

수반 모델에 기반한 관측영향 진단법을 이용하여 동아시아 지역의 단기에보에 AMSU-A 자료 동화가 미치는 영향 분석

김성민 · 김현미*

연세대학교 대기과학과 대기예측성 및 자료동화연구실

(접수일: 2016년 12월 20일, 수정일: 2017년 3월 15일, 게재확정일: 2017년 3월 15일)

Adjoint-Based Observation Impact of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) on the Short-Range Forecast in East Asia

Sung-Min Kim and Hyun Mee Kim*

Atmospheric Predictability and Data Assimilation Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 20 December 2016; revised 15 March 2017; accepted 15 March 2017)

Abstract The effect of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) observations on the short-range forecast in East Asia (EA) was investigated for the Northern Hemispheric (NH) summer and winter months, using the Forecast Sensitivity to Observations (FSO) method. For both periods, the contribution of radiosonde (TEMP) to the EA forecast was largest, followed by AIRCRAFT, AMSU-A, Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), and the atmospheric motion vector of Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) or Multi-functional Transport Satellite (MTSAT). The contribution of AMSU-A sensor was largely originated from the NOAA 19, NOAA 18, and MetOp-A (NOAA 19 and 18) satellites in the NH summer (winter). The contribution of AMSU-A sensor on the MetOp-A (NOAA 18 and 19) satellites was large at 00 and 12 UTC (06 and 18 UTC) analysis times, which was associated with the scanning track of four satellites. The MetOp-A provided the radiance data over the Korea Peninsula in the morning (08:00~11:30 LST), which was important to the morning forecast. In the NH summer, the channel 5 observations on MetOp-A, NOAA 18, 19 along the sea-side (along the ridge of the subtropical high) increased (decreased) the forecast error slightly (largely). In the NH winter, the channel 8 observations on NOAA 18 (NOAA 15 and MetOp-A) over the Eastern China (Tibetan Plateau) decreased (increased) the forecast error. The FSO provides useful information on the effect of each AMSU-A sensor on the EA forecasts, which leads guidance to better use of AMSU-A observations for EA regional numerical weather prediction.

Key words: Forecast Sensitivity to Observations (FSO), observation impact, AMSU-A, East Asia regional forecast

*Corresponding Author: Hyun Mee Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea.
Phone: +82-2-2123-5683, Fax: +82-2-2123-5163
E-mail: khm@yonsei.ac.kr

1. 서 론

자료동화시스템에서는 배경 값과 관측 값 사이의 차이를 최소화 시키는 분석 값을 추정하기 위해서 다수의 관측 종을 수치모델의 단기 예보 결과와 동화하고 있다. 최근 들어서는 전천후 대기연직구조 탐측기 (Advanced Microwave Sounding Unit-A, AMSU-A; Microwave Humidity Sounder, MHS; High-resolution Infrared Sounder, HIRS; Atmospheric Infrared Sounder, AIRS; Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI; Cross-track Infrared Sounder, CrIS; Global Positioning System Radio Occultation, GPSRO), 적외 영상과 가시영상을 이용하여 산출한 대기 운동 벡터 관측(Kidder and Vonder Haar, 1995; Salonen and Bormann, 2011; Kim et al., 2017)을 수치모델의 단기 예보 결과와 동화하여 수치예측 성능을 크게 높이고 있다. 수치모델의 단기 예보 결과와 동화되는 관측 종들 중 AMSU-A 복사관측 자료는 전 지구의 전천후 대기온도 연직구조에 대한 정보를 제공하기 때문에 수치예측의 성능 향상에 매우 중요한 관측 종이다.

Liu et al. (2012)에서는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델의 단기 예보 결과와 라디오존데, 항공기, 대기 운동 벡터, 지표 및 해양 관측 종을 동화시킨 분석 값을 만들고, 위의 관측 종에 덧붙여 AMSU-A 복사관측 자료까지 포함해서 동화한 새로운 분석 값을 만들어, 각각의 분석 값으로부터 2008년 8월 11일부터 9월 13일 사이에 대서양에서 발생한 5개의 사이클론에 대해 36시간 예보를 수행하였다. 각각의 분석 값으로부터 수치 적분된 36시간 예측 경로를 비교한 결과, AMSU-A 복사관측 자료가 동화된 분석 값으로부터 적분된 36시간 예보가 AMSU-A 복사관측 자료가 동화되지 않은 분석 값으로부터 적분된 36시간 예보보다 태풍 경로 오차가 평균 16% 가량 작았다. 이와 같이 일정한 관측 자료의 집합을 동화하여 생성한 분석 값으로부터 적분된 예보 값과 위 집합으로부터 관심 있는 관측 종을 빼거나 더해 만든 새로운 분석 값으로부터 적분된 예보 값의 차이로부터 단일 관측 종이 예보에 미치는 영향(i.e., 관측영향)을 추정하는 방법을 Observation System Experiments (OSEs)라고 한다. OSEs는 관측영향을 진단하려는 관측 종이 많아질수록 계산 비용이 급격하게 증가한다. 특히, AMSU-A 복사관측 자료와 같이 많은 채널을 가진 위성 자료의 경우, OSEs를 이용하여 위성관측 채널의 영향을 추정하기에는 현실적으로 감당하기 어려운 계산 비용이 필요하다. 또한 OSEs는 관심 있는 관측 종을 빼거나 더해주는 과정 동안 배경 값과 관측 값 간의 가중치 정보가 변하기 때문에, 예측에 대한 각각의 관측 종의 영향을 독립적으로 추정할 수

없다는 방법론적 한계를 가지고 있다.

OSEs의 한계를 극복하기 위하여 비교적 최근에 제시된 수반모델에 기반한 관측민감도(Forecast sensitivity to observations: FSO) 진단법 또는 관측영향 진단법을 이용하면, 단기예보에 대한 관측영향을 단 시간 내에 독립적으로 산출할 수 있다(Kim et al., 2013; Jung et al., 2013; Kim and Kim, 2014, Kim et al., 2017). 이 방법은 수십만 개의 위성 자료의 관측영향을 준 현업과 비슷한 속도로 계산하기 때문에, 어떤 종류 또는 채널의 위성 자료가 수치예측 성능 향상에 도움이 되는지를 효율적으로 판단하게 해준다(Cardinali, 2009; Gelaro and Zhu, 2009; Gelaro et al., 2010; Joo et al., 2013; Jung et al., 2013; Lorenc and Marriott, 2014; Kim and Kim, 2014; Kim, 2016). 수반모델에 기반한 관측민감도 진단법이 가진 장점에도 불구하고, 이 방법에서 사용하는 선형가정 때문에 중, 장기 예측에 대한 관측영향을 산출하는 데는 어느 정도 한계가 있다. 관측민감도 진단법을 이용하여 관측영향을 살펴 본 최근 연구에서는 AMSU-A 복사관측 자료가 전 지구 예측에 대한 기여도가 가장 크다고 알려져 있다(Cardinali, 2009; Gelaro and Zhu, 2009; Gelaro et al., 2010; Joo et al., 2013; Lorenc and Marriott, 2014; Kim and Kim, 2014; Kim, 2016). 또한 AMSU-A 복사관측 자료는 2008년 태풍 시즌의 동아시아와 북서태평양 지역의 날씨 예측에 있어서도 관측 자료들 중 가장 큰 영향을 보인 바 있다(Jung et al., 2013). 하지만 동아시아 지역에서는 수치 예측에 대한 기여도가 컸던 일부 위성(NOAA 16, 17)의 수명이 다 하였고, 극동 시베리아 지역에서의 지표 라디오존데 관측망이 이전 보다 성기게 변하였기 때문에, AMSU-A 복사 자료의 관측영향에 대한 보다 세밀한 연구가 필요하다. 따라서, 이 연구에서는 4개의 Advanced Television Infrared Observation Satellite (TIROS) Operational Vertical Sounder (ATOVS) 위성(NOAA 15, 18, 19, MetOp-A)에 탑재된 AMSU-A 복사관측 자료가 동아시아 수치예측에 미치는 영향을 위성 별, 채널 별, 계절 별로 살펴보았다.

2장에서는 방법을, 3장에서는 AMSU-A 복사관측 자료를 포함한 여러 종의 관측영향에 대한 결과를 제시하고, 결론과 요약은 4장에 제시하였다.

2. 방 법

2.1 관측영향

이 연구에서 사용한 수반모델 기반의 관측민감도 계산 방법은 기상청 전지구 통합모델의 관측 민감도 계산 방법과 동일하다. 기상청 전지구 통합모델의 관측 민감도 계산 방법에 대한 보다 상세한 수식 전개

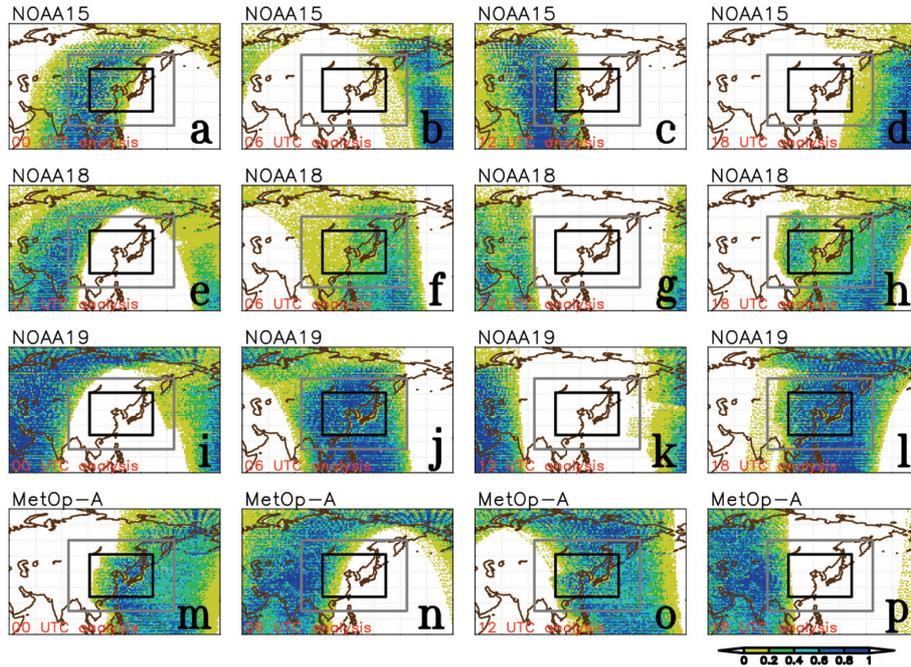


Fig. 1. The ratio of ATOVS AMSU-A radiance observations among the total observations assimilated for (a)-(d) NOAA 15, (e)-(h) NOAA 18, (j)-(l) NOAA 19, and (m)-(p) MetOp-A. The first, second, third, and fourth columns are the ratio at 00, 06, 12, and 18 UTC analysis, respectively. To calculate the observation impact in the black box (25-50 N°, 100-150, 100-150 E°) in East Asia, the observations over the grey box (15-60 N°, 85-165 E°) is considered.

는 Lorenc and Marriott (2014), Joo et al. (2013), Kim and Kim (2014)에 소개되어 있다.

예보오차($\mathbf{x}^f - \mathbf{x}_t$; 예측 값과 참 값의 차이)는 건조 에너지 norm을 이용하여 아래 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$e = (\mathbf{x}^f - \mathbf{x}_t)^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} (\mathbf{x}^f - \mathbf{x}_t) = \frac{1}{M_{domain}} \iiint \frac{1}{2} \left[\rho u'^2 + \rho v'^2 + \frac{\rho g^2}{\theta'^2 N^2} \theta'^2 + \frac{1}{\rho c^2} \right] dx dy d\eta, \quad (1)$$

여기서 M_{domain} 는 모델 영역 내 공기의 질량, N^2 는 부력 진동수의 제곱 상수, g 와 c 는 각각 중력 가속도와 음속 상수이다. 또한 ρ , u' , v' , θ' , p 는 각각 공기 밀도와 수평 바람, 온위, 기압의 예보오차이다. \mathbf{C} 는 건조 에너지 norm이고, 예보오차는 지역 투영 행렬(\mathbf{P})을 사용함으로써 관심 있는 특정 지역에서만 계산할 수 있다. AMSU-A 복사관측은 온도와 관련이 있고 습도와는 관련이 없기 때문에 건조 에너지 norm을 사용하였다. 이 연구에서는 모델 상층 경계 근처에 쌓이는 수치 계산 상의 노이즈를 고려하지 않기 위해서,

Gelaro et al. (2010)과 Lorenc and Marriott (2014)의 실험 설계와 동일하게 지표면부터 150 hPa까지에서만 식 (1)을 계산하였다. 또한 수평적으로는 북위 25-50°와 동경 100-150°에 해당하는 동아시아 지역에서 발생하는 예보오차만을 고려하였다(Fig. 1의 검은 박스). 참 값(\mathbf{x}_t)은 알 수 없으므로, 기상청 전지구 통합모델의 4차원 변분자료동화 시스템에서 산출되는 분석 값(\mathbf{x}_a)을 참 값으로 사용하였다.

비선형 예보오차 감소량은 관측을 동화하기 이전과 동화한 이후에 계산되는 예보오차 에너지의 변화량을 의미한다. 분석 값에서 적분된 예보의 오차 ($\mathbf{x}^{fa} - \mathbf{x}_t$)^T $\mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P}$ ($\mathbf{x}^{fa} - \mathbf{x}_t$)와 배경 값에서 적분된 예보의 오차 ($\mathbf{x}^{fb} - \mathbf{x}_t$)^T $\mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P}$ ($\mathbf{x}^{fb} - \mathbf{x}_t$) 간의 차이로 계산되며 아래 식 (2)와 같다.

$$\delta e = (\mathbf{x}^{fa} - \mathbf{x}_t)^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} (\mathbf{x}^{fa} - \mathbf{x}_t) - (\mathbf{x}^{fb} - \mathbf{x}_t)^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} (\mathbf{x}^{fb} - \mathbf{x}_t). \quad (2)$$

전지구 통합모델에서 관측 민감도를 계산할 때는 비선형 모델에서 모의되는 구름 수상체(수증기, 구름 물, 구름 얼음)들을 단일 수상체(물)로 단순화하고 좀 더 낮은 해상도로 내삽하여 $\mathbf{x}^{fa} - \mathbf{x}_t$ 와 $\mathbf{x}^{fb} - \mathbf{x}_t$ 를 계산하는데 각각을 $\delta \mathbf{w}_t^{fa}$ 와 $\delta \mathbf{w}_t^{fb}$ 로 표현한다(Lorenc and

Marriott, 2014). 그러면 식 (2)는 아래 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\delta e = (\delta \mathbf{w}_t)^T \mathbf{P}^T \mathbf{C} \mathbf{P} (\delta \mathbf{w}_t^{fa} + \delta \mathbf{w}_t^{fb}) = (\delta \mathbf{w}_t)^T \left(\frac{\delta e}{\delta \mathbf{w}_t} \right), \quad (3)$$

여기서 $\delta e/\mathbf{w}_t$ 는 $\delta \mathbf{w}_t$ ($= \delta \mathbf{w}_t^{fa} - \delta \mathbf{w}_t^{fb}$)에 대한 예보오차 감소량의 미분 값이다. 식 (3)을 관측공간에서 표현하기 위해서, $\delta \mathbf{w}_t$ 는 관측 증분($\delta \mathbf{y}$)에 대한 테일러 전개를 사용하여 아래 식 (4)와 같이 근사될 수 있다(Joo et al., 2013).

$$\delta \mathbf{w}_t = M[\mathbf{x}_b + K(\delta \mathbf{y})] - M[\mathbf{x}_b] \approx \mathbf{M} \mathbf{K} \delta \mathbf{y}, \quad (4)$$

여기서 M 과 K 는 비선형 수치 모델과 확장 칼만 게인(extended Kalman gain)이고 \mathbf{x}_b 는 배경 값이며, \mathbf{M} 와 \mathbf{K} 는 각각 섭동 예보 모델과 K 의 선형 연산자이다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면, 예보오차 감소량을 아래 식 (5)와 같이 관측공간에서 근사할 수 있다.

$$\delta e \approx (\mathbf{M} \mathbf{K} \delta \mathbf{y})^T \mathbf{C} (\delta \mathbf{w}_t^{fa} + \delta \mathbf{w}_t^{fb}). \quad (5)$$

식 (5)를 관측영향이라 하며, 관측영향은 수치모델에 동화된 관측 값마다 독립적으로 산출된다. 또한 $\delta e/\delta \mathbf{y} = (\mathbf{M} \mathbf{K})^T \mathbf{C} (\delta \mathbf{w}_t^{fa} + \delta \mathbf{w}_t^{fb})$ 는 예측의 관측에 대한 민감도(즉 관측민감도)라고 한다. 관측영향을 산출할 때 사용되는 섭동 예보 모델은 비선형 모델의 예보 궤적을 따라서 선형화되는데, 사용할 수 있는 예보 궤적으로서는 배경 값에서 적분된 예보 궤적, 분석 값에서 적분된 예보 궤적, 두 예보 궤적 사이의 평균 궤적이 있다. 전지구 통합모델에서는 평균 궤적을 따라서 선형화된 섭동 예보 모델을 이용할 때 산출되는 총 관측영향이 비선형 예보오차 감소량을 가장 가깝게 근사하므로(Lorenc and Marriott, 2014), 식 (5)와 같이 평균 궤적을 따라 관측영향을 계산한다.

2.2 AMSU-A 복사관측 자료

네 개의 극 궤도 위성(NOAA 15, 18, 19, MetOp-A)에 탑재된 AMSU-A 센서는 전 지구의 대기 연직 구조를 수 시간 이내에 관측할 수 있다. 이런 이유로 AMSU-A 센서는 대기의 특성을 연구하기에 매우 유용하다(Liu et al., 2012). Figure 1은 연구 기간 중 00, 06, 12, 18 UTC에 기상청 4차원 변분자료동화시스템에 동화된 총 관측 수 중 AMSU-A 복사관측 수 비율의 수평 분포로, AMSU-A 센서가 탑재된 극 궤도 위성들의 스캔 경로를 나타낸다. AMSU-A는 1445 km의 스캔 폭을 갖는 스캔 경로 1~3개로 동아시아 지역을 관측한다. 동화되는 AMSU-A 복사관측 자료 비율의 수평 분포는 AMSU-A 복사관측이 동화되는 분석 시점에 따라 두 가지 분포로 구분할 수 있는데, 하나는 00과 12 UTC에 동화된 관측(주로 NOAA 15와

MetOp-A 위성의 관측 자료)의 수평 분포(Figs. 1a, c, e, g, i, k, m, o)이고, 다른 하나는 06과 18 UTC에 동화된 관측(주로 NOAA 18과 19 위성의 관측 자료)의 수평 분포(Figs. 1b, d, f, h, j, l, n, p)이다. 즉 AMSU-A의 두 가지 관측 분포는 네 개의 극 궤도 위성이 동아시아를 지나는 스캔 위치와 관련이 있다. 이 연구에서는 1차원 변분법(Rodgers, 1990)을 이용하여 청천 지역과 구름 지역에서의 AMSU-A 4-14번 채널을 품질 검사한 후 대기의 연직 자료를 복원하는데, 위성에 탑재된 AMSU-A 성능에 따라 몇몇 채널은 블랙리스트에 사용되지 않았다. World Meteorological Organization (WMO)의 권고에 따라 NOAA 15에서는 4, 6, 11-14번 채널이, NOAA 19에서는 8번 채널이, MetOp-A에서는 7번 채널이 블랙리스트에 있었다. 또한 구름의 영향을 받는 복사관측(AMSU-A 1, 2번 채널)을 사용하여 모델에서 분석되는 구름장을 개선하였는데, 이로 인해서 구름 지역에 있는 AMSU-A 5번 채널 관측 일부를 추가로 동화 할 수 있게 되었다(English et al., 2007).

3. 결 과

3.1 동아시아 예측에 대한 동아시아 지역의 관측영향 통계

동아시아 지역(북위 25-50°, 동경 100-150°)의 기상 예측은 풍상층의 영향을 크게 받는다. 이 연구에서 예보오차 감소량은 북위 25-50°, 동경 100-150°(Fig. 1의 검은 박스)에 해당하는 지역에서 계산하였고, 예보오차 감소량에 대한 관측영향은 예보오차를 계산한 지역의 풍상층을 포함하여 북위 15-60°, 동경 85-165°(Fig. 1의 회색 박스)에 해당하는 지역에서 산출하였다. 관측영향은 북반구 여름철(2011년 6, 7, 8월)과 북반구 겨울철(2011년 12월, 2012년 1, 2월) 동안 6시간 간격의 모든 분석 시점에서 산출하여, 계절별로 통계치를 계산하였다.

관측영향 진단법을 이용하여 관측영향을 살펴 본 이전 연구(e.g., Cardinali, 2009; Gelaro and Zhu, 2009; Gelaro et al., 2010; Jung et al., 2013; Kim and Kim, 2014)와 마찬가지로 기상청 전지구 통합모델 시스템에서도 AMSU-A 복사 관측이 전 지구 예보오차를 가장 많이 감소시키는데, AMSU-A 관측에 의한 전 지구 예보오차 감소량(AMSU-A 관측영향)은 겨울 반구 중위도 지역 해양 상공에 주로 위치하고 있다(Kim, 2016). 반면에, 동아시아 지역의 예보오차 감소에 가장 많은 기여를 한 관측 종은 계절에 관계없이 라디오존데(TEMP) 관측으로 나타났다. 다른 관측들의 영향은 계절별로 다르게 나타났는데, 여름에는 AIRCRAFT, AMSU-A, IASI가 뒤 따랐고, 겨울에는 AIRCRAFT,

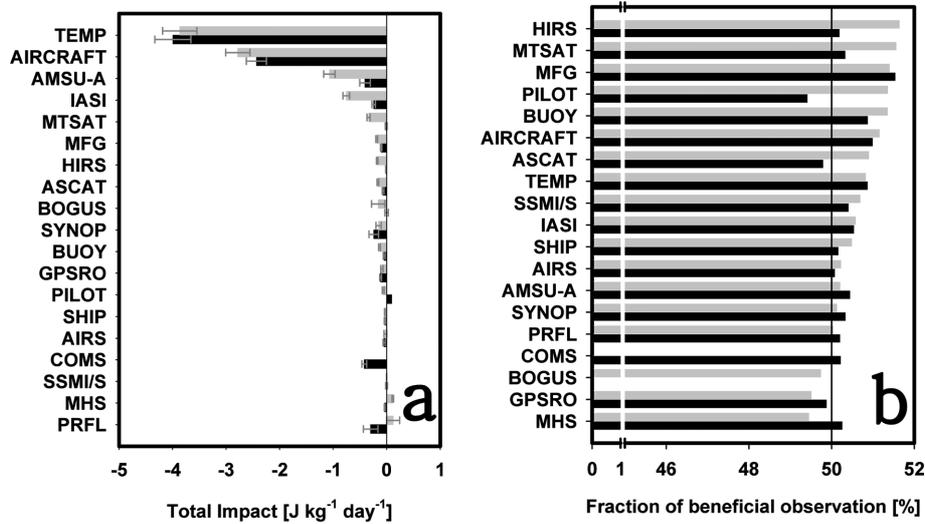


Fig. 2. (a) Total impact of observations and (b) fraction of beneficial observations for the NH summer months (grey bar) and NH winter months (black bar). The dark gray error bar in (a) represents 95% confidence interval considering realistic correlated sampling error in Kim and Kim (2014).

AMSU-A, 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite: COMS)의 대기 운동 벡터가 뒤 따랐다.

TEMP 관측은 중국 화북, 화동, 화중, 화남 지역과 한반도 및 일본 지역에 조밀하게 분포하며, 중국 서북과 서남 및 몽고 지역은 TEMP 관측이 거의 없는 공백 지역이다. 동아시아 기상현상에 중요한 중관 시스템 중 하나인 중위도 기압골은 중국 화북 지역을 서에서 동으로 지나는데 중위도 기압골의 이동 경로에는 TEMP 및 AIRCRAFT 관측이 조밀하게 분포되어 있다. 중위도 기압골의 이동 경로의 TEMP, AIRCRAFT, AMSU-A 관측은 대부분 예보오차를 감소시킨다. 반면, TEMP 및 AIRCRAFT 관측 공백 지역인 티베트 고원과 해양을 관측하는 관측 중은 거의 대부분이 AMSU-A 자료이다. TEMP 관측망은 AIRCRAFT 관측망 보다 더 균질하기 때문에 동아시아 예보오차 감소에 있어서 TEMP 관측이 AIRCRAFT 관측보다 더 큰 기여를 한다. 한편, 티베트 고원에서 AMSU-A 자료의 이로운 관측 비율은 50% 이하이기 때문에 티베트 고원 상공의 AMSU-A 자료 중 절반 이상은 동아시아의 예보오차를 증가시킨다. 이 때문에 동아시아 예보오차 감소에 대한 AMSU-A 관측의 기여도는 TEMP 및 AIRCRAFT 관측의 기여도 보다 작다.

관측의 기여도 순위는 현실적인 표본 오차를 포함하여 계산한 95% 신뢰 구간(Kim and Kim, 2014)에서 살펴 보았을 때 변동이 없었다(Fig. 2a). 이로운 관측 비율은 50%가 조금 넘게 나타났다(Fig. 2b). 예측

에 도움이 되는 이로운 관측 비율이 약 절반으로 나타나는 것은 관측 오차, 분석 오차, 배경 오차 공분산의 성장 모드(Lorenc and Marriott, 2014)와 표본 오차(Kim and Kim, 2014)로부터 기인한다. 동아시아 예보 오차 감소에 기여를 많이 한 상위 4개의 관측 중(여름철: TEMP, AIRCRAFT, AMSU-A, IASI; 겨울철: TEMP, AIRCRAFT, AMSU-A, COMS)의 관측영향의 합은 총 관측영향의 87%를 차지한다. 동아시아 예보 오차 감소에 가장 많이 기여한 TEMP와 두 번째로 많이 기여한 AIRCRAFT의 관측영향은 계절 별 차이가 크지 않다. 한편 2011년 12월 1일부터 자료동화에 사용되기 시작한 천리안 위성의 대기 운동 벡터를 제외하면, 계절 별로 관측영향의 차이가 가장 크게 발생하는 관측 중은 AMSU-A이다.

3.2 AMSU-A 관측영향

AMSU-A 관측은 계절 별, 위성 별, 채널 별로 관측 영향이 매우 다르기 때문에 각각의 요소 별로 전반적인 관측영향을 살펴 보고자 한다. NOAA 15, 18, 19, MetOp-A ATOVS 위성에서 관측하는 AMSU-A 복사 관측 자료 중 동아시아 예보오차 감소에 가장 많이 기여한 복사관측 자료는 계절에 관계없이 NOAA 19 AMSU-A 였다(Fig. 3a). 그 다음으로는, 여름에는 MetOp-A AMSU-A, NOAA 18 AMSU-A, NOAA 15 AMSU-A가 뒤 따랐고, 겨울에는 NOAA 18 AMSU-A 와 NOAA 15 AMSU-A가 뒤 따랐다(Fig. 3a). MetOp-A AMSU-A 복사관측 자료는 겨울철 동아시아 지역

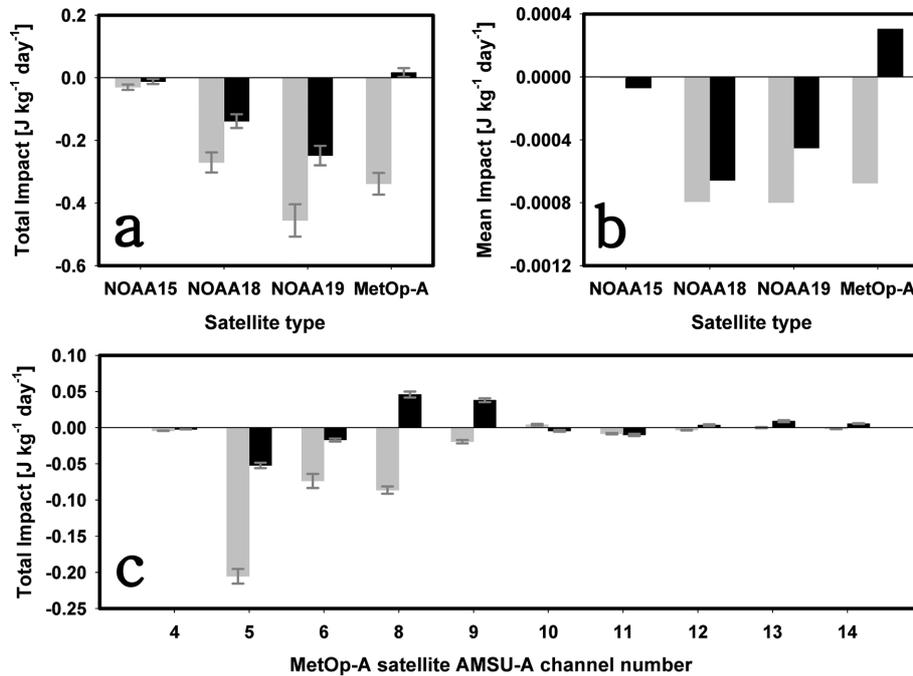


Fig. 3. Time-averaged statistics ($J\ kg^{-1}\ day^{-1}$, mean and 95% confidence interval considering realistic sampling error) stratified by ATOVS sounder-type satellite observations assimilated in the analysis: (a) total observation impact and (b) mean observation impact in the NH summer months (grey bar) and the NH winter months (black bar) in East Asia region. (c) Time-averaged statistics stratified by MetOp-A AMSU-A channels assimilated in the analysis for the total observation impact in the NH summer months (grey bar) and the NH winter months (black bar) in East Asia region.

예측에 도움이 되지 못했으며(Fig. 3a), MetOp-A AMSU-A의 평균 관측영향(총 관측영향/동화된 관측의 수)은 계절적 변동성이 컸는데(Fig. 3b), 그 원인을 파악하기 위해 동아시아 예보오차 감소량에 대한 MetOp-A AMSU-A 복사관측 자료의 기여도를 Fig. 3c에서 계절 별, 채널 별로 살펴 보았다. MetOp-A AMSU-A 복사관측 중 5, 6, 8, 9번 채널은 여름철 동아시아 지역의 예보오차를 많이 감소시켰으나, 겨울철 동아시아 지역의 예보오차는 5번과 6번 채널에 의해서만 감소되었다. 그리고 MetOp-A AMSU-A 8, 9번 채널은 겨울철 동아시아 지역의 예보오차를 증가시켰다(Fig. 3c). 가장 함수의 최대 값이 성층권에 위치한 10-14번 채널은 동아시아 지역 예측에 대해서 아주 작은 기여를 하였는데(Fig. 3c), 이것은 MetOp-A AMSU-A 10-14번 채널이 동아시아 예측에 중요하지 않다는 것을 의미하는 것은 아니다. 왜냐하면 이 연구에서는 이전 연구들과 마찬가지로 모델 상단에 쌓이는 수치 계산 상의 노이즈를 고려하지 않기 위해 예보오차를 연직으로 지표면부터 150 hPa까지만 계산했기 때문이다. 예보오차를 150-50 hPa에서 계산하여 관측영향을 계산하였을 때는 MetOp-A AMSU-A 10-14번 채널의 기

여도가 다른 채널(5, 6, 8, 9번 채널)의 기여도 보다 더 크게 나타났다(not shown).

AMSU-A 센서가 탑재된 네 개의 위성이 동아시아 지역을 지나는 시간은 모두 다르다. 00과 12 UTC에 동화되는 동아시아 지역 AMSU-A 복사관측 자료의 대부분을 관측하는 위성은 NOAA 15와 MetOp-A 위성이며, 06과 18 UTC에 동화되는 동아시아 지역 AMSU-A 복사관측 자료의 대부분을 관측하는 위성은 NOAA 18과 NOAA 19 위성이다(Fig. 1). 따라서 동아시아 지역의 예보오차 감소량에 대한 AMSU-A 복사관측 자료의 기여도를, 00과 12 UTC에 동화된 AMSU-A 복사관측 자료와 06과 18 UTC에 동화된 AMSU-A 복사관측 자료로 나누어 위성 별로 분석하였다. 또한 한반도 낮 시간 예보에 중요한 역할을 하는 MetOp-A 위성의 AMSU-A 복사관측 자료의 기여도를 계절 별, 채널 별로 분석하였다. 00과 12 UTC에 동화된 AMSU-A 복사관측 자료 중 MetOp-A 위성 관측 자료가 동아시아 지역의 예보오차 감소에 가장 크게 기여하였고(Figs. 4a, b), 06과 12 UTC에 동화된 AMSU-A 복사관측 자료 중에는 NOAA 18과 19 위성 관측 자료의 기여가 가장 컸다(Figs. 4c, d). 동아

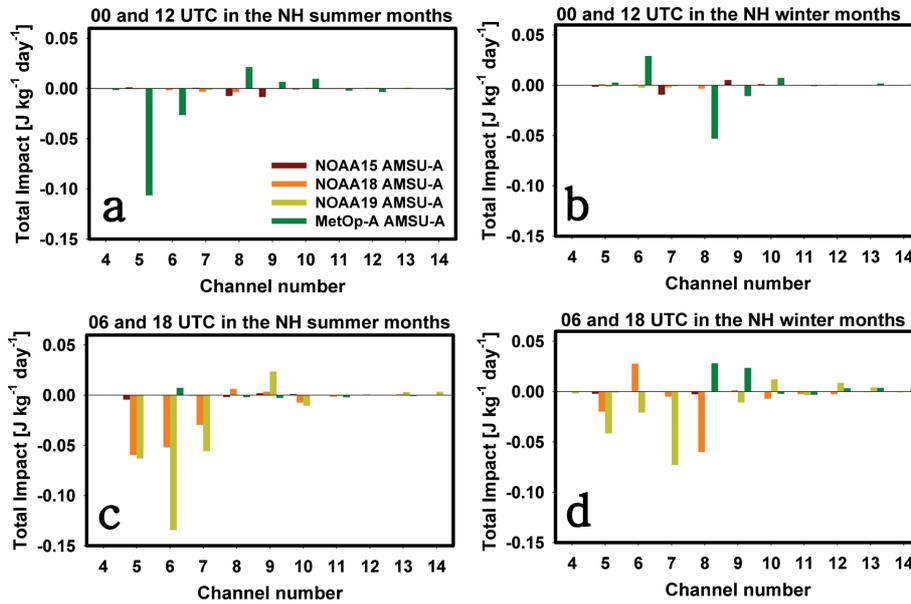


Fig. 4. Time-averaged statistics ($J\ kg^{-1}\ day^{-1}$, mean) stratified by the NOAA15, NOAA18, NOAA19, MetOp-A AMSU-A for total observation impact at (a) 00 and 12 UTC in the NH summer months, (b) 00 and 12 UTC in the NH winter months, (c) 06 and 18 UTC in the NH summer months, and (d) 06 and 18 UTC in the NH winter months.

Table 1. Abbreviations for the various observation types.

| Abbreviation | Description |
|--------------|--|
| AMSU-A | Advanced Microwave Sounding Unit-A (radiance) |
| MHS | Microwave Humidity Sounder (radiance) |
| HIRS | High-resolution Infrared Radiation Sounder (radiance) |
| MFG | Meteosat First Generation (Meteosat-7) by European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (wind) |
| MTSAT | Multi-functional Transport Satellite (wind) |
| COMS | Communication, Ocean and Meteorological Satellite by Korea Meteorological Administration (wind) |
| ASCAT | Advanced Scatterometer (wind) |
| IASI | Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (radiance) |
| AIRS | Atmospheric Infrared Sounder (radiance) |
| SSM/I | Special Sensor Microwave Imager/Sounder (radiance) |
| GPSRO | Global Positioning System Radio Occultation (bending angle) |
| TEMP | Upper-air observations from a radiosonde (wind, temperature, specific humidity) |
| PILOT | Upper-air wind profile from a Pilot Balloon (wind) |
| PRFL | Wind profiler (wind) |
| AIRCRAFT | Upper-air wind and temperature from aircraft (wind, temperature) |
| SYNOP | Land surface synoptic weather observations (wind, temperature, surface pressure, specific humidity) |
| SHIP | Sea surface weather observation by ship (wind, temperature, surface pressure, specific humidity) |
| BUOY | Sea surface weather observation by buoy (wind, temperature, surface pressure, specific humidity) |
| BOGUS | Bogus observations generated by national meteorological centers (wind) |

시아 지역의 예보오차 감소량에 대한 기여도를 계절 별, 채널 별로 보면, 여름에는 00과 12 UTC에 동화된 MetOp-A AMSU-A 5번과 6번 채널의 기여가 가장 컸

고, 겨울에는 00과 12 UTC에 동화된 MetOp-A AMSU-A 8번 채널의 기여가 가장 컸다. 나머지 AMSU-A 채널들은 동아시아 예측에 영향을 거의 주지 않거나 예

100 수반 모델에 기반한 관측영향 진단법을 이용하여 동아시아 지역의 단기예보에 AMSU-A 자료 동화가 미치는 영향 분석

Table 2. Total impact ($\text{J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) and beneficial observation (%) of AMSU-A channel 5, 6, 7, 8, and 9 of NOAA 15, 18, 19, and MetOp-A for all analyses time over the land and ocean.

| | | Land | | Ocean | |
|------------------|----|--|----------------------|--|----------------------|
| | | Total impact ($\text{J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) | Beneficial ratio (%) | Total impact ($\text{J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) | Beneficial ratio (%) |
| NH summer months | #5 | - | - | -0.364 | 54.67 |
| | #6 | -0.254 | 51.19 | -0.293 | 52.97 |
| | #7 | -0.068 | 50.00 | +0.005 | 48.67 |
| | #8 | -0.135 | 50.14 | -0.060 | 50.02 |
| | #9 | -0.035 | 50.67 | +0.045 | 48.69 |
| NH winter months | #5 | - | - | -0.229 | 51.40 |
| | #6 | -0.103 | 52.21 | -0.019 | 50.53 |
| | #7 | -0.179 | 51.24 | -0.027 | 50.12 |
| | #8 | +0.105 | 49.16 | -0.018 | 50.19 |
| | #9 | +0.031 | 49.41 | +0.008 | 49.59 |

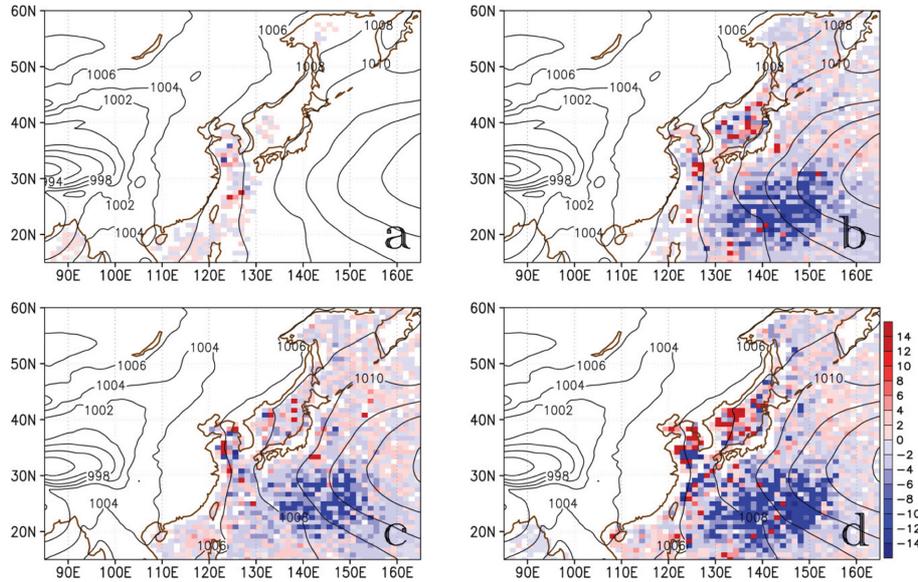


Fig. 5. Horizontal distribution of time-averaged total observation impact statistics (shaded, $10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) for the AMSU-A channel 5 of (a) NOAA15 (00 and 12 UTC), (b) MetOp-A (00 and 12 UTC), (c) NOAA18 (06 and 18 UTC), and (d) NOAA19 (06 and 18 UTC) with the mean sea level pressure (black contours, 4 hPa interval) in the NH summer months.

보오차를 감소시키지 못했다(Figs. 4a, b). 06과 18 UTC에 동화된 NOAA 18과 19 AMSU-A의 거의 모든 채널 관측 값은 여름과 겨울의 동아시아 지역의 예보오차를 감소시켰다(Figs. 4c, d). 하지만, 동아시아 예측에 민감한 티베트 지역 상공의 중위도 기압골과 그 풍상측 지역(Kim et al., 2012)을 06과 18 UTC에 관측하는 MetOp-A AMSU-A 8번 채널들의 관측 값(Figs. 1n, p)은 겨울철 동아시아 지역의 예보오차를 증가시켰다(Figs. 4c, d). 이것은 대륙에 동화되는 AMSU-A 관측 자료의 이로운 관측 비율이 해양보다

작게 나타나는 원인 중 하나이다.

동아시아 지역의 예보오차 감소량에 대한 AMSU-A 복사 관측의 기여도 중 5-9번 채널의 기여도가 가장 크기 때문에 5-9번 채널의 기여도를 대륙과 해양으로 나누어 계절별로 살펴보았다(Table 2). AMSU-A 5번 채널은 해양 상공에서의 복사 관측만을 동화하기 때문에 대륙 위에서는 관측영향이 계산되지 않는다. 계절에 관계없이 5-9번 채널에서 이로운 관측 비율이 50% 이상이면 예보오차를 감소시키지만, 50% 이하면 예보오차를 증가시킨다. 따라서 이로운 관측 개수와

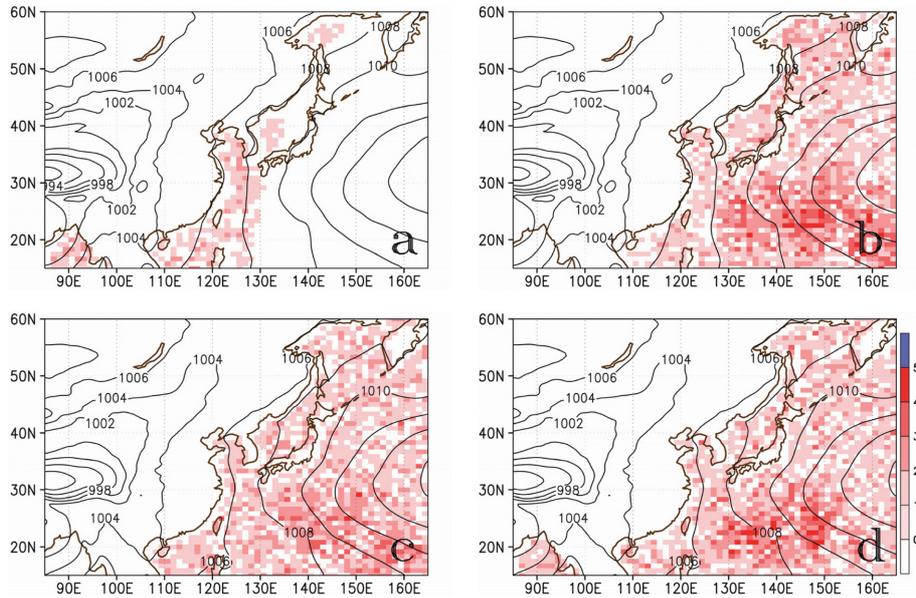


Fig. 6. P-value (shaded, %) for the AMSU-A channel 5 observation impact of (a) NOAA15 (00 and 12 UTC), (b) MetOp-A (00 and 12 UTC), (c) NOAA18 (06 and 18 UTC), and (d) NOAA19 (06 and 18 UTC) in the NH summer months.

관측영향의 부호는 상관성이 높은 것으로 보인다. 여름철에는 대륙 위의 6-9번 채널이 예보오차를 감소시키지만, 해상에서는 태풍의 영향으로 7번과 9번 채널은 예보오차를 증가시킨다. 겨울철에는 대륙(주로, 티베트 지역) 위의 8번과 9번 채널이 예보오차를 증가시켰는데, 이에 대해서는 Fig. 7에서 자세히 분석하였다. 9번 채널의 경우는 식 1의 예보오차가 계산되지 않는 대류권 상층부(약 100 hPa)에 가장 민감한 채널이기 때문에 동아시아 지역의 해상에서 예보오차 감소량에 대한 기여도는 매우 작다.

AMSU-A 5번 채널이 여름철 동아시아 지역의 예보오차를 감소시키는데 가장 큰 영향을 보였기에 AMSU-A 5번 채널의 관측영향 수평 분포를 살펴보았다(Fig. 5). MetOp-A 위성은 아침 시간(한국 표준시로 오전 8시~11시 30분)에 한반도 상공의 복사량을 관측하기 때문에, 한반도 낮 시간 예보에 중요한 역할을 한다. 여름철 한반도 연안을 관측하는 AMSU-A 5번 채널 관측은 동아시아 지역의 예보오차를 다소 증가시켰지만, 여름철 태풍 기간 동안의 예측민감지역인 북태평양 고기압의 가장자리(Reynolds and Gelaro, 2001; Kim et al., 2011)를 따라 분포하는 5번 채널 관측은 동아시아 지역의 예보오차를 크게 감소시켰다. 또한 최근에는 구름의 영향을 받는 복사관측(AMSU-A 1, 2번 채널)을 사용하여 모델에서 분석되는 구름장을 개선함으로써 구름 지역에 있는 AMSU-A 5번 채널 관측 일부를 추가로 동화하여 사용하고 있기 때문에(English

et al., 2007), 동아시아 지역의 예보오차 감소에 5번 채널의 기여도가 높은 것으로 생각된다. 남서해상 및 동중국해상에서 큰 음의 값으로 나타나는 관측영향(Fig. 5d)은 2011년 6월 6일 06 UTC, 7월 16일 18 UTC, 8월 27일 06 UTC에 남서해상 및 동중국해상에 동화된 AMSU-A 5번 채널 관측의 밀도가 낮아서 발생한 매우 큰 관측민감도(Baker and Daley, 2000에서 언급된 super-sensitivity)와 관련된 것으로 보인다. 따라서 남서해상 및 동중국해상의 AMSU-A 5번 채널 관측이 예보오차를 크게 감소시킨 것이 아닐 수 있다. Figure 6은 Fig. 5에서 보여준 관측영향 통계치의 양쪽 꼬리 유의확률(double-tail significance probability)을 나타낸다. 모든 격자에서 양쪽 꼬리 유의확률은 5% 이하인데(Fig. 6), 이는 동아시아 지역의 3개월 관측영향 자료들 중에 그 값이 평균으로부터 표준편차의 2배 이상 떨어져 있는 자료의 확률이 5% 이하라는 것이며 3개월 관측영향 자료가 통계적으로 신뢰성이 있음을 의미한다.

AMSU-A 8번 채널은 여름철 동아시아 지역의 예보오차는 감소시키나 겨울철에는 오히려 동아시아 지역의 예보오차를 증가시키므로, 겨울철에 동화된 AMSU-A 8번 채널의 관측영향의 수평 분포를 살펴보았다. 겨울철에는 중국 동쪽 지역 상공에 분포하는 NOAA 18 AMSU-A 8번 채널 관측이 동아시아 지역의 예보오차를 감소시켰으나(Fig. 7c), 티베트 지역 상공에 분포하는 NOAA 15와 MetOp-A AMSU-A 8번 채널은

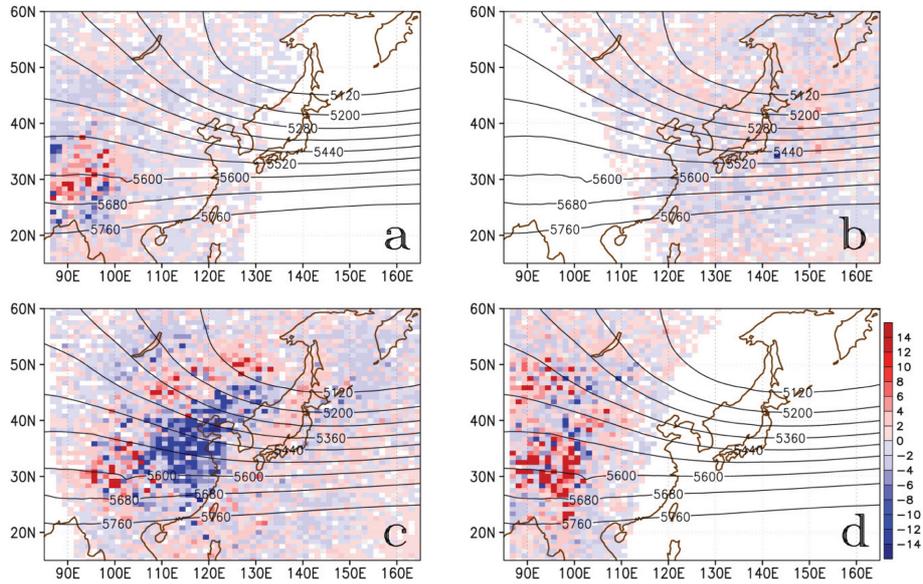


Fig. 7. Horizontal distribution of time-averaged total observation impact statistics (shaded, $10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) for the AMSU-A channel 8 of (a) NOAA15 (00 and 12 UTC), (b) MetOp-A (00 and 12 UTC), (c) NOAA18 (06 and 18 UTC), and (d) MetOp-A (06 and 18 UTC) with the geopotential height at 500 hPa level (black contours, 40 m interval) in the NH winter months.

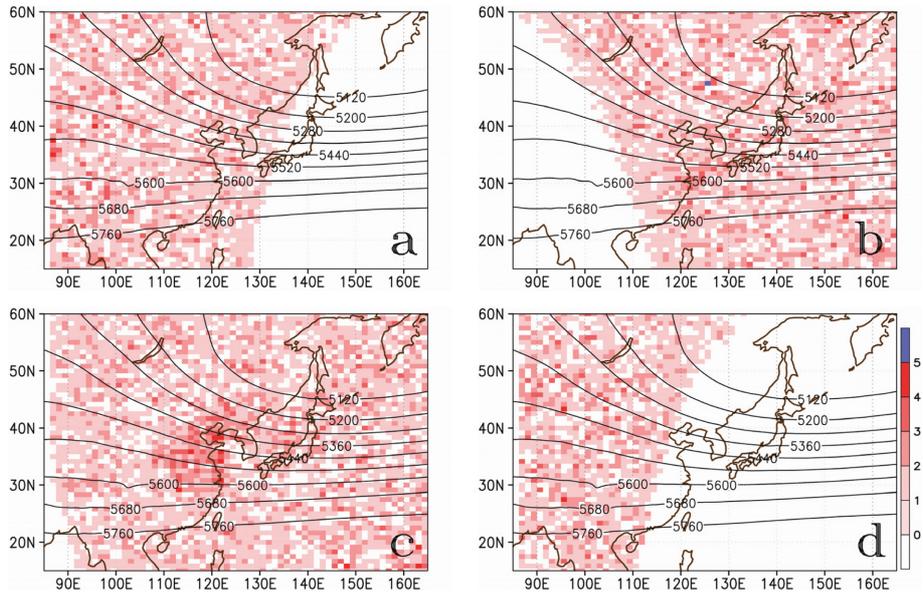


Fig. 8. P-value (shaded, %) for the AMSU-A channel 8 observation impact of (a) NOAA15 (00 and 12 UTC), (b) MetOp-A (00 and 12 UTC), (c) NOAA18 (06 and 18 UTC), and (d) MetOp-A (06 and 18 UTC) in the NH winter months.

동아시아 지역의 예보오차를 증가시켰다(Figs. 7a, d). 하지만 티베트 지역 상공에서 MetOp-A AMSU-A 8 번 채널의 동화로 인해서 증가한 예보오차(Fig. 7d)는 티베트 남쪽 지역 상공의 MetOp-A IASI 관측의 동

화로 인한 예보오차 감소와 상쇄되었다(Fig. 9). 관측 영향 통계치의 양쪽 꼬리 유의확률은 모든 격자에서 5% 이하로 나타나는데(Fig. 8), 이것은 Fig. 6에서 논의한 것과 마찬가지로 동아시아 지역에서 3개월 관측

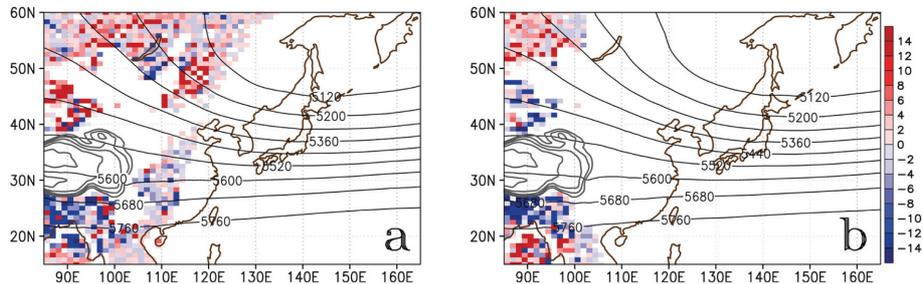


Fig. 9. Horizontal distribution of time-averaged total observation impact statistics (shaded, $10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$) for the MetOp-A IASI of (a) 06 UTC and (b) 18 UTC with the geopotential height at 500 hPa level (black contours, 80 m interval) and the topography (gray contour, above 3000 m) in the NH winter months.

영향 샘플 자료 중에서 그 값이 평균 값으로부터 표준편차의 2배 이상 떨어져 있을 확률이 5% 이하라는 것을 의미한다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 동아시아 지역(북위 25-50°, 동경 100-150°)에서의 예보오차 감소량에 대한 관측영향을 동아시아 지역의 풍상층을 포함한 북위 15-60°, 동경 85-165° 지역에서 계절별(북반구 여름철: 2011년 6, 7, 8 월, 북반구 겨울철: 2011년 12월, 2012년 1, 2월)로 살펴본다. 동아시아 지역은 경압성이 강한 지역으로 분석 오차가 쉽게 성장할 수 있는 환경이고, 이 지역 상공의 경압 지역은 기상자료 초기 값에 대해 민감한 지역(예측민감지역)으로 알려져 있다(Reynolds and Gelaro, 2001).

동아시아 지역의 예보 오차 감소에 가장 큰 기여를 한 관측 중은 계절에 관계없이 TEMP(라디오존데) 관측으로 나타났다. 그 다음으로는 계절별로 다른데, 여름에는 AIRCRAFT, AMSU-A, IASI가 뒤 따랐고, 겨울에는 AIRCRAFT, AMSU-A, 천리안 위성(COMS)의 대기 운동 벡터가 뒤 따랐다. 동아시아에 분포한 TEMP 관측 중 중위도 기압골이 지나가는 길목(중국 화북지역)에 분포한 TEMP 관측의 기여도가 가장 컸다. AMSU-A 복사관측 자료 중 동아시아 예보오차 감소에 가장 많이 기여한 복사관측 자료는 계절에 관계없이 NOAA 19 AMSU-A였다. 그 다음으로는, 여름에는 MetOp-A AMSU-A, NOAA 18 AMSU-A, NOAA 15 AMSU-A가 뒤 따랐고, 겨울에는 NOAA 18 AMSU-A와 NOAA 15 AMSU-A가 뒤 따랐다.

동아시아 지역을 지나는 극 궤도 위성 중에서는 00과 12 UTC 분석 시간에는 MetOp-A AMSU-A 복사관측 자료가 동아시아 지역의 예보 오차 감소에 가장 큰 기여를 하였고, 06과 12 UTC 분석 시간에는 NOAA 18과 19 AMSU-A 복사자료 관측의 기여도가 가장 컸

는데, 이는 각각의 극 궤도 위성이 동아시아 지역을 지나는 시간과 관련이 있다. 특히, MetOp-A 위성은 아침 시간(한국 표준시로 오전 8시~11시 30분)에 한반도 상공의 복사량을 관측하기 때문에, 한반도 낮 시간 예보에 중요한 역할을 한다.

여름철 한반도 연안을 관측하는 AMSU-A 5번 채널 관측은 동아시아 지역의 예보오차를 다소 증가시켰지만, 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 분포하는 AMSU-A 5번 채널 관측은 동아시아 지역의 예보오차를 크게 감소시켰는데, 북태평양 고기압의 가장자리는 여름철 태풍 기간 동안의 예측민감지역으로 알려진 바 있다(Reynolds and Gelaro, 2001; Kim et al., 2011). 이는 이전 예측민감도 연구를 통해 밝혀진 예측민감지역에서의 관측 값이 예보오차를 실질적으로 감소시켜 주고 있음을 보여준다. 겨울철에는 중국 동쪽 지역 상공에 분포하는 NOAA 18 AMSU-A 8번 채널 관측이 동아시아 지역의 예보오차를 감소시켰으나, 티베트 지역 상공에 분포하는 NOAA 15와 MetOp-A AMSU-A 8번 채널은 동아시아 지역의 예보오차를 증가시켰다. AMSU-A 8번 채널은 대류권 상층부(300-400 hPa)에 민감하기 때문에 중위도 기압골과 그 풍상층을 관측하기에 최적의 채널이다. AMSU-A 8번 채널에 의한 동아시아 지역의 예보오차 증가는 티베트 지역 상공에 분포하는 MetOp-A 위성 관측에 의해서 나타나는데, 티베트 지역 상공의 MetOp-A AMSU-A 8번 채널이 동아시아 예측에 도움이 되지 못하는 것은 수치 모델에서 모의되는 지형의 한계로 인해서 지표 반사도가 실제와 다르게 계산되고, 이로 인해서 위성 복사관측을 산출하는데 있어서 복사관측의 품질을 떨어뜨리기 때문으로 생각된다. 티베트 지역 상공에서 MetOp-A AMSU-A 8번 채널의 동화로 인해 증가한 예보오차는 티베트 남쪽 지역 상공의 MetOp-A IASI 관측의 동화로 인한 예보오차 감소와 상쇄되었다. MetOp-A 위성에는 AMSU-A와 IASI 센서가 함께 탑재되어 있어 스캔 위치가 서로 겹친다.

이 연구에서는 동아시아 지역의 수치예보에 AMSU-A 관측자료의 동화가 미치는 영향을 분석하기 위해 수반 모델에 기반한 관측영향 진단법을 이용하였다. 그 결과, 수치예보 예측성 향상에 대한 AMSU-A 관측자료의 기여도를 계절 별, 위성 별, 채널 별로 판별할 수 있었다. 이 연구의 결과는 동아시아 지역의 수치예보 향상을 위한 미래 관측망 구성과 위성복사관측 자료의 품질 검사 등에 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(KMIPA 2015-5200)의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 심사를 해주신 두 분 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

Baker, N. L., and R. Daley, 2000: Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1431-1454, doi:10.1002/qj.49712656511.

Cardinali, C., 2009: Monitoring the observation impact on the short-range forecast. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 239-250, doi:10.1002/qj.366.

English, S., U. O’Keeffe, and M. Sharpe, 2007: Assimilation of cloudy AMSU-A microwave radiances in 4D-VAR. *proc. 15th International TOVS Study Conference*, Maratea, Italy, 4-10 October 2006.

Gelaro, R., and Y. Zhu, 2009: Examination of observation impacts derived from observing system experiments (OSEs) and adjoint models. *Tellus*, **61**, 179-193, doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00388.x.

_____, 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.

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.

Jung, B.-J., H. M. Kim, T. Auligné, X. Zhang, and X.-Y. Huang, 2013: Adjoint-derived observation impact using WRF in the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 4080-4097, doi:10.1175/MWR-D-12-00197.1.

Kidder, S. Q., and T. H. Vonder Harr, 1995: *Satellite Meteorology: An Introduction*. Academic Press, San Diego, 466 pp.

Kim, H. M., B.-J. Jung, S. Park, J. Kay, S.-M. Kim, J. Kim, S. Kim, and E. Yang, 2012: Development of scientific tools for evaluating the forecast sensitivity to remote sensing observations. *CATER 2011-2211*, KMA, 1-114.

_____, S.-M. Kim, and B.-J. Jung, 2011: Real-time adaptive observation guidance using singular vectors for typhoon Jangmi (200815) in T-PARC 2008. *Wea. Forecasting*, **26**, 634-649, doi:10.1175/WAF-D-10-05013.1.

Kim, M., H. M. Kim, J. Kim, S.-M. Kim, C. Velden, and B. Hoover, 2017: Effect of enhanced satellite-derived atmospheric motion vectors on numerical weather prediction in East Asia using an adjoint-based observation impact method. *Wea. Forecasting*, **32**, 579-594, doi:10.1175/WAF-D-16-0061.1.

Kim, S., H. M. Kim, E.-J. Kim, and H.-C. Shin, 2013: Forecast sensitivity to observations for high-impact weather events in the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **23**, 171-186, doi:10.14191/Atmos.2013.23.2.171 (in Korean with English abstract).

Kim, S. M., 2016: Forecast Sensitivity to Observations in the KMA UM and the Effect of Observations on Numerical Weather Prediction. Ph.D. Thesis, Yonsei University, 183 pp.

_____, and H. M. Kim, 2014: Sampling error of observation impact statistics. *Tellus*, **66**, 25435, doi:10.3402/tellusa.v66.25435.

Liu, Z., C. S. Schwartz, C. Snyder, and S. Ha, 2012: Impact of assimilating AMSU-A radiances on forecasts of 2008 Atlantic tropical cyclones initialized with a limited-area ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 4017-4034, doi:10.1175/MWR-D-12-00083.1.

Lorenc, A. C., and R. Marriott, 2014: Forecast sensitivity to observations in the Met Office Global numerical weather prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 209-224, doi:10.1002/qj.2122.

Reynolds, C. A., and R. Gelaro, 2001: Remarks on Northern Hemisphere forecast error sensitivity from 1996 to 2000. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2145-2153, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<2145:RONHFE>2.0.CO;2.

Rodgers, C. D., 1990: Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements. *J. Geophys. Res.*, **95**, 5587-5595.

Salonen, K., and N. Bormann, 2011: Accounting for the characteristics of AMV observations errors in data assimilation. EUMETSAT Tech. Note, 7 pp.