WRF 모형에서의 적운모수화 사용 여부에 따른 여름철 남한 지역 집중호우 모의 민감도 분석

서가영¹·안중배^{2*}

¹*부산대학교 지구환경시스템학부 박사과정* ²*부산대학교 지구환경시스템학부 교수* (2020년 10월 13일 접수, 2020년 11월 23일 최종 수정, 2020년 11월 27일 게재 확정)

Sensitivity Analysis of Cumulus Parameterization in WRF Model for Simulating Summer Heavy Rainfall in South Korea

Ga-Yeong Seo¹ · Joong-Bae Ahn^{2*}

¹Ph.D. student, Division of Earth Environmental System, Pusan National University ²Professor, Division of Earth Environmental System, Pusan National University (Received 13 October 2020, Revised 23 November 2020, Accepted 27 November 2020)

Abstract : In this study, the impact of cumulus parameterization usage in Weather Research and Forecasting (WRF) model on reproducing summer precipitation in South Korea is evaluated. Two sensitivity experiments are set up with using cumulus parameterization (ON experiment) and without using cumulus parameterization, which is called Convection Permitting Model (OFF experiment). For the both ON and OFF experiments, the horizontal grid resolution is 2.5km, and initial and lateral boundary conditions are derived from ERA5 reanalysis data. Overall, both of the two experiments can capture the spatial distribution of 2014 summer mean and extreme precipitation but show dry biases in the southern region of Korean Peninsula. Occurrence percentage analyses for different precipitation. In the case of heavy rainfall over Gyeongnam region for 25 August 2014, OFF experiment shows similar characteristic of rainfall to the observations, although it simulates earlier precipitation peak. On the other hand, ON experiment underestimates the amount of precipitation. Also, vertical distribution of equivalent potential temperature and strong southerly wind which play an important role in developing heavy rainfall on 25 August 2014 are better simulated in OFF experiment.

Key Words : Convection Permitting Model (CPM), WRF, heavy rainfall, Korean Peninsula, cumulus parameterization

주요어: 고해상도 모델 실험, WRF, 집중호우, 한반도 지역, 적운모수화

^{*}Correspondence: jbahn@pusan.ac.kr

[©] KU Climate Research Institute

1. 서론

한반도는 여름철 동아시아 몬순지역에 위치해 중 위도 종관 시스템의 영향을 받는 동시에 장마와 집 중호우과 같은 중규모 기상현상이 빈발하는 지역이 다. 최근에는 기후변화로 인해 한반도에서 발생하 는 여름철 집중호우의 강도가 강해지는 경향이 있 고 이로 인한 사회적, 경제적 피해도 상당하다(Jung et al., 2011; Jang et al., 2016). 특히 2020년 여름 철 중부 지방에서는 장마기간 동안 누적 강수량이 800mm가 넘어 1973년 이후 장마철 강수량 1위를 기록하였다(KMA, 2020). 기상청 관측지점 자료에 따르면 부산 지역의 경우 약 170mm 이상의 일 강 수량을 기록하는 등 전국적으로 발생한 폭우는 많 은 사회적 피해를 입혔다.

극한 강수현상이 인간에게 미치는 영향이 커지면 서 기후모델을 이용하여 한반도에서 발생하는 강 수의 특징을 이해하고 이를 예측하고자 연구들이 수행되고 있다(Jee and Kim, 2017; Oh and Suh, 2017; Kim et al., 2018; Song et al., 2019). Hong and Lee(2009)는 Weather Research and Forecasting model(WRF) 모형을 이용하여 2006년 7월 한반도 집중호우 사례에 대해 재현실험을 수행하였 고 민감도 실험을 통해 산악 지형이 강수를 20% 정 도 증가하는데 영향을 준다고 언급하였다. Song et al.(2019)는 남한지역 극한 강수를 온난형(warmtype)과 한랭형(cold-type)으로 나누어 Local Data Assimilation and Prediction System(LDAPS) 모 형의 강수 유형별 예측성을 평가하였고 한반도 온 난형 강수 예측을 위해서는 모델의 구름 모수화 방 안이 개선되어야 한다고 제안하였다.

수치 모델링을 이용한 강수 모의는 측면 경계조 건, 모델 영역 및 해상도, 모수화 방안 등에 따라 영향을 받는다(Gebhardt *et al.*, 2011; Min *et al.*, 2016; Choi and Ahn, 2017; Jee and Kim, 2017). 그 중 적운모수화는 대기 모형의 수평 격자가 구름 의 수평 크기보다 큰 경우 구름으로부터 동반된 강 수과정의 모수화를 통해 표현하는 방안이다(Lim, 2019). 그러나 이러한 모수화 방안들은 깊은 대류 현상으로 인해 발생하는 집중호우의 강수강도를 약 하게 모의하는 등의 일반적인 오류가 존재할 수 있 다(Berg et al., 2013; Prein et al., 2015). 최근에 는 컴퓨터의 성능 및 용량이 증가하면서 수평격자 가 4km 이하인 고해상도의 모델링을 통해 적운모 수화 방안을 사용하지 않고 강수를 모의하는 소위 Convection Permitting Model(CPM)실험을 수행 하는 연구가 진행되고 있다. Gao et al.(2017)은 적 운모수화 방안을 사용하지 않았을 때 미국 지역의 여름철 강수 공간분포 및 일변동성 모의능력이 향 상된다고 하였다. Brisson et al. (2016)도 CPM 실험 에서 모델 영역 크기에 따른 강수 모의능력을 평가 하였다. 하지만 CPM실험의 민감도 실험과 관련된 국내연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 적운모수화 사용여부에 따른 민 감도 실험을 수행하여 CPM 실험이 남한 지역의 평 균 및 극한 강수 모의에 미치는 영향에 대해 분석하 고자 한다. 적운모수화가 크게 영향을 주는 대류현 상이 분명히 나타난 집중호우 모의능력을 평가하기 위해 2014년 8월 25일 경남 지역 집중호우 사례에 대해 모의실험을 수행하였다(Singh *et al.*, 2011). WRF에 의한 강수 및 종관적 특징에 대한 모의성능 을 평가하고 남한 지역 집중호우 모의에 적절한 방 안이 무엇인지 보고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 적운모수화 사용여부에 따른 민 감도를 살펴보기 위해 National Center for Atmospheric Research(NCAR)에서 개발된 WRF version 4.0을 사용하여 2가지의 실험을 수행하였 다. 즉 적운모수화를 사용한 실험을 ON 실험, 적운 모수화를 사용하지 않은 실험에 해당하는 CPM 실 험을 OFF 실험이라고 명칭하였다. 집중호우 현상 모의를 위해서는 고해상도 실험이 수행되어야 하 므로 두 실험의 수평 격자간격 모두 2.5km로 설정 하였고 실험에 대한 도메인을 Figure 1에 나타내 었다. WRF모형의 측면경계조건으로 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA5 재분석자료를 사 용하였다(Hersbach et al., 2020). ERA5 자료의 수 평해상도는 25km이고 시간해상도는 3시간이다. WRF의 여름철 강수 모의능력과 특정 사례인 2014 년 8월 25일 경남 지역 폭우 사례를 분석하기 위 해 실험의 적분 수행기간은 2014년 5월 25일부터 2014년 8월 31일로 하였고 1시간 간격으로 자료 결과를 저장하였다. 두 실험 모두 미세물리 모수화 방안은 Goddard(Tao et al., 1989), 복사 모수화는



Figure 1. Topography (m) of the WRF model domain. Purple dots indicates 94 ASOS stations.

CAM(Community Atmospheric Model scheme, Collins *et al.*, 2002), PBL 모수화는 YSU(Yonsei University Scheme, Hong *et al.*, 2006), 지표 모 수화는 Noah(Unified Noah Land Surface Model, Chen and Dudhia, 2001)을 사용하였다. ON 실 험에서는 적운모수화 방안을 BMJ(Betts-Miller-Janjic, Betts and Miller, 1986; Janjić, 1994)를 사 용하였고 OFF실험에서는 적운모수화 방안을 사용 하지 않았다. BMJ 방안은 관측의 연직분포를 기준 으로 삼아 모델의 기온 및 습도 연직분포를 조절하 는 대류조정방식이다.

WRF모형의 강수 모의성능 검증을 위해 기상청 에서 제공하는 종관기상관측자료(ASOS)를 사용 하였다. 본 연구에서 사용된 지점은 총 94개이고 WRF 실험 결과를 이중선형보간법을 이용하여 해 당 지점에 내삽하였다(Figure 1). 또한 2014년 8월 25일 경남 지역 폭우 당시의 남한 주변지역 종관장 분석을 위해 MERRA2자료를 사용하였다(Gelaro *et al.*, 2017).

3. 결과

1) 2014년 여름철 강수에 대한 모의성능

각각의 실험에 따른 WRF의 2014년 여름철 남한 지역 강수의 공간분포를 ASOS자료와 비교 분석하 였다(Figure 2, 3). Figure 2는 2014년 여름철(6~8 월) 평균 강수량에 대한 공간분포 및 편차를 각 실험 마다 나타낸 그립이다. ASOS를 보면 남부 지역으 로 갈수록 높은 강수 분포가 나타나고 남해안 일부 지역에서는 10mm/day 이상의 강수값이 나타난다 (Figure 2a). WRF가 모의한 강수분포는 관측과 유 사하게 나타나지만 대체적으로 건조편차가 나타나 고 두 실험간에도 지역적 차이가 있다. ON 실험결 과를 보면 중부 지역에서 관측값과 유사하게 나타



Figure 2. Spatial distribution of 2014 summer mean precipitation (mm/day) from (a) Observation, (b) ON, and (c) OFF experiment and difference between ASOS and (d) ON and (e) OFF experiments.



Figure 3. Same as Fig. 2 but for mean above the 90th percentile of daily precipitation (mm/day) in 2014 summer.

나고 남부 지역에서는 평균적으로 3mm/day 이상 의 건조 편차가 나타난다. OFF실험의 강수 공간분 포는 관측과 유사하게 대다수의 남부 지역 관측지 점에서 6mm/day 이상의 값이 나타나 ON실험에 비해 전체적으로 높은 강수값이 나타난다(Figure 2c). 특히 남부 지역에서 ON실험에 비해 편차가 감 소하여 좋은 모의성능을 보인다. 대체적으로 강수 량이 높게 나타나는 지역에서는 적운모수화를 사용 하지 않은 OFF실험이 적운모수화를 사용한 ON실 험에 비해 강수량을 잘 모의한다.

Figure 3은 2014년 여름철 일강수량의 90퍼센타 일 이상에 해당되는 강수량 평균 분포를 나타낸 그 림이다. 관측자료는 평균 일강수량 분포와 유사하 게 남부지방에서 높은 값이 분포한다. WRF를 이용 한 민감도 실험결과들은 이러한 극한강수 특징을 잘 모의한 모습을 보여준다. ASOS에서 90퍼센타일 이상 강수가 경남 지역을 중심으로 높은 값이 분포 한 반면 민감도 실험들은 그보다 서쪽에 위치한 진 주, 산청 지점을 중심으로 나타난다. 이 지역은 지 리산이 위치하여 산악강제상승 효과로 인해 남쪽으 로부터 오는 하층제트가 산악지형을 만나 상승운동 이 강하게 발달해 강수가 과다모의 된 것으로 보인 다(Park *et al.*, 2003). 반면 남해안 지역에서는 강 수가 과소모의되는 특징이 있는데 이는 해수면온

도(SST) 강제력 때문으로 보인다. 남해안 지역에 서 집중호우가 발생할 때의 SST는 강한 양의 편차 를 가진다(Jung, 2019), WRF의 강제력으로 처방된 ERA5는 관측자료인 HadISST와 비교하였을 때 남 해안지역에서 상대적으로 낮은 SST값을 나타낸다 (Figure not shown), 따라서 낮은 SST값으로 인해 남해안 지역에 나타나는 집중호우가 과소모의 되어 90퍼센타일 이상 강수가 건조편차를 보이게 되는 것으로 판단된다. ON실험에서는 전체적으로 건조 편차가 나타나고 특히 양산, 창원, 부산 등 경남의 일부 지점에서 강수를 과소 모의하는 모습이 두드 러진다. 창원, 무안 등 일부 지점의 경우 ON실험에 서 30mm/day 이상 건조편차가 나타난 반면, OFF 실험에서 편차가 크게 감소해 관측값과 유사한 모 습이 나타난다. 강수의 편차정도가 어느 정도의 크 기로 나타나는지 보기 위해 각 지역별로 평균 편차, 평균 절대값 오차¹⁾(Mean Absolute Error, MAE), 그리고 평균 제곱근 오차값²⁾(Root Mean Square Error, RMSE)을 Table 1에 나타내었다. 지역은 남 한 전체지역, 남한의 북쪽 지역(36~38°N), 그리고 남한의 남쪽 지역(34~36°N)으로 나누어 분석하였 다. 3개의 오차값들을 보면 ON실험에 비해 OFF실 험의 값이 더 작아 좋은 모의성능을 보여준다. 또한 지역별로 보면 북쪽지역의 90퍼센타일 이상 일강수

		ON	OFF
South Korea	Mean Bias Mean Absolute Error (MAE) Root Mean Square Error (RMSE)	-1.64 (-8.06) 1.75 (10.59) 2.35 (14.73)	-1.02 (-2.98) 1.40 (9.69) 1.97 (13.17)
North region of South Korea	Mean Bias Mean Absolute Error (MAE) Root Mean Square Error (RMSE)	-0.64 (-1.43) 0.85 (5.42) 1.13 (6.87)	-0.38 (0.62) 0.84 (6.45) 1.12 (8.11)
South region of South Korea	Mean Bias Mean Absolute Error (MAE) Root Mean Square Error (RMSE)	-2.66 (-14.21) 2.69 (15.52) 3.15 (19.58)	-1.69 (-6.23) 2.01 (12.95) 2.57 (16.75)

 Table 1. Bias values of ON and OFF experiments for mean (mean above the 90th percentile) of 2014 summer daily precipitation.



Figure 4. Percentage of occurrence of summer daily precipitation in 2014 summer for different intensity classes derived from the observation and WRF experiments.

를 제외하고는 OFF실험의 모의성능이 ON실험보 다 작은 값이 나타난다. 따라서 경남지역 뿐만 아니 라 전체적인 지역에 대해서 CPM실험이 강수에 대 해서 향상된 모의성능이 나타남을 확인할 수 있다.

강수의 공간분포뿐만 아니라 강수강도에 따른 발 생빈도를 보기 위해 2014년 여름철 일강수량 범위 에 따른 발생비율의 히스토그램을 Figure 4에 나타 내었다. x축은 일강수량의 범위를, y축은 전체 일 강수자료에 대한 범위에 해당하는 강수의 발생비율 을 백분율로 나타낸 값이다. 왼쪽그림은 무강수 및 약한 강수강도에 대한 그림이고 오른쪽그림은 강한 강수강도에 대한 그림이다. 무강수일은 기상청 기 준을 따라 일강수량이 0.1mm 이하일 때로 정의하 였다. 10mm/day 이하의 약한 강수의 경우 WRF의 민감도 실험들 모두 관측에 비해 크게 모의하는 경 향이 있다. 두 WRF 실험을 비교해 보면 큰 차이는 나지 않지만 ON실험보다 OFF실험이 관측과 더 작 은 차이가 나타난다. 90mm/day 이상의 경우 범위 에 따라 다르지만 전체적으로 WRF 민감도 실험결 과가 관측에 비해 작은 값을 나타낸다. 그러나 민감 도 실험들 중 OFF실험이 ON실험보다 크게 모의해 관측과 유사한 값을 보여 좋은 모의성능을 보여주 고 특히 240mm/day 이상의 범위에서는 OFF실험 의 값만 존재한다.

2) 2014년 8월 25일 경남 집중호우 사례에 대한 모의성능

2014년 8월 25일에 내린 강수량은 창원에 248 mm, 양산에 177mm으로 단시간에 많은 비가 내렸 으며 최대시우량은 부산 금정구에서 130mm가 나 타났다. 이 집중호우로 인해 10명이 실종 또는 사망 하였고 약 1,342억원의 재산 피해가 발생하는 등 피 해 정도가 매우 심각하였다(KMA, 2015). 해당 집중 호우 사례에 대해 비가 가장 많이 내린 시간대의 레 이더 합성 영상을 Figure 5에 나타내었다. KST기준 8월 25일 12시에 전남 동쪽 지역과 창원 지역에 강 도 40mm/hr 이상의 강한 에코가 나타나고 있다. 13시에는 전남 지역의 강수 에코는 거의 사라진 모 습이 나타나지만 부산 및 창원 지역에서는 여전히 강도 높은 강수 에코가 보이고 이는 14시까지 지속 되는 모습이 나타난다.

Figure 6에서 MERRA2 자료를 이용하여 2014 년 8월 25일의 종관장을 나타내었다. Figure 6a의 상층은 200hPa의 풍속을 나타내고 하층은 해면기 압 및 850hPa 바람벡터를 보여준다. 하층 종관장 을 보면 한반도 서해안 남쪽 지역에 저기압 중심이 위치하고 있고 일본 지역에 고기압이 위치하고 있 다. 이 저기압과 고기압으로 인해 두 기압 사이 지 역에서 12m/s 이상의 강하고 습한 남풍계열의 바



Figure 5. Radar image of rainfall (mm/hr) at (a) 12:00, (b) 13:00, (c) 14:00 on 25 August 2014 (KST). Images are provided by Korea Meteorological Administration (KMA).



Figure 6. (a) Spatial distribution of the (top) 200hPa wind speed (m/s), (bottom) sea level pressure (shaded, hPa) and 850hPa wind (vector, m/s), (b) Vertical cross section of Divergence (1e+06 s⁻¹) over 129.3°E at 12:00 KST on 25 August 2014 from MERRA2 data. Red 850hPa wind vector denotes that the wind speed is greater than 12m/s.

람(하층제트)이 발생해 부산 및 경남 지역으로 유입 되는 모습을 확인할 수 있다. 상층의 경우 제트기류 의 최대 풍속이 나타나는 위치가 위도 40°N, 경도 136°E 부근이라 부산 및 경남 지역은 상층 제트기 류의 입구 남쪽에 위치하게 된다. Figure 6b는 경도 129.3°E 지역에 대한 발산장의 연직 분포를 나타낸 그림이다. 집중호우가 발생한 경남지역이 위치하는 35~36°N지역을 보면, 하층에 수렴현상이 나타나 고 상층인 200hPa에서 발산이 나타난다. 이는 상층 제트기류 입구에서 나타나는 2차순환 현상이다. 위 결과들을 종합해보면 부산 및 경남 지역 하층에서 는 수렴현상이 발생하고 이 수렴현상과 하층제트가 만나 강한 상승운동이 생겨 그 지역에 강한 강수가 발생하게 되었다. 결론적으로 2014년 8월 25일 집 중호우는 경남 지역에서의 상·하층 제트 결합으로 인한 집중호우 발생 사례라 볼 수 있다.



Figure 7. Timeseries of accumulated precipitation averaged for 3 ASOS stations on 25 August 2014 (KST).

앞서 WRF가 모의한 2014년 여름철 평균 및 극 한 강수 분석 결과를 통해 적운모수화를 사용하지 않은 실험에서 강수 모의능력이 우수한 점을 확인 할 수 있었다. 이를 바탕으로 해당 집중호우 사례 에 대한 WRF 민감도 실험들의 모의성능을 평가하 기 위해 강수를 분석하였다(Figure 7, 8). Figure 7 은 2014년 8월 25일 일강수량이 170mm 이상 기록 된 ASOS지점 대해 시간 누적강수를 나타낸 그래프 이다. 해당 지점들은 창원, 북창원 그리고 양산 지 점이고 세 지점을 평균하여 나타내었다. ASOS의 경우 06시부터 비가 내리기 시작하고 12시를 기점 으로 급격하게 강수량이 증가하는 모습이 나타난 다. 13시부터 14시 동안 누적강수량은 약 70mm가 증가하였으며 15시까지 약 220mm까지 비를 내린 뒤 이 이후로 소강상태가 된다. 또 다른 관측자료로 NASA에서 제공하는 Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM)의 강수자료를 ASOS 지점에 내삽 하여 살펴보았다(Huffman et al., 2007). 그 결과 누적 강수량이 약 140mm 정도로 ASOS자료에 비 해 적은 양의 강수를 기록해 차이가 있음을 보여준 다. WRF 민감도 실험 결과를 분석해보면 ON실험 이 누적강수량을 약 30mm로 과소모의하는 반면, OFF실험은 단시간에 강수가 급격히 증가하는 집 중호우 현상을 잘 모의하는 모습을 보여준다. OFF 실험에서 집중호우가 시작된 시각을 비교해보면 ASOS에 비해 약 4시간 정도 이른 시각으로 모의 한다. 8시부터 발생한 누적강수는 4시간 동안 약 150mm가 증가하는 모습을 보여준다. ON실험이 극한강수의 모습을 잘 모의하지 못하지만 OFF실험 은 TRMM 및 ASOS와 가장 비슷한 누적강수량 값 이 나타나 우수한 모의성능을 보여준다.

Figure 8은 KST 시간 기준 2014년 8월 25일의 3 시간 간격 평균 강수량을 나타낸 그림이다. ON실 혐의 경우 강수가 나타나는 위치가 위도 35°N 지역 과 36~37°N에서 각각 나타나고 있다. 위도 35°N에 위치한 강수코어는 시간이 지날수록 동쪽으로 진행 하고 12시 이후로 강도가 약화되면서 사라지는 모 습을 보여준다. 09시에 부산 지역에서 강수가 40 이



Figure 8. Spatial distribution of 3 hourly precipitation (mm/hr) for (a-d) Radar, (e-h) ON and (i-l) OFF experiment at (a, e, i) 06:00, (b, f, j) 09:00, (c, g, k) 12:00, (d, h, l) 15:00 on 25 August 2014 (KST).

상의 값을 보이지만 경남 지역으로 중심으로 발생 한 집중호우 사례의 공간분포의 모습과 거리가 있 어 보인다. 오히려 8월 25일의 ON실험 강수는 부 산, 경남지역보다 북쪽에서 중심적으로 발생하는 모습이 나타난다. 하지만 적운모수화를 사용하지 않은 OFF실험은 강한 강수의 중심이 남부 지역에 위치해 관측과 유사한 모습을 보여준다. OFF실험 에서 06시에 전남 지역과 경남 지역에 두 개의 강수 코어가 나타나고 09시로 갈수록 경남 지역의 강수 가 강해지고 전남 지역의 강수는 소멸하는 모습을 보여준다. Figure 5와 레이더 자료(Figure 8a-d)에 서는 경남지역 극한강수 시간대가 12~13시에 나타 나 OFF실험의 결과가 더 이른 시간대이긴 하지만 공간분포는 레이더자료와 매우 유사한 모습이다. 강수량 또한 80 이상의 값이 나타나 강한 집중호우 가 발생하고 있는 모습을 보여준다. OFF실험에서

12시 이후로 약 10으로 강수량이 감소하기 시작하 면서 부산, 경남지역의 강수코어가 약화되는 모습 이 나타난다.

Figure 9는 2014년 8월 25일 집중호우가 내린 시 간에 대한 MERRA2와 WRF 민감도 실험들의 위도 35~35.5°N의 영역을 평균한 상당온위 연직구조를 나타낸 그림이다. 상당온위는 기온과 습도를 동시 에 고려할 수 있는 변수로 강수의 열역학적 특징을 파악할 수 있다(Son and Seo, 2012). MERRA2 자 료를 분석해보면 경남지역 집중호우 발생 전이지만 12시에 경도 129°E에서 330K 이상의 값이 하층에 서 나타나 고온다습한 공기가 위치하고 126~127° E에서 하층에 높은 상당온위값이 나타난다(Figure 9a, d). 그림에 나타내진 않았지만 집중호우가 발생 할 때에는 고도에 따라 상당온위가 감소하는 불안 정 층이 존재한다. 이처럼 다량의 수증기와 불안정



Figure 9. Vertical cross section of equivalent potential temperature (K) averaged area of 35-35.5°N derived from (a, d) MERRA2, (b, e) ON, and (c, f) OFF experiment at (a-c) 09:00, (d-f) 12:00 on 25 August 2014 (KST).

층이 존재하였기 때문에 강한 강수가 발생할 수 있 었다. WRF의 민감도 실험의 상당온위를 분석해보 면 ON실험의 경우 09시와 12시에 경도 127~128° E 하층에서 345K 이상의 값이 나타나지만 불안 정 층은 크게 발달하지 못하고 있다(Figure 9b, e). OFF실험에서는 하층에서 ON실험에 비해 상당온 위 값이 낮지만, 경도 129°E에서는 342K 이상의 값 이 나타난다. 경도 127~128°E 지역 상층의 경우 700~500hPa 사이의 층까지 342K 이상의 높은 값 이 나타나는 모습을 보인다. 12시 이후로는 상층의 상당온위 값이 감소하는 모습이 나타난다.

집중호우와 깊게 관련 있는 하층제트의 모의수 준을 분석하기 위해 WRF 민감도 실험들이 모의 한 850hPa의 바람벡터를 Figure 10에 나타내었 다. WRF결과는 MERRA2 격자에 내삽하여 나타내 었고 벡터의 색깔은 풍속을 의미한다. 관측자료인 MERRA2의 경우 부산과 경남 지역으로 12m/s 이 상의 강한 남서풍계열의 바람이 불어오는 모습이 나타났다. ON실험에서는 12시에 18m/s 이상의 강 한 남서풍이 부산과 경남 지역을 포함할 뿐만 아니 라 위도 37°N 지역까지 나타난다. 또한 ON실험의 경우 하층 저기압이 관측에 비해 상대적으로 북쪽 에 위치해있어 하층제트가 관측보다 북쪽 지역까지 도달해 강수코어가 상대적으로 북쪽 지역에서 나타 난 것으로 보인다(Figure not shown). 반면 OFF실 혐의 경우 하층 저기압의 위치가 관측과 유사하게 목포 근처에서 나타나 강한 하층 제트의 수렴이 경 남지역에서 나타나 강한 강수가 발달 할 수 있었다. OFF실험에서는 09시에 경남 남쪽 지역에서 18m/s 이상의 남서풍이 나타난다. 이 때 시각이 OFF실험



Figure 10. Spatial distribution of 850hPa wind vector (m/s) derived from (a, d) MERRA2, (b, e) ON, and (c, f) OFF experiment at (a-c) 09:00, (d-f) 12:00 on 25 August 2014 (KST). Color indicates magnitude of wind speed.

에서 경남 지역의 강수가 가장 강하게 나타난 시각 과 일치한다(Figure 8j).

4. 결론

본 연구에서는 WRF의 적운모수화 방안 사용 여 부에 따른 남한 지역 강수 모의능력에 대해 분석하 였다. ERA5 자료를 경계조건으로 하고 수평해상도 를 2.5km로 설정하여 적운모수화 적용 여부에 따 른 민감도 실험을 수행하였다. 분석기간은 2014년 여름철에 해당하는 기간인 6월부터 8월까지이다.

2014년 여름철 평균 강수를 분석한 결과, WRF는 모든 민감도 실험에서 대체적으로 건조 편차가 나 타나지만 적운모수화를 사용하지 않은 실험에서 비 교적 작은 편차를 보인다. 중부 지역의 경우 두 실험 모두 비슷한 모의수준을 보이지만 관측에서 큰 강 수량이 나타난 남부 지역에서 OFF실험은 ON실험 에 비해 향상된 모의능력을 보여준다. 90퍼센타일 이상 일강수 분석을 통해서 두 민감도 실험 간의 확 연한 차이가 나타난다. 적운모수화를 사용하지 않 은 OFF실험이 ON실험에 비해 작은 오차값이 나타 나 상대적으로 우수한 모의수준을 보여준다. 마찬 가지로 일강수량 범위에 따른 발생비율 분석에서도 같은 결과가 나타났다. WRF 민감도 실험들은 관측 보다 낮게 모의하는 경향이 있지만 강수강도가 강 한 경우에서 OFF실험이 ON실험에 비해 관측과 유 사하게 모의한 결과가 나타난다.

극한 강수에 대해 WRF 민감도 실험들의 모의 수 준을 분석하기 위해 2014년 8월 25일 경남 지역 집 중호우 사례에 대한 모의실험 결과를 관측과 비교 해보았다. 8월 25일 집중호우가 발생한 ASOS지 점에 대해 시간별 누적 강수량을 보면, OFF실험에 서 단시간에 발생한 집중호우의 모습을 가장 잘 모

의하였고 총 누적 강수량도 관측과 제일 가까운 값 을 나타낸다. 사례일에 대한 3시간 간격의 강수 공 간 분포를 살펴보면, ON실험은 관측의 집중호우가 발생한 지역보다 북쪽지역에서 강수 코어가 나타난 다. OFF실험에서는 관측보다 이른 시간에 경남지 역에 극한 강수가 나타나지만 관측과 유사한 공간 분포를 보여준다. 해당 사례와 연관성이 있는 상당 온위를 분석한 결과 OFF실험에서 높은 상당온위 값과 상층까지 불안정한 층이 나타난다. ON실험에 서는 지표 근처에 관측과 유사하게 345K이상의 값 이 존재하지만 상층까지 높게 발달하지 못하고 있 다. WRF실험이 모의한 집중호우 당시의 하층 바람 장을 살펴보면 두 실험 모두 강한 남풍계열의 하층 바람이 경남지역에 존재하지만 ON실험은 관측에 비해 북쪽지역까지 강한 하층제트가 나타나는 반면 OFF실험에서 하층제트가 경남지역까지 나타나 수 증기가 이 지역에서 수렴할 수 있는 조건이 된다. 결 론적으로 OFF실험에서 상당온위의 연직 분포 및 하층의 강한 남풍이 관측과 유사하게 나타남으로써 경남지역의 집중호우 모의가 잘 나타난 것으로 보 이다

본 연구결과를 통해 WRF에서 적운모수화를 사용하지 않았을 때 극한강수의 모의능력이 우수한 점을 확인할 수 있다. CPM 민감도 실험에서 적운모 수화 사용여부에 따라 모델해상도도 다르게 한 선 행연구들과 달리, 본 연구에서는 모든 조건을 같이 하고 적운모수화 사용 유무만 다르게 설정하였다 (Meredith *et al.*, 2015; Saeed *et al.*, 2017). 따라 서 여름철 남한 집중호우 모의실험을 통해 본 연구 는 오로지 적운모수화 사용 여부에 따른 민감도 분 석이 가능하다는 점에서 의의가 있다. 하지만 WRF 모델의 적분기간이 2014년 여름철로 매우 짧아 10 년 이상의 기후값 분석 및 다른 계절에 대한 강수 민 감도 분석에 있어서 어려움이 있다. 이에 더해 한 가 의 모의능력을 판단하는 것에는 한계가 있다. 향후 본 연구 결과를 기반으로 적분 기간을 연장하여 기 후적인 측면에서 분석을 수행할 예정이다.

사사

이 연구는 기상청 「기상·지진See-At기술개발연 구」(KMI2018-01213)의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 이 연구에 기상청 슈퍼컴퓨터가 활용되도 록 지원해준 기상청 슈퍼컴퓨터 운영과에 감사드립 니다.

주

1) 각 격자의 모델값과 관측값의 차이의 절대값들을 평균한 값
 2) 각 격자의 모델값과 관측값의 차이의 제곱값들을 평균한 값

의 제고그,
$$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}$$

Reference

- Berg, P., Wagner, S., Kunstmann, H., and Schädler, G., 2013, High resolution regional climate model simulations for Germany: part I—validation, *Climate Dynamics*, 40(1-2), 401-414.
- Betts, A. K. and Miller, M. J., 1986, A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(473), 693-709.
- Brisson, E., Demuzere, M., and van Lipzig, N. P. M., 2016, Modelling strategies for performing convection-permitting climate simulations, *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), 149-163.

Chen, F. and Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced

land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585.

- Choi, Y.-W. and Ahn, J.-B., 2017, Impact of cumulus parameterization schemes on the regional climate simulation for the domain of CORDEX-East Asia Phase 2 using WRF model, *Atmosphere*, 27(1), 105-118 (in Korean with English abstract).
- Collins, W. D., Hackney, J. K., and Edwards, D. P., 2002, An updated parameterization for infrared emission and absorption by water vapor in the National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model, *Journal of Geophysical Research*, 107(D22), ACL 17-1-ACL 17-20.
- Gao, Y., Leung, L. R., Zhao, C., and Hagos, S., 2017, Sensitivity of U.S. summer precipitation to model resolution and convective parameterizations across gray zone resolutions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(5), 2714-2733.
- Gebhardt, C., Theis, S. E., Paulat, M., and Ben Bouallègue, Z., 2011, Uncertainties in COSMO-DE precipitation forecasts introduced by model perturbations and variation of lateral boundaries, *Atmospheric Research*, 100(2-3), 168-177.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., Silva, A. M. d., Gu, W., Kim, G.-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., and Zhao, B., 2017, The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), Journal of Climate, 30(14), 5419-

5454.

- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N., 2020, The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal* of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049.
- Hong, S.-Y. and Lee, J.-W., 2009, Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea, *Atmospheric Research*, 93(4), 818-831.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D.
 B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.
 P., and Stocker, E. F., 2007, The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasiglobal, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Jang, M., You, C.-H., Jee, J.-B., Park, S.-H., Kim, S.-i., and Choi, Y.-J., 2016, Three-dimensional analysis of heavy rainfall using KLAPS re-analysis data, *Atmosphere*, 26(1), 97-109 (in Korean with English abstract).
- Janjić, Z. I., 1994, The Step-Mountain Eta Coordinate Model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure Schemes, *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-

945.

- Jee, J.-B. and Kim, S., 2017, Sensitivity study on highresolution WRF precipitation forecast for a heavy rainfall event, *Atmosphere*, 8(6), 96 (in Korean with English abstract).
- Jung, E., 2019, Characteristics of sea surface temperature variation during the high impact weather over the Korean Peninsula, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 40(3), 240-258 (in Korean with English abstract).
- Jung, I.-W., Bae, D.-H., and Kim, G., 2011, Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, 31(3), 359-370.
- Kim, G., Cha, D.-H., and Park, C., 2018, Estimation of uncertainties and projection for bias-corrected outputs of multi-regional climate models, *Journal of Climate Research*, 13(4), 263-273 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2015, 2014 Abnormal Climate Report, Korea Meteorological Administration, 169p (in Korean).
- Lim, K.-S. S., 2019, Bulk-type cloud microphysics parameterization in atmospheric models, *Atmosphere*, 29(2), 227-239 (in Korean with English abstract).
- Meredith, E. P., Maraun, D., Semenov, V. A., and Park, W., 2015, Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24), 12500-12513.
- Min, J.-S., Roh, J.-W., Jee, J.-B., and Kim, S., 2016, A study on sensitivity of heavy precipitation to domain size with a regional numerical weather prediction model, *Atmosphere*, 26(1), 85-95 (in Korean with English abstract).
- Oh, S.-G. and Suh, M.-S., 2017, Dynamic downscaling of current climate (1981-2005) over CORDEX-East Asia Phase 2 domain using RegCM4.0, *Journal of Climate Research*, 12(1), 87-109 (in Korean with English abstract).

- Park, C. H., Lee, H. W., and Jung, W.-S., 2003, The effects of low-level jet and topography on heavy rainfall near Mt. Jirisan, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 39(4), 441-458 (in Korean with English abstract).
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tolle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., van Lipzig, N. P., and Leung, R., 2015, A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges, *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323-361.
- Saeed, S., Brisson, E., Demuzere, M., Tabari, H., Willems, P., and van Lipzig, N. P. M., 2017, Multidecadal convection permitting climate simulations over Belgium: sensitivity of future precipitation extremes, *Atmospheric Science Letters*, 18(1), 29-36.
- Singh, A. P., Singh, R., Raju, P., and Bhatla, R., 2011, The impact of three different cumulus parameterization schemes on Indian summer monsoon circulation, *International Journal of Ocean and Climate Systems*, 2(1), 27-43.
- Son, J.-H. and Seo, K.-H., 2012, Dominant modes of the East Asian summer monsoon using equivalent potential temperature, *Atmosphere*, 22(4), 483-488 (in Korean with English abstract).
- Song, H.-J., Lim, B., and Joo, S., 2019, Evaluation of rainfall forecasts with heavy rain types in the high-resolution unified model over South Korea, Weather and Forecasting, 34(5), 1277-1293.
- Tao, W.-K., Simpson, J., and McCumber, M., 1989, An ice-water saturation adjustment, *Monthly Weather Review*, 117(1), 231-235.
- KMA, 2020, http://www.kma.go.kr/download_02/ellinonewsletter_2020_08.pdf (in Korean).

책임편집: 이은걸 영문교열: 이은걸