

국지예보모델에서 고해상도 마이크로파 위성자료(MHS) 동화에 관한 연구

김혜영* · 이은희 · 이승우 · 이용희

기상청 수치모델링센터

(접수일: 2018년 3월 16일, 수정일: 2018년 5월 23일, 게재확정일: 2018년 5월 26일)

A Study on the Assimilation of High-Resolution Microwave Humidity Sounder Data for Convective Scale Model at KMA

Hyeyoung Kim*, Eunhee Lee, Seung-Woo Lee, and Yong Hee Lee

Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 16 March 2018; revised 23 May 2018; accepted 26 May 2018)

Abstract In order to assimilate MHS satellite data into the convective scale model at KMA, ATOVS data are reprocessed to utilize the original high-resolution data. And then to improve the preprocessing experiments for cloud detection were performed and optimized to convective-scale model. The experiment which is land scattering index technique added to Observational Processing System to remove contaminated data showed the best result. The analysis fields with assimilation of MHS are verified against with ECMWF analysis fields and fit to other observations including Sonde, which shows improved results on relative humidity fields at sensitive level (850-300 hPa). As the relative humidity of upper troposphere increases, the bias and RMSE of geopotential height are decreased. This improved initial field has a very positive effect on the forecast performance of the model. According to improvement of model field, the Equitable Threat Score (ETS) of precipitation prediction of 1~20 mm hr⁻¹ was increased and this impact was maintained for 27 hours during experiment periods.

Key words: Microwave satellite data, convective scale model, data assimilation, cloud detection, MHS

1. 서 론

기상청은 수치예보모델의 성능향상을 위하여 다양한 위성자료의 활용을 지속적으로 추진하고 있다. 한 예로 극궤도 위성의 연직탐측기인 ATOVS (Advanced Tiros-N Vertical Sounder)와 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)를 동화하여 전구 예보모델의 오차를 크게 개선하였다(Chang et al., 2002; Joo et al., 2005; Lee et al., 2009; Kim and Kim, 2017). 그 중 마이크로파 자료는 다른 위성자료에 비해 구름에 덜 민

감하므로 구름이 있는 대기의 온습도 정보를 제공할 수 있다. 온도채널에 비해 공간 해상도가 높은 수증기 탐측기인 AMSU-B (Advanced Microwave Sounding Unit-B)나 MHS (Microwave Humidity Sounder)는 수증기 연직정보를 제공하므로 대기 내 역학정보 개선하여 강수예측 향상에 기여한다(Karbou et al., 2010; Geer et al., 2014). 최근 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)를 비롯한 대부분의 전구모델은 구름이나 강수의 영향을 고려한 마이크로파 자료동화를 통해 모델의 예측 정확도를 높이고 있다(Bauer et al., 2010; Geer et al., 2017). 한편, 대류규모 모델은 높은 시공간 해상도와 강한 비선형성으로 적외자료나 강수지수를 활용하여 강수구름을 효과적으로 제거할수록 강수예측이 개선됨을 보였다(Zou et al., 2013; Qin and Zou, 2016).

*Corresponding Author: Hyeyoung Kim, Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, 61 Yeouidaebang-ro 16-gil, Dongjak-gu, Seoul 07062, Korea.
Phone: +82-2-2181-0564, Fax: +82-2-2181-0908
E-mail: hyoungkim@korea.kr

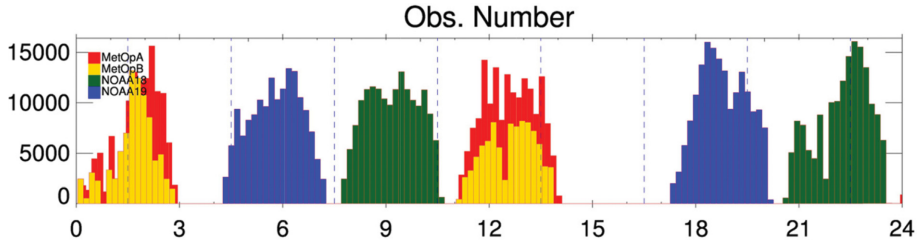


Fig. 1. Temporal coverage of MHS data available to be assimilated into LDAPS over 24 hour period.

한반도 서해안 및 남해안에서는 새벽, 내륙은 오후에 강한 강수가 나타나는 경향을 보인다(Jung and Seo, 2005). 또한 연직 온도 차이로 인한 대류 불안정뿐 아니라 서해상의 수증기 유입에 의해서 크게 좌우되는 특징을 보인다(Sohn et al., 2013; Song and Sohn, 2015). 현재 기상청 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)의 수증기 정보는 지면관측자료(Surface) 및 고층관측자료를 활용하고 있다. 연직 수분정보를 제공하는 고층관측자료는 주로 육상에서 하루 2~4회 관측된다. 수분장은 시공간 변동성이 크므로 국지관측은 대표성 오차가 크다. 이를 줄이기 위해 시공간적으로 밀도 있는 위성자료를 활용하여 수증기 정보를 제공하면 국지예보모델의 강수 예측성을 높일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 국지예보모델의 강수 예측성 향상을 위해 고해상도 마이크로파 위성자료를 활용하여 수증기정보 개선 가능성을 검토하고, MHS 자료의 품질검사 과정을 국지예보모델에 최적화하여 개선된 초기장이 모델의 예측성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 마이크로파 위성자료

MHS센서는 ATOVS의 마이크로파 수증기 탐측기로 총 4개의 극궤도 위성 Meteorological Operational Satellite (MetOp) - A, B와 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - 18, 19에 탑재되어 한반도 영역을 하루에 2회 정도 관측한다. 2300 km의 관측폭(swath width)에 90개의 관측점을 가지며 관측각은 1.1° 이다. 탐측이 교차궤도(cross-track)를 이루므로 직하점의 해상도 $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ 이지만 관측 가장자리에서는 $26 \text{ km} \times 52 \text{ km}$ 로 해상도가 낮아진다. 따라서 관측지점에 따라 밝기온도도 차이가 난다. 본 연구에서는 관측점 위치에 대한 편차보정을 실시하고, 편차보정에 어려움이 있는 양쪽 최외각 10개의 자료는 사용하지 않는다.

MHS는 2개의 약한 윈도우채널(89, 150 GHz)과 3개의 연직탐측채널($183.31 \pm 1, \pm 3, 190.31 \text{ GHz}$) 총 5개

의 채널로 구성되어 있다. 183 GHz 수증기 흡수영역에 위치한 3~5번 채널이 연직 수증기정보를 제공하며 주파수가 가장 큰 5번 채널이 하층대기의 정보를 제공한다. 윈도우영역에 해당하는 1번과 2번 채널은 지표면과 구름 내 얼음 입자에 의한 산란과 방출에 의해 영향을 많이 받으므로 직접 동화되지는 않고 주로 전처리 과정에서 강수나 구름 판별에 사용된다.

Figure 1은 국지예보모델 영역에서 한달 간 누적한 MHS 관측수의 24시간 분포도이다. 국지예보모델의 경우 모델 영역이 작아 방문주기가 비교적 긴 극궤도 위성자료의 가용 관측 빈도가 적지만 MHS자료는 4개 위성에 동일한 센서가 탑재되어 있어 1500 UTC 부근을 제외하면 24시간 중 모든 시간대에 고른 관측이 이루어지고 있다. 특히 0000과 1200 UTC에는 두 위성(MetOp-A, B)의 집중 관측이 이루어지고 있다.

2.2 자료처리 및 자료동화

본 연구에 사용된 MHS자료는 기상청 국가기상위성센터에서 직수신한 ATOVS 원시 자료 중 수증기채널만을 AAPP (ATOVS and AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) Preprocessing Package, Atkinson, 2017)로 재 처리한 자료이다. ATOVS 자료는 각기 다른 해상도의 자료로 구성되어 있으며 자료처리의 편의성을 위해 모든 자료를 HIRS (High-resolution Infrared Radiation Sounder) 관측점 위치로 변환하는 과정(mapping process)을 거친다. 이때, 고해상도 자료는 고유한 정보를 잃게 되므로 국지예보모델에서는 적절한 고해상도 정보를 사용하기 위해 수증기채널 자료를 독립적으로 처리하여 고유의 공간해상도와 정보를 유지하게 했다.

AAPP로 처리된 관측값은 모델에 입력되기 전에 여러 단계의 전처리 과정을 거쳐 적합성을 판별하는데 통합모델(Unified Model, UM)에서는 이를 관측자료 처리시스템(Observational Processing System, OPS)이라고 한다. OPS는 위성에서 관측한 밝기온도(O)와 RTTOV-9 (Radiative Transfer for TOVS-9, Saunders et al., 2010) 모델에 예측모델장(T, q, Ts 등)을 입력하여 계산한 밝기온도(B)를 기준으로 전처리를 수행

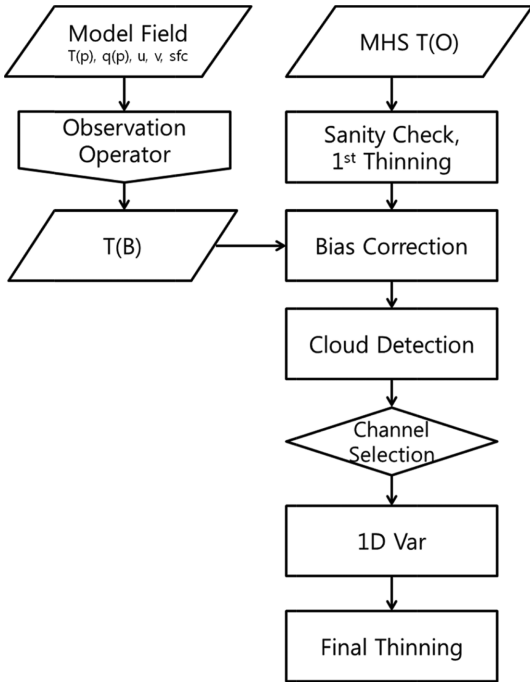


Fig. 2. Flowchart of observational processing system in LDAPS.

한다. Figure 2는 통합모델의 위성자료 처리시스템에 대한 모식도이다. 기본적인 점검을 마친 관측자료는 시공간 축아내기(thinning)를 하여 중복 자료 제거 후 모델과 관측 사이에 고정적으로 존재하는 편차를 보정한다. 본 연구에 사용된 편차보정기법은 관측증분(O-B, innovation)을 이용한 Harris and Kelly (2001)의 정적 보정으로 대기 층후자료(850-300 hPa, 200-50 hPa)와 관측점 위치를 예측인자로 사용하여 관측값의 편차를 보정한다. 편차보정 후 관측증분을 재계산하여 임계값보다 큰 자료는 제거한다. 구름이나 강수에 의해 영향 받은 관측을 탐지하는 구름탐지과정을 실시한 후 자료동화에 사용될 채널을 선택한다. 채널선택 후에는 연직 1차원 변분과정을 실시하여 수렴도 및 복사모델오류를 점검하고, 이후 과정에 필요한 표면온도, 수분 등에 대한 정보를 추가한다(Eyre, 1989; Hilton et al., 2009). 이때 관측과 추정값의 차이가 임계값 이내인 자료만 최종 축아내기를 거쳐 실제 자료동화과정에 사용된다.

OPS에서 전처리를 마친 관측자료는 3 km 간격의 3차원 변분동화과정을 통해 최적의 대기상태로 추정된 수평바람장, 온도, 밀도, 기압, 총수직의 분석증분(analysis increment) 형태로 모델의 초기장으로 사용된다. 이 때 사용되는 관측자료는 분석시간기준 ± 90

분 이내의 자료이며 3차원 변분법을 보완하기 위해 관측시간에 가까운 배경장을 이용하는 적시관측자료 기법(First-Guess at Appropriate Time (FGAT), Lorenc and Rawlins, 2005)과 모델에 미치는 충격을 완화하기 위해 분석증분을 점진적으로 모델에 입력하는 분석증분 갱신법(Incremental Analysis Update, IAU)이 적용되었다(Weston, 2014; Lee et al., 2015).

2.3 구름 탐지기법 개선

MHS 5개 채널만을 사용한 기존 국지예보모델의 OPS 구름탐지과정은 2단계로 이루어져 있고 그 과정은 아래와 같다.

1) 권운 탐지는 식 (1)과 같은 구름 비용함수를 이용한다.

$$J_c = \frac{1}{2} \Delta T \cdot \{HBH^T + R\}^{-1} (\Delta T)^T \quad (1)$$

(ΔT : 관측증분, R : 관측오차 공분산, B : 배경오차 공분산, H : 접선형 관측연산자)

구름 비용함수값이 임계값보다 크고, 구름빙정에 민감한 5번 채널의 관측증분이 기준값보다 작으면 상층운에 의한 영향이 있다고 판단한다. 이때 구름수분에 의해 오염된 하층 2개 채널은 사용하지 않고, 구름 상공의 정보를 반영하는 3번 채널만 사용한다(Hong et al., 2010).

2) 강수 탐지는 강수의 유무는 Bennartz et al. (2002)이 제안한 1번과 2번 채널의 밝기온도 차이를 이용하여 아래 식 (2)와 같다.

$$SI = TB_1 - TB_2 - (a + b \times \theta) \quad (2)$$

(TB_1, TB_2 : 1번, 2번 채널 밝기온도, θ : 위도)

식 (2)의 값이 임계값 이상이면 강수로 판정하여 모든 채널은 사용하지 않는다.

실제 Bennartz기법을 육상에 적용할 경우 마이크로파 영역의 방출률 크기와 변동성이 커서 강수탐지가 어렵다. 본 연구에서는 강수탐지과정에서 육상 강수 구름을 효과적으로 제거하기 위해 Qin and Zou (2016)가 제안한 육상 산란지수(L_{index})를 추가하였다. 육상 산란지수는 식 (3)와 같이 산출한다.

$$L_{index} = \frac{TB_1^{normalized}}{\frac{1}{2} \left(\frac{TB_2}{100} - 1 \right)^3} \quad (3)$$

$$TB_1^{normalized} = \frac{TB_1 - \mu}{\sigma}, \quad \mu = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 TB_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (TB_i - \mu)^2}$$

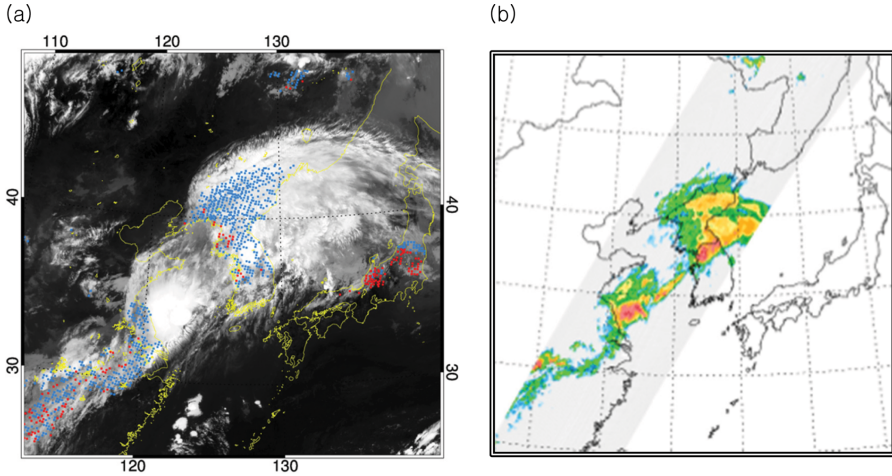


Fig. 3. (a) The distribution of precipitation captured by land scattering index over IR image at 0000 UTC 5 July 2016. The blue dot were detected as cirrus and the red dot were determined as clear sky using existing1 criteria (EXP1). (b) The distribution of GMI rain rate at same time.

식 (3)의 분자 항은 강수입자에 민감한 1번 채널을 전체 채널의 평균과 표준편차를 이용하여 정규화하고, 분모 항은 얼음입자에 민감한 2번 채널을 변형한 것이다. 강수를 포함한 구름이나 지면에 대해 각기 다르게 반응하는 마이크로파 채널 별 특성을 반영한 것이다(Muller et al., 1994). 관측점의 육상 산란지수가 임계값 이상인 경우 강수나 두꺼운 구름에 의한 영향이 있다고 판단하여 전 채널을 제거한다.

Figure 3a는 2016년 7월 5일 0000 UTC 구름영상과 육상 산란지수를 이용하여 강수로 탐지된 관측점의 분포이다. 파란 점은 기존 구름탐지과정에서 권운으로 탐지되었던 관측이고, 빨간 점은 청천으로 분류되었으나 육상 산란지수를 통해 강수에 의해 오염된 자료로 판별된 자료이다. 이는 기존 OPS에는 육상 강수탐지 과정이 없고, 실제 강수구름이 있더라도 관측 증분이 작은 경우 이를 인지하지 못하기 때문이다. Figure 3b는 같은 시간대에 한반도를 통과한 GMI (GPM Microwave Imager)로 산출한 강수분포로 Fig. 3a의 강수구역과 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 모델값이나 다른 위성자료를 사용하지 않고 MHS 자료만으로 육상 강수구름을 성공적으로 탐지하고 있음을 알 수 있다.

육상 산란지수로 탐지된 자료의 특성을 보기 위해 채널 별 관측증분의 히스토그램을 Fig. 4에 제시하였다. 검은 선은 기존 구름탐지법을 적용한 자료, 회색 음영은 육상 산란지수에서 강수로 판별된 자료의 분포이다. 빨간 선은 강수에 의해 오염된 자료를 제거한 이후의 분포이다. 각 자료의 편차(center)와 표준편차(STD)는 같은 색으로 히스토그램 옆에 제시하였다.

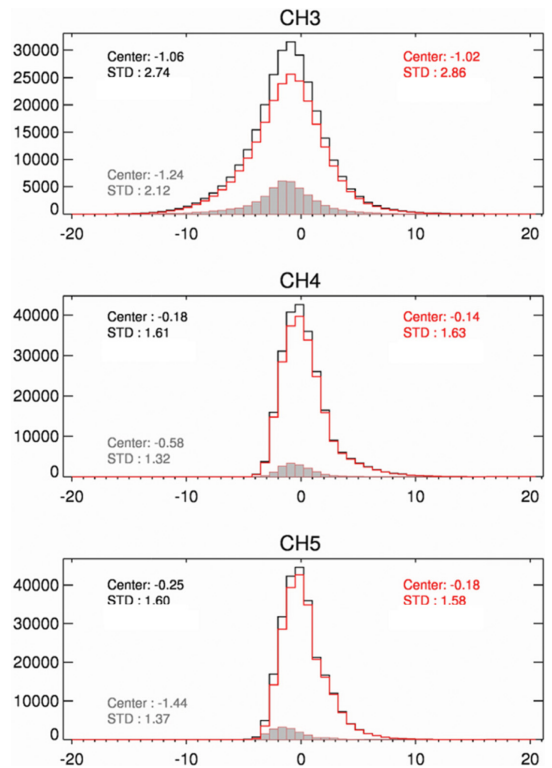


Fig. 4. The histograms of innovation (O-B) for CH3, 4 and 5. The black line is the data using the existing detection method, the gray shade is the distributions of the data determined by precipitation on the land scattering index, and the red line is the distributions after removing the contaminated data.

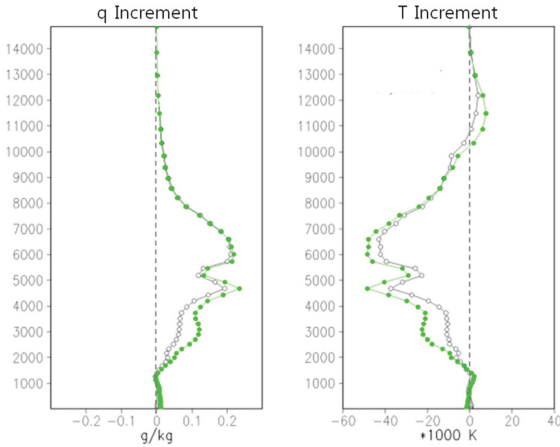


Fig. 5. Profiles of humidity and temperature increments by MHS 183 GHz channels with (black)/without (green) assimilating other dataset.

예상대로 강수에 의해 오염된 자료는 모든 채널에서 음의 편차를 보이고 있으며 강수에 민감한 5번 채널의 편차가 -1.44로 다른 채널에 비해 다소 크다. 이 자료를 제거한 경우 관측증분 편차가 모든 채널에서 감소한 반면 표준편차는 5번 채널은 감소하고 3번과 4번 채널은 다소 증가하였다.

3. 결 과

MHS 자료가 모델에 미치는 영향을 평가하기 위해 우선 위성자료동화에 의한 초기 분석장의 변화를 살펴보고, 구름탐지방법 개선에 따른 모델예측 민감도를 조사하였다.

3.1 모델 분석장에 미치는 영향

3.1.1 단일 관측실험

MHS 자료가 초기 분석장에 미치는 영향을 보기 위해 육지 지점에서 단일관측 자료동화실험을 수행하였다. Figure 5는 단일 MHS 자료에 의한 습도와 온도 분석증분의 연직분포로 MHS 자료만 동화(초록 선)한 경우와 현재 국지예보모델에서 사용중인 관측자료에 MHS 자료를 추가 동화(검은 선)시 MHS에 의한 분석증분이다. 단일 MHS 자료는 라디오존데 관측이 이루어지는 전라남도 광주부근의 관측점 중 음의 관측증분 가진 자료를 선택하였다. 두 실험에서 음의 관측증분에 의해 MHS 자료의 민감고도(2~8 km)에 수분이 증가하는 반면 온도는 그 크기는 작지만 대류권에서는 감소, 성층권에서는 약한 증가를 보인다. 예상대로 위성자료만을 사용한 경우에 증분이 더 크지만 기존 관측자료와 같이 동화한 경우에도 위성자료가

분석장에 미치는 영향이 작지 않음을 알 수 있다. 특히 5 km 이상의 대류권 중상층 수분장의 경우 MHS 자료동화의 효과는 기존 자료에 의해 영향을 거의 받지 않는 것으로 보인다. 또한 Fig. 4와 같이 강수에 의해 오염된 자료는 음의 관측증분을 가지므로 이를 제거하지 않을 경우 대기 수증기는 증가하여 모델 예측에 영향을 미친다.

3.1.2 다른 관측 자료동화에 미치는 효과

MHS 자료 동화가 분석장 개선에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다양한 관측자료의 분석잔차(O-A, residual)를 비교하였다. Figure 6은 위성자료 동화를 실시하지 않은 국지예보모델(기준실험)과 MHS 자료동화를 수행한 모델의 분석장에 대해 다양한 관측자료의 1개월 평균 분석잔차를 나타낸 것이다. Figure 6a는 라디오존데 관측값에 대한 모델 분석장의 지위고도(geopotential height, GPH), 온도, 습도의 편차(bias, 실선)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE, 점선)를 나타낸 것이다. MHS 자료동화를 실시한 경우(빨간 선), 기준실험(검은 선)에 비해 지위고도의 편차 및 평균 제곱근 오차가 감소하였다. 상대 습도의 평균 제곱근 오차는 700-300 hPa에서 감소하고 700 hPa 이상의 고도에서는 기준실험에 비해 수증기양이 증가하여 500 hPa 상층의 건조함이 개선이 되는 것을 볼 수 있다. 반면 온도는 500-300 hPa 고도에서 편차 및 평균제곱근 오차는 커졌다. 마이크로파 수증기채널 자료동화로 대기 내 수증기양 증가로 인해 지위고도에서 음의 편차가 감소한 것으로 보인다. Figures 6b-d는 다양한 위성자료의 분석잔차를 비교한 것이다. ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) 자료는 수증기채널(18~22번)에서 평균과 표준편차가 감소하였다. 15번 채널의 표준편차는 0.24 K, 최상층 채널(22번채널)의 표준편차는 0.47 K 작아져 상층으로 갈수록 개선율이 높았다. 대기 총 누적수증기량에 대한 정보를 제공하는 지상 GNSS (Global Navigation Satellite System)의 연직 총지연길이(zenith total delay, ZTD)도 몇몇 관측소를 제외하면 기준실험에 비해 분석잔차가 감소하였다. IASI의 경우 수증기채널(75번~98번)에서 분석잔차의 표준편차가 0.2~0.5 K 감소하였다. 대류권 온도채널(1~60번)에서도 분석잔차 감소가 나타난다. 특히 MHS 자료의 민감고도인 400 hPa 이하(30~60번)에서 평균 0.1 K가량 개선이 나타났다. MHS 자료동화를 수행한 경우 수증기정보에 민감한 관측자료에서 기준실험에 비해 분석잔차의 평균과 표준편차가 공통적으로 감소하였다. 따라서 자료동화를 통해 수증기장이 개선되고, 수증기장의 개선은 대기 역학 구조에도 영향을 미치므로 지위고도의 개선도 같이 이루어진 것을 알 수 있다.

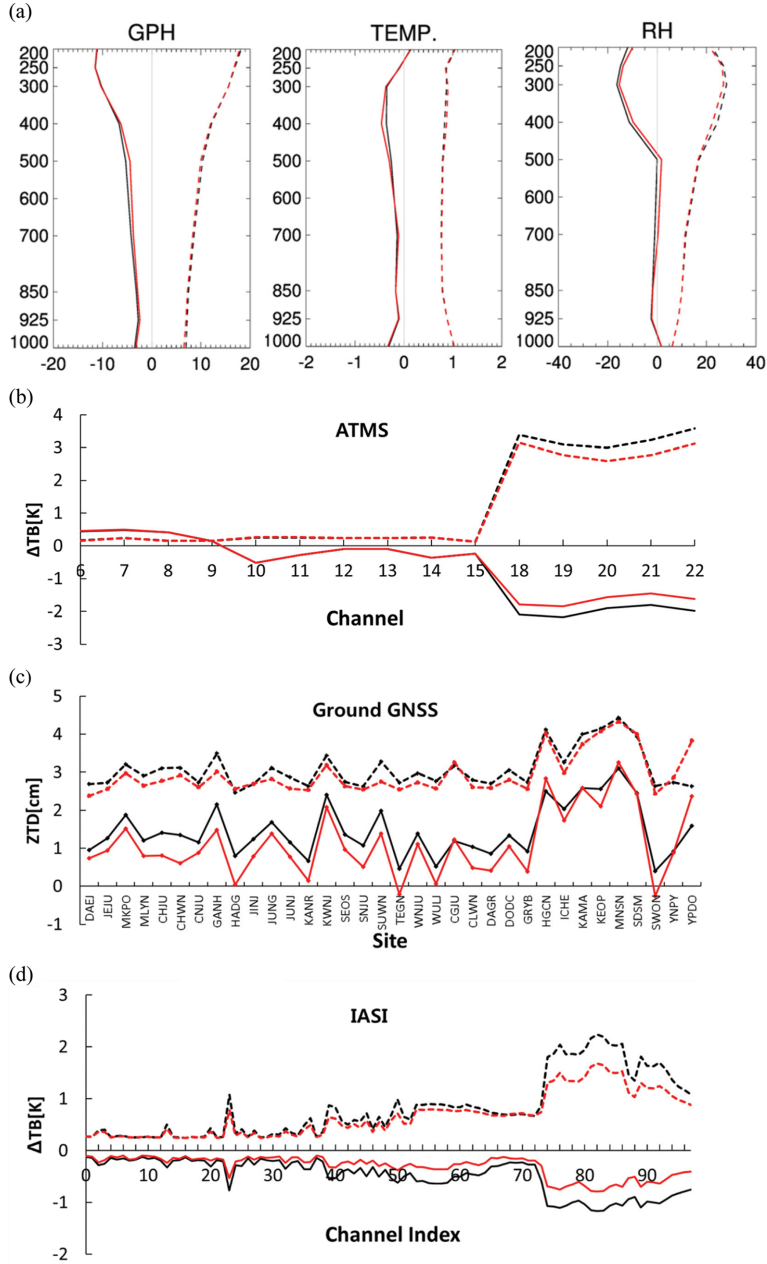


Fig. 6. Mean (solid line) and standard deviation (dashed line) of residuals for a selection of observing system for the assimilating MHS (red) and the control (black). The observing systems are follows: (a) Radiosonde GPH, temperature and humidity observations, (b) ATMS bright temperature with temperature-sounding channels (6-15) and humidity-sounding channels (18-22), (c) ground GNSS ZTD observations and (d) IASI brightness temperatures with temperature-sounding channels (channel index 1-60) and humidity-sounding channels (channel index 76-99).

3.2 모델의 예측 성능에 미치는 영향

국지예보모델에서 마이크로파 위성자료를 동화할 때 구름의 영향을 제거하는 것이 강수예측을 개선한

다는 선행연구(Zou et al., 2013; Qin and Zou, 2016)를 기반으로 구름 탐지 방법에 따른 3개의 실험을 구성하였다. 기준실험(OPER)은 라디오존데를 비롯한 기

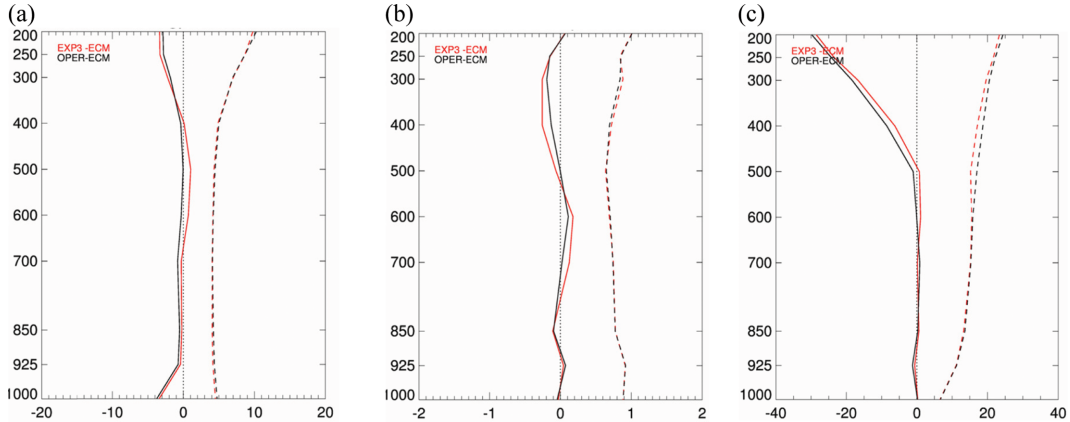


Fig. 7. The profiles of mean difference (solid line) and standard deviation (dashed line) of initial analysis fields of OPER (black line) and EXP3 (red line) to ECMWF. The field are follows: (a) geopotential height, (b) temperature, and (c) relative humidity.

존 국지예보모델에 사용되는 자료를 동화한 것이다. MHS 자료를 추가한 실험 중 EXP1은 기존 통합모델의 기준을 적용한 것이다. EXP2는 구름의 영향을 엄격하게 제거하기 위해 권운영역의 모든 자료를 사용하지 않고, 구름 가장자리에서 관측증분이 큰 것을 고려해 관측증분의 임계값을 하향 조정하였다. EXP3은 새로 도입한 육상 산란지수를 적용하여 강수에 의해 오염된 관측은 제외하고 권운의 상층 정보를 사용하였다. 실험기간은 강수가 빈번했던 2016년 7월이며 검증영역은 가변격자영역을 포함한 국지예보모델 전 영역에 대해 실시하였다.

3.2.1 ECMWF 분석장 비교

규준실험을 포함한 각 실험의 초기분석장 품질을 조사하기 위해 ECMWF 분석장의 지위고도, 온도, 상대습도와 비교하였다. Figure 7은 ECMWF 분석장과 EXP3(붉은 선), 규준실험(검은 선)의 (a) 지위고도, (b) 온도, (c) 상대습도의 편차(실선)와 표준편차(점선)를 고도에 따라 나타낸 것이다. 지위고도의 편차는 700 hPa 이하에서 EXP3이 규준실험에 비해 감소하나 700 hPa 상공에서는 증가하고 있다. 수분장은 500 hPa 이상에서 규준실험이 ECMWF 분석장보다 건조하며 자료동화를 통해 평균오차 및 표준오차가 감소하였다. 이는 Fig. 6a의 결과와도 유사하다. 각 실험 별 분석장의 편차에 대한 평균과 표준편차를 Table 1에 정리하였다. 수분장은 EXP1과 EXP3이 근소한 차이로 ECMWF 분석장에 가장 가까운 값을 보이고, 지위고도는 EXP3이 ECMWF 분석장과 가장 차이가 작았다. 수분장과 지위고도, 온도장을 비교한 결과 EXP3이 타 실험에 비해 ECMWF에 근사하는 분석장을 생산했다. 이는 강수에 의해 오염된 자료가 성공적으로 제거되

Table 1. The means and its standard deviations of analysis field differences between experiments and ECMWF.

Experiments	GPH	Temp.	RH
OPER	-0.27 ± 6.43	0.09 ± 0.87	-9.72 ± 16.03
EXP1	0.51 ± 6.63	0.11 ± 0.88	-8.91 ± 15.67
EXP2	-0.47 ± 6.38	0.09 ± 0.87	-9.78 ± 15.69
EXP3	-0.06 ± 6.27	0.09 ± 0.87	-8.98 ± 15.46

어 대기 내 수분정보가 정확해져서 다른 실험에 비해 대기 역학정보가 개선되었기 때문으로 보인다.

3.2.2 관측 검증

모델의 예측성능을 비교하기 위해 라디오존데 관측 자료를 이용한 예측시간 별 관측검증을 수행하였다. 각 실험에서 예측한 지위고도, 온도, 상대습도와 라디오존데 관측에 대한 평균제곱근오차를 계산 후 규준 실험과 비교하기 위해 아래 식 (4)와 같이 개선율 (Improvement Rate, IR)을 산출하였다. 실험이 규준 실험 대비 예측오차가 감소하면 양의 값을 가진다.

$$IR[\%] = \left(1 - \frac{RMSE(EXP)}{RMSE(OPER)}\right) \times 100 \tag{4}$$

Figure 8에 주요 고도와 예측시간에 따른 실험의 오차 개선율을 제시하였다. 빨간색은 규준실험에 비해 실험의 오차가 증가한 것을 의미하고, 초록색은 오차가 감소한 것을 의미한다. EXP1은 초기장의 지위고도와 수증기장이 개선되었으나 예측이 진행되면서 오차가 커지는 결과를 보인다. EXP2의 경우, 850 hPa의 수증기장 및 바람, 지위고도의 개선이 두드러진다. 하층 수증기장에 비해 500 hPa의 수증기장은 개선되지

IR		EXP1				EXP2				EXP3			
		0	12	24	36	0	12	24	36	0	12	24	36
GPH	250	0	2	-1	-3	0	1	0	-1	-1	1	2	0
	500	5	1	0	0	0	0	2	1	4	2	5	3
	700	2	-2	-3	-2	2	0	0	1	3	2	5	3
	850	1	-2	-2	-3	2	0	1	0	3	1	6	2
Temp.	250	0	0	-1	0	1	0	-1	0	3	1	1	-1
	500	-2	-3	-6	-2	-1	-2	-1	1	-2	-4	-1	3
	700	0	-1	-4	-1	0	-2	-1	-1	0	-1	-1	-2
	850	0	0	0	-4	0	0	0	1	1	4	0	0
RH	250	1	-3	2	-1	4	1	0	-8	1	-1	-1	4
	500	-3	-6	-5	0	-1	-1	-5	-1	5	2	-7	2
	700	1	2	-3	-1	6	4	2	-2	4	5	3	-5
	850	2	-3	-3	-7	4	2	-2	-1	1	3	1	-1

Fig. 8. Table of GPH, temperature, and relative humidity improvement rate for 0, 12, 24 and 36 hr. forecast lead times at 850, 700, 500 and 250 hPa. Green shading indicates reduced RMSE whereas red shading means increased RMSE compared to OPER.

않았으며 이는 권운영역을 자료동화에서 제외하면서 상층 수증기정보도 많이 소실되었기 때문이다. EXP3는 다른 실험에 비해 수분장과 지위고도의 개선율이 크며 예측시간 내내 유지된다. EXP1이나 EXP2에 비해 전 층에서 초기 수분장이 고르게 개선된 것은 육상 구름탐지 강화에 따라 강수에 의해 오염되지 않은 육상 자료 사용에 의한 것으로 이 영향은 예측 내내 유지되었고 또한 지위고도의 개선에도 반영되었다.

3.2.3 강수예측 성능검증

각 실험이 강수예측 성능에 미치는 영향을 검증하기 위해 전국 670여 개의 자동기상관측망(Automated Weather Station, AWS)에서 관측한 1시간 누적 강수량과 모델에서 예측한 1시간 강수량을 비교하였다. 비교를 위해 공정 임계 지수(Equitale Threat Score, ETS)를 사용하였으며(Mesinger and Black, 1992) 이 값은 -1/3~1 사이의 값을 가지고 1에 가까울수록 강수 예측 성능이 좋을 의미한다. Figure 9는 각 실험과 기준실험에서 예측한 1시간 누적강수를 강우강도에 따라 각 실험과 기준실험의 공정 임계 지수 차이 (ΔETS)를 산출하여 비교한 것이다. Figure 9a는 강우강도 별로 전체 예측시간에 대해 평균한 공정 임계 지수 차이이다. 양의 값은 전체 예측시간 동안 각 실험이 기준실험에 비해 강수 예측이 개선됨을 의미한다. EXP1과 EXP2는 강우강도 3~10 mm hr⁻¹ 구간에서 강수검증 지수가 기준실험보다 높으며 15 mm hr⁻¹ 이상에서는 예측지수가 악화되었다. EXP3는 약한 강수뿐 아니라 15 mm hr⁻¹ 이상의 구간에서도 강수 예보정확

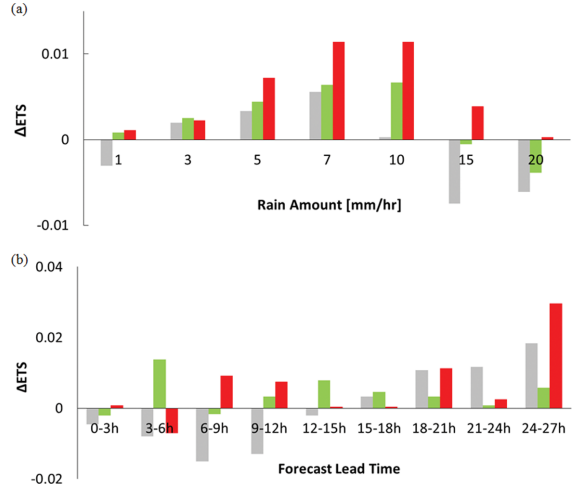


Fig. 9. The difference of Equivalent Threat Score (ΔETS) between EXPs and OPER at (a) rain amounts, and (b) forecast lead time on July 2016. EXP1 is gray bar, EXP2 is green bar, and EXP3 is red bar.

도가 개선되었다. 예측시간에 따른 개선을 알아보기 위해 1~20 mm hr⁻¹ 강우강도 구간의 ETS를 3시간 간격으로 평균하여 Fig. 9b에 나타냈다. EXP1은 15시간 예측시간 이후에 강수예측 개선을 보이고 있다. EXP2는 전 예측 시간에 대해 개선이 이루어 졌으며 특히 예측 초반인 3~6시간에서 다른 실험에 비해 개선이 크다. 이는 하층 수증기장 개선의 의한 것으로 보인다. EXP3는 예측 6시간 이후부터 개선이 나타났으며 18시간 이후에도 강수 예측개선이 지속적으로 나타나고 있다. 이는 중상층 수증기장 개선이 대기 열역학 구조에 영향을 주어 강한 강수 및 예측 시간에도 영향을 미치고 있는 것으로 보인다.

3.2.4 집중호우 사례

2017년 7월 16일에 충청 내륙에 시간당 80 mm가 넘는 집중호우가 발생하였다. 이는 장마전선의 영향으로 인한 강한 수증기 유입과 대기 불안정에 의한 것으로 실제 예상 강수량보다 강한 집중호우가 발생하였다. Figure 10은 2017년 7월 15일 2100 UTC의 (a) 지상분석일기도와 (b) 850 hPa 수분속(moisture flux), (c) 레이더, (d) COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite) 위성영상분석 자료이다. 지상 분석일기도에서 한반도 중부에 정체전선이 위치하고 있고, 산동반도 서쪽의 기압골은 전선상에서 발달하면서 서해상으로 유입되고 있다. 동중국해에서 서해를 거쳐 중남부지방 중심으로 수증기가 강하게 유입되고 있다(Fig. 10b). 레이더(Fig. 10c)와 위성영상(Fig.

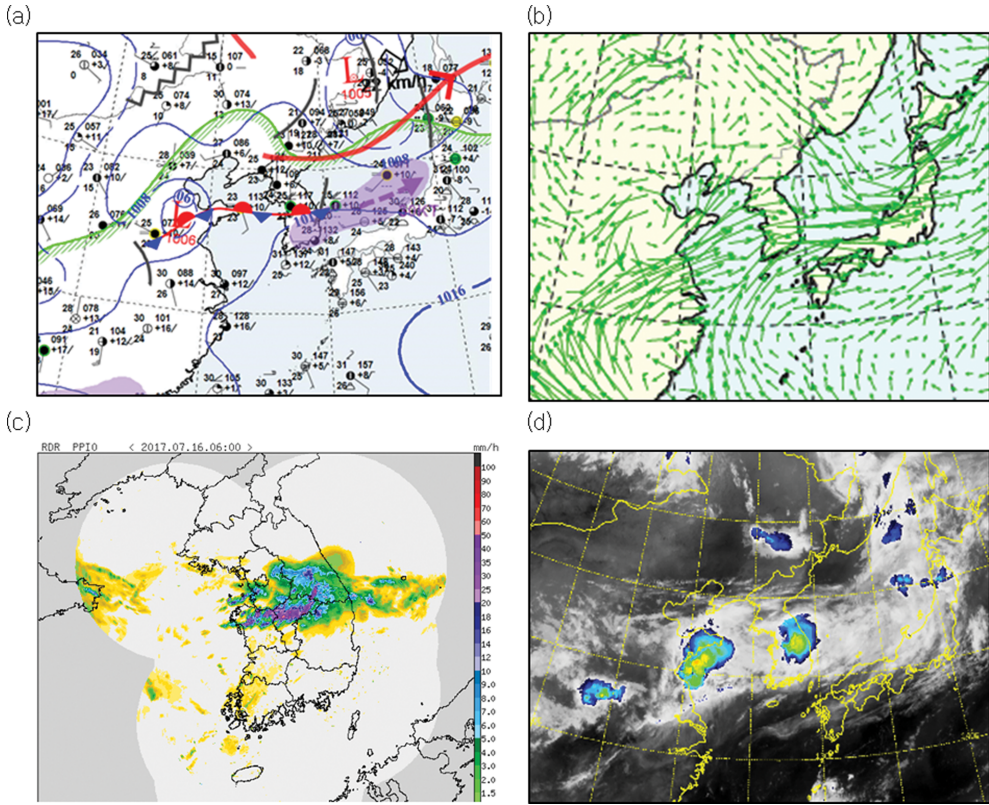


Fig. 10. (a) Surface analysis chart, (b) 850 hPa moisture flux, (c) radar rain rate (mm hr^{-1}), (d) COMS IR image and convective rain area at 2100 UTC 15 July 2017.

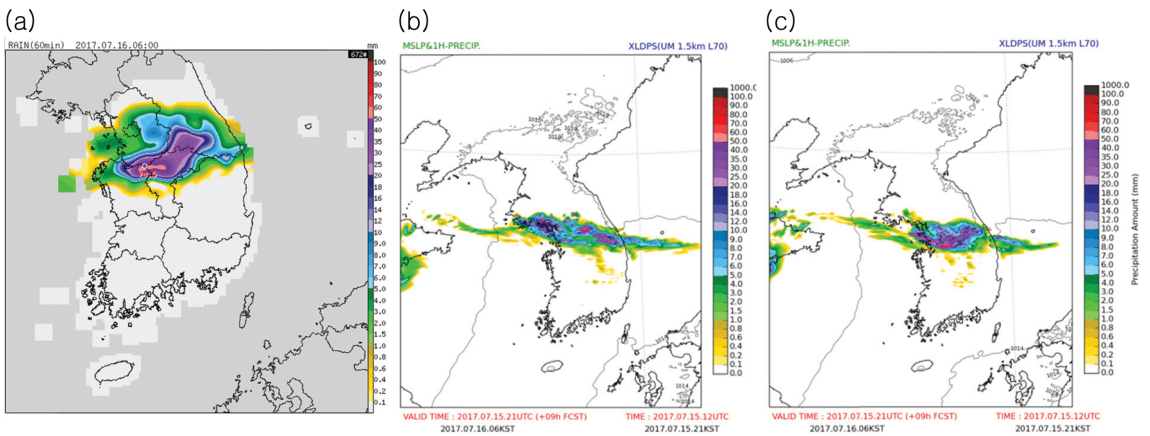


Fig. 11. The 1 hr accumulated precipitation of (a) AWS, and 9 hour predicted by (b) control experiment (OPER) and (c) experiment with assimilating MHS (EXP3) at 2100 UTC 15 July 2017.

10d)을 보면 강한 수분속이 수렴하는 전선면 부근 중 부권에서 강한 강수 예외와 대류성 구름이 발달해 있는 것을 볼 수 있다.

Figure 11은 2017년 7월 15일 2100 UTC의 (a) AWS 1시간 누적 강수 분포와 (b) 규준실험 및 (c) EXP3의 9시간 예측 강수량을 비교한 것이다. 규준실험에서 강

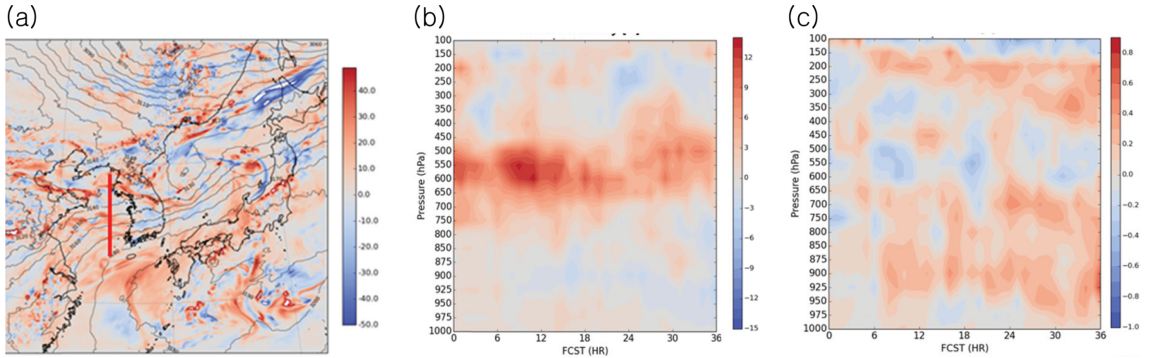


Fig. 12. (a) The difference of 700 hPa humidity field between EXP3 and OPER at 1200 UTC 15 July 2017, which is the initial analysis time. The mean difference of (b) humidity and (c) temperature in the west coast region (red line in (a)) along forecast lead time.

수 중심이 분리되어 분포하는 반면 EXP3의 경우 강수대의 형태가 AWS 관측 강수 분포와 거의 유사하며 강수 중심의 위치가 기준실험에 비해 납하한 것을 확인할 수 있다. 이러한 예측 강수량 차이의 원인을 보기 위해 초기 분석장을 살펴보았다. Figure 12a는 초기 분석시간인 7월 15일 1200 UTC의 700 hPa 수분장 차이를 나타낸 것으로 강수대가 위치한 전선면을 따라 EXP3이 기준실험에 비해 수증기가 증가하였다. 수증기 유입이 일어나고 있는 서해안 영역(Fig. 12a의 빨간 실선 영역)에서 평균한 수증기(Fig. 12b)와 온도(Fig. 12c)의 차이를 예측시간에 따라 고도 별로 비교하였다. 붉은색 계열은 EXP3에서 수증기나 온도의 증가를 파란색 계열은 감소를 의미한다. EXP3이 500~700 hPa의 초기장에 수분이 증가하였으며 이는 예측시간 내내 지속되고 6~12시간에서 가장 최대를 이룬다. 같은 시간대에 925~850 hPa의 온도가 기준실험보다 상승한 것을 볼 수 있다. 이는 상층 수분증가에 의해 하층의 온도가 상승하게 되고, 이에 의한 대류강화로 하층 강수에 영향을 미친다는 연구 결과(Zelinka and Hartmann, 2009)와도 일치한다. 이 사례는 위성자료동화가 중상층 수증기 정보를 개선하여 모델입력장에 추가하였을 때 대기 불안정도 증가 및 대류 강화를 통해 하층 강수에 미치는 사례이다.

4. 결 론

본 연구는 국지예보모델의 강수 예측정확도 개선을 위해 고해상도 마이크로파 자료동화를 추가하고, 이에 따른 모델예측민감도를 평가하였다. 현재 기상청 전구모델에는 다양한 위성자료가 동화되고 있는데 반해 국지예보모델의 자료동화체계에는 지면, 고층관측, 해상풍, 항공, 레이더 5종의 자료가 분석장 갱신에 사

용되고 있다. 국지예보모델에서 한반도 주변의 해상 전구모델에서 받은 경계장 정보에 의존하므로 정확한 대기상태를 모델에 반영하기 어렵다. 본 연구에서는 시공간적으로 밀도 있는 위성자료를 추가하고, 오염되지 않은 수증기 정보를 제공하기 위해 위성자료 전처리과정 중 구름탐지과정을 개선하여 국지예보모델에 최적화하였다. 구름탐지 시 구름영역의 모든 자료를 제거하기보다 육상 강수탐지 개선을 통해 강수에 의해 오염되지 않은 자료를 동화할 때 초기 수증기장을 비롯한 지위고도 개선이 컸다. 존재를 비롯한 위성 관측자료의 분석잔차 분석 및 ECMWF 분석장을 비교한 결과 MHS 자료의 민감고도인 대류권 중상층 850-300 hPa의 수분정보가 개선되었고, 특히 500 hPa에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대류권 중상층의 상대습도가 증가하여 건조함이 개선되고 이로 인해 지위고도장의 편차가 줄고 오차도 감소하는 결과를 보인다. 이러한 개선된 초기장은 모델의 예측 성능 향상에도 매우 긍정적인 영향을 보였다. 수증기장이나 지위고도와는 달리 온도의 오차는 소폭 증가하는 것으로 보인다. 이는 자료동화에서 오는 불균형을 조절하는 배경오차 공분산을 조정해야 할 필요가 있음을 제안한다.

지위고도 및 수분장 개선에 따라 1~20 mm hr⁻¹ 구간의 강수예측 검증지수가 높아지고, 강수개선효과 또한 27시간까지 유지되었다. 장마전선에 동반된 호우 사례 분석에서 대기의 중상층 수증기정보가 미치는 영향이 비교적 오래 지속되는 것을 알 수 있었고 이는 대류 불안정을 야기하여 하층 강수에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구 결과를 토대로 마이크로파 위성자료 동화를 기상청 국지예보모델에 반영하였으며, 향후 수치모델에 보다 정확한 수분 정보 제공을 위해 구름영역

의 자료동화를 추가하고, 수분이 집중되어 있는 하층 채널의 사용에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 마음속 깊은 감사를 드립니다. 연구가 진행되는 동안 같이 고민해준 김은희, 강희정, 최다영님께도 감사를 드립니다. 이 연구는 수치모델링센터 주요사업 ‘수치예보·지진업무 지원 및 활용연구(KMA-2018-00720)’의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Atkinson, N., 2017: AAPP User Guide. NWPSAF-MF-UD-036, 17 pp.
- Bauer, P., A. J. Geer, P. Lopez, and D. Salmond, 2010: Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances: Part I. Implementation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1868-1885, doi:10.1002/qj.659.
- Bennartz, R., A. Thoss, A. Dybbroe, and D. B. Michelson, 2002: Precipitation analysis using the advanced microwave sounding unit in support of nowcasting applications. *Meteorol. Appl.*, **9**, 177-189.
- Chang, D. E., T. K. Jang, Y.-H. Lee, and M.-J. Kim, 2002: The effect of assimilating ATOVS soundings on short-range forecast. *Atmosphere*, **12**, 40-43.
- Eyre, J. R., 1989: Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation. II: application to TOVS data. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 1027-1037.
- Geer, A. J., and Coauthors, 2017: All-sky satellite data assimilation at operational weather forecasting centres. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, doi:10.1002/qj.3202.
- _____, J. F. Baordo, N. Bormann, and S. English, 2014: All-sky assimilation of microwave humidity sounders. ECMWF Tech. Memo., 741 pp.
- Harris, B. A., and G. Kelly, 2001: A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. 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. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 495-505.
- Hong G., G. Heygster, J. Notholt, F. Weng, and Q. Liu, 2010: Simulations of microwave brightness temperatures at AMSU-B frequencies over a 3D convective cloud system. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 1781-1800, doi:10.1080/01431160902926640.
- Joo, S. W., E. J. Lee, and H. C. Shin, 2005: Development on the direct assimilation technique of ATOVS radiance in 3DVAR of the KMA global model. KMA-TN-2005-04, 48 pp (in Korean).
- Jung, J. H., and M. S. Seo, 2005: Characteristics and Types of the Diurnal Variation of Hourly Precipitation during Rainy Season over South Korea. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.*, **41**, 533-546 (in Korean with English abstract).
- Karbou, F., E. Gérard, and F. Rabier, 2010: Global 4DVAR assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part I: Impacts of various land surface emissivity parameterizations. *Wea. Forecasting*, **25**, 5-19, doi:10.1175/2009WAF2222243.1.
- Kim, S.-M., and H. M. Kim, 2017: Adjoint-based observation impact of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) on the short-range forecast in East Asia. *Atmosphere*, **27**, 93-104, doi:10.14191/Atmos.2017.27.1.093 (in Korean with English abstract).
- Lee, E. H., Y. S. Kim, H. C. Shin, and M. S. Lee, 2009: MetOp IASI data assimilation in Unified Model in KMA. *Proc. Fall Meeting KMS*, Daegu, Korea, Korean Meteorological Society, 300-301 (in Korean).
- Lee, Y. H., H. Y. Lee, J. Lee, K. H. Lee, and D. J. Kim, 2015: Evaluating the precipitation forecast by extension of variable grid area in KMA convective scale model(LDAPS). *Proc. Spring Meeting KMS*, Seoul, Korea, Korean Meteorological Society, 5-6 (in Korean).
- Lorenc, A. C., and F. Rawlins, 2005: Why does 4D-Var beat 3D-Var?. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3247-3257.
- Mesinger, F., and T. L. Black, 1992: On the impact on forecast accuracy of the step-mountain(eta) vs. sigma coordinate. *Meteor. Atmos. Phys.*, **50**, 47-60.
- Muller, B. M., H. E. Fuelberg, and X. Xiang, 1994: Simulations of the effects of water vapor, cloud liquid water, and ice on AMSU moisture channel brightness temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, **33**, 1133-1154.
- Qin, Z. K., and X. L. Zou, 2016: Development and initial assessment of a new land index for microwave humidity sounder cloud detection. *J. Meteor. Res.*, **30**, 12-37, doi:10.1007/s13351-016-5076-4.
- Saunders, R., M. Matricardi, and A. Geer, 2010: RTTOV-9 Users Guide. NWPSAF-MO-UD-016, Exeter, UK, 57 pp.
- Sohn, B. J., G.-H. Ryu, H.-J. Song, and M.-L. Ou, 2013: Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean peninsula inferred

- from TRMM measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3873-3888, doi:10.1175/MWR-D-13-00075.1.
- Song, H.-J., and B. J. Sohn, 2015: Two heavy rainfall types over the Korean peninsula in the humid East Asian summer environment: A satellite observation study. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 363-382, doi:10.1175/MWR-D-14-00184.1.
- Weston, P., 2014: Assimilating IASI data into the UKV. Met Office SA Technical Memo., 15, 30 pp.
- Zelinka, M. D., and D. L. Hartmann, 2009: Response of humidity and clouds to tropical deep convection. *J. Climate*, **22**, 2389-2404.
- Zou, X. L., Z. K. Qin, and F. Z. Weng, 2013: Improved quantitative precipitation forecasts by MHS radiance data assimilation with a newly added cloud detection algorithm. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3203-3221, doi: 10.1175/MWR-D-13-00009.1.