

WRF 모형의 적운 모수화 방안이 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 기후 모의에 미치는 영향

최연우 · 안중배*

부산대학교 지구환경시스템학부

(접수일: 2016년 12월 14일, 수정일: 2017년 2월 13일, 게재확정일: 2017년 2월 23일)

Impact of Cumulus Parameterization Schemes on the Regional Climate Simulation for the Domain of CORDEX-East Asia Phase 2 Using WRF Model

Yeon-Woo Choi and Joong-Bae Ahn*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 14 December 2016; revised 13 February 2017; accepted 23 February 2017)

Abstract This study assesses the performance of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in reproducing regional climate over CORDEX-East Asia Phase 2 domain with different cumulus parameterization schemes [Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjic (BM), and Grell-Devenyi-Ensemble (GD)]. The model is integrated for 27 months from January 1979 to March 1981 and the initial and boundary conditions are derived from European Centre for Medium-Range Weather Forecast Interim Reanalysis (ERA-Interim). The WRF model reasonably reproduces the temperature and precipitation characteristics over East Asia, but the regional scale responses are very sensitive to cumulus parameterization schemes. In terms of mean bias, WRF model with BM scheme shows the best performance in terms of summer/winter mean precipitation as well as summer mean temperature throughout the North East Asia. In contrast, the seasonal mean precipitation is generally overestimated (underestimated) by KF (GD) scheme. In addition, the seasonal variation of the temperature and precipitation is well simulated by WRF model, but with an overestimation in summer precipitation derived from KF experiment and with an underestimation in wet season precipitation from BM and GD schemes. Also, the frequency distribution of daily precipitation derived from KF and BM experiments (GD experiment) is well reproduced, except for the overestimation (underestimation) in the intensity range above (less) than 2.5 mm d^{-1} . In the case of the amount of daily precipitation, all experiments tend to underestimate (overestimate) the amount of daily precipitation in the low-intensity range $< 4 \text{ mm d}^{-1}$ (high-intensity range $> 12 \text{ mm d}^{-1}$). This type of error is largest in the KF experiment.

Key words: WRF, dynamical downscaling, CORDEX East Asia phase 2, cumulus parameterization scheme, simulation skill

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932
E-mail: jbahn@pusan.ac.kr

1. 서론

산업혁명 이후 인간 활동에 의한 지구온난화가 급격히 진행되면서 집중호우, 가뭄, 폭염, 한파 등과 같은 극한 기상 현상이 전 세계 곳곳에서 빈번히 발생하고 있다. 이는 사회 여러 분야에 심각한 영향을 미치고 있으며, 그 규모와 양상은 지역별로 상당한 차이를 보인다(Easterling et al., 2000; Alexander et al., 2006; IPCC, 2013). 이러한 기후변화에 적극 대응하기 위해서는 먼저 기후변화를 정확히 이해하고, 이를 신뢰성 있게 예측하는 것이 중요하다.

최근 World Climate Research Program (WCRP)에서 주관하는 국제 사업의 일환으로 The phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5, Taylor et al., 2012)가 진행되었으며, 이를 통해 전지구 접합모형(coupled general circulation model) 및 Representative Concentration Pathways (RCP; Moss et al., 2008) 시나리오를 활용한 기후변화 예측 연구가 활발히 진행되고 있다(Baek et al., 2013; Giorgetta et al., 2013; IPCC, 2013). 그러나 이러한 전구 모형의 결과는 낮은 해상도로 인하여 지역규모의 기후 정보를 산출하기에는 한계가 있다. 반면, 지역기후 모형은 고분해능의 지형 효과 등을 반영함으로써 국지규모의 기후변화 연구에서 매우 유용한 도구로 이용되고 있다(e.g., Giorgi and Mearns, 1999; Boo et al., 2004; Im et al., 2008; Ahn et al., 2010a, b; Hong and Ahn, 2015; Im et al., 2016). 최근 우리나라는 다섯 개의 지역기후모형, 즉, RegCM version 4 (RegCM4; Giorgi et al., 2012), Regional Spectral Model (RSM; Hong et al., 2013), Weather Research and Forecasting model (WRF; Skamarock et al., 2005), Seoul National University Meso-scale Model version 5 (SNU-MM5; Lee et al., 2004; Cha et al., 2008), Hadley Centre Global Environmental Model version 3 regional climate model (HadGEM3-RA; Davies et al., 2005)을 이용하여 국제 공동연구인 Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) 동아시아 1단계 프로젝트에 참여하였으며(Lee et al., 2014; Oh et al., 2014; Park et al., 2015), 이에 더하여 12.5 km의 고해상도를 가지는 한반도 국가표준 기후변화 시나리오도 산출하였다. 이와 관련한 여러 선행연구에서는 지역기후모형의 현재 기후에 대한 모의수준을 검증하였고, 동아시아 지역 및 한반도의 미래 기후 변화 전망을 제시하였다(Ahn et al., 2014, 2016; Im et al., 2015, 2016; Cha et al., 2016; Choi et al., 2016; Lee et al., 2016a; Oh et al., 2016; Suh et al., 2016). Ahn et al. (2016)은 다중 지역기후모형 앙상블을 이용하여 RCP 시나리오 별 남한의 극한 강수 변화 전망을 제시하였

으며, Choi et al. (2016)은 동일한 자료로 표준 강수지수(Standardized precipitation index)를 분석하여 남한 지역의 미래 가뭄 변화 전망을 제시하였다.

그러나 지역기후모형을 이용한 수치모의의 경우 사용된 모형, 경계조건, 모의영역 및 물리과정 모수화 등에 따라 그 결과가 상이하게 나타난다(Ham et al., 2005; Oh et al., 2011; Lee et al., 2016b). Ham et al. (2005)은 동일한 조건을 사용한 세 개의 지역기후모형(WRF, MM5, RSM)을 이용하여 장마철 집중호우에 대한 WRF 모형의 모의성능이 우수함을 제시하였다. Lee et al. (2016b)은 Consortium for Small-scale Modelling (COSMO)-Climate Limited-area Modelling (CLM) (CCLM)을 이용하여 스펙트럴 넷징에 따른 CORDEX 동아시아 2단계 영역의 민감도 실험을 실시하였고, 이를 통해 CCLM 자체의 모의성능과 스펙트럴 넷징 효과를 평가하였다. 이에 더하여, 여러 선행연구에서는 적운 모수화 방안에 따라 모형의 모의성능이 민감하게 변할 수 있다고 제시하였다. Oh et al. (2011)은 RegCM4의 경계조건 및 적운 모수화 방안을 달리하여 민감도 실험을 수행하였고, Emanuel 적운 모수화 방안이 CORDEX 동아시아 1단계 영역 기후모의에서 우수한 모의성능을 보인다고 제시하였다.

본 연구에서는 CORDEX 동아시아 2단계 영역에 대한 WRF 모형의 최적의 모의 환경을 구축하기 위해 적운 모수화 방안을 달리하여 모형의 민감도 실험을 수행하였다. 2장에서는 본 연구에 사용된 지역기후모형 및 실험설계에 대해 설명하였고, 3장에서는 적운 모수화 방안에 따른 WRF 모형의 동아시아 기후 모의 수준을 분석하였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 자료 및 실험 방법

본 연구에 사용된 지역기후모형은 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발된 WRF version 3.7이다. WRF 모형은 완전 압축성 비정수계(fully compressible non-hydrostatic) 모형으로 수평 격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하고, 연직격자는 지형에 근거한 정역학 기압 연직 좌표를 사용한다(Skamarock et al., 2008).

본 연구에서는 CORDEX 동아시아 2단계 지역(Fig. 1)의 현재 기후를 재현하기 위해 WRF 모형의 초기 및 경계조건으로 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA-Interim (ERA-INT) 재분석자료를 사용하였다. ERA-INT 재분석자료의 수평해상도는 약 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 이고, 시간해상도는 6시간 간격이다(Simmons et al., 2007). 본 실험의 적분기간은 1979년 1월부터 1981년 3월까지

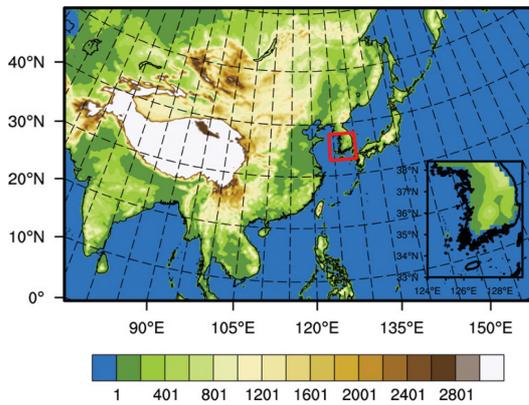


Fig. 1. Analysis domain and topography.

Table 1. Model configuration used in this study.

Contents	Description
Horizontal dimensions	395 × 250
Horizontal resolution	25 × 25 km
Vertical layer (top)	30 eta levels (50 hpa)
Lateral boundary condition	ERA-Interim
Buffer zone	15 grid points
Integration time step	60s
Spectral nudging	Yes

지 총 27개월이며, 초기 3개월의 결과는 Spin-up 기간으로 분석에 사용되지 않았다. 모형의 수치적분 간격은 60초, 복사 물리과정의 계산간격은 30분, 적운 물리과정의 계산은 5분으로 각각 설정하였다. 실험의 수평해상도는 25 km로 동서방향으로 395개, 남북방향으로 250개의 격자로 구성되어 있고 연직으로는 50 hpa까지 총 30개의 층으로 구성되어있다. 또한, 대규모 강제력 정보가 제공되는 측면 경계조건은 명시지역(Specified zone)이 1개 층, 완충지역(Relaxation zone)이 14개 층으로 이루어져 있으며, 모형의 계통 편차를 줄이기 위하여 스펙트럴 너징(spectral nudging) 기법(von Storch et al., 2000; Cha and Lee, 2009)을 적용하였다(Table 1). 적분에 사용된 물리과정으로, 구

름물리 방안은 WRF Single-Moment 3-class (WSM3, Hong et al., 2004)를, 복사물리 방안은 Community Atmospheric Model (CAM, Collins et al., 2002)을, 지면 모델은 Noah Land Surface (Chen and Dudhia, 2001)를, 그리고 행성 경계층 방안은 Yonsei University (YSU) 방안(Hong et al., 2006)을 사용하였다.

본 연구에서는 적운 모수화 방안이 CORDEX 동아시아 2단계 지역 기후 모의에 미치는 영향을 알아보기 위해서 3가지 적운 모수화 방안[Kain (KF, Kain, 2004), Betts-Miller-Janjic (BM, Betts and Miller, 1986; Janjic, 1994)와 Grell-Devenyi Ensemble (GD, Grell and Dévényi, 2002)]을 이용하여 민감도 실험을 수행하였다(Table 2). 민감도 실험에서 사용된 KF와 GD 방안은 모두 질량 속 유형(mass-flux type)으로 적운과 주위 공기 사이에 일어나는 유입/유출(Entrainment/Detrainment) 과정과 적운 내부의 연직 질량 속을 고려함으로써 아격자 규모의 대류가 격자 규모의 대기 상태에 미치는 영향을 계산하는 방법이다. KF방안은 Convective Available Potential Energy (CAPE)에 기반한 종결 가정을 사용하며 격자규모 연직 속도를 이용하여 대류 발생 여부를 결정하고 GD방안은 다양한 종결 가정 및 모수화 가정을 조합하여 대류성 강수를 모의한다. 이와 달리 BM 방안은 대류 조절 방법(convective adjustment scheme)으로 관측에 기반한 열역학적 변수들의 연직 분포를 이용하여, 다양한 대류 환경에 대해 온도 및 습도의 상태를 관측의 연직 분포로 복원시키는 방법이다.

본 연구에서는 동아시아 지역에 대한 WRF 모형의 기후 모의성능을 검증하기 위해 0.5° 간격의 Climatic Research Unit (CRU, Harris et al., 2014)의 월평균 기온 및 강수량자료와 지상관측과 위성관측이 통합된 Global Precipitation Climatology Project (GPCP, Adler et al., 2003) 월평균 강수량자료를 이용하였다.

3. 결 과

Figures 2와 3은 각각 여름철 및 겨울철 평균 기온의 공간분포와 각 자료(CRU, ERA-INT, KF, BM, GD)

Table 2. Experiment design used in this study.

Experiment	KF	BM	GD
Microphysics	WSM3	WSM3	WSM3
Shortwave/Longwave radiation	CAM	CAM	CAM
Surface layer	Monin-Obukhov similarity	Monin-Obukhov similarity	Monin-Obukhov similarity
Land surface	Noah	Noah	Noah
Planetary boundary layer	Yonsei University	Yonsei University	Yonsei University
Cumulus scheme	Kain-Fritch	Betts-Miller-Janjic	Grell-Devenyi Ensemble

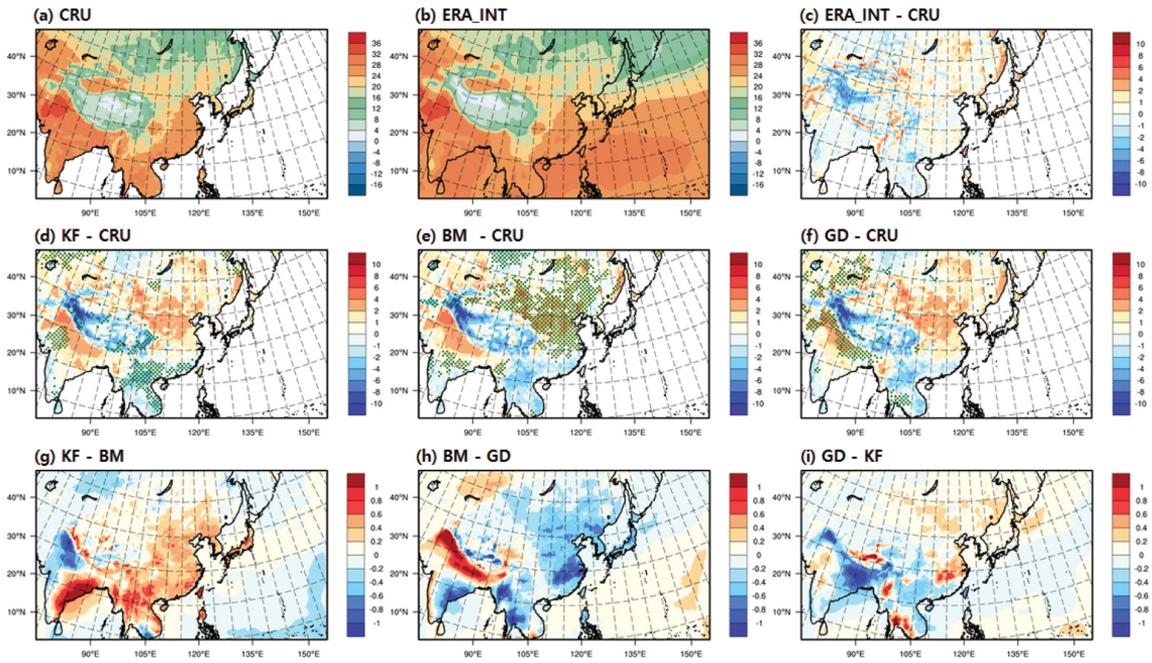


Fig. 2. Spatial distribution of summer mean 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$) derived from CRU (a) and ERA-INT (b) and difference between ERA-INT and CRU (c), difference between CRU and KF (d), BM (e), GD (f), difference between KF and BM (g), BM and GD (h), and GD and KF (i). Superimposed dots denote the areas where the bias is minimum among three sensitivity experiments (KF, BM, GD). Only if minimum biases are uniformly distributed over a large area, the dots are superimposed. The shade interval is 4°C for (a-b), 2°C for (c-f), and 0.2°C for (g-i).

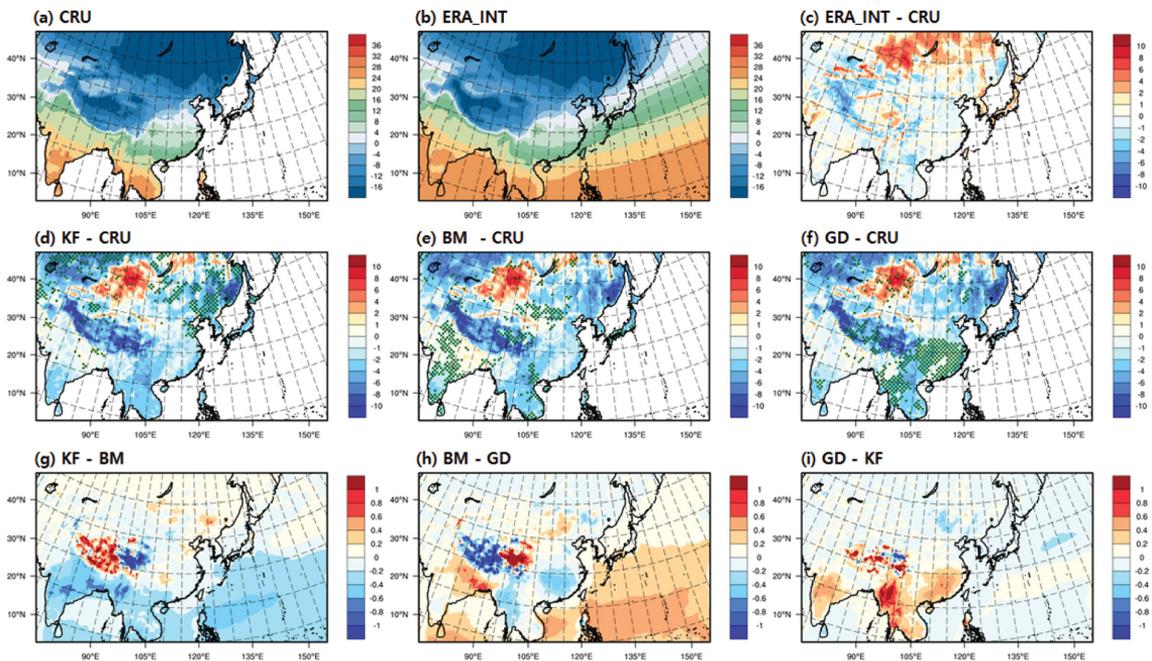


Fig. 3. Same as in Fig. 2 but for winter mean 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$).

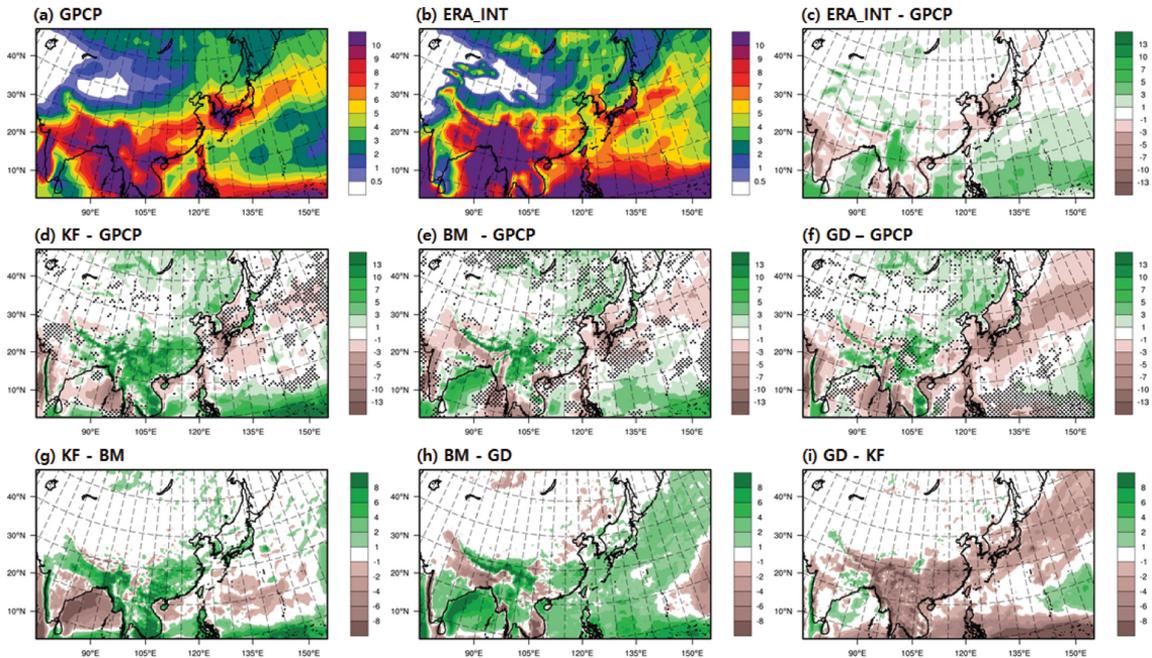


Fig. 4. Same as in Fig. 2 but for summer mean precipitation (mm d^{-1}). Notice that the contour interval is not uniform in the figure.

간의 차이를 나타낸 그림이다. CRU 관측 자료를 살펴보면, 티벳 고원을 포함한 높은 산악 지역에서는 16°C 이하의 낮은 기온 분포가 나타나고, 이와 대조적으로 인도를 포함한 저위도 지역(북위 25°N 이하)에서는 24°C 이상의 높은 기온 분포가 나타난다. 또한, 동아시아 지역의 여름 기온 분포는 저위도에서 고위도로 갈수록 감소하는 특징을 보인다(Fig. 2a). 지역 기후모형의 측면경계 강제력으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료는 티벳 고원 등 주로 산악 지역에서 기온의 편차가 크게 나타난다(Fig. 2c). 이러한 특성은 WRF 모형의 결과에서도 유사하게 나타나지만, 그 편차의 크기는 지역기후 모의 결과가 ERA-INT 보다 더 크다. 이는 WRF 모형이 생산한 부가정보(added value) 때문인 것으로 사료된다. WRF가 모의한 여름철 기온의 공간 분포를 살펴보면, 민감도 실험 결과들은 전반적으로 여름 기온의 공간 분포를 관측과 유사하게 모의한다. 하지만 적은 모수화 방안에 따른 모형의 모의수준은 지역적으로 큰 차이를 보인다(Figs. 2g, 2h and 2i). 특히, 중국 남동지역(광저우 일대의 화남지방) 여름 기온 모의에서 KF 실험은 다른 두 방안(BM, GD)을 적용한 경우보다 비교적 작은 계통 편차를 보인다. 즉, KF 실험은 해당 지역의 기온을 BM 및 GD 실험보다 높게 모의하는 특성을 보인다(Figs. 2g and 2i). 이와 달리 중국 베이징을 중심으로 한 북동 아시

아 지역에는 BM 방안이 다른 방안에 비해서 비교적 높은 모의성능을 보인다. 또한, 인도 북부 지역을 포함한 일부 지역에서는 GD 방안의 모의 수준이 가장 높게 나타난다.

겨울철 기온은 여름철 기온(Fig. 2a)과 비슷한 공간 분포를 보이지만 기온의 범위에서 큰 차이를 보인다(Fig. 3a). 특히, 티벳 고원 및 북위 40°N 이상의 고위도 지역에서는 약 -16°C 이하의 낮은 기온 분포가 나타나고 북위 10°N 이하의 저위도 지역에서는 약 20°C 이상의 높은 기온 분포가 나타난다. 민감도 실험 결과를 살펴보면, 세 실험 모두 시베리아 일부 지역을 제외한 대부분의 지역에서 CRU 보다 기온을 낮게 모의하는 특성을 보인다(Figs. 3d, 3e and 3f). 이러한 특성은 배경강제력으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료에서도 유사하게 나타난다(Fig. 3c). 특히, KF 실험은 여름철 기온의 경우와 달리 중국 동북지역 기온 모의에서 비교적 높은 모의수준을 보인다(Fig. 3d). 반면, BM 실험은 중국 내몽고 일부 지역과 인도 지역에서 높은 모의수준을 보이고(Fig. 3e), GD 실험은 중국 화남지방(광저우 일대)에서 우수한 모의성능을 보인다(Fig. 3f). 즉, KF (BM) 실험은 다른 실험들에 비해 중국 동북(인도) 지역의 기온을 다소 높게 모의함으로써 관측과 가장 유사하게 나타나고, GD 실험은 다른 실험들에 비해 중국 화남지방의 기온을 다소 높게

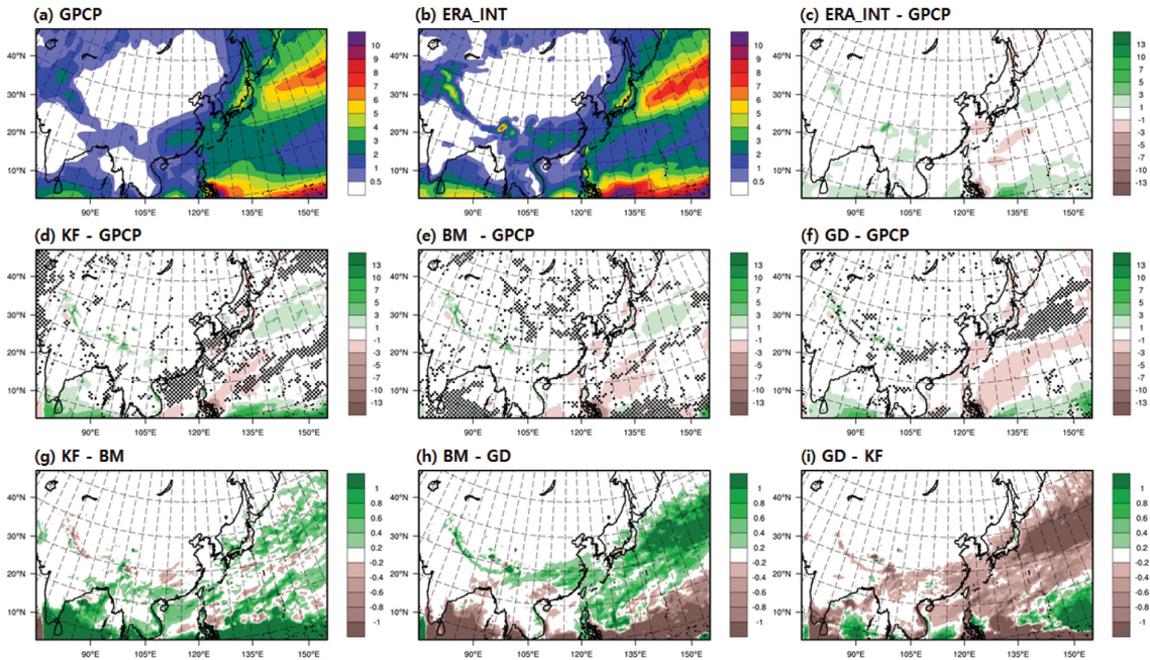


Fig. 5. Same as in Fig. 2 but for winter mean precipitation (mm d^{-1}). Notice that the contour interval is not uniform in the figure.

모의함으로써 해당 지역에서 비교적 우수한 모의수준을 보인다.

Figure 4는 여름철 강수의 공간분포와 각 자료 간의 차이를 나타낸 그림이다. 동아시아 여름 강수의 특징을 살펴보면, 동서방향으로 길게 늘어져 있는 강수 밴드가 중국, 한국, 일본에 걸쳐 분포하고 있으며, 적도 서태평양 및 인도와 인도차이나 반도를 포함한 남동 아시아 지역에서 10 mm d^{-1} 이상의 많은 강수가 나타난다(Fig. 4a). 민감도 실험 결과를 살펴보면, 세 실험 모두 여름 몬순에 의한 강수 패턴은 잘 모의하였으나 전반적으로 동아시아 지역의 강수를 과대모의하는 특성을 보인다. 이와 대조적으로, 세 실험은 공통적으로 인도 서부 지역과 북서 태평양 지역의 강수를 과소모의하는 경향을 보인다(Figs. 4d, 4e and 4f). 이러한 특성은 배경강제력으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료에서도 유사하게 나타난다(Fig. 4c). 동아시아 여름철 강수 모의에서, KF실험은 주로 30°N 이상의 북서태평양 지역과 인도 서북부 지역에서 높은 모의 수준을 보이며(Fig. 4d), BM 실험은 중국 동북지역 지역에서, GD 실험은 티벳 고원 및 적도 서태평양 지역에서 높은 모의수준을 보인다. 특히 GD 실험은 다른 두 실험에 비해 전반적으로 강수를 과소 모의하는 경향을 보이며, KF 실험은 동아시아 몬순 지역의 강수를 상대적으로 과대 모의하는 것으로 나타

났다.

Figure 5는 겨울철 강수의 공간분포 및 적은 모수화 방안에 따른 민감도 실험의 결과를 나타낸 그림이다. GPCP 자료를 살펴보면, 겨울철 강수는 주로 중국 남동부 지역부터 북서태평양 지역에 걸쳐 분포하고 있으며, 적도 서태평양 지역에서는 10 mm d^{-1} 이상의 많은 강수가 나타난다. 이에 반해, 중국 대다수의 지역과 몽골 지역에서는 0.5 mm d^{-1} 이하의 매우 적은 강수가 나타난다(Fig. 5a). WRF의 측면 경계장으로 사용된 ERA-INT 재분석 자료는 겨울 강수의 공간 분포 및 정량적인 특성을 비교적 잘 나타내고 있으며(Figs. 5b and 5c), 이러한 겨울철 강수의 특성은 WRF를 이용한 민감도 실험에서도 유사하게 나타난다. 그러나 상대적으로 KF 실험은 BM 및 GD 실험에 비해 전반적으로 강수를 과다하게 모의하는 특성을 보였으며, 특히 인도양과 적도 서태평양 지역에서 강수를 과다하게 모의한다(Fig. 5d). BM 실험은 동경 90° , 북위 30° 이상의 북동아시아 일부 지역에서 다른 실험들에 비해 비교적 높은 모의성능을 보인다(Fig. 5e). GD 실험은 다른 실험에 비해 20°N 이상의 북서태평양 지역에서 강수를 과소 모의하는 것으로 나타났다지만, 일본 동쪽 해상 일부 지역에서 모의수준이 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 5f).

동아시아 여름 몬순과 겨울 몬순의 효과를 분석하

Table 3. Information of latitude and longitude for the analysis regions.

Analysis region	Latitude (N)	Longitude (E)
CORDEX2	10~55	80~155
South Korea	33~38	124~130

기 위해서는 동아시아 전체 영역(Table 3)에 대한 기온 및 강수의 공간패턴을 분석하는 것이 중요하다. Figures 6과 7은 각각 계절 평균된 기온 및 강수의 공간분포에 대하여 관측과 민감도 실험간의 통계값(Bias, Spatial correlation and Root mean square error; BCR)을 나타낸 다이어그램이다. 이는 동아시아 지역에 대하여 민감도 실험결과와 관측과의 편차(Bias), 공간상관계수(Spatial correlation coefficient) 그리고 평균제곱근오차(Root mean square error; RMSE)를 각각 가로

축과 세로축 그리고 해당 표식의 크기로 나타낸 그림이다. 따라서 기온 및 강수에 대한 실험의 모의성능이 우수할수록 해당 표식들은 기준점(빨간 X 표식)에 가까워지고 표식의 크기는 줄어든다(Suh et al., 2012). 3가지 민감도 실험 모두 여름철을 제외한 모든 계절에 기온의 한랭편차가 강하게 나타나지만, 여름철의 온난편차는 다른 계절에 비해 비교적 작게 나타난다. 즉, 봄, 가을, 겨울철에는 3가지 실험 모두 약 -2°C 의 편차를 보이는 반면, 여름철에는 약 0.3°C 의 편차를 보인다. 또한, 세 실험 모두 계절적 차이는 있지만 상관계수가 0.96 이상으로 높게 나타났다. 이는 WRF 모형이 동아시아 지역의 기온분포를 전반적으로 잘 모의하고 있음을 의미한다. 또한, 각 실험 별로 모의 수준을 살펴보면, KF 실험은 다른 실험에 비해 봄과 겨울철에 한랭편차가 여름철에는 온난편차가 뚜렷하게 나타나지만, 여름철에는 비교적 높은 공간 상관성

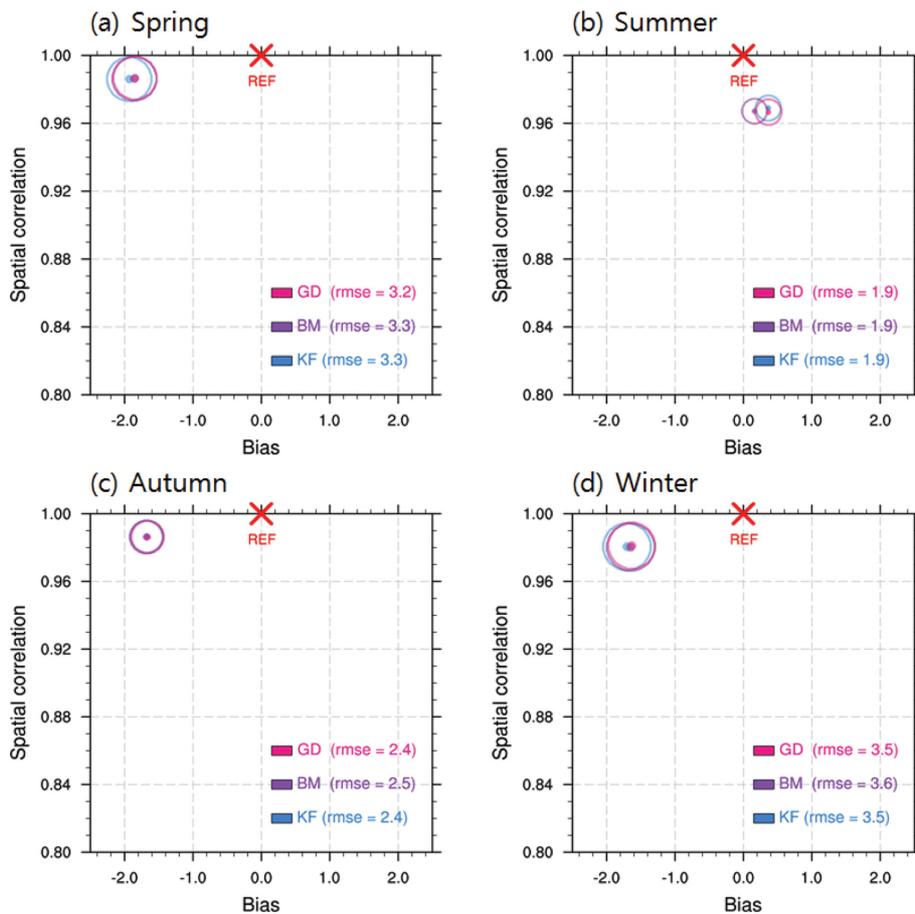


Fig. 6. The BCR diagram of seasonal mean 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$) over CORDEX-East Asia phase 2 domain during MAM (a), JJA (b), SON (c) and DJF (d). The size of circle indicates RMSE.

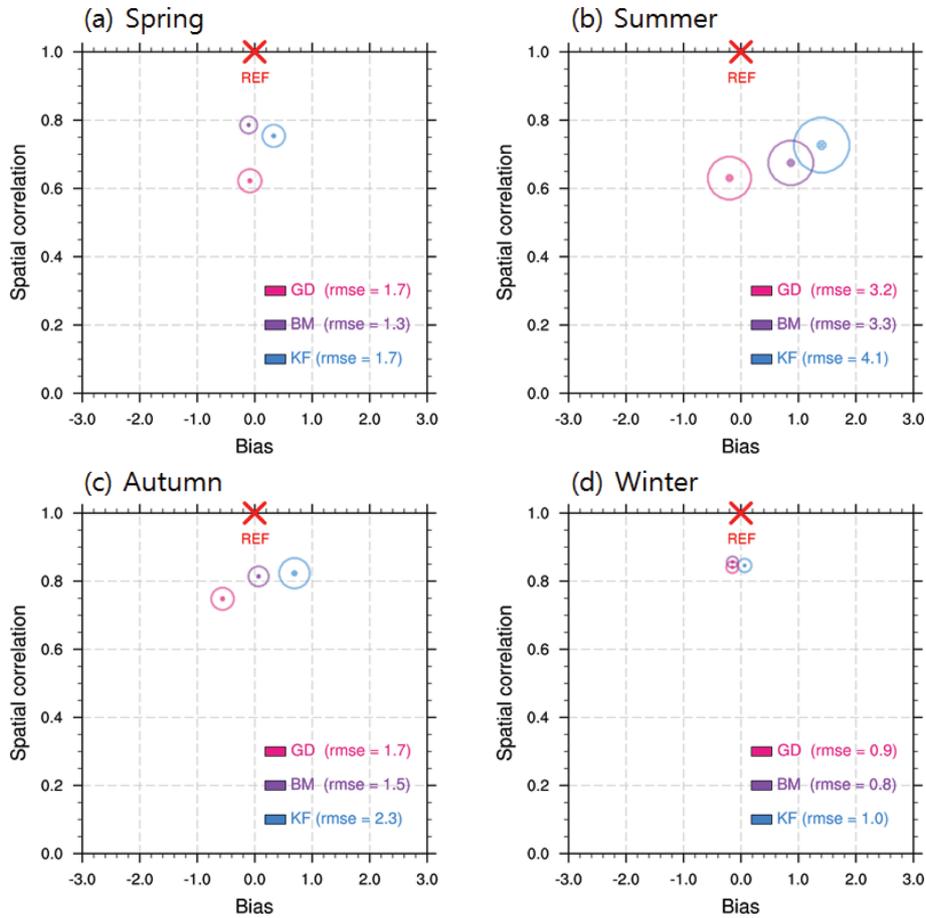


Fig. 7. Same as in Fig. 6 but for seasonal mean precipitation (mm d^{-1}).

을 보인다. 이와 달리, BM 실험은 봄, 가을, 겨울철에 GD 실험과 상당히 유사한 모의수준을 보이지만, 여름철에는 세 실험 중 가장 높은 모의성능을 보인다.

강수의 경우 기온의 경우와 같이 각 계절에 따라 그리고 사용된 적운 모수화 방안에 따라서 결과가 상이하게 나타난다(Fig. 7). 공통적으로 모든 실험에서 겨울철의 모의수준이 높게 나타나고, 연중 강수량이 집중되는 여름철에는 모의수준이 낮게 나타난다. 각 실험별로 모의수준을 살펴보면, KF 실험은 동아시아 지역에서 계절에 상관없이 습윤편차를 가지고 다른 실험들에 비해 평균제곱근오차가 높게 나타난다. 이와 달리, 겨울철 강수모의에서는 KF 실험이 다른 실험들에 비해 비교적 작은 편차를 가지며, 여름철 동안 관측과 가장 높은 공간상관성을 보인다. 또한, BM 실험은 봄, 가을, 겨울철 동안 강수에 대하여 우수한 모의 수준을 보인다. 즉, BM 실험이 해당 계절 동안 다른 실험들에 비해 작은 평균제곱근

오차를 보이며, 관측과도 높은 상관관계를 보인다. 이에 반해, 여름철에는 GD 실험이 다른 실험보다 비교적 적은 편차와 평균제곱근오차를 가지고 있지만 관측과의 공간상관성 측면에서는 모의 수준이 비교적 낮게 나타난다.

Figure 8은 기온과 강수량에 대한 계절 변동을 각 지역별로 나타낸 그림이다. 각 분석 지역에 대한 상세한 위·경도 정보는 Table 3에 나타났다. 관측에서 남한지역의 기온은 동아시아 지역의 기온보다 높게 나타나는 특징이 보인다. 이러한 특징의 WRF 모형의 결과에서도 잘 나타난다. 그러나 WRF는 공통적으로 관측 비해 여름철 기온을 다소 높게 모의하는 특성을 보이며, 겨울철 기온은 다소 낮게 모의하는 특성을 보인다. 이 결과는 앞선 분석에서 여름에 온난 편차가 크게 나타난 것과 동일한 결과이다(Figs. 2 and 6). 기온의 계절변동에서, 세 민감도 실험은 상호 뚜렷한 차이를 보이지 않지만, 그 중에서 BM 실험이 관측과 가

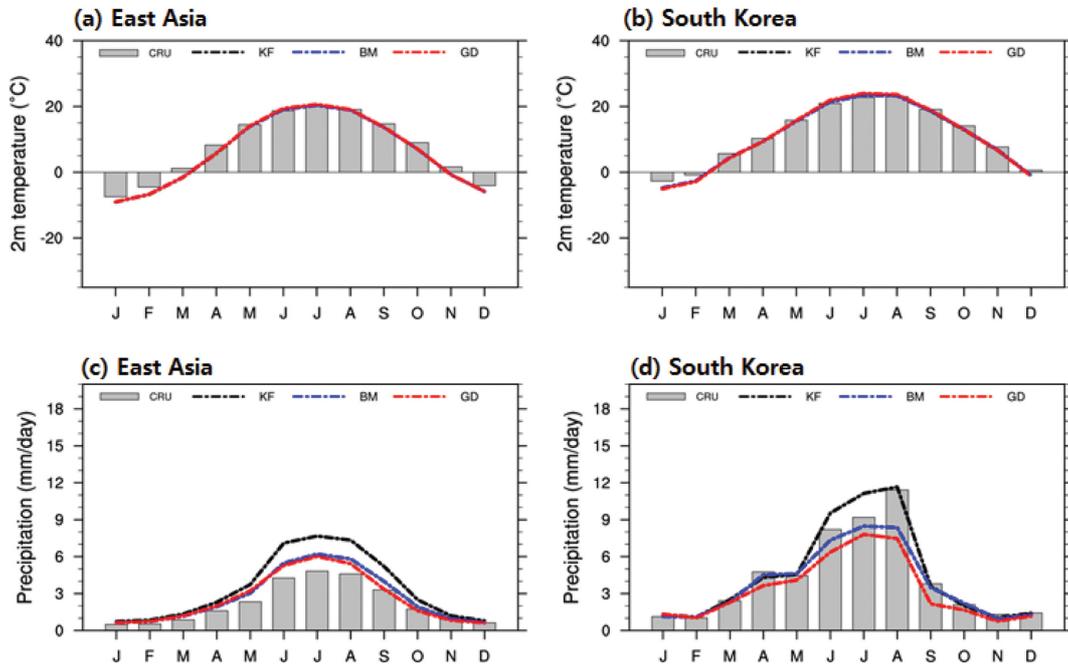


Fig. 8. Seasonal variation of monthly mean 2 m temperature ($^{\circ}\text{C}$; a, b) and precipitation (mm d^{-1} ; c, d) over East Asia (a, c) and South Korea (b, d).

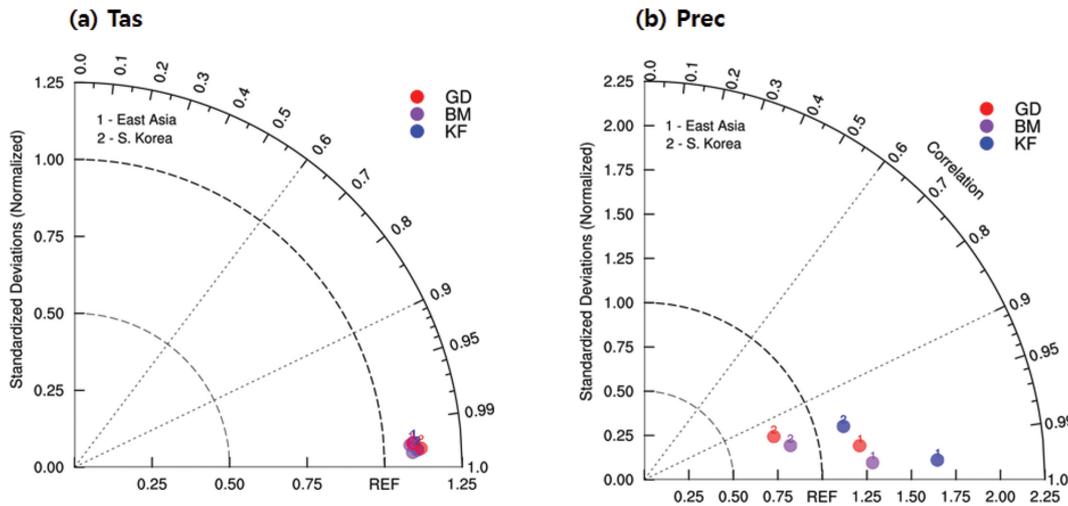


Fig. 9. Taylor diagram for monthly mean 2 m temperature (a) and precipitation for the period from April 1979 through March 1980.

장 유사한 변동을 보인다. 이와 관련된 통계분석은 Fig. 9에서 자세히 다루었다.

강수 계절 변동은 기온의 경우와 달리 민감도 실험 별로 큰 차이를 보인다. WRF 모형은 전반적으로 동아시아 지역의 여름철 강수를 과다 모의하는 특성

을 보이며, 모형의 편차는 공통적으로 겨울철 보다 여름철에 더 크게 나타난다. 각 실험 별로 살펴보면, KF 실험은 남한 지역에서 여름철 강수를 과다 모의하는 경향을 보인다. 반면, BM과 GD 실험은 이 지역에서 여름철 강수를 과소 모의하는 특징을 보인다.

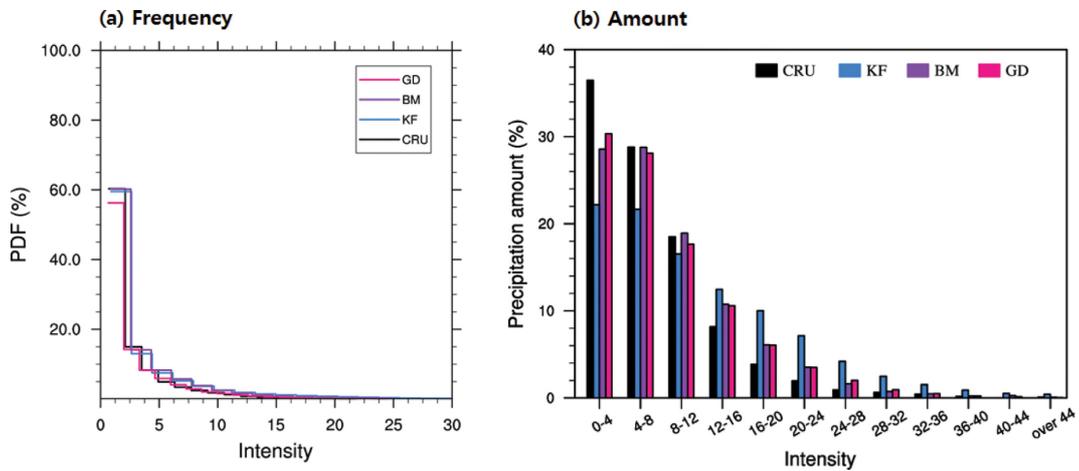


Fig. 10. Frequency distribution of daily precipitation (a) and amount of daily precipitation accumulated over all the precipitation events contributing for each intensity bin over East Asia.

동아시아 강수모의에서 BM 실험과 GD 실험은 상당히 유사한 기온의 계절 변동을 보여주고 있다. 특히, BM 실험은 GD 실험에 비해 봄철 강수를 보다 관측과 유사하게 모의하고 있으며, GD 실험은 여름과 가을철 강수를 보다 관측에 가깝게 모의하고 있다. 남한 지역에서는 BM 실험이 비교적 우수한 모의성능을 보이지만 8월의 강수를 과소모의 하는 특징이 나타난다.

Figure 9는 Taylor 다이어그램을 이용하여 적운 모수화 방안에 따른 WRF 모형의 모의성능을 나타낸 그림이다. 이는 동아시아와 남한 지역에 대하여 관측 대비 표준편차 비(Normalized standardized deviations) 및 시간 상관계수(Temporal correlation coefficient)를 도표에 나타낸 그림으로, 실험의 모의성능이 우수할수록 해당 표식들은 기준점(Fig. 9의 REF)에 가까워진다(Taylor, 2001). 즉, 모형의 변동성에서 관측의 변동성을 나눈 표준편차 비와 시간 상관계수는 1에 가까울수록 실험결과가 관측과 비슷함을 의미한다. 기온의 경우 세 민감도 실험은 뚜렷한 차이를 보이지 않지만, BM 실험이 나머지 실험들에 비해 비교적 CRU와 유사한 변동성을 보인다. 즉, BM 적운 모수화 방안을 적용한 실험은 KF 및 GD 방안을 적용한 실험에 비해 표준편차 비와 시간 상관계수가 1에 가깝게 나타났다. 이러한 결과는 앞서 설명한 Figs. 8a 및 8b 와도 일치하는 결과이다. 강수의 경우 기온의 경우와 달리 민감도 실험 별로 큰 차이를 보인다. 분석 영역에 관계없이 BM 실험은 비교적 CRU와 유사한 변동성을 보인다. 이와 달리 KF 실험은 두 지역 모두에서 CRU 대비 높은 표준편차 비를 보이고 있다. GD 실험은 BM 실험과 유사한 변동성을 보이지만 BM에 비

해 시간 상관계수가 낮게 나타난다.

앞선 분석에서는 강수의 평균적인 특성에 대한 모형의 모의수준을 제시하였다. 하지만 이러한 분석들은 극한 강수를 분석하는데 있어 한계가 있다. 따라서, 강수의 평균적인 특성 이외에도 극한 강수 등을 고려할 수 있는 강수강도별 강수량 및 빈도수에 대한 분석을 수행하였다. Figure 10은 강수강도에 따른 강수빈도 및 강수량을 나타낸 그림이다. 강수 빈도는 연중 강수 발생 횟수에 대한 각 강수강도 별 강수 발생 일수의 비를 백분율로 나타낸 것이고, 강수량은 연 누적 강수량에 대한 각 강수강도별 누적 강수량의 비를 백분율로 나타낸 것이다. 관측의 경우 2.5 mm d^{-1} 이하의 강수에서 약 60%의 발생빈도를 보이며, 4 mm d^{-1} 미만의 강수에서 약 36%의 강수량을 설명한다. 적운 모수화 방안에 따른 민감도 실험 결과를 분석해보면, 세 민감도 실험은 각 강수 강도별로 강수빈도와 강수량에서 상당한 차이를 보인다. 특히, KF 실험과 BM 실험은 2.5 mm d^{-1} 미만의 강수 강도에서 관측과 비슷한 발생 빈도(약 60%)를 보이지만 2.5 mm d^{-1} 이상의 강수 강도에서는 강수 빈도를 과다 모의하는 특성을 보인다. 이와 반대로, GD 실험은 2.5 mm d^{-1} 미만의 강수강도에서 관측 보다 발생 빈도를 과소 모의하는 경향을 보이며, 2.5 mm d^{-1} 이상의 강수강도에서는 관측과 유사한 발생 빈도를 보인다. 강수량 모의의 경우, BM과 GD 실험이 비교적 관측과 비슷한 강수량을 모의하지만, 4 mm d^{-1} 이하의 강수강도에서는 강수량을 과소 모의하고 12 mm d^{-1} 이상의 강수강도에서 강수량을 과다 모의하는 특성을 보인다. 특히, KF 실험은 다른 실험 대비 강수량 모의에서 큰 편차를 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 WRF 모형의 적운 모수화 방안이 CORDEX 동아시아 2단계 지역의 기후 모의에 미치는 영향을 분석하였다. WRF 모형의 초기 및 경계장으로 ERA-INT 재분석 자료를 이용하였으며, 지역기후 모델링 분야에서 널리 사용되고 있는 KF, BM, GD 모수화 방안을 이용해서 민감도 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 동아시아 및 남한 지역의 계절평균 기온과 강수에 대하여 WRF 모형의 관측대비 편차, 평균제곱근오차, 시간 및 공간 상관성 등을 분석함으로써 모형의 모의수준을 제시하였다.

연구 결과에 의하면 적운 대류 모수화에 따라 동아시아 지역의 수치 모사 결과가 현저히 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 여름철(겨울철) 기온의 경우, KF 실험은 중국 광저우 일대의 화남(중국 동북) 지역에서 다른 실험들에 비해 비교적 작은 계통 편차를 보인다. 이와 달리 BM 실험은 베이징을 중심으로 한 북동 아시아(인도) 지역에서, GD 방안은 인도 북부 일부(중국 광저우 일대의 화남) 지역에서 비교적 낮은 계통적 편차를 보인다. 동아시아 여름철(겨울철) 강수 모의에서, KF 실험은 주로 30°N 이상의 북서태평양 지역과 인도 서북부(남동 중국해) 지역에서 높은 모의 수준을 보이며, BM 실험은 중국 동북(동경 90°, 북위 30° 이상의 북동아시아) 지역에서, GD 실험은 티베트 고원 및 적도 서태평양(동일본해) 지역에서 비교적 작은 계통 편차를 보인다. 특히 GD 실험은 다른 두 실험에 비해 전반적으로 강수를 과소 모의하는 경향을 보이며, KF 실험은 강수를 상대적으로 과대 모의 하는 것으로 나타났다.

동아시아 여름 몬순과 겨울 몬순의 효과를 분석하기 위해서는 동아시아 전체 지역에 대한 기온 및 강수의 공간패턴을 분석하는 것이 중요하다. 각 실험 별로 기온 공간분포에 대한 모의수준을 살펴보면, BM과 GD 실험이 KF 실험에 비해 기온 공간분포에 대한 높은 모의수준을 보이는 것을 확인하였으며, 특히 BM 실험은 여름철 기온 공간분포 모의에서 비교적 우수한 성능을 보인다. 강수의 경우, KF 실험은 동아시아 지역에서 계절에 상관없이 습윤편차를 가지고 다른 실험들에 비해 높은 평균제곱근오차를 보이지만, BM 실험은 봄, 가을, 겨울철 동안 강수에 대하여 우수한 모의 수준을 보인다. 이에 반해, GD 실험이 다른 실험보다 비교적 적은 여름철 강수의 편차와 평균제곱근오차를 가지고 있지만 관측과의 공간상관성 측면에서는 모의 수준이 비교적 낮게 나타난다.

이에 더하여, WRF는 적운 모수화 방법에 관계없이 동아시아 및 남한 기온의 계절변동을 비교적 잘 모의하였다. 그러나, 강수의 계절 변동은 기온의 경우와

달리 민감도 실험 별로 큰 차이를 보인다. WRF 모형은 전반적으로 동아시아 지역의 여름철 강수를 과대 모의하는 특성을 보이며, 모형의 편차는 공통적으로 겨울철 보다 여름철에 더 크게 나타난다. 각 실험 별로 살펴보면, KF 실험은 남한 지역에서 여름철 강수를 과대 모의하는 경향을 보인다. 반면, BM과 GD 실험은 동일 지역에서 여름철 강수를 과소 모의하는 특징을 보인다. 남한 지역에서는 BM 실험이 비교적 우수한 모의성능을 보이지만 8월의 강수를 과소모의 하는 특징이 나타난다. 또한, Taylor 다이어그램 분석을 통해서 BM 실험이 나머지 실험들에 비해 비교적 기온 및 강수의 변동성을 CRU와 유사하게 모의하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 강수의 평균적인 특성 이외에도 강수의 수문학적 특성을 고려할 수 있는 강수강도별 강수량 및 빈도수에 대한 분석을 수행하였다. 세 민감도 실험은 각 강수 강도별로 강수빈도와 강수량에서 상당한 차이를 보인다. 특히, KF 실험과 BM 실험은 2.5 mm d⁻¹ 미만의 강수 강도에서 관측과 비슷한 발생 빈도(약 60%)를 보이지만 2.5 mm d⁻¹ 이상의 강수 강도에서는 강수 빈도를 과대 모의하는 특성을 보인다. 이와 반대로, GD 실험은 2.5 mm d⁻¹ 미만의 강수강도에서 관측 보다 발생 빈도를 과소 모의하는 경향을 보이며, 2.5 mm d⁻¹ 이상의 강수강도에서는 관측과 유사한 발생 빈도를 보인다. 강수량 모의의 경우, BM과 GD 실험이 비교적 관측과 비슷한 강수량을 모의하지만, 4 mm d⁻¹ 이하의 강수강도에서는 강수량을 과소 모의하고 12 mm d⁻¹ 이상의 강수 강도에서 강수량을 과대 모의하는 특성을 보인다.

결론적으로 WRF 모형은 관측과 비교하여 기온, 강수의 계절 변동 및 공간패턴을 비교적 잘 모의하나, 적운 모수화 방안 별, 분석변수 및 분석지역 별로 상이한 모의 수준을 나타낸다. 하지만 강수의 모의 결과는 적운 모수화 방안과 구름물리 방안의 조합에 큰 영향을 받기 때문에 본 연구에서 사용한 WSM3 대신 다른 물리 방안을 사용할 경우 본 연구의 결과가 달라질 수 있다. 또한, 이 연구 결과는 2년간의 수치 실험을 통해 얻어진 결과이므로 수치 모의 기간이 비교적 짧은 한계점을 가진다. 향후 추가 적분을 통해 통계적 분석뿐만 아니라 역학적으로 심도 있는 분석을 수행할 예정이다.

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., J. Hur, and K. M. Shim, 2010a: A simulation of agro-climate index over the Korean peninsula using dynamical downscaling with a numerical weather prediction model. *Korean J. Agr. Forest Meteorol.*, **12**, 1-10, doi:10.5532/KJAFM.2010.12.1.001 (in Korean with English abstract).
- _____, J. Y. Hong, and K. M. Shim, 2010b: Agro-Climatic Indices Changes over the Korean Peninsula in CO2 Doubled Climate Induced by Atmosphere-Ocean-Land-Ice Coupled General Circulation Model. *Korean J. Agr. Forest Meteorol.*, **12**, 11-22, doi:10.5532/KJAFM.2010.12.1.011 (in Korean with English abstract).
- _____, Y. W. Choi, S. R. 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.
- Alexander, L. V., and Coauthors, 2006: Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Baek, H. J., and Coauthors, 2013: Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618, doi:10.1007/s13143-013-0053-7.
- Betts, A., and M. 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.
- Boo, K. O., W. T. Kwon, and J. K. Kim, 2004: Vegetation changes in the regional surface climate over East Asia due to global warming using BIOME4. *Geophys. Space Phys.*, **27**, 317-327.
- Cha, D. H., D. K. Lee, and S. Y. Hong, 2008: Impact of boundary layer processes on seasonal simulation of the East Asian summer monsoon using a regional climate model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **100**, 53-72, doi:10.1007/s00703-008-0295-6.
- _____, and _____, 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**, D14, 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 description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Choi, Y. W., and Coauthors, 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.
- 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**, 1-20, doi:10.1029/2001JD001365.
- Davies, T., M. J. P. Cullen, A. J. Malcolm, M. H. Mawson, A. Staniforth, A. A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office's global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759-1782, doi:10.1256/qj.04.101.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, 2000: Climate extremes: Observation, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068-2074, doi:10.1126/sci-ence.289.5487.206.
- Giorgetta, M. A., and Coauthors, 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **5**, 572-597, doi:10.1002/jame.20038.
- Giorgi, F., and L. O. Mearns, 1999: Introduction to special section: Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, **104**, 6335-6532, doi:10.1029/98JD02072.
- _____, and Coauthors, 2012: RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Res.*, **52**, 7-29, doi:10.3354/cr01018.
- 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.
- Ham, S. R., S. J. Park, C. H. Bang, B. J. Jung, and S. Y. Hong, 2005: Intercomparison of the East-Asian summer monsoon on 11-18 July 2004, simulated by WRF, MM5, and RSM models. *Atmosphere*, **15**, 91-99 (in Korean with English abstract).
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister, 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623-642, doi:10.1002/joc.3711.
- 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.
- _____, and Coauthors, 2013: The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 219-243, doi:10.1007/s13143-013-0023-0.
- Im, E. S., J. B. Ahn, A. R. Remedio, and W. T. Kwon, 2008: Sensitivity of the regional climate of East/Southeast Asia to convective parameterizations in the RegCM3 modelling system. Part 1: Focus on the Korean peninsula. *Int. J. Climatol.*, **28**, 1861-1877, doi:10.1002/joc.1664.
- _____, 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, 2016: Robust intensification of hydroclimatic intensity over East Asia from multi-model ensemble regional projections. *Theor. Appl. Climatol.*, doi:10.1007/s00704-016-1846-2, in press.
- 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, 1535 pp.
- Janjic, 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.
- 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. H., 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. *Climate Res.*, **11**, 69-85 (in Korean with English abstract).
- Lee, D. K., D. H. Cha, and H. S. Kang, 2004: Regional climate simulation of the 1998 summer flood over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1735-1753, doi:10.2151/jmsj.82.1735.
- 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.
- Moss, R., and Coauthors, 2008: *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 132 pp.
- 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, C., and Coauthors, 2015: Evaluation of multiple

- regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Climate Dyn.*, **46**, 2469-2486, doi:10.1007/s00382-015-2713-z.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR/TN-468+STR, 88 pp.
- _____, _____, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 125 pp, doi:10.5065/D68S4MVH.
- 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., S. G. Oh, D. K. Lee, D. H. Cha, S. J. Choi, C.-S. Jin, and S.-Y. Hong, 2012: Development of new ensemble methods based on the performance skills of regional climate models over South Korea. *J. Climate*, **25**, 7067-7082, doi:10.1175/JCLI-D-11-00457.1.
- _____, 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.