

WRF 모형에서 한반도 여름철 강수 예측에 모의영역이 미치는 영향

김형규¹⁾ · 이해영¹⁾ · 김주완^{1)*} · 이승우²⁾ · 부경운³⁾ · 이송이¹⁾

¹⁾공주대학교 대기과학과, ²⁾기상청 수치모델링센터 수치자료응용과,
³⁾국립기상과학원 현업운영개발부

(접수일: 2020년 10월 21일, 수정일: 2020년 12월 12일, 게재확정일: 2021년 1월 7일)

Effect of Model Domain on Summer Precipitation Predictions over the Korean Peninsula in WRF Model

Hyeong-Gyu Kim¹⁾, Hye-Young Lee¹⁾, Joowan Kim^{1)*}, Seungwoo Lee²⁾,
Kyung On Boo³⁾, and Song-Ee Lee¹⁾

¹⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

²⁾Numerical Data Application Division, Numerical Modeling Center,
Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

³⁾Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 21 October 2020; revised 12 December 2020; accepted 7 January 2021)

Abstract We investigated the impact of domain size on the simulated summer precipitation over the Korean Peninsula using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Two different domains are integrated up to 72-hours from 29 June 2017 to 28 July 2017 when the Changma front is active. The domain sizes are adopted from previous RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) and current LDAPS (Local Data Assimilation and Prediction System) operated by the Korea Meteorological Administration, while other model configurations are fixed identically. We found that the larger domain size showed better prediction skills, especially in precipitation forecast performance. This performance improvement is particularly noticeable over the central region of the Korean Peninsula. Comparisons of physical aspects of each variable revealed that the inflow of moisture flux from the East China Sea was well reproduced in the experiment with a large model domain due to a more realistic North Pacific high compared to the small domain experiment. These results suggest that the North Pacific anticyclone could be an important factor for the precipitation forecast during the summer-time over the Korean Peninsula.

Key words: Domain size, precipitation, sensitivity test, WRF model, Korean Peninsula

1. 서 론

지난 수십 년간, 수치모형을 이용한 다양한 시공간 규모의 기상 현상의 예측에서 해상도, 수치해법, 물리 과정 등 수치모델링 기술의 발달은 수치예보의 정확

도를 지속적으로 향상시켜왔다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 국지적으로 발생하는 여름철 강수는 예측선행 시간이 짧아 모델의 예측성을 제한하는 요소로 작용한다. 또한 한반도에서의 여름철 강수의 양상은 지속성이 약해지며 집중성과 강도는 강해지는 경향을 보이고 있다(An et al., 2011; Hong et al., 2011). 뿐만 아니라 온난화에 따른 기후변동은 강수 예측에 대한 불확실성을 더욱 증가시키고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 여름철 집중호우의 특성에 대한 이해를 높이고 수치모델의 예측성능을 향상시키기 위한

*Corresponding Author: Joowan Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju 32588, Korea.
Phone: +82-41-850-8528, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: joowan@kongju.ac.kr

많은 연구들이 진행되고 있다.

한반도에서 발생하는 집중호우의 특성에 관한 선행 연구 결과들을 보면, 집중호우는 대류가용잠재에너지가 작고 열적 중립인 대기불안정도의 특징을 보이며 (Hong, 2004), 중- β 에서 중- α 규모의 구름 무리에서 주로 발생하는 특징을 보였다(Lee and Kim, 2007). 또한 위성 자료를 이용한 연구에서 한반도의 집중호우는 온난 강수 형태가 지배적임을 보였다(Song and Sohn, 2015). 수치 모델을 이용한 연구에서는 복잡한 지형에 의해 집중호우가 강화되며(Hong and Lee, 2009) 초기 GPS 수증기 자료의 동화가 강수 예측성 향상에 기여하는 것으로 밝혀졌다(Kim et al., 2015). 이 외에도 수치모델의 물리, 역학적 특성들이 집중호우의 예측성에 미칠 수 있는 영향에 대한 다양한 연구(예, Jeong et al., 2016; Lee et al., 2017)가 진행되었다.

한편, 초기 및 경계조건, 물리과정, 분해능 등 수치 모델 고유의 불확실성은 수치예보시스템의 정확도에 크게 영향을 미친다(Gebhardt et al., 2011; Peralta et al., 2012). Li et al. (2016)은 Weather Research and Forecasting (WRF) 모형을 이용해 홍수가 발생하는 계절에 대해 모델 해상도, 모의 영역 크기, 물리모수화 방법이 여름철 강수의 예측성에 상당한 영향을 미침을 보였다. Wang et al. (2016)도 호우 모의에서 해상도와 모델 영역의 크기가 물리과정만큼 많은 불확실성이 존재함을 보였다. 이 외에도 연직 해상도(Aligo et al., 2009), 도메인 구성 옵션 및 스핀업 시간(Chu et al., 2018)이 강수 산출물의 정확성과 신뢰성을 향상시키는데 중요한 요소가 될 수 있다.

특히 Goswami et al. (2012), Goswami and Mohapatra (2014)는 모의 영역 크기가 격자 간격, 초기 조건과 함께 지역 모델의 예측성에 중요한 역할을 하는 것을 보였다. 또한 Dash et al. (2015)은 인도와 남아시아 영역의 몬순에 대한 지역기후모의에서 모의 영역의 크기를 줄이는 경우, 인도의 여름철 장마 기간에 대한 강수가 크게 줄어들 수 있음을 보였다. 한반도의 여름철 집중호우에 대해서도 이와 유사한 결과가 보고되었으며(Min et al., 2016), 이러한 결과는 동아시아의 여름 몬순 및 집중호우 예측에 모의 영역의 설정이 중요한 영향을 미친다는 것을 시사한다. 이러한 연구들에 맞춰 최근 기상청에서는 기존에 사용하던 지역수치예보모델(Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS) 대신 수평해상도 1.5 km 격자를 가진 국지수치예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)의 모의 영역을 확장하여 예보에 활용하고 있다.

그러나 강수 예측에 대한 지역 사례연구에 있어 모의 영역은 모델 물리 과정에 비해 유의하지 않은 효과로 인해 덜 주목받았으며(Chu et al., 2018), 기존의

연구도 사례 중심의 민감도 실험에 그쳐, 이에 대한 연구가 부족한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 2017년 7월 한달 기간 동안 발생했던 여름철 강수 사례들을 1일 간격으로 연속적으로 모의함으로써 모델의 모의 영역이 한반도 여름철 강수의 단기 예측 성능에 미치는 영향과 그 원인을 살펴보고자 한다. 2장에서는 분석에 사용된 자료 및 모델 실험 설정을 서술하였으며, 3장에 실험 결과와 물리적 원인을 분석하였다. 마지막으로 4장에 요약 및 토의를 서술하였다.

2. 연구 방법

2.1 자료 및 사례

수치예보 모델의 강수 예측 성능을 평가하기 위해 기상청에서 제공하는 2017년 7월 1일부터 31일까지의 기간에 대한 1시간 해상도의 중관기상관측자료(ASOS, Automated Synoptic Observing System)를 사용하였다. 분석 기간 동안 96개 지점의 관측소 자료를 이용하였으며, 연구에서 사용된 관측소의 위치는 Fig. 1a와 같다. 해당 기간 동안 영향이 큰 집중호우를 파악하기 위해 인구가 많이 분포하는 중요 도시에 위치한 10개의 관측소(서울, 인천, 수원, 청주, 대전, 전주, 광주, 대구, 부산, 제주)를 선정 한 후, 일 누적 강수량을 분석하였다(Figs. 1b, c). 2017년 7월 3~4일에는 강원도를 중심으로 나타났던 집중 호우가 중부 지방까지 영향을 미쳤으며, 선정된 중부 지방의 도시들에 대해 평균적으로 약 100 mm의 강수가 관측된 것을 확인하였다. 11일에는 수도권 지역의 관측소에 대해 평균적으로 약 90 mm의 강수가 내렸으며 서울에서는 120 mm에 가까운 강수를 확인하였다. 며칠 후인 16~17일에는 청주에 290 mm의 많은 강수가 집중되어 큰 피해를 유발하였다. 또한 해당 기간 동안, 남부 지방에 비해 중부 지방에서 강수가 더 빈번하고 강하게 발생하였다.

2.2 실험 설계 및 모델 구성

모델의 영역이 한반도 여름철 강수의 예측성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 비정역학 중규모 모델인 WRF v4.0 모델(Skamarock et al., 2019)을 사용하였다. WRF 모델을 수행하기 위한 입력 자료로 전지구 범위의 6시간 간격, N128의 가우시안 격자($\Delta x=0.75^\circ$)로 구성되어 있는 the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Re-Analysis Interim (ERAInterim) 자료를 사용하였다. 모의 영역에 따른 예측 성능 비교를 위해 동아시아의 넓은 지역을 포함하는 영역(DMI)의 모델을 수행한 뒤, one-way nesting을 이용하여 크기가 서로 다른 두 동지 격자를 구성

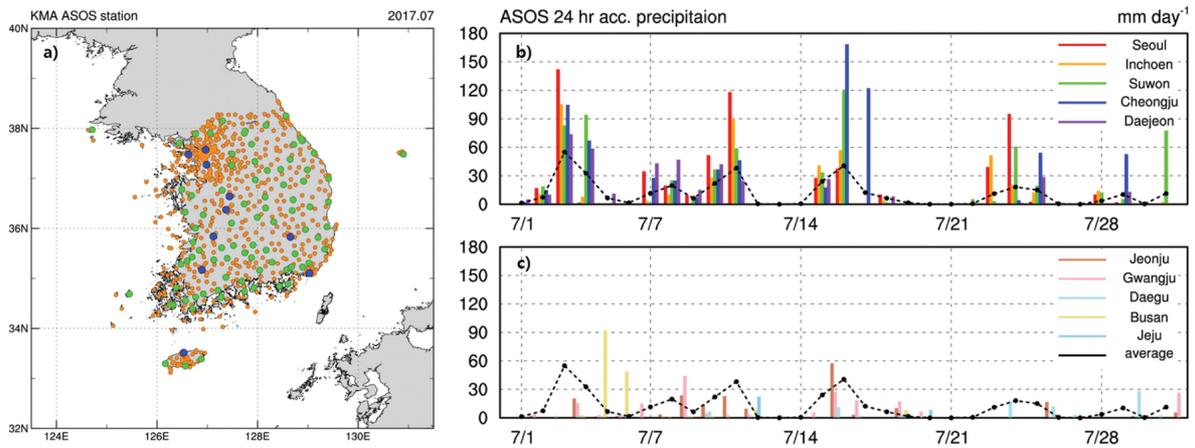


Fig. 1. (a) Locations of KMA weather stations for ASOS (green) and AWS (orange). The blue dots are selected ten stations of ASOS which locate in large cities. (b, c) Cumulative daily precipitation for the ten selected stations. The black line indicates averaged precipitation of the selected ten stations.

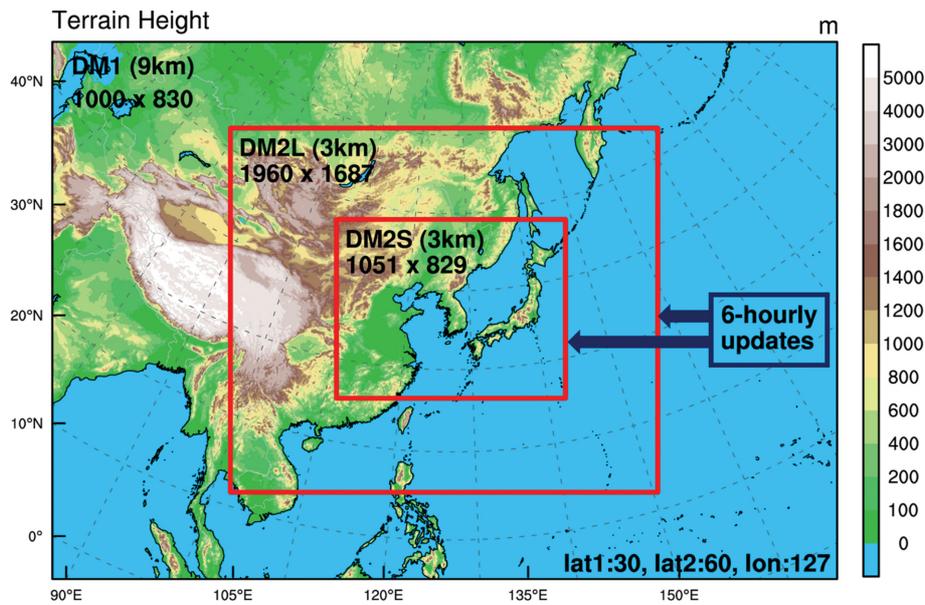


Fig. 2. Domain configurations used for the model experiments. Number at the top-left corner indicate horizontal resolution and the number of grids in the domain. Both DM2L and DM2S are simulated using DM1 data for their lateral boundaries every 6 hours.

하였다. 예측성 비교를 위한 실험 모의 영역은 기상청에서 현업으로 사용했던 지역수치예보모델(RDAPS) 영역(이 실험의 DM2L)과 현재 국지수치예보모델(LDAPS)에 사용되는 영역(이 실험의 DM2S)으로 설정하였으며, 두 실험 모두 어미 영역인 DM1에서 6시간마다 측면 경계 자료를 받도록 구성되었다. 모의 영역에 대한 동서와 남북으로의 격자 수(및 해상도)는

DM1이 1000×830 (9 km), DM2L는 1960×1687 (3 km), DM2S는 1051×829 (3 km)이며, 해당 영역을 Fig. 2에 나타내었다. 모든 모델 실험은 45개의 연직층과 30 hPa의 모델 최상층 기압을 이용하였으며, 적분 시간 간격은 9 km 해상도의 어미 격자의 경우, 32초를, 3 km 해상도의 두 등지 격자 실험은 15초를 적용하였다. 모든 실험은 2017년 6월 29일부터 7월 28일까지의

Table 1. Summary of the WRF model configuration.

Model	WRF v4.0		
Domain	Domain 1	Domain 2 Large	Domain 2 Small
Horizontal grid spacing (km)	1000 × 830 (9 km)	1960 × 1687 (3 km)	1051 × 829 (3 km)
Time step (s)	32	15	15
Vertical layers/Model top	45 Sigma layers/30 hPa		
Grid nesting	One-way nesting		
Initial/Boundary condition	ERA-Interim (N128)	Domain 1	
Case/Integrated time	29 June 2017~28 July 2017 (72 hours in one case)		
Longwave/Shortwave radiation	RRTMG		
Microphysics	WSM5		
Planetary boundary layer	Shin and Hong		
Land surface model	Noah LSM		
Shallow convection	GRIMS		
Deep convection	New SAS	None	
Gravity wave drag	GWDO		

Table 2. Contingency table for verification of 1-day accumulated rain.

Total events = $H + F + M + C$		Observation	
		Yes	No
Forecast	Yes	H (Hit)	F (False alarms)
	No	M (Miss)	C (Correct negative)

기간에 대해 일별 0000 UTC를 초기 시간으로 각 날짜에 대해 72시간 예측을 수행하였다. 모델의 물리 과정은 차세대 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)에 사용되는 것과 유사한 모수화 과정(Hong et al., 2018)을 적용하였으며, 장파/단파 복사는 RRTMG (Iacono et al., 2008), Microphysics는 WSM (WRF Single Momentum) 5 Class (Hong et al., 2004), 행성 경계층은 Shin and Hong (Shin and Hong, 2015), 지면 모델은 Noah LSM (Tewari et al., 2004), 얇은 대류는 GRIMS (Hong and Jang, 2018), 중력과 항력은 GWDO (Kim and Arakawa, 1995; Hong et al., 2008; Choi and Hong, 2015)를 사용하였다. 깊은 대류의 경우, DM1에 대해서만 New SAS (Kwon and Hong, 2017)를 적용하였으며, DM2L, DM2S에 대해서는 별도의 모수화를 적용하지 않았다. 앞서 언급한 실험 설정들은 Table 1에 요약하였다.

2.3 강수 예측 성능 검증

모델의 강수 예측 성능을 파악하기 위해 특정 임계값을 기준으로 예측값과 관측값을 분할표(Contingency

Table)를 이용하여 비교하는 양분예보지수를 사용하였다. 관측 공백에 의한 효과를 최소화하고자 ASOS에 비해 많은 관측 지점을 운영하고 있는 방재기상관측자료(AWS, Automatic Weather System)를 사용하여 양분예보지수를 계산하였으며, 총 498개의 관측 자료를 사용하였다(Fig. 1a). 본 연구에서는 모델에서 모의된 강수의 예측 성능 평가에 주로 사용되는 성공임계지수(Threat Score, TS)와 공정임계지수(Equivalent Threat Score, ETS), 치우침지수(Bias Score, BS)를 이용하였다. 지수를 계산하는데 사용되는 분할표는 Table 2와 같으며, 각 지수는 다음과 같이 정의된다.

$$TS = \frac{H}{H + M + F} \quad (1)$$

$$ETS = \frac{H - a}{H + M + F - a} \quad \left(\text{where } a = \frac{(H + M) \times (H + F)}{H + M + F + C} \right) \quad (2)$$

$$BS = \frac{H + F}{H + M} \quad (3)$$

성공임계지수의 경우, 0과 1 사이의 값을 가지며 1

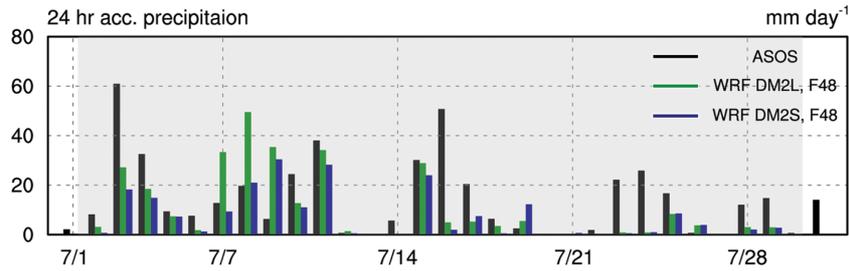


Fig. 3. Averaged cumulative daily precipitation for the ten selected stations. Each result indicates ASOS (black), DM2L (green), and DM2S (blue) for a 48-hr forecast. The gray shade shows the analysis period, which is the overlapping period between ASOS and model experiments.

에 가까울수록 완벽한 예보에 가까운 결과를 나타낸다. 공정임계지수는 -1/3과 1 사이의 값으로 나타나며, 0보다 작을 경우 임의 추정한 것보다 예보 능력이 없는 것을 의미한다. 치우침지수는 1에 근접할수록 예보가 어느 한쪽으로 치우쳐지지 않게 나오는 것을 의미한다. 이러한 지수들은 분석 기간 동안 전반적인 강수 사례에 대한 모형의 강수 예측 성능을 파악하는데 활용되었다.

모델의 수분속(moisture flux) 분석을 위해 Fasullo and Webster (2003)에서 사용된 수분속(VIMT, Vertically Integrated Moisture Transport, Eq. 4)을 활용하였다.

$$VIMT = \int_{1000 \text{ hPa}}^{700 \text{ hPa}} qU dp \quad (4)$$

여기서 q 는 혼합비를, U 는 수평 바람장을 의미한다. Fasullo and Webster (2003)에서는 300 hPa 아래의 범위에 대해 수분속 계산을 수행하였으나 본 연구에서는 하층에서의 수증기 수송을 분석하기 위해 700 hPa보다 아래에서의 수분속을 분석에 사용하였다. 700 hPa보다 높은 고도에서는 혼합비의 값이 작아지므로 하층 수분속의 계산에 큰 차이를 보이지 않는다(그림 미포함).

3. 결 과

3.1 강수 예측성능 검증

모델의 전반적인 강수 시계열 재현 능력을 확인하기 위해 ASOS와 48시간 예측 실험에 대한 선정된 관측소에서의 평균 일 강수량을 분석하였다(Fig. 3). 7월 1일 0000 UTC부터 하루 간격으로 72시간 동안 모델을 적분 수행하였기 때문에 동일한 기간에 대해 모델 예측장끼리 비교할 수 있는 7월 2~29일까지의 기간을 분석에 활용하였다. 모의 영역을 달리한 두 실험 모두 7월 16일의 강수는 잘 모의하지 못하였는데, 이는 사례의 국지적 특성이 매우 강하여 집중 강수

영역을 예측하는데 실패했기 때문이다. 청주에서 발생한 이 국지성 집중호우 사례를 제외하고는 전반적으로 강수 예측 결과가 ASOS에서 관측된 강수와 유사한 결과를 보인다.

2017년 7월 강수의 지역별 모의 성능을 확인하기 위해 7월 누적 강수의 공간 분포를 Fig. 4에 나타내었다. ASOS의 누적 강수 분포를 보면 태백산맥을 기준으로 중부 지방의 서쪽에 강수가 집중되었던 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 1b에서 중부 지방의 관측소에 강수가 집중되어 나타났던 7월 16일의 청주 사례에 의한 것으로 판단된다. 이러한 강수 특성은 AWS로 나타낸 누적 강수 분포에서도 확인할 수 있다. 24시간 모델 예측장에서는 산맥 근처에 강수가 집중되어 있는 분포를 보이고 있으며, 이는 지형에 의한 영향이 반영되는 것으로 보인다. 앞서 ASOS에서 보인 관측 강수 분포와 비교하였을 때, DM2L, DM2S는 충청도 지역의 강수를 잘 모의하지 못하였으나, 경기도 및 강원도 산간 지역의 강수를 유사한 수준으로 모의하고 있다. 하지만 48, 72시간 모델 예측장에 대해서는 DM2L에서의 강수가 DM2S에 비해 넓은 영역에서 나타나고 있으며, 특히 충청도 지역에서 뚜렷한 강수 증가를 보인다. 이러한 차이는 7월 16일 청주 호우 사례에서도 DM2L가 DM2S보다 개선된 강수 예측 성능을 나타내는 요인으로 작용한다. 일반적으로 DM2L에서의 강수가 DM2S에 비해 더 강하게 모의하는 특징이 지속적으로 나타나며 72시간 모델 예측장에서는 DM2L가 강한 강수량을 과다모의하는 경향을 보인다.

DM2L와 DM2S의 강수예측성능을 정량적으로 평가하기 위해 양분예보지수를 다양한 임계값(threshold value)에 대하여 계산하였다(Fig. 5). 분석을 위해 498개의 AWS 자료와 각 모델 실험의 일 강수 자료를 사용하였으며, 모델의 경우 관측 지점과 가장 가까운 격자점의 자료를 이용하였다. 본 연구에서의 양분예보지수는 높은 강수 예측성을 보이는 것은 아니나, 기

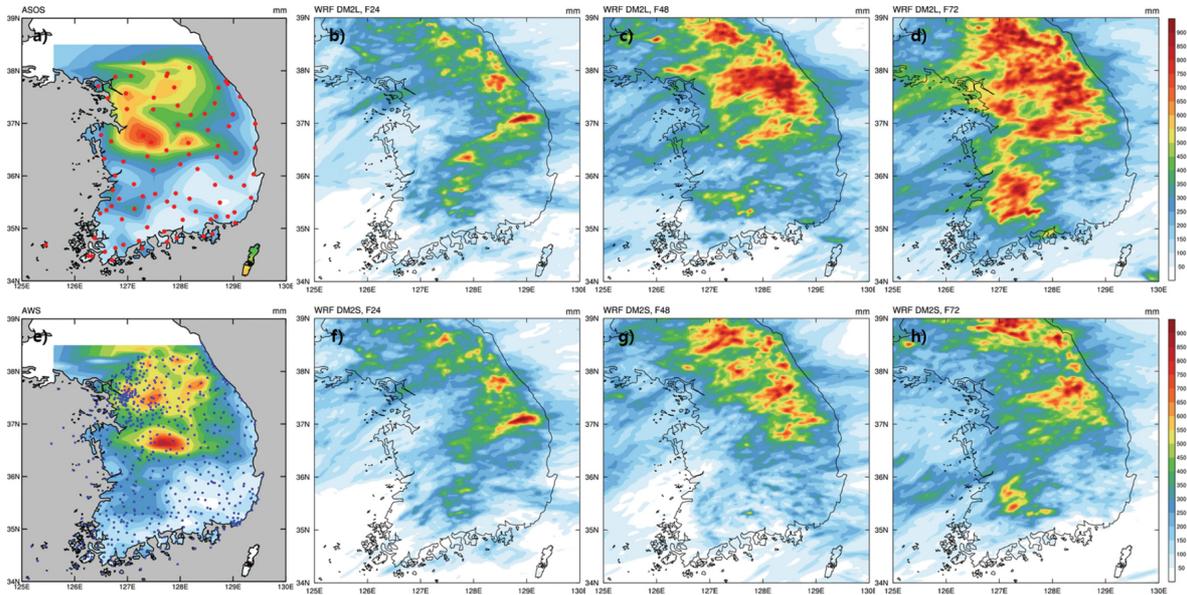


Fig. 4. Horizontal distribution of accumulated precipitation from 2 July to 29 July for 2017. (a) ASOS, (b-d) 24, 48, 72-hr forecasts from DM2L, (e) AWS, and (f-h) 24, 48, 72-hr forecasts from DM2S.

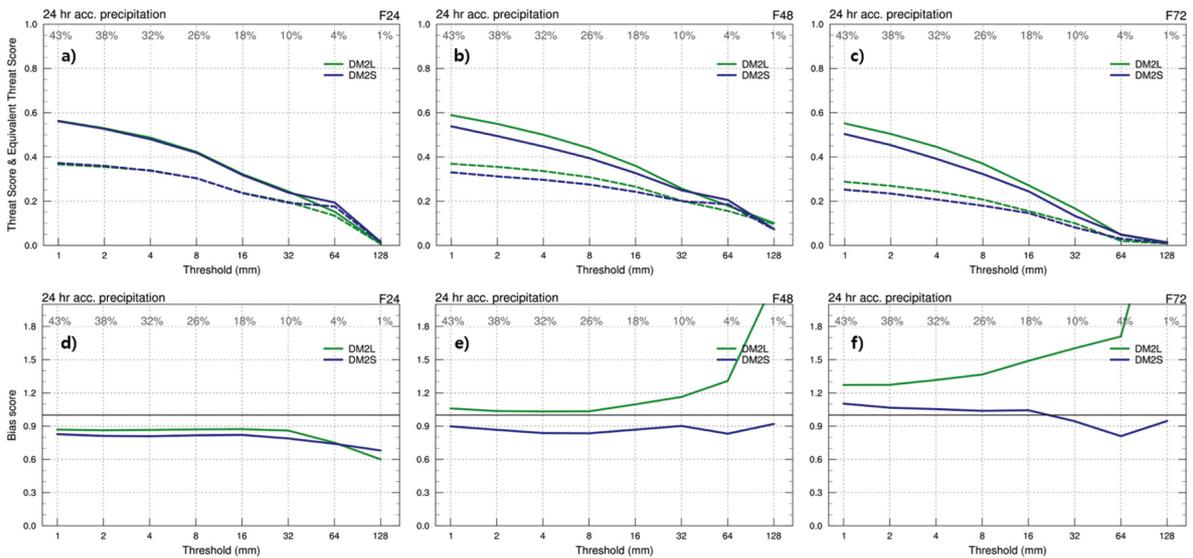


Fig. 5. (a-c) Threat score (solid line) and equivalent threat score (dashed line) of 1-day accumulated precipitation for 24, 48, 72-hr forecasts. (d-f) The same as in the upper panel but for bias score. Results for DM2L and DM2S indicate green and blue, respectively. The rate of samples (in %) for each threshold is shown at the top of the figure.

존 문헌들에서 제시된 값과 유사한 범위를 보이고 있다(e.g. Han et al., 2016). 또한 일부 강수 차이가 존재하나 분석에 중요한 강수 사례들을 모델이 잘 모의하고 있으므로, 한반도 강수 분석에 문제가 없을 것으로 판단된다.

모델 실험의 24시간 예측 결과에서는 강수 강도와 관계없이 두 모의 영역에 따른 지수 간 차이가 매우 작은 반면(Fig. 5a), 48시간 이상의 예측 결과에서는 모의 영역이 넓은 DM2L에서 16 mm 이하의 강수에 대한 성공임계지수 및 공정임계지수가 유의하게 높은

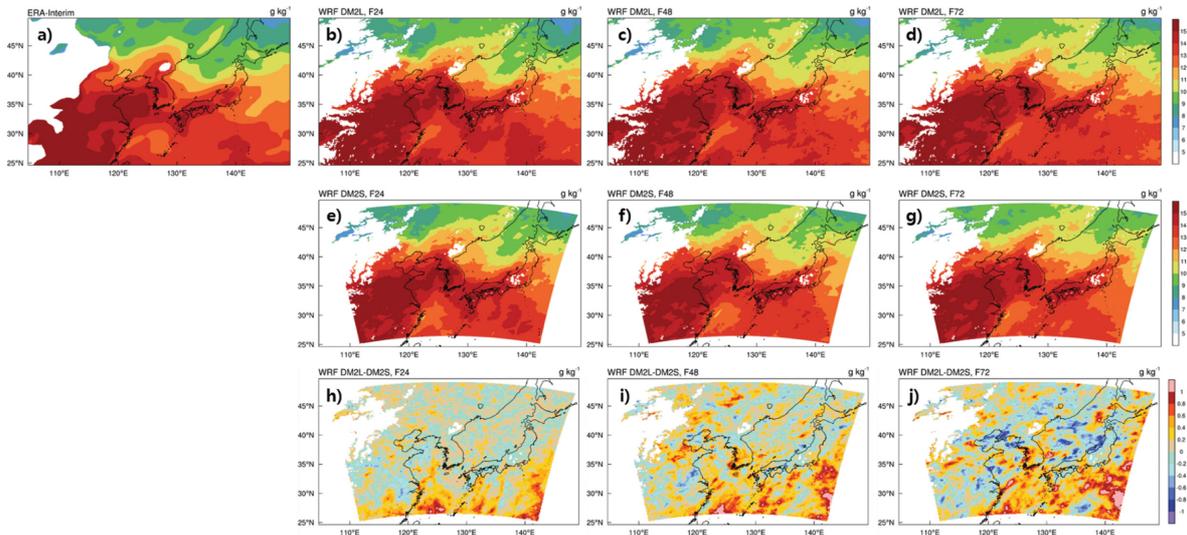


Fig. 6. Horizontal distribution of 900-hPa mixing ratio averaged from 2 July to 29 July 2017 for (a) ERA-Interim, (b-d) 24, 48, 72-hr forecasts of DM2L, and (e-g) DM2S. (h-j) Differences between DM2L and DM2S (DM2L-DM2S) for 24, 48, 72-hr forecasts are also shown.

것을 확인할 수 있다(Figs. 5b, c). 이는 DM2L의 강수 분포가 DM2S에서 모의된 강수에 비해 더 관측과 유사하기 때문에 판단된다. 강수 임계값이 클수록 강수로 판단되는 관측 사례와 관측소가 적기 때문에 높은 임계값에서의 성공임계지수는 크게 감소하지만 7월과 같은 우기에는 32 mm day^{-1} 이상의 강수도 관측 전체 강수의 10%를 차지하여 32 mm day^{-1} 수준의 임계값 결과도 유의미한 해석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

치우침 지수의 경우, 24시간 예측 결과에 대해서는 두 모의 영역에 대한 결과가 비슷하게 나타나며(Fig. 5d), 그 외의 예측 시간에 대해서는 DM2L에서의 치우침 지수가 DM2S에 비해 큰 경향을 보인다. 이러한 결과는 DM2L의 강수가 예측 시간이 증가함에 따라 DM2S에 비해 과다모의되는 특징을 반영하는 결과이다(Fig. 4).

따라서 한반도에서의 24시간 강수 예측에서는 모의 영역에 따른 예측 성능 차이가 뚜렷하지 않으며, 24시간 이하의 초단기 강수 예측에 있어 모의 영역에 대한 효과가 미미할 것으로 판단된다. 이와 반대로 48, 72시간 강수 예측에 대해서는 모의 영역이 예측 성능에 유의한 영향을 주며, 이는 모의 영역의 설정에 따라 48시간 이상의 강수 예측 결과가 바뀔 수 있음을 암시한다.

3.2 강수 예측 성능의 향상 요인

앞서 보인 강수 예측 성능 및 누적 강수 차이가 어

디서 기인하는지 확인하기 위해 7월 한 달에 대한 900 hPa에서의 평균 혼합비를 분석하였다(Fig. 6). ERA-Interim과 비교하였을 때, 두 실험 모두 전반적으로 유사한 혼합비 분포를 나타낸다. 하지만 실험 간 혼합비 분포에 대한 차이는 예측 시간이 증가함에 따라 DM2L의 혼합비가 DM2S에 비해 한반도에서 높은 값을 나타내며, 동중국해까지 이어지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 700 hPa 이하의 평균 하층 수분속과 850 hPa에서의 바람장을 나타낸 것이다. 모든 예측장에서의 DM2L가 DM2S에 비해 동중국해로부터 유입되는 남서풍을 더 강하게 모의하며, 북태평양 고기압의 경계를 따라 하층 수분속 또한 크게 나타난다. 이러한 특징이 24시간 예측장에 비해 48, 72시간 예측장에서 더 강하게 나타나며, 앞서 보인 한반도에서의 높은 혼합비(Fig. 6)는 동중국해를 통한 수증기의 유입으로 인해 나타난 결과로 보인다.

본 연구에 사용된 분석 기간은 2017년 7월 2일부터 7월 29일까지로 2017년 6월 24일부터 7월 29일까지 발생했던 장마 기간의 대부분이 포함되어 있다. 때문에 분석 기간에 대한 한반도 강수의 정확한 예측을 위해서는 장마철의 평균적인 종관 배경 및 순환장을 정확히 모의하는 것이 중요하다. 특히 한반도 장마 전선 발달에는 북태평양 고기압의 확장이 중요한 역할을 하며, 북태평양 고기압의 확장에 의해 유도되는 강한 남서 기류는 적도의 수증기를 한반도로 수송하여, 한반도 여름철 강수 현상에 중요한 영향을 미친다

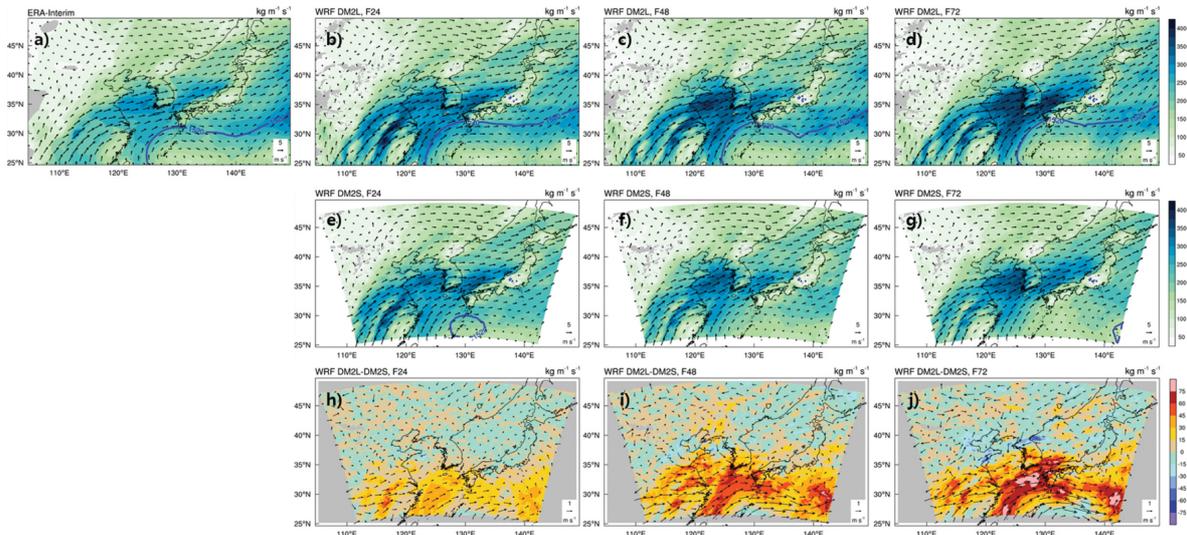


Fig. 7. Same as Fig. 6, but for VIMT (shaded) and 850-hPa wind (vector). Blue line indicates geopotential height for 1520 gpm at 850-hPa.

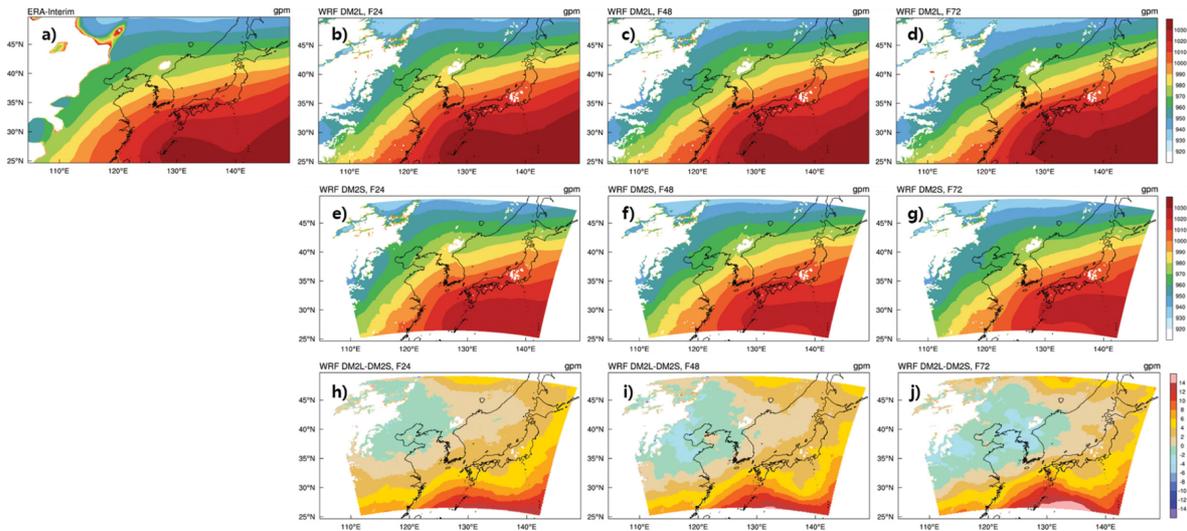


Fig. 8. Same as Fig. 6, but for geopotential height at 900-hPa.

(Sohn et al., 2013). 이러한 특성이 모델 실험에서 잘 재현되고 있는지 확인하기 위해, 예측 시간 별 지위 고도의 분포를 분석하였다.

Figure 8은 900 hPa에서의 일 평균 지위고도의 분포를 나타낸다. 두 실험에서 모의된 지위고도의 분포는 전반적으로 ERA-Interim과 유사하지만 북태평양 고기압 지역에서 유의미한 차이가 나타나며, 특히 DM2S에 비해 DM2L에서 북태평양 고기압의 강도가 강하게 모의되는 것을 볼 수 있다. 이러한 특징은 모든 예

측장에서 일관되게 나타나며, 북태평양 고기압의 확장부가 측면 경계와 가까운 DM2S에서 6시간 주기로 갱신되는 측면 경계가 북태평양 고기압을 정확하게 모의하는데 충분하지 않음을 암시한다. 이와 반대로 DM2L에서는 북태평양 고기압의 확장이 현실적으로 모의되며, 모의 영역이 DM2S보다 더 넓기 때문에 ERA-Interim과 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.

한반도로 유입되는 하층 수분속은 동중국해에서의 남서 기류에 비례하며, 바람의 상당부분은 기압경도

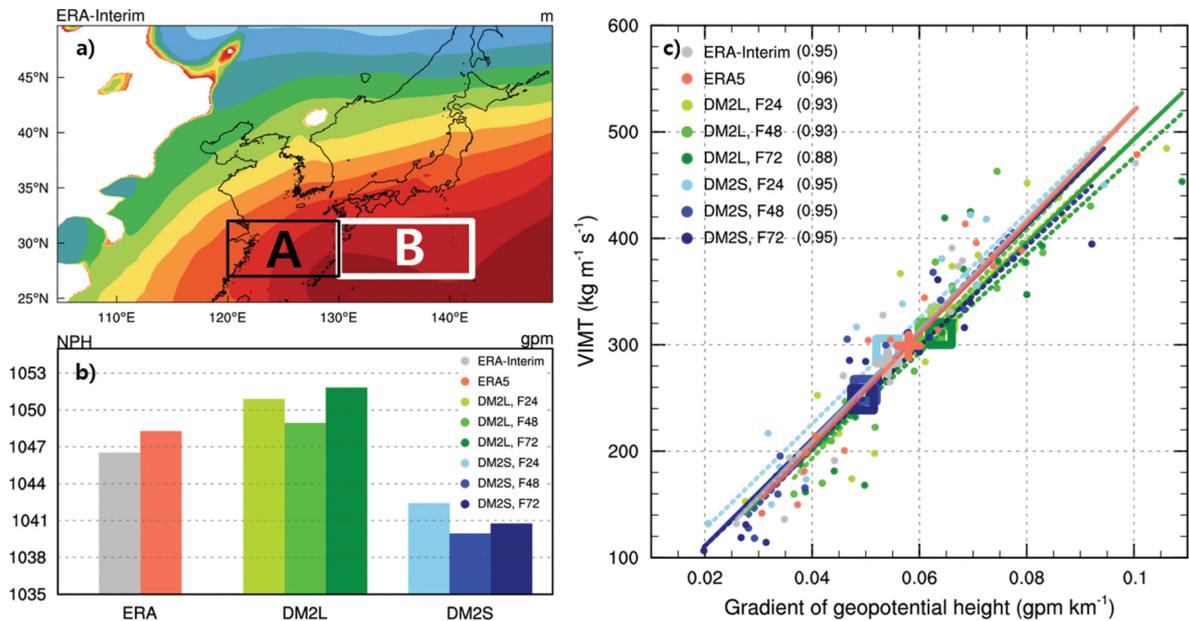


Fig. 9. (a) Same as Fig. 8a. (b) 900-hPa geopotential height for the area B (white box) in Fig. 9a. (c) Scatter plot for VIMT and gradient of geopotential height in the area A (black box). Each dot indicates the result of a 1-day case for ERA-Interim (gray), ERA5 (orange), 24, 48, 72-hr forecasts of DM2L (green), and DM2S (blue). The plus and square dot represents averaged results for reanalysis and forecast data. Each line indicates the regression result for each experiment (dashed) and averaged results for a domain (solid). The correlation coefficient between meridional VIMT and gradient of geopotential height is shown in brackets.

력으로 설명된다. 모델 실험 간 나타나는 북태평양 고기압의 지위고도 차이는 주변의 지위고도 경도를 변화시키며, 한반도로 유입되는 수증기에 영향을 미칠 수 있다. 북태평양 고기압에 따라 나타나는 하층 수분속의 변화를 확인하고자 기존 연구들(Kamae et al., 2019; Shi et al., 2020; Yeo et al., 2020)에서 공통적으로 동아시아 여름 몬순 시기에 수증기의 유입이 강하게 나타나는 것으로 알려진 A 영역(120-130°E, 27-37°N)과 북태평양 고기압의 확장이 두드러지는 B 영역(130-142°E, 27-37°N)을 선정하여(Fig. 9a), A 영역에 대해서는 하층 수분속 및 지위고도의 경도를, B 영역에 대해서는 지위고도를 지역 평균한 뒤, DM2S와 DM2L의 비교 분석을 진행하였다(Figs. 9b, c). 태풍에 의한 효과를 제외하고자 2017년 제 5호 태풍 노루가 나타난 7월 20일 이후의 기간을 제외하고 분석을 수행하였으며, 해상도가 수분속의 강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 고해상도 ERA5 자료($\Delta x \sim 0.281^\circ$)를 추가로 분석하였다.

ERA-Interim과 DM2S에서의 북태평양 고기압의 지위고도를 비교하였을 때(Fig. 9b), 모델의 측면 경계에 위치하는 B 영역에서의 지위고도는 평균적으로 6

gpm 가장 약하게 모의된다. 이와 반대로 DM2L에서는 약 3 gpm의 다소 강한 지위고도가 나타나며, DM2S의 결과에 비해 비교적 ERA-Interim과 유사한 지위고도가 나타난다. 또한 고해상도의 자료인 ERA5와의 비교에서도 DM2S에 비해 DM2L에서의 지위고도가 더 유사하게 나타나, A 영역에서의 지위고도 경도가 DM2S에 비해 강하게 나타난 것으로 생각할 수 있으며, 하층 수분속 또한 DM2L에서 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 모든 실험에서 지위 고도의 경도와 하층 수분속에 대한 회귀직선의 기울기는 양의 값을 가지며, 모든 분석에서 0.88 이상의 매우 높은 상관관계를 보인다. 따라서 정확한 북태평양 고기압의 모의는 한반도로 유입되는 수증기의 수송을 조절하여 한반도 여름철 강수에 대한 단기 예측성 향상에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

DM2S와 비교하여 DM2L에서 모의되는 북태평양 고기압의 지위고도는 재분석자료(ERA-Interim, ERA5)와 잘 일치하나, 북태평양 고기압 경계면에서의 지위고도 경도 및 수분속은 재분석자료와 비교할 때 다소 과다모의되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 WRF 모델에서 모의되는 화중 및 화북 지역의 기압

이 예측 시간이 증가함에 따라 과소모의되는 경향에 기인하는 것을 확인하였으며, 이러한 문제는 DM2L과 DM2S에서 공통적으로 발생하였다. DM2L에서 나타나는 대류권 하층 지위 고도 경도의 과다모의는 수분 속을 증가시켜 한반도 강수의 과다모의로 이어질 수 있으며, Fig. 4에서 나타나는 강수 편차가 일부 관련되어 있는 것으로 생각된다. 한반도 북서부의 기압 배치 역시 여름철 수증기 수송에 영향을 미치는 중요한 요소로 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

4. 요약 및 토의

현재 현업으로 운영 중인 국지예측모델 LDAPS의 영역(DM2S)과 과거 지역예측모델인 RDAPS의 영역(DM2L)을 활용하여 여름철 강수 예측에 대한 모델 영역의 영향을 평가하였다. 본 연구에서는 중규모 지역 모델인 WRF v4.0 모형을 이용해 고해상도 지역 예측에서 모의 영역이 수치 모델에 미치는 영향을 파악하고자 하였으며, 모의 영역을 제외하고는 동일한 조건에서 실험을 수행하고자 하였다. 모델 결과의 평가를 위해 모의된 일 단위 강수량을 ASOS 및 AWS 관측소에 맞춘 뒤 계산하였으며, 양분예보지수를 이용하여 다양한 임계값에서 모델의 강수 단기 예측성을 정량적으로 평가하였다. 성공임계지수와 공정임계지수, 치우침지수 분석 결과, 두 모델 실험은 24시간 예측 수행 시 한반도 지역의 강수예측성에서 유사한 성능을 보였으나, 48, 72시간 예측에서는 모의 영역이 넓은 DM2L가 DM2S보다 개선된 예측 성능을 보였다. 이러한 차이는 중부지방의 강수량에서 두드러지게 나타났으며, 일반적으로 모의 영역이 넓은 DM2L가 2017년 7월의 한반도 강수를 많이 모의하는 특성을 보였다.

한반도 지역의 혼합비 분포에서도 DM2S에 비해 DM2L에서 값이 크게 나타나며, 이러한 특징이 동중국해에서 이어지는 것을 확인하였다. 모의 영역에 따른 하층 수증기 수송 차이 또한 동중국해에서 크게 나타났으며, DM2L에서 모의된 북태평양 고기압의 지위 고도 또한 재분석자료와 유사한 분포를 보였다. 이를 통해 한반도에서의 강수 패턴의 차이가 동중국해에서 유입되는 하층 수분속에 의해 영향을 받으며, 현실적인 북태평양 고기압의 모의가 한반도 여름철 강수 예측에 중요한 요인으로 작용한 것으로 판단하였다.

현재 기상청에서 사용되는 국지 모델 예측 시간은 48시간으로, 24시간 강수 예측에 있어 모의 영역에 의한 모델 성능의 차이가 미미하나, 국지 모델의 예측 시간을 48시간 이상 연장할 경우 여름철 북태평양 고기압의 수치예보모델의 영역을 확장하는 것이 여름철 강수 예측성 향상에 도움이 될 수 있음을 암시한다.

그러나 모의 영역을 확장하는 것은 계산시간을 증가시키므로 효율적인 모델 운영을 위해서는 목표로 하는 예측 시간에 적합한 모델 영역을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 한반도 여름철 강수에 대한 두 모의 영역의 차이만을 분석하였으나, 효과적인 예측 영역을 결정하기 위해서는 다양한 예측 영역과 예측 시기에 대한 민감도 실험이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원들께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 “기상지진 See-At기술개발연구사업”(KMI2018-01211)과 국립기상과학원의 “위험기상에 대한 분석·예보의 융합기술 고도화”(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Aligo, E. A., W. A. Gallus Jr., and M. Segal, 2009: On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts. *Wea. Forecasting*, **24**, 575-594.
- An, S.-I., K.-J. Ha, K.-H. Seo, S.-W. Yeh, S.-K. Min, and C.-H. Ho, 2011: A review of recent climate trends and causes over the Korean Peninsula. *J. Climate Change Res.*, **2**, 237-251 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.-J., and S.-Y. Hong, 2015: An updated subgrid orographic parameterization for global atmospheric forecast models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12445-12457, doi:10.1002/2015JD024230.
- Chu, Q., Z. Xu, Y. Chen, and D. Han, 2018: Evaluation of the ability of the Weather Research and Forecasting model to reproduce a sub-daily extreme rainfall event in Beijing, China using different domain configurations and spin-up times. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **22**, 3391-3407, doi:10.5194/hess-22-3391-2018.
- Dash, S. K., K. C. Pattanayak, S. K. Panda, D. Vaddi, and A. Mamgain, 2015: Impact of domain size on the simulation of Indian summer monsoon in RegCM4 using mixed convection scheme and driven by Had-GEM2. *Climate Dyn.*, **44**, 961-975, doi:10.1007/s00382-014-2420-1.
- Fasullo, J., and P. J. Webster, 2003: A hydrological definition of Indian monsoon onset and withdrawal. *J. Climate*, **16**, 3200-3211.
- Gebhardt, C., S. E. Theis, M. Paulat, and Z. B. Bouallègue, 2011: Uncertainties in COSMO-DE precipitation

- forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries. *Atmos. Res.*, **100**, 168-177, doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.008.
- Goswami, P., and G. N. Mohapatra, 2014: A comparative evaluation of impact of domain size and parameterization scheme on simulation of tropical cyclones in the Bay of Bengal. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 10-22, doi:10.1002/2013JD020592.
- _____, H. Shivappa, and S. Goud, 2012: Comparative analysis of the role of domain size, horizontal resolution and initial conditions in the simulation of tropical heavy rainfall events. *Meteor. Appl.*, **19**, 170-178, doi:10.1002/met.253.
- Han, J.-Y., S.-Y. Hong, K.-S. S. Lim, and J. Han, 2016: Sensitivity of a cumulus parameterization scheme to precipitation production representation and its impact on a heavy rain event over Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 2125-2135, doi:10.1175/MWR-D-15-0255.1.
- Hong, S.-Y., 2004: Comparison of heavy rainfall mechanisms in Korea and the central US. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II*, **82**, 1469-1479.
- _____, and J.-W. Lee, 2009: Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea. *Atmos. Res.*, **93**, 818-831.
- _____, and J. Jang, 2018: Impacts of shallow convection processes on a simulated boreal summer climatology in a global atmospheric model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 361-370, doi:10.1007/s13143-018-0013-3.
- _____, J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 103-120.
- _____, J. Choi, E.-C. Chang, H. Park, and Y.-J. Kim, 2008: Lower-tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model. *Wea. Forecasting*, **23**, 523-531.
- _____, W. T. Kwon, I. U. Chung, H. J. Baek, Y. H. Byun, and D. H. Cha, 2011: A review of regional climate change in East-Asia and the Korean peninsula based on global and regional climate modeling researches. *J. Climate Change Res.*, **2**, 269-281 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos.*, **54**, 267-292, doi:10.1007/s13143-018-0028-9.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D13103.
- Jeong, J.-H., D.-I. Lee, and C.-C. Wang, 2016: Impact of the cold pool on mesoscale convective system-produced extreme rainfall over southeastern South Korea: 7 July 2009. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3985-4006, doi:10.1175/MWR-D-16-0131.1.
- Kamae, Y., W. Mei, and S.-P. Xie, 2019: Ocean warming pattern effects on future changes in East Asian atmospheric rivers. *Environ. Res. Lett.*, **14**, 054019, doi:10.1088/1748-9326/ab128a.
- Kim, Y.-J., and A. Arakawa, 1995: Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1875-1902.
- Kim, E.-H., K.-D. Ahn, H.-C. Lee, J.-C. Ha, and E. Lim, 2015: A study on the effect of ground-based GPS data assimilation into very-short-range prediction model. *Atmosphere*, **25**, 623-637, doi:10.14191/Atmos.2015.25.4.623.
- Kwon, Y. C., and S.-Y. Hong, 2017: A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 583-598, doi:10.1175/MWR-D-16-0034.1.
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 367-396.
- Lee, J.-Y., W. Kim, and T.-Y. Lee, 2017: Physical and dynamic factors that drove the heavy rainfall event over the middle Korean Peninsula on 26-27 July 2011. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 101-120, doi:10.1007/s13143-017-0009-4.
- Li, Y., G. Lu, Z. Wu, H. He, J. Shi, Y. Ma, and S. Weng, 2016: Evaluation of optimized WRF precipitation forecast over a complex topography region during flood season. *Atmosphere*, **7**, 145, doi:10.3390/atmos7110145.
- Min, J.-S., J.-W. Roh, J.-B. Jee, and S. Kim, 2016: A study on sensitivity of heavy precipitation to domain size with a regional numerical weather prediction model. *Atmosphere*, **26**, 85-95, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.085 (in Korean with English abstract).
- Peralta, C., Z. Ben Bouallègue, S. E. Theis, C. Gebhardt, and M. Buchhold, 2012: Accounting for initial condition uncertainties in COSMO-DE-EPS. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, D07108, doi:10.1029/2011JD016581.
- Shi, Y., Z. Jiang, Z. Liu, and L. Li, 2020: A Lagrangian analysis of water vapor sources and pathways for precipitation in East China in different stages of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, **33**, 977-992,

- doi:10.1175/JCLI-D-19-0089.1.
- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 250-271, doi:10.1175/MWR-D-14-00116.1.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2019: A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp, doi:10.5065/1dfh-6p97.
- 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.
- Tewari, M., and Coauthors, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. *Extended Abstract, 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction*, **14**, 11-15 [Available online at https://ams.confex.com/ams/84Annual/techprogram/paper_69061.htm].
- Wang, X., P. Steinle, A. Seed, and Y. Xiao, 2016: The sensitivity of heavy precipitation to horizontal resolution, domain size, and rain rate assimilation: case studies with a convection-permitting model. *Adv. Meteorol.*, **2016**, 7943845, doi:10.1155/2016/7943845.
- Yeo, S.-R., M. H. Kwon, and J.-Y. Lee, 2020: The non-linear relationship between the western North Pacific anticyclonic circulation and Korean summer precipitation on subseasonal timescales. *Climate Dyn.*, **54**, 525-541, doi:10.1007/s00382-019-05013-7.