Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 28, No. 1 (2018) pp. 85-97
https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.1.085
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 노 트
(Research Note)

CORDEX-동아시아 2단계 영역 재현실험을 통한 WRF 강수 모의성능 평가

안중배 · 최연우 · 조세라*
부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2017년 12월 26일, 수정일: 2018년 2월 18일, 게재확정일: 2018년 2월 20일)

Evaluation of Reproduced Precipitation by WRF in the Region of CORDEX-East Asia Phase 2

Joong-Bae Ahn, Yeon-Woo Choi, and Sera Jo*
Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 26 December 2017; revised 18 February 2018; accepted 20 February 2018)

Abstract This study evaluates the performance of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in reproducing the present-day (1981~2005) precipitation over Far East Asia and South Korea. The WRF model is configured with 25-km horizontal resolution within the context of the COordinated Regional climate Downscaling Experiment (CORDEX) - East Asia Phase 2. The initial and lateral boundary forcing for the WRF simulation are derived from European Centre for Medium-Range Weather Forecast Interim reanalysis. According to our results, WRF model shows a reasonable performance to reproduce the features of precipitation, such as seasonal climatology, annual and inter-annual variabilities, seasonal march of monsoon rainfall and extreme precipitation. In spite of such model's ability to simulate major features of precipitation, systematic biases are found in the downscaled simulation in some sub-regions and seasons. In particular, the WRF model systematically tends to overestimate (underestimate) precipitation over Far East Asia (South Korea), and relatively large biases are evident during the summer season. In terms of inter-annual variability, WRF shows an overall smaller (larger) standard deviation in the Far East Asia (South Korea) compared to observation. In addition, WRF overestimates the frequency and amount of weak precipitation, but underestimates those of heavy precipitation. Also, the number of wet days, the precipitation intensity above the 95 percentile, and consecutive wet days (consecutive dry days) are overestimated (underestimated) over eastern (western) part of South Korea. The results of this study can be used as reference data when providing information about projections of fine-scale climate change over East Asia.

Key words: WRF, dynamical downscaling, CORDEX-East Asia Phase 2, Model evaluation, ERA-Interim

1. 서 론

지구온난화에 따른 기후변화는 분석시기, 지역 등에 따라 차이가 클 것으로 전망된다(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2013). 최근 들어 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5; Taylor et al., 2012) 전구 모형 자료를 이용한 기후변화 연구가 활발히 진행되고 있지만 이러한 전구 모형 결과로는 지역규모의 기후정보를 산출하는데 한계가 있다. 이를 개선하기 위한 노력으로 전세계적으로 지역기후모형을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 대표적인 예로 World Climate Research Program (WCRP) 산하의 COordinated Regional climate

*Corresponding Author: Sera Jo, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, 63 Busandaehak-ro, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932
E-mail: seta43@pusan.ac.kr

Downscaling Experiment (CORDEX) 프로젝트가 있다. CORDEX는 지역기후모형을 이용하여 전세계 14개 지역에 대한 고해상도 기후변화 정보를 산출하는 프로젝트로, 이를 통해 생산된 자료들을 비교함으로써 기후변화 전망에 대한 불확실성을 평가하고 신뢰성 있는 기후 변화 정보를 생산할 수 있다. 최근 우리나라는 CMIP5 전구 모형 자료와 지역기후모형 체인을 이용하여 CORDEX 동아시아 1단계 영역에 대한 역학적 규모축소 연구를 수행하였다(Oh et al., 2011, 2014; Park et al., 2013; Zou et al., 2016; Lee et al., 2014). 이에 더하여, 국내 연구진들은 상세한 지형 효과(수평해상도 12.5 km)를 반영한 지역기후모형을 이용하여 한반도 국가표준 기후변화 시나리오를 산출하였다(Ahn et al., 2014, 2016; Hong and Ahn, 2015; Im et al., 2015, 2017; Cha et al., 2016; Choi et al., 2016; Oh et al., 2016; Lee et al., 2016a, 2017a; Suh et al., 2016).

지역기후 모형을 이용하여 신뢰성 있는 기후 예측 정보를 산출하기 위해서는 우선적으로 재분석자료를 경계조건으로 처방하는 현재기후 재현실험(perfect boundary condition experiment)이 수행되어야 한다. 이는 미래기후를 평가하기 이전에 지역기후 모델링 과정(모수화 방안, 적분영역설정 등)에서 발생하는 계통적 오차를 평가하기 위한 필수적인 과정이다(Giorgi and Gutowski, 2015). Jin et al. (2016)은 European Centre for Medium-Range Weather Forecast Interim reanalysis (ERA-INT) 자료를 경계 조건으로 처방한 다섯 개의 지역기후 모형 [Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (HadGEM3-RA), Regional Climate Model (RegCM), Seoul National University Regional Climate Model (SNURCM), Weather Research and Forecasting model version 3.7 (이하, WRF) 및 Global/Regional Integrated Model system (GRIMs)]을 이용하여 CORDEX 동아시아 1단계 영역에 대한 현재기후를 모의하였고, 북서태평양 열대저기압에 대한 모형의 모의수준을 평가하였다. 또한, Huang et al. (2015)은 국내 연구진에서 생산한 동아시아 상세 기후 재현 정보 및 Consortium for Small-scale Modelling Climate Limited-area Modelling (CCLM) 을 이용하여 동아시아 몬순영역(East Asian Summer Monsoon, Western North Pacific Tropical Monsoon, South Asia Summer monsoon 그리고 Australian-Maritime Continent Monsoon)에 대한 지역기후모형의 모의수준을 평가하였고, 이를 통해 산출된 자료의 앙상블이 동아시아 몬순 모의에서 우수한 모의수준을 보인다고 제시하였다.

한편, CORDEX 프로젝트는 IPCC 제6차 평가보고서에 대비하기 위해 CORDEX 동아시아 2단계 연구계획을 새롭게 발표하였다(WCRP, 2014). CORDEX 동아시아 2단계에서는 모형의 수평해상도는 증가하고 모의영역은 이전단계에 비해 다소 축소되었다(http://cordex.org/domains/region-7-east-asia/).

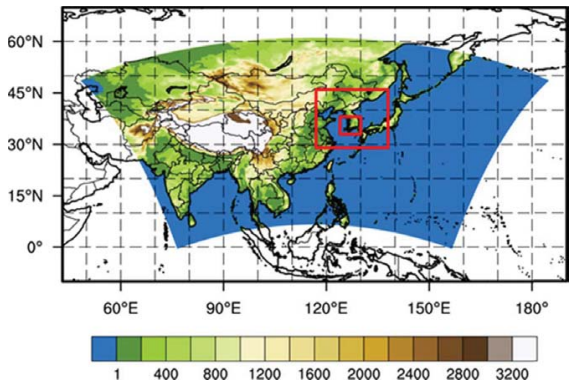

Fig. 1. CORDEX-East Asia Phase 2 domain and topography (Shaded). Boxed area denotes analysis region (Far East Asia and South Korea) used in this study.

Table 1. Domain information for analysis region.

Analysis region	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Far East Asia	29~46	117~138
South Korea	33~38	124~130

본 연구에서는 WRF 모형을 이용하여 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 현재 기후를 재현하였고, 특히 극동아시아 및 한반도 지역에 대한 모형의 강수 모의성능을 평가하였다. 2장에서는 연구에 사용된 자료 및 실험설계를 설명하였고, 3장에서는 극동아시아 및 남한 지역 강수 특성(공간분포, 시간변동, 극한사상 등)에 대한 WRF 모형의 모의수준을 평가하였다. 마지막으로 4장에서는 연구의 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 실험 방법

본 연구에서는 한반도 및 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 현재기후에 대하여 WRF 모형의 강수 모의성능을 평가하였다. 이를 위해 측면 경계 조건으로 6시간 간격의 ERA-INT 자료를 사용하였다. ERA-INT 자료의 수평해상도는 약 0.75° × 0.75°이다(Simmons et al., 2007).

Figure 1은 WRF 모형에서 설정한 모의영역(CORDEX 동아시아 2단계 영역)을 보여준다. 본 연구에서는 강수의 모의성능 평가를 위한 분석대상 영역으로 극동아시아(29~46°N, 117~138°E)와 남한(33~38°N, 124~130°E) 지역을 선정하였다(Table 1). 생산된 재현기후 자료의 수평해상도는 25 km이며 구름 모수화 방안은

Table 2. Model configuration used in this study.

Contents	Details	
Resolution	250 × 395 (25 km)	30(eta) levels
Reference position	Longitude: 116.57°/ Latitude: 34.4° (Lambert Conformal)	
Microphysics	WSM3	Hong et al. (2004)
Long/Short Waves	CAM	Collins et al. (2002)
Land Surface	Noah	Chen and Dudhia (2001)
PBL	Yonsei University(YSU)	Hong et al. (2006)
Cumulus	BMJ	Janjić (1994)
Spectral Nudging	Applied	

WRF-Single-Moment 3-class (WSM3, Hong et al., 2004), 복사 모수화 방안은 Community Atmospheric Model (CAM) scheme (Collins et al., 2002), 지표면은 Noah Land Surface Model (Chen and Dudhia, 2001) 그리고 행성경계층은 Yonsei University (YSU) 행성경계층 모수화 방안(Hong et al., 2006)을 사용하였다. 이와 함께 사용된 적운 모수화 방안은 Betts-Miller-Janiic (BMJ, Betts and Miller, 1986; Janjić, 1994)이다. Choi and Ahn (2017)은 본 연구와 같은 영역에 대하여 WSM3와 세 가지 적운 모수화 방안[Kain (Kain, 2004), BMJ 그리고 Grell-Devenyi Ensemble (Grell and Dévényi, 2002)]을 조합하여 민감도 실험을 수행하였고, 이를 통해 BMJ 방안이 동아시아 기후 모의에 우수한 모의성능을 보인다고 제시하였다. Lee et al. (2016b)는 스펙트럴 넛징을 적용한 CCLM 모형을 이용하여 CORDEX 동아시아 2단계 영역에 대한 재현 실험을 수행하였고, 이를 통해 CCLM의 모의성능과 스펙트럴 넛징 효과를 분석하였다. 본 연구에서도 모형의 계통오차를 줄이고 강수의 모의성능을 향상을 위해 스펙트럴 넛징 기법을 적용하였다(von Storch et al., 2000; Cha and Lee, 2009)(Table 2). WRF 모형을 이용해 생산된 재현자료의 기간은 1979년에서 2013년까지 총 35년이다.

Asian Precipitation Highly - Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of water resources (APHRODITE, Yatagi et al., 2012) 자료는 0.25° × 0.25° 간격의 강수 재분석 자료로, rain-gauge-observation 기반의 일 단위 강수 격자자료를 제공한다. 기존의 APHRODITE 자료는 아시아 지역의 강수에 대해 비교적 시공간적 정보가 정확한 것으로 알려져 있으나, 극한 강수를 과소 모의하는 것으로 나타났다(Yatagi et al., 2012; Lee et al., 2017b). 이에 Lee et al. (2017b)은 Generalized Extreme Value distribution과 분위사상법을 이용해 남한 지역에 대한 APHRODITE 자료의 강수극한값을 개선하였다. 본 연구에서는 개선된 APHRODITE 자료(Lee et al., 2017b)를 이용하여 WRF 모형의 강수 재현능력을 평가하였다. 분석기간은 자료의 제공 기간에 맞춰 1981년부터 2005년까지 총 25년이다.

APHRODITE는 해상의 강수 정보를 제공하지 않기 때문에 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 version 7 (Huffman et al., 2007) 일 강수 자료와 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) version 2.2 (Adler et al., 2003)의 5일 평균 강수자료를 추가하여 WRF 모형의 여름철 강수밴드 모의능력을 평가하였다. TRMM과 GPCP의 수평격자 해상도는 각각 0.25° × 0.25°와 2.5° × 2.5°이다. GPCP의 분석기간은 WRF, ERA-INT 및 APHRODITE와 동일하나, TRMM 자료의 분석기간은 1998년부터 2015년까지이다.

3. 결 과

WRF 모형이 재현한 CORDEX 동아시아 2단계영역 강수의 계통 오차를 살펴보기 위해 여름철과 겨울철 강수의 기후값 및 관측으로부터의 편의를 Figs. 2, 3에 나타내었다. Figure 2는 APHRODITE, ERA-INT 그리고 WRF가 재현한 여름철 강수의 공간분포를 나타낸 그림이다. APHRODITE 관측 자료를 살펴보면 주요 몬순지역(인도, 동남아시아, 한국, 중국 및 일본)에서 강수량이 많은 것으로 나타난다. 특히, 히말라야 산맥, 베트남, 그리고 인도 및 미얀마의 서쪽 해안을 따라 강한 강수 밴드가 나타난다(Fig. 2a). 이와 같은 특징은 WRF에서도 유사하게 나타난다(Fig. 2b). 하지만 관측으로부터의 편의를 살펴보면 동아시아 지역의 강수를 과대 모의하는 특징을 가진다(Figs. 2e, f). 특히, 관측에서 강수가 많은 지역(히말라야 산맥 남쪽지역, 파키스탄, 인도의 서쪽 해안 등)에 대해서 강수를

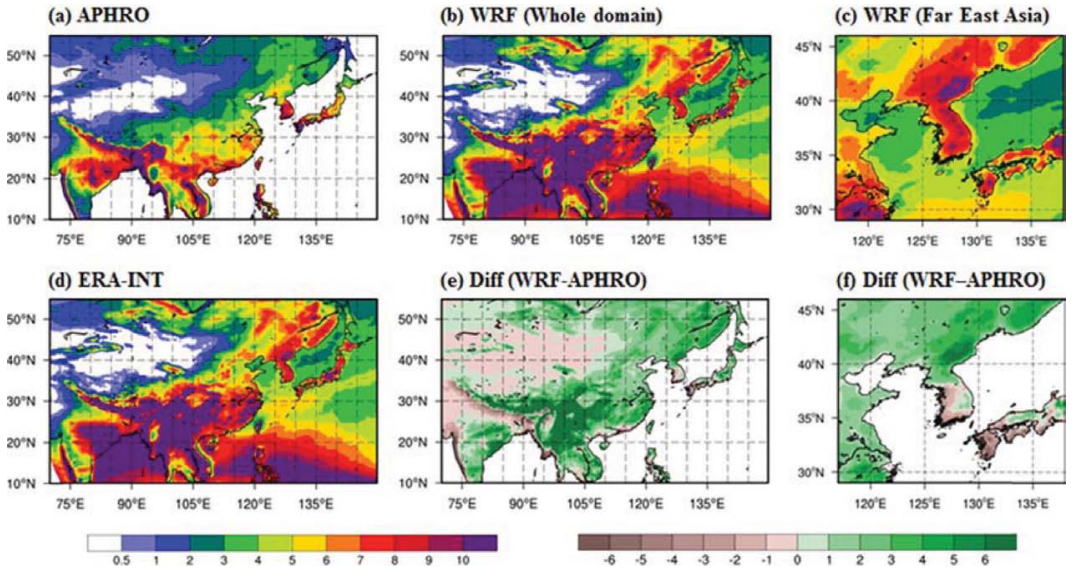

Fig. 2. Boreal summer precipitation climatology (mm d^{-1}) with respect to (a) APHRODITE, (b) WRF (Whole domain), (c) WRF (Far East Asia) (d) ERA-INT and bias of (e) WRF (Whole Domain), (f) WRF (Far East Asia) compared with APHRODITE.

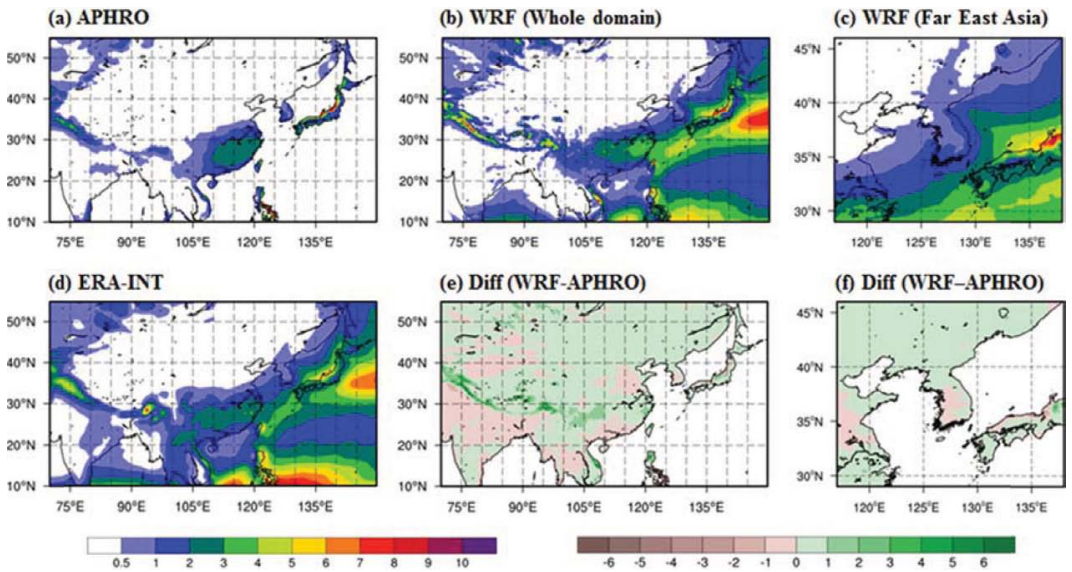

Fig. 3. Same as Fig. 2 but for Boreal winter.

과대 모의하는 것으로 나타났으며, 인도차이나 반도를 포함한 동남아시아 지역에서도 강수를 과대 모의하는 특성을 보인다. 이와 반대로, 한반도, 일본 및 인도 등에서는 강수의 건조 편의가 뚜렷하게 나타난다. CORDEX 동아시아 phase 2를 기반으로 한 Lee et al. (2016b)의 연구 결과에 따르면 CCLM 모형도 WRF 모형과 마찬가지로 동아시아 지역에 전반적으로 습윤 편차를, 반대로 남한지역에는 건조 편차를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 한편, CORDEX-EA Phase I 영역에서 5종의 RCM을 이용한 재현실험의 결과를 살펴보면 RegCM4, CCLM, HadGEM3-RA은 한반도 주변에 건조편의를, SNU-MM5, YSU-RSM 모형은 습윤

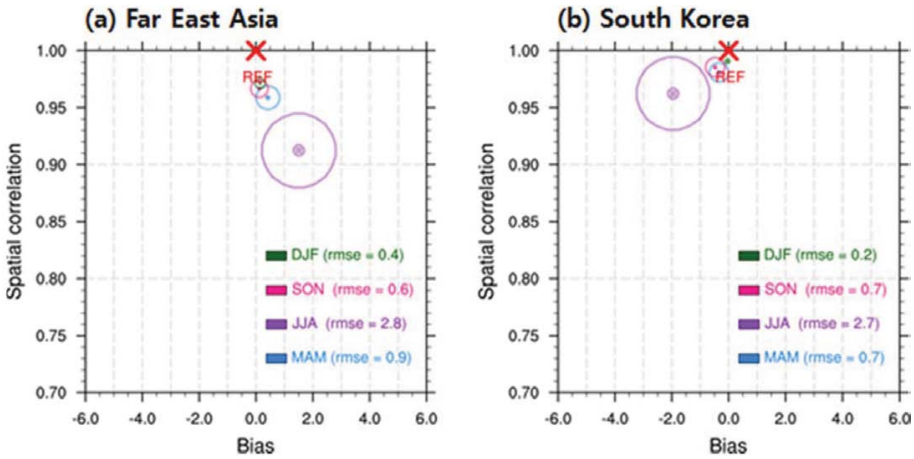

Fig. 4. BCR diagram for seasonal mean precipitation over (a) Far East Asia and (b) South Korea. The size of circle indicates RMSE.

편의를 보인 것을 확인할 수 있다(Oh et al., 2011; Park et al., 2013; Huang et al., 2015). 즉, 지역기후모형을 이용한 기후모의 결과는 사용된 모형에 의존적인 것을 의미한다. 그러므로 CORDEX 동아시아 2단계영역에 대하여 지역기후변화를 전망하기 위해서는 향후 다중지역기후모형 앙상블을 이용한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, ERA-INT에서 나타난 몽골 지역의 약한 건조 편의는 WRF 모형을 통해 더욱 강해졌지만, 한반도를 포함한 일부 지역(히말라야 산맥, 인도 서쪽 해안, 일본)의 건조 편의는 WRF 모형을 이용한 재현실험에서 개선되어 나타났다. 이는 WRF 모형이 생산한 부가정보(added value) 때문인 것으로 사료된다(Figs. 2e, f; ERA-INT의 편의는 그림으로 제시하지 않음).

여름철에 비해 강수가 작은 겨울철에는, 히말라야 산맥 부근, 중국 동부 그리고 일본 및 한반도를 포함한 극동아시아 영역에서 강수가 많은 것으로 나타났다(Fig. 3a). 전반적으로 WRF 모형은 겨울철 강수의 공간패턴을 관측과 유사하게 잘 재현하였다(Figs. 3b, c). ERA-INT의 경우(ERA-INT의 편의는 그림으로 제시하지 않음) 관측과 비교하여 인도차이나 반도에서 큰 습윤 편의가 나타났는데, 이러한 편의는 WRF를 이용한 재현실험에서 다소 감소하였다. 또한, 양쯔강 이남에서 나타난 강수의 음의 편의도 역학적 규모축소 이후 줄어들거나 양의 강수 편의가 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 WRF는 해당지역에서 경계 조건으로 사용된 ERA-INT 보다 강수를 많이 모의하는 것으로 나타났다.

Figure 4 극동아시아 및 남한의 강수 공간분포에 대한 WRF와 관측간의 통계값(Bias, Spatial correlation and Root mean square error; BCR)을 나타낸 다이어그램이다. BCR 다이어그램의 X축은 관측 대비 모형의 편의, Y축은 공관상관계수를 나타내고, 각 점의 크기는 공간에 대한 Root Mean Square Error (RMSE) 값을 나타낸다. 즉, 모형의 재현 결과가 관측과 유사할수록 X축의 편의값은 0에, Y축의 공간상관계수는 1에, 그리고 반지름 RMSE는 0에 가깝다(빨간 ×로 표시된 REF점으로 수렴). 먼저 극동아시아 영역에 대한 BCR 다이어그램을 살펴보면 강수의 공간적 분포는 모든 계절에서 공간상관계수가 0.9 이상으로 WRF가 강수의 공간적 분포를 잘 모의하는 것을 알 수 있다(Fig. 4a). 이때 공간상관계수는 아노말리의 영역 평균값을 고려한 uncentered 방식으로 계산되었다(DelSole and Shukla 2006). 강수량이 많은 여름철에 편의와 RMSE가 가장 크게 나타났고, 공간상관계수는 가장 낮게 나타났다. 이는 Hong and Ahn (2015)에서 제시한 공간상관계수와 유사한 수준이다. 극동아시아 영역에 대해서는 WRF 모형이 모든 계절에서 양의 편의를 나타내 강수를 관측에 비해 과대 모의하는 것으로 나타났다. 한편 남한영역에 대해서는 극동아시아 영역 전체와 달리 모든 계절에서 음의 편의가 나타났고, 이는 앞서 Figs. 2, 3에서 보인 편의와 일치한다(Fig. 4b).

WRF 모형이 강수의 계절 변동을 관측과 유사하게 모의하는지 평가하기 위해 Fig. 5에서는 극동아시아 및 남한 영역에 대한 강수의 계절변화를 시계열로 나타내었다. 검은색 실선은 APHRODITE 강수자료, 파란색 실선은 WRF가 재현한 강수를 나타내고, X축은 월, Y축은 월평균 강수(mm d^{-1})를 의미한다. 극동아시아 영역은 동아시아 여름몬순지역으로 대부분 강수

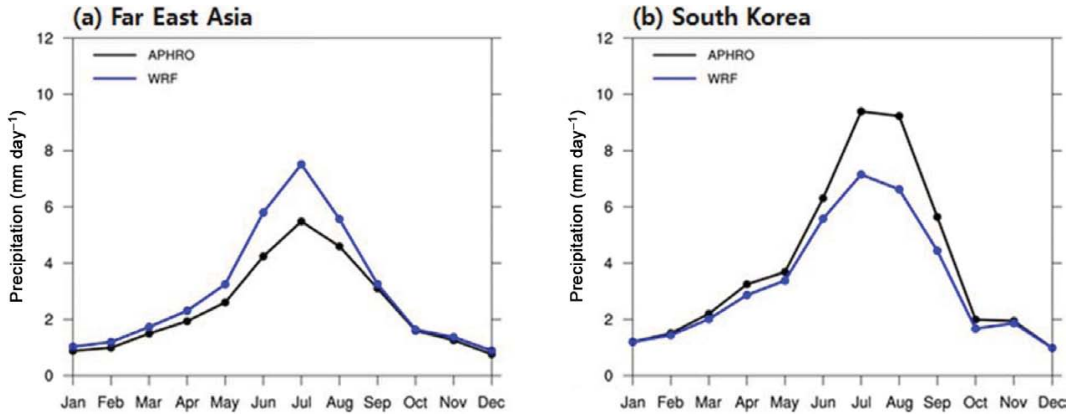

Fig. 5. Climatological annual cycle of precipitation over (a) Far East Asia and (b) South Korea.

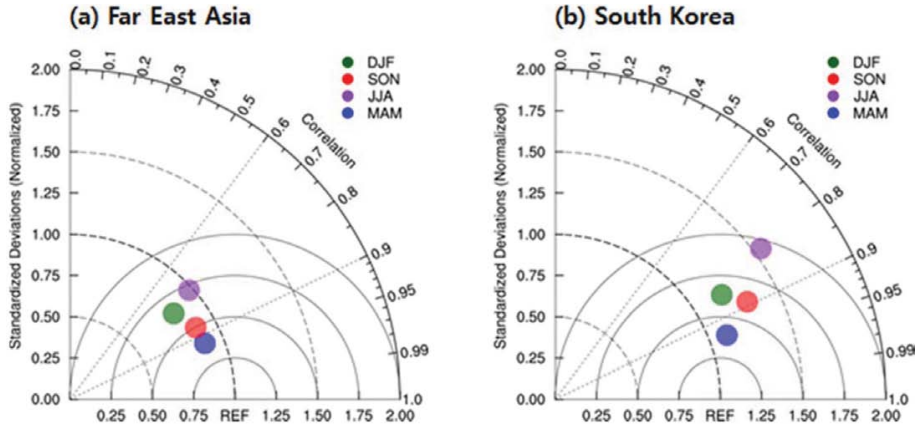

Fig. 6. Taylor diagram for seasonal mean precipitation over (a) Far East Asia and (b) South Korea region for the period from 1981 through 2005. REF point means WRF reproduction are exactly agree with APHRODITE data.

가 여름철(JJA)에 집중되어 나타난다(Wang and LinHo, 2002). APHRODITE에 나타난 극동아시아 강수의 계절변동성을 살펴보면 7월에 강수의 피크가 나타났으며, 8월, 6월의 강수는 그 뒤를 따르는 형태를 보인다(Fig. 5a). WRF 모형도 이와 같은 강수의 계절변동성(여름철에 피크)을 관측과 유사하게 모의 하였다. 또한, APHRODITE 자료를 살펴보면, 남한영역의 강수가 6월부터 크게 증가하기 시작해 7, 8월에 최댓값이 나타나는 특징을 보인다. WRF 모형에서도 이와 같은 특징이 잘 나타나지만, 앞서 분석한 바와 같이 WRF는 관측에 비해 여름철 강수를 과소 모의하는 특성을 보인다(Fig. 5b).

WRF가 모의한 강수의 경년변동성을 평가하고자 Taylor 다이어그램 분석을 수행하였다(Fig. 6). Taylor 다이어그램은 모형의 경년변동 모의성능을 평가할 수 있는 통계적 방법으로 가로/세로축은 표준편차비(관측 표준편차 대비 모형의 표준편차 비율)를, 호는 시간상관계수를 나타낸다(Taylor, 2001). 따라서 표준편차비와 시간상관계수가 1(가로축의 REF)에 가까울수록 WRF의 모의 결과는 관측과 잘 일치한다. 그림에서 파란색, 보라색, 빨간색, 녹색은 각각 봄, 여름, 가을, 겨울철 결과를 나타낸다. 먼저 극동아시아 강수에 대한 모형 결과를 분석해보면, 전반적으로 WRF는 극동아시아 강수의 시간변동을 관측과 유사하게 잘 모의한다. 하지만, 시간상관계수(0.74~0.92) 및 표준편차비(0.82~0.98)는 계절에 따라 다소 차이를 보인다. 즉, WRF가 모의한 동아시아 봄철(여름철) 강수는 관측과 비교하여 높은(낮은) 시간상관성을 보인다. 또한, 여름철 강수의 표준편차비는 0.98로 1에 가까운 반면, 봄, 가을, 겨울철 강수의 표준편차비는 각각 0.89, 0.88, 0.82로 비교적 1보다 낮게 나타난다. 또한, 남한에 대한 결과를 살펴보면, WRF가 모의한 남한 강수의 시

Table 3. Summary of basic statistics derived from Fig. 6 during the reproduction period (1981~2005) over the Far East Asia and South Korea (parenthesis).

Season	Correlation	Normalized standard deviation
Spring	0.92 (0.94)	0.89 (1.11)
Summer	0.74 (0.81)	0.98 (1.54)
Autumn	0.87 (0.89)	0.88 (1.30)
Winter	0.77 (0.85)	0.82 (1.19)

간상관계수는 0.81~0.94로 통계적으로 99% 유의하게 나타났으며, 표준편차비는 1.11~1.54로 비교적 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다(Table 3). 다시 말해서, WRF 모형은 극동아시아 지역에 대해서 관측보다 표준편차를 작게 모의하는 특성을 보이는 반면, 남한 지역에 대해서 관측보다 표준편차를 크게 모의하는 특성을 보인다. 이와 더불어, WRF의 모의결과는 분석지역 및 계절에 따라 다소 차이가 있지만 전반적으로 봄철에 우수한 모의수준을 보이며, 여름철 강수에 대해서는 낮은 모의수준을 보인다.

한반도 여름철 강수밴드의 이동을 WRF가 잘 모의하는지 알아보기 위하여, Hovmöller 다이어그램 분석을 수행하였다(Fig. 7). 먼저 TRMM 관측 자료를 살펴보면, 동아시아 몬순 강수밴드는 6월 초에서 7월 중순까지 일본 남쪽(약 30°N)에서 한반도로 북상한다. 그리고 강수밴드는 7월 중순 이후 점점 약해지다가 8월 중순부터는 다시 강해지면서 한반도 남쪽으로 이동한다(Fig. 7a). 이러한 강수밴드의 특성은 GPCP 관측 자료에서도 유사하게 나타난다(Fig. 7b). 또한, WRF의 측면 경계 강제력으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료에서도 이러한 강수밴드의 이동이 잘 보인다. 하지만, ERA-INT 재분석 자료의 경우, 강수밴드의 발달 시점이 TRMM, GPCP 보다 조금 늦게 나타나며, 6월 말 한반도로 북상해서 8월 중순 한반도로 남하하는 강수밴드를 약하게 모의하는 특징을 보인다(Fig. 7c). 이러한 특성은 WRF를 이용한 재현실험에서도 유사하게 나타나지만, 여름철(6월 말부터 8월 중순까지) 강수모의에서는 WRF가 ERA-INT 보다 우수한 모의수준을 보인다(Fig. 7d). 이러한 결과는 공간장 분석 결과와도 잘 일치한다(Fig. 2).

Figure 8은 ERA-INT과 WRF가 모의한 여름철 하층 바람장과 혼합비의 분포를 나타낸 그림이다. WRF의 측면 경계장으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료는 여름철 북태평양 고기압의 확장과 그에 따른 동아시아 몬순순환의 특징을 잘 나타내고 있다. 특히, 동아시아 해안을 따라 강하게 발달한 하층제트의 영향으로 저위도의 고온다습한 공기가 남중국해를 거쳐 한반도로 유입되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 동아시

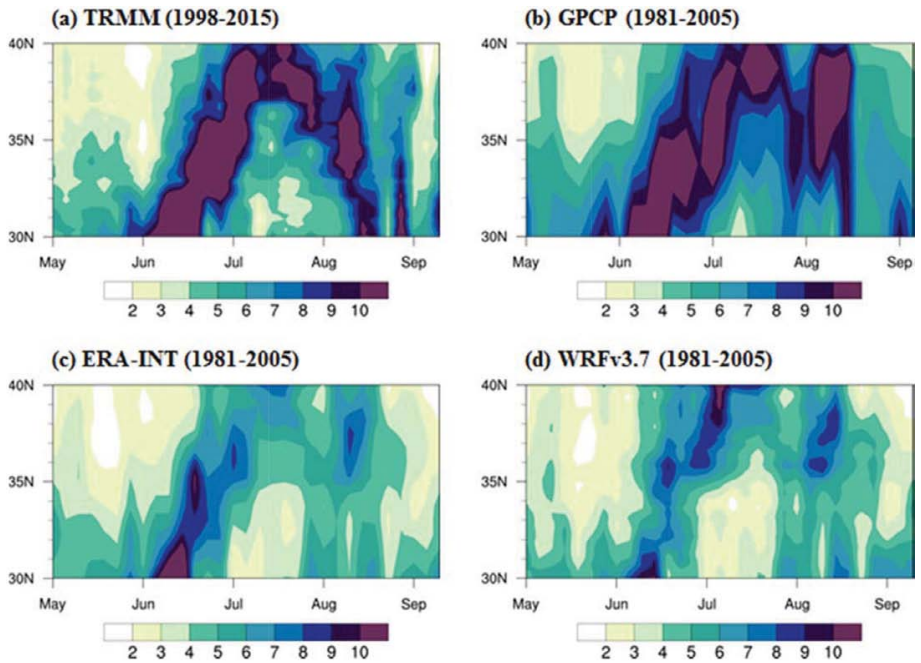

Fig. 7. Hovmöller plot of precipitation (mm d^{-1}) over Korean Peninsula (126~130°E) for (a) TRMM, (b) GPCP, (c) ERA-INT, (d) WRF reproduction simulation for the period from 1981 through 2005.

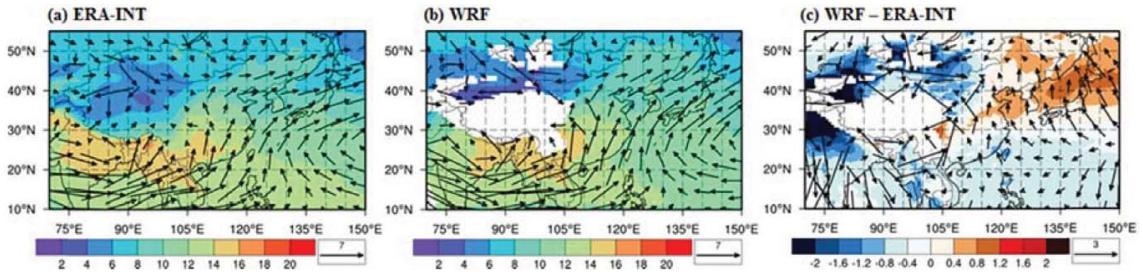

Fig. 8. Boreal summer mean 850 hPa wind vectors (m s^{-1}) and specific humidity (g kg^{-1}) with respect to (a) ERA-INT, (b) WRF and (c) bias of WRF compared with ERA-INT.

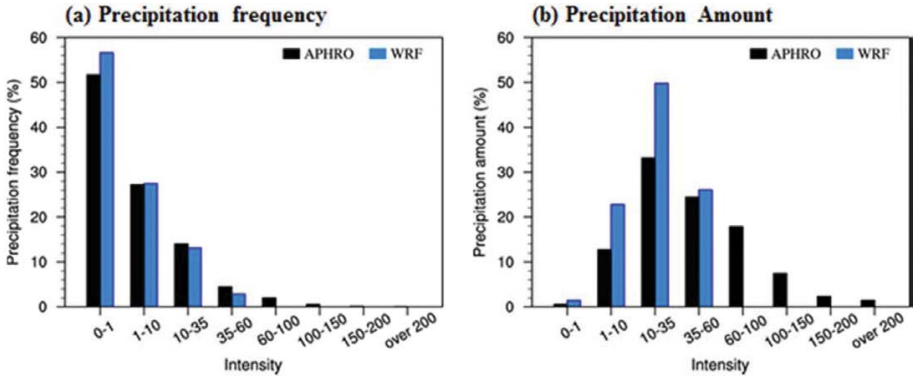

Fig. 9. Fraction distribution of precipitation (a) frequency and (b) amount according to precipitation intensity (mm d^{-1}) over South Korea.

아 여름 몬순의 특성은 WRF 모형의 재현실험에서도 유사하게 나타난다. 하지만 WRF의 결과는 ERA-INT 재분석자료에 비해 하층 제트를 상대적으로 강하게 모의하는 특성을 보인다. 이에 따라 한반도에 더 많은 습윤공기가 유입되면서 여름철 남한 강수의 건조 편의를 줄이는 역할을 하는 것으로 나타났다.

앞선 분석에서는 시간 및 공간 평균된 강수의 특성을 분석하였다. 하지만 이러한 분석들은 강수강도에 따른 강수의 특징을 분석하는데 있어 한계를 가진다. 따라서, Fig. 9에서는 강수 강도별 강수빈도와 강수량 분포에 WRF의 모의수준을 평가하고자 하였다. 관측의 경우 10 mm d^{-1} 미만의 강수강도에서 약 70% (20%)의 강수빈도(강수량)를 나타낸다. 재현실험 결과를 살펴보면, WRF는 전반적으로 10 mm d^{-1} 보다 약한 강수의 빈도수를 관측보다 과다 모의하고 10 mm d^{-1} 보다 강한 강수의 빈도수를 관측보다 과소 모의하는 특성을 보인다. 또한, 강수량 모의에서 WRF는 60 mm d^{-1} 보다 약한 강수를 관측보다 과대 모의하고 있으며, 60 mm d^{-1} 강한 강수를 관측보다 과소 모의하는 특성을 보인다. 즉, WRF는 강수강도가 약한 강수에서 강수빈도와 강수량을 관측보다 과대하게 모의하는 반면, 강수강도가 강한 강수에서는 강수빈도와 강수량을 관측보다 과소 모의하는 특성을 보인다. 이는 RegCM4를 이용한 CORDEX 동아시아 영역 1단계 재현실험의 결과와도 일치하였으며(Oh et al., 2011), 지역기후모형이 강수강도에 따른 강수빈도 및 강수량을 모의함에 있어 계통적 오차를 보인다는 선행 연구 결과와도 일치한다(Im et al., 2015; Ahn et al., 2016; Choi and Ahn, 2017).

지역기후모형을 이용하여 미래 기후변화를 예측하기 위해서는 강수의 평균적인 특성 이외에도 극한 강수 현상에 대한 모형의 모의수준을 평가하는 것도 중요하다. Figure 10은 연중 강수일수(WDAY)와 상위 95%의 강수강도(PR95)에 대한 WRF의 모의수준을 나타낸 것이다. WDAY는 일 강수량이 1 mm d^{-1} 이상인 날의 연중 일수로 정의하였고, PR95는 일 강수량의 확률분포에서 95퍼센타일을 초과하는 강수의 평균값으로 정의하였다. APHRODITE 관측 자료를 살펴보면, 남한의 연평균 WDAY는 70~115일의 분포를 보인다. 특히, 경상도를 제외한 남한 전역에서 WDAY가 90일 이상으로 나타나고, 강원도에서 WDAY(113일)가 가장 높게 나타난다. 이러한 특성은 WRF 모형

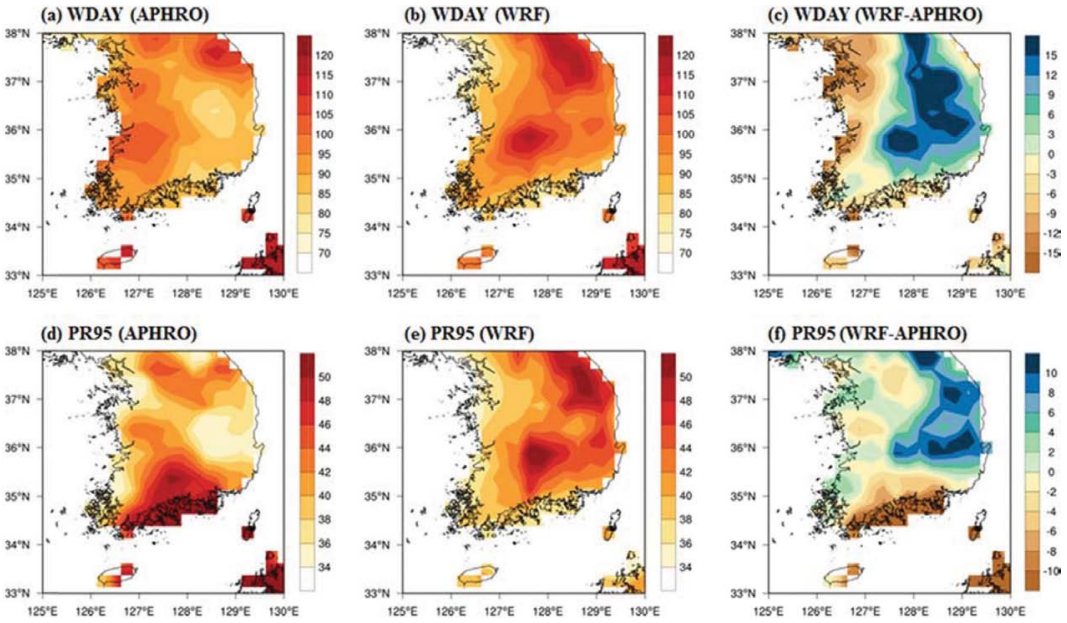

Fig. 10. Spatial distribution of (a, b, c) number of wet days and (d, e, f) precipitation intensity above the 95 percentile with respect to (a, d) APHRODITE, (b, e) WRF, (c, f) difference between WRF and APHRODITE.

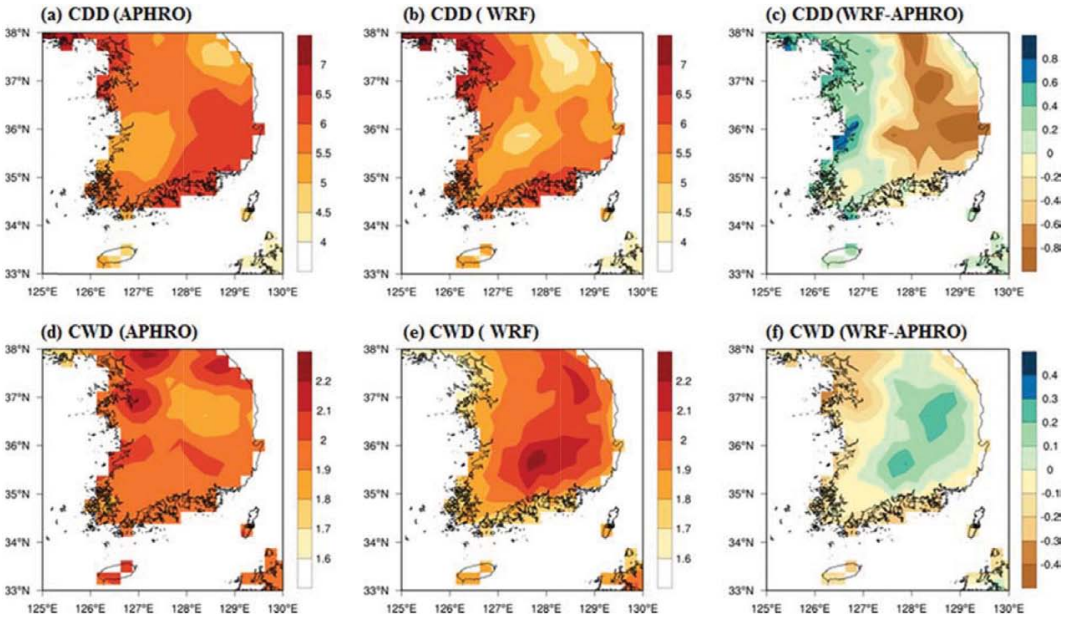

Fig. 11. Spatial distribution of (a, b, c) consecutive dry days and (d, e, f) consecutive wet days with respect to (a, d) APHRODITE, (b, e) WRF, (c, f) difference between WRF and APHRODITE.

의 결과에서도 유사하게 나타난다. 그러나 WRF를 이용한 재현 실험에서는 태백산맥과 소백산맥 등 주로 산악 지역의 WDAY를 다소 높게 모의하는 특성을 보인다. 반면, 경기도를 포함한 남한 서부 지역에서는 WDAY를 다소 낮게 모의하는 특성을 보인다.

강수 강도를 나타내는 PR95 지수는 강수 빈도수를

나타내는 WDAY와 유사한 공간 분포를 보인다. APHRODITE 자료를 분석해 보면, PR95는 남한 전역에서 21~56 mm d^{-1}의 분포를 보인다. 특히, 전라도에서 PR95 (56 mm d^{-1})가 가장 높게 나타나며, 경상북도를 포함한 서해안 일부 지역에서 PR95가 낮게 나타나는 특징을 보인다. WRF를 이용한 재현 실험에서도 이와 비슷한 공간분포를 보인다. 하지만 WRF를 이용한 재현실험에서는 PR95가 산악지역을 중심으로 과대 모의되는 특징을 보이며, 경기도와 전라도 일부 지역에서는 PR95가 다소 과소 모의되는 특성을 보인다.

이와 더불어 강수 지속기간에 대한 WRF의 모의수준을 검증하고자 연속무강수일수(CDD)와 연속강수일수(CWD)에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 일 강수량이 연속적으로 1 mm d^{-1} 미만인 경우를 CDD로, 연속적으로 1 mm d^{-1} 이상일 때를 CWD로 정의하였다. 그리고 이를 25년 평균하여 Fig. 10에 나타내었다. APHRODITE 자료를 살펴보면, CDD는 WDAY, PR95와 상반되는 공간 분포를 보인다. 즉, 경상도에는 CDD가 6.5일 이상으로 높게 나타나고 강원도와 전라도 일부 지역에서는 CDD가 5일 미만으로 낮게 나타난다. 이러한 특징은 WRF를 이용한 재현 실험에서도 유사하게 나타난다. 하지만 WRF는 127.5°E를 기준으로 남한 서부지역의 CDD를 과대 모의하는 특성을 보이며, 남한 동부지역의 CDD를 과소 모의하는 특성을 보인다. 이러한 결과는 앞서 설명한 Fig. 9의 분석결과와도 일치하는 결과이다.

또한, CWD에 대한 결과를 살펴보면, APHRODITE 자료의 연평균 CWD는 1.6~2.2일의 분포를 보인다. 특히 경기도와 강원도를 포함한 고위도 지역에서 CWD가 높게 나타나지만, 경상북도에서는 CWD가 비교적 낮게 나타난다. 하지만 WRF는 이러한 CWD의 공간분포 특성을 모의하는데 있어 한계점을 보인다. 전반적으로 WRF는 남한의 동부지역에서 CWD를 과다 모의하는 특성을 보이며, 남한의 서부지역에서 CWD가 과소 모의되는 특성을 보인다. 이러한 결과는 앞서 제시한 Figs. 10, 11a와도 일맥 상통한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 동아시아 지역의 미래 기후변화를 전망하기에 앞서 지역기후모형의 현재기후 모의수준을 평가하였다. 이를 위해, ERA-INT 자료를 경계조건으로 처방한 WRF를 이용하여 CORDEX 동아시아 2단계 영역에 대한 현재기후(1979~2013) 재현실험을 수행하였다. 분석기간은 1981년부터 2005년까지 총 25년이며, 분석영역은 동아시아 몬순에 영향을 받는 남한(33~38°N, 124~130°E)과 극동아시아(29~46°N, 117~138°E) 지역이다.

연구 결과에 따르면 WRF는 동아시아 지역의 강수 공간분포를 관측과 유사하게 모의하지만 전반적으로 동아시아 지역 강수를 과대 모의하는 특징을 보인다. 이러한 특성은 WRF의 경계조건으로 사용된 ERA-INT 자료에서도 유사하게 나타난다. 특히, WRF와 ERA-INT는 공통적으로 인도차이나 반도를 포함한 동남아시아 지역의 여름철 강수를 과대 모의하는 특성을 보인다. 이와 반대로, 한반도, 일본 및 인도 일부 지역에서는 WRF 및 ERA-INT가 여름철 강수를 관측에 비해 과소 모의하는 특성을 보인다. 하지만 한반도 및 일본 일부 지역에 나타나는 건조편의는 WRF 모형에 의해 다소 해소되는 것으로 나타났다. 이는 WRF 모형이 ERA-INT 재분석자료보다 하층제트를 강하게 모의하여 한반도에 습윤공기의 유입을 증가시키기 때문으로 나타났다. 겨울철 강수를 살펴보면, WRF는 전반적으로 동아시아 지역의 강수량과 강수의 공간패턴을 관측과 유사하게 잘 모의한다. 즉, 지역기후모형은 ERA-INT에서 나타난 인도차이나 반도에서의 강수 습윤편의를 약화시키는 특성을 보인다. 또한, BCR diagram 및 계절 변동성 분석 결과, WRF는 극동아시아(남한) 지역의 강수를 계절에 상관없이 과대(과소) 모의하고 있으며, 특히 여름철을 제외한 나머지 세 계절의 강수를 관측과 유사하게 잘 재현하였다.

전반적으로 WRF를 이용한 재현실험 결과는 극동아시아 영역과 남한의 강수 경년변동을 관측과 유사하게 잘 모의하지만, 표준편차는 극동아시아(남한) 지역에 대해 관측보다 작게(크게) 모의하는 특성을 보인다. 또한, 한반도 여름철 강수밴드의 이동 패턴을 관측과 유사하게 모의하며, 여름철(6월 말부터 8월 중순까지) 강수량 모의에서 ERA-INT 보다 우수한 모의수준을 보인다. 하지만, ERA-INT와 WRF는 공통적으로 여름철 강수밴드의 발달 시점을 TRMM과 GPCP 보다 조금 늦게 모의하며, 6월 말 한반도로 북상해서 8월 중순 한반도로 남하하는 강수밴드를 약하게 모의하는 특성을 보인다.

극한강수현상에 대한 모형의 모의수준을 평가해 보면, 강수강도에 따른 강수특성의 경우, WRF는 강수강도가 약한 강수에서 강수빈도와 강수량을 관측보다 많이 모의하는 반면, 강수강도가 강한 강수에서는 강수빈도와 강수량을 관측보다 작게 모의하는 특성을 보인다. 또한, WRF를 이용한 재현 실험에서는 태백산맥과 소백산맥 등 주로 산악 지역의 WDAY(PR95)를 다소 높게 모의하는 특성을 보인다. 반면, 경기도를 포함한 남한 서부(경기도와 전라도 일부) 지역에서는 WDAY(PR95)를 다소 낮게 모의하는 것으로 나타났다. 이와 더불어 강수 지속기간에 대한 WRF의 모의수준을 검증하고자 연속무강수일수(CDD)와 연속

강수일수(CWD)에 대한 분석을 수행하였다. 전반적으로 WRF는 127.5°E를 기준으로 남한 서부지역의 CDD(CWD)를 과대(과소) 모의하는 특성을 보이며, 남한 동부지역의 CDD(CWD)를 과소(과대) 모의하는 특성을 보인다.

본 연구의 결과는 극동아시아 및 남한 지역의 미래 기후변화를 전망하기에 앞서 수행된 실험으로 CORDEX 동아시아 2단계 지역에 대한 WRF의 모의수준을 평가한 데에 의의가 있다. 결론적으로 WRF는 전반적으로 극동아시아 및 남한의 상세기후를 관측과 유사하게 재현하지만, 분석지역 별로 상이한 강수의 모의수준을 나타낸다. 본 연구의 결과는 향후 WRF를 이용한 극동아시아 및 남한 지역의 미래 기후변화 전망에 대한 기준자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시 · 예측 및 국가정책 지원 강화 사업(KMIPA 2015-2081)의 지원으로 수행되었으며, 이 연구에 기상청 슈퍼컴퓨터가 활용되도록 지원해준 기상청 슈퍼컴퓨터 운영과에 감사드립니다.

REFERENCES

Adler, R. F., and Coauthors, 2003: The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979 - present). *J. Hydrometeorol*., **4**, 1147-1167.

Ahn, J.-B., Y.-W. Choi, S. Jo, and J.-Y. Hong, 2014: Projection of 21st century climate over Korean Peninsula: Temperature and precipitation simulated by WRFV3.4 based on RCP4.5 and 8.5 scenarios. *Atmosphere*, **24**, 541-554, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.541 (in Korean with English abstract).

_____, and Coauthors, 2016: Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 223-236, doi:10.1007/s13143-016-0021-0.

Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air · mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693-709, doi:10.1002/qj.49711247308.

Cha, D.-H., and D.-K. Lee, 2009: Reduction of systematic errors in regional climate simulations of the summer monsoon over East Asia and the western North Pacific by applying the spectral nudging technique. *J. Geophys. Res.*, **114**, D14108, doi:10.1029/2008JD011176.

_____, and Coauthors, 2016: Future changes in summer precipitation in regional climate simulations over the Korean Peninsula forced by multi-RCP scenarios of HadGEM2-AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 139-149, doi:10.1007/s13143-016-0015-y.

Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.

Choi, Y.-W., J.-B. Ahn, M.-S. Suh, D.-H. Cha, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, and H.-S. Kang, 2016: Future changes in drought characteristics over South Korea using multi regional climate models with the standardized precipitation index. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 209-222, doi:10.1007/s13143-016-0020-1.

_____, and J. B. Ahn, 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**, 105-118, doi:10.14191/Atmos.2017.27.1.105 (in Korean with English abstract).

Collins, W. D., J. K. Hackney, and D. P. Edwards, 2002: An updated parameterization for infrared emission and absorption by water vapor in the National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model. *J. Geophys. Res.*, **107**, 17-20, doi:10.1029/2001JD001365.

DelSole, T., and J. Shukla, 2006: Specification of wintertime North American surface temperature. *J. Climate*, **19**, 2691-2716, doi:10.1175/JCLI3704.1.

Giorgi, F., and W. J. Gutowski, 2015: Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annu. Rev. Env. Resour.*, **40**, 467-490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.

Grell, G. A., and D. Dévényi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 38-1–38-4, doi:10.1029/2002GL015311.

Hong, J.-Y., and J.-B. Ahn, 2015: Changes of Early Summer Precipitation in the Korean Peninsula and Nearby Regions Based on RCP Simulations. *J. Climate*, **28**, 3557-3578, doi:10.1175/JCLI-D-14-00504.1.

Hong, S.-Y., 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, doi:10.1175/1520-0493(2004)

132<0103:ARATIM>2.0.CO;2.

_____, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341, doi:10.1175/MWR3199.1.

Huang, B., S. Polanski, and U. Cubasch, 2015: Assessment of precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-East Asia regional climate simulations. *Climate Res.*, **64**, 141-158, doi:10.3354/cr01302.

Huffman, G. J., D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, D. B. Wolff, R. F. Adler, G. Gu, Y. Hong, K. P. Bowman, and E. F. Stocker, 2007: The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J. Hydrometeor.*, **8**, 38-55, doi:10.1175/JHM560.1.

Im, E.-S., J.-B. Ahn, and S.-R. Jo, 2015: Regional climate projection over South Korea simulated by the HadGEM2-AO and WRF model chain under RCP emission scenarios. *Climate Res.*, **63**, 249-266, doi:10.3354/cr01292.

_____, Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2017: Robust intensification of hydroclimatic intensity over East Asia from multi-model ensemble regional projections. *Theor. Appl. Climatol.*, **129**, 1241-1254, doi:10.1007/s00704-016-1846-2.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press.

Janjić, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2.

Jin, C.-S., D.-H. Cha, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, H.-S. Kang, and C.-H. Ho, 2016: Evaluation of climatological tropical cyclone activity over the western North Pacific in the CORDEX-East Asia multi-RCM simulations. *Climate Dyn.*, **47**, 765-778, doi:10.1007/s00382-015-2869-6.

Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.

Lee, D., and Coauthors, 2016a: Time of emergence of anthropogenic warming signals in the Northeast Asia assessed from multi-regional climate models. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 129-137, doi:10.1007/s13143-016-0014-z.

_____, C. Park, Y.-H. Kim, and S.-K. Min, 2016b: Evaluation of the COSMO-CLM for East Asia climate simulations: Sensitivity to spectral nudging. *J. Clim. Res.*, **11**, 69-85, doi:10.14383/cri.2016.11.1.69 (in Korean with English abstract).

_____, and Coauthors, 2017a: Thermodynamic and dynamic contributions to future changes in summer precipitation over Northeast Asia and Korea: a multi-RCM study. *Climate Dyn.*, **49**, 4121-4139, doi:10.1007/s00382-017-3566-4.

Lee, G., D. H. Cha, and C. Park, 2017b: Improvement of Extreme Summer Precipitation over South Korea in APHRODITE Data. *J. Climate Res.*, **12**, 41-51, doi:10.14383/cri.2017.12.1.41 (in Korean with English abstract).

Lee, J.-W., S.-Y. Hong, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2014: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Climate Dyn.*, **42**, 733-747, doi:10.1007/s00382-013-1841-6.

Oh, S.-G., M.-S. Suh, J.-S. Myoung, and D.-H. Cha, 2011: Impact of boundary conditions and cumulus parameterization schemes on regional climate simulation over South-Korea in the CORDEX-East Asia domain using the RegCM4 model. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 373-387, doi:10.5467/JKESS.2011.32.4.373 (in Korean with English abstract).

_____, J.-H. Park, S.-H. Lee, and M.-S. Suh, 2014: Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *J. Geophys. Res.*, **119**, 2913-2927, doi:10.1002/2013JD020693.

_____, and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 2: precipitation. *Asia.-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 171-189, doi:10.1007/s13143-016-0018-8.

Park, J.-H., S.-G. Oh, and M.-S. Suh, 2013: Impacts of boundary conditions on the precipitation simulation of RegCM4 in the CORDEX East Asia domain. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1652-1667, doi:10.1002/jgrd.50159.

Simmons, A., S. Uppala, D. Dee, and S. Kobayashi, 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsl*., **110**, 25-35.

Suh, M.-S., and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 1: surface air temperature. *Asia.-Pac.*

J. Atmos. Sci., **52**, 151-169, doi:10.1007/s13143-016-0017-9.

Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7183-7192, doi:10.1029/2000JD900719.

_____, R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

von Storch, H., H. Langenberg, and F. Feser, 2000: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3664-3673, doi:10.1175/1520-0493(2000)128<3664:ASNTFD>2.0.CO;2.

Wang, B., and LinHo, 2002: Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J. Climate*, **15**, 386-398, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0386:RSOTAP>2.0.CO;2.

WCRP, 2014: Report of the first session of the CORDEX Science Advisory Team (SAT), WCRP Report No. 14/2014, 29 pp.

Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi, and A. Kitoh, 2012: APHRODITE Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1401-1415, doi:10.1175/BAMS-D-11-00122.1.

Zou, L., T. Zhou, and D. Peng, 2016: Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX East Asia domain: A comparison of regional ocean-atmosphere coupled model to stand-alone RCM simulations. *J. Geophys. Res.*, **121**, 1442-1458, doi:10.1002/2015JD023912.