Atmosphere. Korean Meteorological Society Vol. 31, No. 5 (2021) pp. 637-656 https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.5.637 pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

기 술 노 트 (Technical Note)

경험적 분위사상법을 이용한 지역기후모형 기반 미국 강수 및 가뭄의 계절 예측 성능 개선

송찬영¹⁾ · 김소희^{1) ·} 안중배²⁾*

¹⁾부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 대기환경과학과 (접수일: 2021년 8월 17일, 수정일: 2021년 9월 30일, 게재확정일: 2021년 10월 20일)

Improvement in Seasonal Prediction of Precipitation and Drought over the United States Based on Regional Climate Model Using Empirical Quantile Mapping

Chan-Yeong Song¹⁾, So-Hee Kim¹⁾, and Joong-Bae Ahn^{2)*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, BK21 School of Earth and Environmental Systems, Pusan National University, Busan, Korea
²⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 17 August 2021; revised 30 September 2021; accepted 20 October 2021)

Abstract The United States has been known as the world's major producer of crops such as wheat, corn, and soybeans. Therefore, using meteorological long-term forecast data to project reliable crop yields in the United States is important for planning domestic food policies. The current study is part of an effort to improve the seasonal predictability of regional-scale precipitation across the United States for estimating crop production in the country. For the purpose, a dynamic downscaling method using Weather Research and Forecasting (WRF) model is utilized. The WRF simulation covers the crop-growing period (March to October) during 2000-2020. The initial and lateral boundary conditions of WRF are derived from the Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM), a participant model of Asia-Pacific Economic Cooperation Climate Center (APCC) Long-Term Multi-Model Ensemble Prediction System. For bias correction of downscaled daily precipitation, empirical quantile mapping (EQM) is applied. The downscaled data set without and with correction are called WRF UC and WRF C, respectively. In terms of mean precipitation, the EQM effectively reduces the wet biases over most of the United States and improves the spatial correlation coefficient with observation. The daily precipitation of WRF C shows the better performance in terms of frequency and extreme precipitation intensity compared to WRF UC. In addition, WRF C shows a more reasonable performance in predicting drought frequency according to intensity than WRF UC.

Key words: United States, precipitation, drought, regional climate model, empirical quantile mapping

^{*}Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932 E-mail: jbahn@pusan.ac.kr

1. 서 론

곡물자급률은 특정 국가의 총 곡물 소비량에서 국내 생산량이 차지하는 비율을 의미하는데, 우리나라의 경 우 2000년 이후 줄곧 20% 대의 낮은 값을 보이고 있 다(농림축산식품부, https://www.mafra.go.kr). 경제협력 개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 참여국을 대상으로 국제연합식 량농업기구(Food and Agriculture Organization, FAO) 의 데이터베이스(FAOSTAT)을 통해 산출된 분석 결과 에 따르면, 지난 3년간(2017/18~2019/20) 우리나라의 평균 곡물자급률은 21.5%로 전 세계 평균인 99.9%에 비해 현저히 낮은 수준을 기록했다(Choi et al., 2021). 특히, 우리나라는 2019년도 기준으로 쌀을 제외한 밀, 옥수수, 대두에 대한 곡물자급률이 각각 0.5%, 0.7%, 6.6%에 불과하여 해당 작물들은 대부분 수입에 의존 하고 있는 실정이다(농림축산식품부). 한편, 미국은 지 난 3년간 평균 곡물자급률이 120.6%이며, 2019년 기 준 밀 생산량 4위(전 세계 생산량 대비 6.8%) 및 수 출량 3위(25.86백만 톤), 옥수수 생산량 1위(전 세계 생산량 대비 30.2%) 및 수출량 1위(46.99백만 톤), 대 두 생산량 2위(전 세계 생산량 대비 29.0%) 및 수출 량 2위(48.31백만 톤)를 차지하였다(Kim, 2019; Choi et al., 2021). 따라서 미국의 곡물 생산량은 전 세계의 주요 곡물 수출 시장을 좌우하며, 미국의 수출량만 아 니라 우리나라의 수입량과 직결된다. 특히 미국 내 곡 물 수확량은 생육시기 동안 가뭄, 과우에 의한 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있기 때문에(e.g., Mishra and Cherkauer, 2010; Lobell et al., 2014; Zipper et al., 2016; Li et al., 2019; Leng, 2021), 우리나라의 곡물 수급을 안정적으로 계획하고 이례적인 가격 상승에 대 비하기 위해서는 주요 곡물 수입 국가인 미국에 대한 강수 및 가뭄 현황을 감시 및 예측하는 것이 중요하다. 장기 계절 예측자료를 생산하기 위하여 대기, 해양, 해빙, 그리고 지면 사이의 다양한 상호작용을 고려한 접합대순환 모형(Coupled General Circulation Model, CGCM)이 사용되고 있다. 또한 단일 모형에 의한 예 측이 갖는 구조적 오차를 제거하기 위해 사용하는 다 중 모형 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)을 통해 예측자료의 성능을 개선하기도 한다. 유럽의 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 와 United Kingdom Met Office (UKMO), 호주의 Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia (POAMA), 미국의 National Centers for Environmental Prediction (NCEP), 그리고 국내의 기상청과 Asia-

Pacific Economic Cooperation Climate Center (APCC) 등을 포함한 세계 여러 현업기관에서는 준실시간 계 절 예측(quasi-real time seasonal predictions)을 위해

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

단일 CGCM 및 MME를 활용하고 있다(e.g., Molteni et al., 2011; Lim et al., 2012; Kirtman et al., 2014; MacLachlan et al., 2015; Ham et al., 2019).

CGCM이 장기 계절 예측을 위해 널리 사용되고 있 지만, 낮은 공간해상도로 인해 지역 규모의 기상 현 상을 예측·분해하기는 어렵다는 단점을 갖는다. 이러 한 한계를 극복하기 위해서 전 지구 모형의 예측자료 를 경계 및 입력자료로 사용하여 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)을 통한 역학적 규모 축소법이 최근 활용되고 있다. 비교적 고해상도를 갖는 RCM은 복잡한 지형 효과를 고려함으로써 지역 규모의 기상 현상을 고려할 수 있다는 장점을 갖기 때문에 많은 선행 연구에서 사용되고 있다(e.g., Hur and Ahn, 2017; Ahn et al., 2018b, 2021; Kim et al., 2019; Seo et al., 2019). 예를 들어, Cocke and LaRow (2000)와 Cocke et al. (2007)에서는 미국 지역에 대해 RCM에 의해 모 의된 강수는 전 지구 모형 결과에 비해 강수 분포를 더 잘 모의하며, 특히 극한 강수에 대한 예측성이 우 수함을 보였다.

RCM이 모의하는 부가 정보(added values)의 중요 성이 대두됨에 따라, 2008년 미국 국립해양대기연구 소(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 Climate Prediction Project for the Americas (CPPA)에서는 복수의 RCM을 이용한 계절 예측을 위 해 Multi-RCM Ensemble Downscaling (MRED) 프로 젝트를 수행하였다. 해당 프로젝트에서는 NCEP Climate Forecast System (CFS) (Saha et al., 2006) 모형의 재 현 자료(reforecast)를 강제력으로 사용하여 미국 지역 을 대상으로 7개의 개별 RCM을 통한 역학적 규모 축소가 수행되었다. 대상 기간은 1982년부터 2003년 까지 북반구 겨울철(12~4월)이며, RCM 최종 산출물의 공간해상도는 약 30 km이다(https://rcmlab.agron.iastate. edu/mred/). 그러나 RCM을 이용한 역학적 규모 축소 가 모든 지역 및 변수에서 향상된 예측성을 보이지 않았다. 예를 들어 Yuan et al. (2012)과 De Sales and Xue (2013)은 MRED 프로젝트에 속한 개별 모형이 모의한 평균 강수가 대부분의 지역에서 CFS에 비해 편의(bias)가 개선되고 공간 분포가 관측과 유사하게 나타났으나, 강제력으로 사용된 CFS에 내재된 불확실 성으로 인해 연 변동 및 계절내 변동에 대한 개선은 불분명할 수 있음을 보였다. Shukla and Lettenmaier (2013)는 MRED 앙상블(즉, 모든 모형의 앙상블에 대 한 평균)의 수문학적 변수(강수, 토양수분, 눈)는 CFS 에 통계적 규모축소법을 적용한 결과에 비해 향상된 예측 수준을 보이나, 지역적인 차이와 RCM 앙상블 구성에 따른 민감도가 존재함을 보였다. 이처럼 일반 적으로 RCM은 모형 자체의 오차나 강제력으로 적용 된 입력 자료의 오차로 인한 편의가 존재한다.

RCM의 편의를 보정하기 위해 다양한 편의보정 방 법(bias correction method)이 활용되고 있다. 편의보정 방법에는 모형의 평균값을 보정하기 위해 선형 혹은 비선형 식을 사용하는 linear scaling 기법(Teutschbein and Seibert, 2012)과 모형의 분포 값을 보정하기 위해 감마 분포(gamma distribution)나 가우시안 분포(gaussian distribution) 등을 사용하는 distribution mapping 기법 (Piani et al., 2010; Themeßl et al., 2012) 등이 있다. 많은 선행 연구에서는 distribution mapping 기법인 분 위사상법(Quantile Mapping)을 RCM에서 모의된 강수 를 보정하기 위한 방법으로 채택하고 있는데(e.g., Wood et al., 2004; Fang et al., 2015; Devi et al., 2021), 해 당 방법은 평균, 표준편차만 아니라 강수 일수나 극 한 강수에 대한 보정 능력이 다른 보정 방법에 비해 우수한 것으로 알려져 있다(Themeßl et al., 2011; Gudmundsson et al., 2012; Chen et al., 2013). 분위사 상법은 이론적 누적분포함수(Cumulative Distribution Function; CDF)를 사용하는 모수 방법과 경험적 누적 분포함수(Empirical Cumulative Distribution Function, ECDF)를 사용하는 비모수 방법으로 구분된다. 그러 나, 모수 방법의 경우 변수의 분포가 이론적 누적분 포함수에 부합하지 않을 경우 과도한 보정이 발생할 수 있다는 단점을 갖기 때문에(Themeßl et al., 2011; M'Po et al., 2016), ECDF를 사용하는 경험적 분위사 상법(Empirical Quantile Mapping, EQM)이 선호되고 있다. 특히, 이전 연구에서는 RCM이 모의한 강수에 모수 방법보다 비모수 방법의 분위사상법을 사용했을 때 보정 효과가 더 우수함을 보인 바 있다(Gudmundsson et al., 2012; Gutjahr and Heinemann, 2013).

부산대학교 기후예측연구실에서는 농촌진흥청과 공 동으로 지난 2010년부터 계절주기로 전 지구 모형인 Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM)과 RCM을 이용하여 미국을 포함 한 주요 곡물 수입 국가들(중국, 남미 등)에 대한 8~9 개월 기상 예측자료를 생산하여 활용하고 있다(RDA, 2014, 2018, 2020). 게다가 PNU CGCM은 APCC의 다중모형 앙상블을 위한 장기 예측 시스템에 참여하 여 매달 12개월 예측 자료를 제공하고 있다(Kim and Ahn, 2015). 본 연구에서는 PNU CGCM 및 RCM을 통해 생산한 강수 예측 자료에 대해 경험적 분위사상 법을 통한 편의보정 방법을 적용하여 강수 및 가뭄의 예측성을 향상시키고자 하였다. 향상된 강수 예측은 미국 내 가뭄에 대한 신뢰할 만한 예측을 가능하게 할 수 있으며, 결과적으로 정책기관이 곡물 가격의 급 격한 변동에 선제적으로 대응하는데 도움을 줄 수 있다. 2장에서는 본 연구에서 사용한 관측 및 모형 자료

와 평가 방법을 서술하였고, 3장에서는 다양한 분석 을 통해 편의보정 방법이 적용되기 전과 후의 강수만 아니라 가뭄지수의 예측성을 비교 평가하였다. 4장에 서는 연구 요약 및 결론을 서술하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1 관측 자료

본 연구에서는 NOAA의 기후예측센터(Climate Prediction Center, CPC)에서 제공하는 일 강수량 자료 (CPC Unified Gauge-Based Analysis daily precipitation over Conterminous United States)를 사용하였다(Xie et al., 2007; Chen et al., 2008). CPC에서는 지상 관측소, 인공 위성 등의 다양한 강수 자료를 통합하여 미국 전역(20°-49.5°N, 233.75°-292.75°E)을 대상으로 0.25° × 0.25°의 공간해상도의 격자형 자료로 제공하고 있다 (https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.unified.daily. conus.html). 이 자료는 1948년부터 현재까지 장기간 에 대해서 일별 자료로 제공되고 있기 때문에 미국을 대상으로 하는 선행연구에서 많이 사용되고 있다(e.g., Dominguez et al., 2012; Behnke et al., 2016). 본 연 구에서는 미국 내 지역 별 분석을 위해 서부 지역 (West), 고평원 지역(High Plains), 남부 지역(South), 중서부 지역(Midwest), 남동부 지역(Southeast) 그리고 북동부 지역(Northeast)의 총 6개의 지역으로 분류하 였다(Fig. 1a). 해당 지역들은 미국가뭄모니터(United States Drought Monitor)에서 지역 별 가뭄 분석을 위



Fig. 1. (a) Topography (Unit: m) and six sub-regions over United States. Gray shading in (b) represents WRF Domain.

해 사용되고 있는 영역과 동일하다.

2.2 지역 기후 모형

본 연구에서는 PNU CGCM version 1.1을 통해 생 산된 전 지구 예측 자료를 사용하였다(Kim and Ahn, 2015). PNU CGCM의 성분 모형은 National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (NCEP CCM3) (Kiehl et al., 1996), Land Surface Model (LSM) (Bonan, 1998), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model (GFDL MOM3) (Pacanowski and Griffies, 2000), Los Alamos National Laboratory elastic viscous plastic sea-ice model (LANL EVP) (Hunke and Dukowicz, 1997)이며, 자세한 설명 은 Kim and Ahn (2015)에 서술되어 있다.

본 연구에서 사용된 RCM은 Weather Research and Forecasting (WRF) version 3.0 (Skamarock et al., 2008) 이다. 미국 전역에 대한 영역이 설정되었으며, 수평해 상도는 30 km이다(Fig. 1b). 적분 기간은 식물이나 작 물이 출현 후 성장하는 기간(생육기간, growing season) 에 해당하는 3~10월로 설정하였다(Linderholm, 2006). WRF의 초기 및 측면 경계조건은 PNU CGCM에서 매년 2월 13일에 적분을 출발하여 생산된 3월부터 10 월까지의 시간 단위의 전지구 예측자료를 사용하였다 (즉, 약 0.5~7.5개월의 예측 선행시간을 갖는다). 사용 된 변수는 연직 및 수평바람, 기온, 상대 습도, 토양 수분, 그리고 토양 온도 등이다(Hur and Ahn, 2015). WRF 적분은 매년 그리고 매달 재시작되어 1개월 동 안 연속 수행되었으며, 매달 spin-up 기간은 4일로 설 정하였다(Ahn et al., 2018b; Kim et al., 2019). 적분 은 2000년부터 2020년까지 수행되었다. 모형의 물리 방안(physics schemes)으로 미세 물리과정에 WRF Single-Moment 6-Class Microphysics (WSM6) Scheme (Hong and Lim, 2006), 적운 모수화에 Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004), 단파 복수 모수화에 Dudhia scheme (Dudhia, 1989), 장파 복수 모수화에 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997), 행성 경계층에 Yonsei University (YSU)

Table 1. Configuration of the WRF used in this study.

scheme (Hong et al., 2006), 지표층에 Monin-Obukhov scheme (Paulson, 1970), 그리고 지면과정에 Noah Land-Surface Model (Chen and Dudhia, 2001)을 사용 하였다(Table 1). WRF에 의해 모의된 강수는 이중 선 형 보간법(bi-linear interpolation)을 이용하여 CPC 관 측 자료에 해당하는 격자점으로 내삽되었다.

2.3 편의보정 방법: 경험적 분위 사상법

본 연구에서는 WRF가 모의한 일 강수량의 편의를 보정하기 위한 방법으로 다음과 같이 ECDF를 사용 하는 EQM을 적용하였다.

$$P_{mod, m, d}^{cor} = ECDF_{obs, m}^{-1}(ECDF_{mod, m}(P_{mod, m, d}))$$

여기서 $P^{cor}_{mod, m, d}(P_{mod, m, d})$ 는 특정 월(m) 및 특정 일(d) 의 보정 후(보정 전) 모형 값을 의미하며, ECDF mod.m (*ECDF*⁻¹_{obs. m})는 특정 월(m) 전체 기간에 대한 모형 ECDF (관측 ECDF의 역함수)를 의미한다. 본 연구에서는 훈 련 기간(training period)에 포함되지 않는 자료들의 보 정 능력을 확인하기 위해서 교차검증(Leave-one-out cross-validation)을 사용하였다(Michaelsen, 1987). 매년 관측과 모형이 모의한 일 강수는 훈련 기간(20년)과 보정 기간(calibration period, 1년)으로 나눈 후, 훈련 기간에 대해서 EOM을 적용하여 산출된 보정계수를 사용하여 보정 기간에 대한 모형의 강수를 보정하였 다. 동일한 방식으로 서로 다른 21년의 해에 대해서 반복 수행하였다. 만약, 특정 격자점에서 훈련 기간 동안 관측의 ECDF을 산출할 수 없는 경우(주어진 기 간 동안 모두 무강수일이거나 단 하루만 무강수일이 아닌 경우)에는 보정 기간 동안의 모형 강수를 모두 무강수로 처방하였다. 본 연구에서는 편의 보정이 적 용되지 않은(적용된) WRF 자료를 WRF UC (WRF C) 로 명명하였다.

2.4 가뭄 지수

일반적으로 가뭄의 모니터링 및 예측은 가뭄을 정량 화 하기위해 강수평년비(Percent of Normal Precipitation) (Hayes et al., 2011), 파머가뭄지수(Palmer Drought

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

Table 2. Definition of the SPI Classes.

SPI Range	Moisture Condition
> 1.0	Wet
$-1.0 < x \le 1.0$	Normal
$-1.5 < x \le -1.0$	Moderate Dry
$-2.0 \le x \le -1.5$	Severely Dry
$-2.0 \leq$	Extremely Dry

Severity Index) (Palmer, 1965)와 같은 다양한 가뭄지 수를 통해 이루어지고 있다. 그 중 McKee et al. (1993) 및 McKee et al. (1995)에 의해 개발된 표준강수지수 (Standard Precipitation Index; SPI)는 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)에서 권장 하는 기상학적 가뭄지수로, 가뭄의 시작이 강수량의 감소라는 점에서 착안되었다(WMO, 2012). SPI는 산 출방식이 간단하여 국내외 가뭄 연구 및 예보에 다양 하게 활용되고 있으며(e.g., Li et al., 2008; Kwak et al., 2016), 사용자에 맞춰 다양한 시간척도(3, 6, 12, 24, 48개월)에 대해 계산될 수 있기 때문에 장·단기 가뭄의 영향을 각각 표현할 수 있다(e.g., Yoon and Won, 2016; Fluixá-Sanmartín et al., 2018). 본 연구에 서는 갑작스럽게 발생하는 단기가뭄과 수년간 지속되 는 장기가뭄을 모두 고려하기 위해 SPI3 (3개월)와 SPI12 (12개월)을 사용하였다. 이 지수들은 30년의 장 기 강수 자료 사용이 권장되므로 1979~2020년까지의 월 강수량 자료를 이용하여 계산되었다. 그러나 예측 자료는 2000년부터 2020년까지 8개월치(3~10월)만 존 재하므로 매년 해당 지수들은 관측 자료(예측시점 이 전)와 예측 자료(예측시점 이후)를 혼합하여 산출되었 다(Son et al., 2015). 예를 들어 2020년 5월의 SPI3 예측은 1979년 1월부터 2020년 2월까지의 관측자료 와 2020년 3월부터 5월까지의 예측자료를 기반으로 한다. 매월 SPI에 따른 가뭄 단계(Table 2)를 기반으 로 가뭄 사례가 정의되었으며, 이후 모형의 가뭄 예 측성은 예측자료가 사용되는 8개월 동안 관측에서 나 타난 가뭄단계 별 발생 횟수를 얼마나 정확하게 맞추 는가에 대해 평가되었다. 가뭄은 특정 값 이하의 가 뭄지수가 지속되는 현상을 일컫으므로, 해당 평가방 식은 예측시점에 진행되고 있는 가뭄의 종료 또는 새 로운 가뭄의 시작을 예측하는데 활용될 수 있다. SPI

산정을 위한 확률분포함수는 강수 분포에 더 적합한 Pearson III 분포가 사용되었다(Guttman, 1999).

2.5 예측성 평가 방법

WRF가 모의한 강수의 예측성을 평가하기 위해서 평균제곱근시간오차(Root mean square temporal error; RMSTE), 평균제곱근공간오차(Root mean square spatial error; RMSSE), 그리고 공간상관계수(spatial correlation coefficient)가 사용되었으며, 이들은 다음과 같이 계산 된다.

$$RMSTE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} (mod_n - obs_n)^2}$$
$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I} (mod_i - obs_i)^2}$$

Spatial correlation coefficeint

$$=\frac{\sum_{i=1}^{I}(mod_{i})*(obs_{i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{I}(mod_{i})^{2}}*\sqrt{\sum_{i=1}^{I}(obs_{i})^{2}}}$$

여기서 mod_n(obs_n)은 특정 n번째 연도에 해당하는 모 형(관측) 값이고, N는 총 연도(2000년부터 2020년까 지, 총 21년)이다. mod_i(obs_i)은 특정 i번째 격자점에서 의 모형(관측) 값이고, I는 총 격자점의 개수이다. 관 측과 모형의 공간 분포 유사성을 측정하기 위해서 주 어진 미국의 내륙 영역(Fig. 1a)에서 uncentered 방식 으로 공간상관계수가 계산되었으며, 모든 자료들은 위 도에 따른 가중치가 반영되었다(DelSole and Shukla, 2006).

SPI에 대한 모형의 성능을 평가하기 위해 Receiver Operating Characteristics (ROC) 분석을 수행하였다. ROC 분석은 확률예보의 정성적 검증에 주로 활용되 고 있으며, Yoo et al. (2013)은 이를 통해 SPI의 가뭄 재현능력을 평가한 바 있다. 본 연구에서는 ROC 모 형(Table 3)을 이용하여 SPI에 따라 분류된 3가지 가 뭄 단계(즉, 보통 가뭄, 심한 가뭄, 극심한 가뭄)에 대 한 편의보정 전후 예측 자료의 성능을 비교 평가하였 다. 예를 들어 관측 자료에서 심한 가뭄이 발생하였 을 때, 예측된 SPI도 심한 가뭄을 나타낼 경우 "성공 (Hit, H)", 그렇지 않을 경우 "잘못된 경고(Missing,

		Obse	erved SPI
		Drought	Non-drought
Predicted SPI	Drought Non-drought	Hit (H) Missing (M)	False (F) Negative hit (N)

M)"로 나타냈다. 반면 심한 가뭄이 발생하지 않았을 때, 심한 가뭄을 예측한다면 "실패(False, F)"로, 그렇 지 않다면 "음의 성공(Negative hit, N)"으로 나타냈다. 그리고 이 결과를 통해 다음과 같이 적중률(Hit Rate, HR)과 비적중률(False Alram Rate, FAR)을 계산하였다.

$$HR = H/(H + M)$$
$$FAR = F/(F + N)$$

성공(H)과 음의 성공(N)은 참으로, 잘못된 경고(M)와 실패(F)는 거짓으로 판단되기에 예측성이 높을수록 HR=1, FAR=0에 가까워지는 특징을 보인다.

3. 결 과

3.1 생육기간 및 계절-월 규모 강수 예측성

Figure 2는 관측(OBS), WRF_UC, 그리고 WRF_C 의 생육기간 평균 강수의 공간분포를 나타낸 그림이

다. 해당 자료들에서 지역 별 영역 평균된 강수 정보 는 Table 4에 나타냈다. 먼저 관측의 강수 분포를 살 펴보면, 남동부 지역, 북동부 지역, 중서부 지역, 남부 지역은 평균 강수량이 각각 3.65 mm day⁻¹, 3.29 mm day⁻¹, 2.99 mm day⁻¹, 2.86 mm day⁻¹로 미국 전역(2.22 mm day⁻¹)보다 많게 나타난다. 로키 산맥(Rocky Mountains)이 위치한 고평원 지역과 그 동쪽에 위치 한 서부 지역은 평균 강수량이 각각 1.82 mm day⁻¹와 1.08 mm day⁻¹로 미국 전역보다 적게 나타난다(Fig. 2a). WRF UC의 경우 관측에서 나타난 강수 패턴을 잘 모의했으나, 대부분의 지역에서 강수를 과대 모의 하는 특징을 보였다(Figs. 2b, d). 특히 북동부 지역에 서는 강수를 0.98 mm day-1 정도 과대 모의하여 다른 지역에 비해 그 크기가 컸으며, 유일하게 남부 지역 에서는 0.37 mm day⁻¹ 정도 과소 모의하였다. WRF C 의 경우 WRF UC에 비해 더 관측과 유사한 공간 분 포를 나타냈으며, 미국 전역에 나타난 편의가 개선되



Fig. 2. Spatial distribution of climatological mean precipitation (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) derived from (a) OBS, (b) WRF_UC, and (c) WRF_C, and (d-e) their differences. The averaged values over the United States are shown at the upper-right corner in each panel.

Table 4. Climatological mean precipitation (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) for the United States and their sub-regions.

Region	OBS	WRF_UC	WRF_C	DIFF (WRF_UC-OBS)	DIFF (WRF_C-OBS)
West	1.08	1.63	1.13	0.56	0.06
High Plains	1.82	2.44	1.89	0.61	0.06
South	2.86	2.49	2.99	-0.37	0.13
Midwest	2.99	3.80	3.07	0.81	0.08
Southeast	3.65	4.19	3.77	0.55	0.12
Northeast	3.29	4.27	3.37	0.98	0.08
U.S.	2.22	2.70	2.31	0.47	0.08

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)



Fig. 3. RMSTE of the precipitation (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) derived from (a) WRF_UC and (b) WRF_C. The averaged values over the United States are shown at the upper-right corner in each panel.

Table 5. RMSTE of the precipitation (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) for the United States and their sub-regions.

Region	WRF_UC	WRF_C
West	0.85	0.53
High Plains	0.95	0.65
South	1.20	1.27
Midwest	1.22	0.86
Southeast	1.30	1.14
Northeast	1.41	0.90
U.S.	1.07	0.82

어 0.06~0.13 mm day⁻¹ 정도의 약한 습윤 편의를 보 였다(Figs. 2c, e).

WRF_UC와 WRF_C에서 나타나는 생육기간 평균 강 수 편의의 연도 별 누적 값을 살펴보기 위해서 RMSTE 의 공간 분포를 Fig. 3, 지역 별로 영역 평균된 값을 Table 5에 나타냈다. WRF_UC의 경우 강수가 미국 전 역 평균 값보다 많았던 4개 지역(남동부 지역, 북동부 지역, 중서부 지역, 남부 지역)에서 1.20~1.41 mm day⁻¹ 의 높은 RMSTE를 보였다(Fig. 3a). WRF_C의 경우 남부 지역을 제외한 모든 지역에서 RMSTE가 감소하 였다(Fig. 3b).

WRF_UC와 WRF_C의 연도 별 생육기간 평균 강 수의 미국 전역에 대한 공간 분포 예측성을 비교하기 위해 관측과 비교된 공간상관계수와 RMSSE를 Fig. 4에 나타냈다. WRF_UC와 WRF_C는 모두 공간상관 계수의 연 변동성이 크게 나타났다(각각의 표준편차 는 0.023와 0.018). WRF_UC는 공간상관계수가 최대 0.96까지 나타났으며, 평균값은 0.93을 보였고, WRF_C 는 최대 0.97 범위까지 나타났으며, 평균값은 0.95로 WRF_UC에 비해 향상된 결과를 보였다. 또한 WRF_C 는 공간상관계수의 표준편차가 WRF_UC에 비해 감 소하였다. 전반적으로 WRF C의 공간상관계수는



Fig. 4. (a) Timeseries of spatial correlation coefficients of the precipitation over the United States during the growing season (Mar-Oct) between OBS and WRF_UC (gray line) and WRF_C (black line). The gray (black) dashed line indicates the average value of WRF_UC (WRF_C). (b) Same as (a) but for RMSSE (Unit: mm day⁻¹).

WRF_UC보다 높았으나, 예외적으로 2010년, 2011년, 그리고 2019년에서는 낮았다(Fig. 4a).

한편, WRF_UC는 RMSSE가 최소 0.83 mm day⁻¹ 까지 나타났으며, 평균값은 1.16 mm day⁻¹을 보였고, WRF_C는 최소 0.62 mm day⁻¹까지 나타났으며, 평균 값은 0.88 mm day⁻¹로 WRF_UC에 비해 향상된 결과 를 보였다. 공간상관계수의 결과와 마찬가지로 WRF_C 는 RMSSE의 표준편차가 WRF_UC에 비해 감소하였 다. 전반적으로 WRF_C의 RMSSE는 WRF_UC보다 낮았으나, 예외적으로 2011년에서는 높았다(Fig. 4b). 공간상관계수 및 RMSSE 분석 결과를 종합적으로 검토했을 때, 편의보정이 적용된 후 강수 공간 분포



Fig. 5. Spatial distribution of OBS precipitation (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) for (a) 2011, (b) 20 years average (2000~2020 without 2011), and (c) their differences. The value of the lower-right corner above each plot indicates the area-averaged value. (d) Timeseries of spatial correlation coefficients from OBS precipitation during the growing season (Mar-Oct). Each coefficient represents the correlation between each year and the 20-year average climate excluding that year.



Fig. 6. BCR diagram for (a) spring (Mar-May, MAM), (b) summer (Jun-Aug, JJA), and (c) fall (Sep-Oct, SO) mean precipitation over the United States. The size of circles indicates the RMSTE. (d), (e), and (f) are the same as (a), (b), and (c), respectively, but bias for the United States and their sub-regions.

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

에 대한 예측성 하락은 특히 2011년에 나타났다(Figs. 4a, b).

특정 연도에 공간분포 예측성이 하락한 이유는 보 정 방법에서 대상이 되는 연도를 제외한 나머지 기간 의 자료들을 이용하여 보정 계수를 산출했기 때문이 라고 판단된다. 특히, 2011년은 텍사스 지역을 비롯한 미국 남부 지역에서 극심한 가뭄이 발생한 연도이기 때문에(Hoerling et al., 2013; Fernando et al., 2016), 보정 계수를 산출하기 위해 사용된 기간(즉, 2000~2010, 2012~2020)과 다른 강수 공간 분포를 보였을 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해 관측에서 해당 연도와 나머지 20년 평균 강수 공간 분포를 비교하였다(Figs. 5a-c). 분석 결과, 2011년에 비교적 저위도에 위치한 남부 지역, 남동부 지역에서는 각각 1.00 mm day⁻¹, 0.33 mm day⁻¹ 정도 강수량이 적고, 고위도에 위치한 서부 지역, 고평원 지역, 중서부 지역, 북동부 지역에 서는 각각 0.22 mm day⁻¹, 0.03 mm day⁻¹, 0.13 mm day⁻¹, 1.23 mm day⁻¹ 정도 강수량이 많아 지역 간 강 수량 차이가 20년 평균 분포에 비해 크게 나타났다 (Fig. 5c). Figure 5d는 2000년부터 2020년까지 관측에 서 매년 해당 연도(1년)의 강수 공간분포와 나머지 연 도(20년)의 평균 공간 분포를 기반으로 계산된 공간 상관계수의 시계열을 나타낸 그림이다. 예를 들어, 해 당 그림에서 2000년에 기록된 수치 약 0.978은 미국 전역에 대한 2000년의 공간분포와 나머지 20년(2001~ 2020년) 평균 공간분포를 이용하여 계산되었다. 해당 그림을 통해 2011년은 다른 연도들과 비교했을 때 0.945의 현저히 낮은 수치를 나타냄을 확인할 수 있 다. 다시 말해, 2011년은 편의 보정을 위한 계수를 산 출하는 배경이 되는 훈련 기간과의 공간 분포 차이로 인해 오히려 보정이 적용되었을 때 공간 분포 예측성 이 하락한 것으로 판단된다.

Figure 6은 계절별 평균 강수의 공간 분포에 대하 여 관측과 비교한 WRF UC과 WRF C의 통계값(Bias,



Fig. 7. Climatological monthly precipitation over the (g) United States and (a-f) their sub-regions.

Spatial correlation and RMSTE; BCR)을 나타낸 다이 어그램(Choi and Ahn, 2017; Ahn et al., 2018a)과 지 역 별로 영역 평균된 편의를 나타낸 그림이다. BCR 다이어그램의 X축은 편의, Y축은 공간상관계수, 그리 고 각 원의 크기는 RMSTE를 나타낸다. 즉, 모형의 예측 성능이 우수할수록 원들은 기준점(REF)에 가까 워지고 그 크기는 줄어든다. WRF UC는 예측 선행 시간(lead time)이 길어질수록(즉, 봄철에서 가을철 순 으로 갈수록) 공간상관계수가 낮아지고 RMSTE가 증 가한다(Figs. 6a-c). 한편, 예측 선행 시간이 길어질수 록 오히려 편의는 점차 감소한 것으로 나타나지만, 이 는 미국 남부 지역에서 나타나는 건조 편의와 대부분 의 지역에서 나타나는 습윤 편의가 서로 상쇄되었기 때문이다(Figs. 6d-f). WRF C는 WRF UC와 유사하게 예측 선행 시간이 길어질수록 RMSTE가 점차 증가하 지만, 그 크기는 WRF UC에 비해 낮은 수준으로 나 타났다. 또한, 공간상관계수를 봄철~가을철에 모두 0.99 이상의 높은 수치를 보였다. 위 결과들은 WRF C 가 WRF UC에 비해 미국 전역에 대해서 계절 규모 의 강수 분포에 대한 모의 성능이 향상되고 대부분의 지역에서 편의가 상당 부분 감소함을 의미한다.

Figure 7은 강수의 월 변동을 각 지역별로 나타낸 그림이다. 관측의 경우 미국 전역에 대해서 강수는 전 반적으로 여름철(6~8월)에 집중되는 모습을 보이나, 서부 지역은 봄철 및 가을철 강수가 많게 나타나는 등 지역 별 차이가 크게 나타났다. WRF UC의 경우 대부분 습윤 편의를 보이는 다른 지역들과 달리 미국 남부 지역에서는 여름철~가을철의 강수를 과소 모의 하는 특성을 보였는데, 이는 앞선 생육기간 평균 강 수 분석에서 해당 지역에서 건조 편의가 나타난 것에 기여하였다(Fig. 7c). 해당 특징으로 인해 미국 남부 지역에서 나타난 건조 편의와 다른 지역들의 습윤 편 의가 상쇄되어 여름철 이후에는 미국 전역에 대한 편 의는 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 7g). WRF C는 WRF UC와 비교했을 때 모든 지역에서 강수 편의가 감소하여 관측과 더 유사한 월 평균 강수량을 모의하 였다.

3.2 일 규모 강수 예측성

본 연구에서 WRF 강수를 보정하기 위해서 사용한





Fig. 8. Frequency of daily precipitation over the United States according to intensity.

EQM은 일 강수량에 대한 모의 성능을 크게 향상시 킬 수 있다. Figure 8은 21년의 생육기간 동안 일 강 수의 강도 별 발생 빈도를 나타낸 것이다. 관측의 경 우 0~1 mm day⁻¹의 강수 범위에서 발생 비율이 낮고, 1~2 mm day⁻¹의 약한 강수 범위에서 가장 높은 발생 비율을 보이고, 이후 강수 강도가 강해짐에 따라 발 생 비율은 다시 감소한다. 해당 증감 경향을 WRF UC 에서는 비교적 잘 모의하나 발생 비율의 최대치가 2~3 mm day⁻¹ 범위에서 나타남에 따라 전체적인 강수 강 도에 따른 빈도 분포가 관측에 비해 오른쪽으로 이동된 모습을 보였다. 특히, 관측의 경우 3 mm dav⁻¹ 이하의 강수가 전체 강수일의 약 80%를 차지한다. WRF UC 는 3 mm day⁻¹ 이하의 강수를 전체 강수일 대비 60% 로 나타내어 관측 대비 과소 모의하였고, 그 이상의 강수는 과대 모의하였다. 즉, WRF UC는 3 mm day-1 이하(초과) 강수를 과소(과대) 모의하였다. WRF C의 경우 WRF UC에서 나타났던 과소 혹은 과대 모의가 비교적 완화되어 관측과 유사한 발생 비율을 모의하였다. WRF C의 일 강수 보정 능력을 더 자세히 살펴보기

Indices	Definition	Unit
Wet days (WD)	Frequency of wet days with precipitation $> 0.1 \text{ mm day}^{-1}$	%
Consecutive wet days (CWD)	Maximum number of consecutive days with precipitation > 0.1 mm day ⁻¹	days
Heavy precipitation (P90)	Precipitation intensity from days > 90th Percentile	mm day ^{-1}
Extreme precipitation (P95)	Precipitation intensity from days > 95th Percentile	mm day ⁻¹

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)



Fig. 9. RMSTE of the (a) WD (Unit: %), (b) CWD (Unit: days), (c) P90 (Unit: mm day⁻¹), and (d) P95 (Unit: mm day⁻¹) during the growing season (Mar-Oct) for the United States and their sub-regions.

Table 7. RMSTE of the precipitation indices during the growing season (Mar-Oct) for the United States and their sub-regions.

	RMSTE (Unit)	WD (%)	CWD (days)	P90 (mm day ⁻¹)	P95 (mm day ⁻¹)
	West	11.16	6.98	19.06	21.38
	High Plains	15.05	6.88	13.38	15.84
	South	9.39	3.13	23.15	28.85
WRF_UC	Midwest	12.25	4.13	12.97	14.71
	Southeast	9.95	5.55	12.81	15.41
	Northeast	10.49	3.58	11.22	13.03
	U.S.	10.81	5.10	13.46	15.25
	West	3.85	4.02	15.93	18.30
	High Plains	4.19	1.60	12.12	14.76
	South	6.25	2.66	12.21	15.09
WRF_C	Midwest	3.88	1.26	12.70	14.55
	Southeast	5.02	3.69	12.63	15.72
	Northeast	4.23	2.21	11.74	14.64
	U.S.	2.52	1.87	9.74	11.16

위해서 강수 일수(wet days, WD), 최대 연속 강수 일수 (consecutive wet days, CWD), 강한 강수 강도(Heavy precipitation intensity, P90) 그리고 극한 강수 강도 (Extreme precipitation intensity, P95)의 총 4가지 강수 지수가 계산되었다. 각 지수에 대한 정의는 Table 6에 명시하였고, 지역 별 강수 지수들의 RMSTE는 Fig. 9와 Table 7에 나타냈다. 먼저 강수 일수의 경우 WRF UC 는 미국 내 지역(미국 전역)에서 9.39~15.05% (10.81%) 의 RMSTE를 보였으나, WRF C는 3.85~6.25% (2.52%) 로 현저히 감소하였다(Fig. 9a). 최대 연속 강수 일수 도 강수 일수와 유사하게 WRF UC는 미국 내 지역 (미국 전역)에서 3.13~6.98일(5.10일)의 RMSTE를 보 였으나, WRF C는 1.26~4.02일(1.87일)로 감소하였다 (Fig. 9b). 강한 강수 강도(극한 강수 강도)의 경우 WRF UC는 미국 내 지역에 대해 11.22~23.15 mm dav⁻¹ (13.03~28.85 mm day⁻¹)의 RMSTE를 보였으나, WRF C 는 11.74~15.93 mm day⁻¹ (14.55~18.30 mm day⁻¹)로 감소하였다(Figs. 9c, d). 특히 WRF UC의 경우 미국 남부 지역에서 분석 기간 동안의 건조 편의로 인해 강한 및 극한 강수 강도의 RMSTE가 크게 나타났는 데, WRF_C에는 해당 편의들이 완화된 모습을 보였다.

3.3 단기 가뭄 지수 (SPI3) 예측성 Figure 10은 2000년부터 2020년까지의 단기 가뭄

단계별 발생빈도에 대하여 관측(OBS)과 관측 대비 WRF UC, WRF C 편의 공간분포를 나타낸 것이다. 그림의 상단부터 차례로 극심한 가뭄(Extreme Dry), 심한 가뭄(Severe Dry), 보통 가뭄(Moderate Dry)를 나 타낸다. 먼저 극심한 가뭄을 살펴보면 21년간 중서부 지역, 남부 지역, 남동부 지역 그리고 북동부 지역의 경계라인에서 가장 빈번하게 발생하였으며, 서부 지 역 일부에서도 약 10~20회가량 발생하였다. WRF UC 는 서부 지역과 북동부 지역 일부에서 최대 5회 더 빈번하게 모의하는 특징을 보였으며, 남부 지역 일부 에서는 관측보다 가뭄을 드물게 모의하는 특징이 나 타났다. WRF C의 경우 이런 특징이 개선되어 미국 전역에서 ±1~2회 정도의 편의가 나타났다. 심한 가뭄 의 경우 극심한 가뭄에 비해 더 넓은 공간범위에서 가뭄이 발생하였다. 특히 북동부 지역에서 가장 빈번 했으며, 50회 이상 발생하는 지역이 극심한 가뭄에 비 해 증가하였다. 이처럼 심한 가뭄이 빈번하게 나타나 는 지역은 서부 지역 일부에서도 나타났는데, 고평원 지역에서는 여전히 낮은 발생빈도를 보였다. WRF UC 는 고평원 지역을 제외한 미국 전역에 대해 ±1~2회 이상의 발생빈도 편의를 보였으며, 특히 서부 지역과 남부 지역, 중서부 지역에서 크게 나타났다. 그러나 WRF C의 경우 서부 지역과 남부 지역에서 편의가 WRF UC에 비해 감소하며, 일부 중서부 지역에서만



Fig. 10. Spatial distributions of observed short-term drought (SPI3) frequency (OBS; left column) and its difference with predicted short-term drought frequency during the growing season (Mar-Oct). The middle (right) column shows the difference between WRF_UC (WRF_C) and OBS, and extreme dry, severe dry and moderate dry from top to bottom.

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

약 +2~3회 정도의 편의가 나타났다. 보통 가뭄의 경 우 고평원 지역의 북부를 제외한 대부분의 지역에서 빈번하게 발생한다. 특히 극심한 가뭄 및 심한 가뭄 이 빈번하게 발생했던 서부 지역과 남부 지역, 중서 부 지역만 아니라 남동부 지역에서도 평균 30회가량 의 발생 빈도를 보였다. 이에 대해 WRF_UC도 미국 전역 대부분에서 편의를 보였으며, 특히 남부 지역에 서 ±5회 이상으로 높았다. WRF_C는 해당 편의가 상 당부분 개선되어 미국 전역에 약 ±1~3회의 낮은 편 의를 보였다. Figure 11은 단기 가뭄의 각 가뭄 단계에 대해 구 한 HR와 FAR을 지역별로 영역 평균하여 나타낸 그 림이다. 미국전역의 각 격자점마다 2000년부터 2020 년까지의 8개월 관측과 예측(즉, 21년x8개월 = 168개 의 표본)을 통해 편의보정에 의한 HR과 FAR 변화 를 나타낸 그림이다. 이는 지역별로 영역 평균하고 WRF_C에서의 값에서 WRF_UC에서의 값을 빼서 나 타냈다. FAR과 HR은 각각 0과 1에 가까울수록 예 측성이 좋기 때문에, Fig. 11에서 음의 FAR과 양의 HR은 모두 예측성의 개선을 의미한다(둘 중 한 값



Fig. 11. The difference of ROC Analysis results (HR and FAR) of the short-term drought (SPI3) between WRF_C and WRF UC for (a) extreme dry, (b) severe dry, and (c) moderate dry.

Table 8. HR and FAR of the short-term drought (SPI3) during the growing season (Mar-Oct) for the United States and their sub-regions.

			Extreme Dry		Severe Dry		Moderate Dry	
		HR	FAR	HR	FAR	HR	FAR	
	West	0.852	0.023	0.815	0.019	0.871	0.020	
	High Plains	0.870	0.012	0.814	0.013	0.884	0.015	
	South	0.740	0.013	0.745	0.022	0.853	0.031	
WRF_UC	Midwest	0.867	0.019	0.872	0.020	0.896	0.020	
	Southeast	0.825	0.015	0.841	0.019	0.896	0.024	
	Northeast	0.888	0.029	0.886	0.025	0.906	0.019	
	U.S.	0.837	0.020	0.822	0.020	0.879	0.022	
	West	0.832	0.012	0.842	0.018	0.877	0.020	
	High Plains	0.861	0.010	0.824	0.012	0.870	0.014	
	South	0.813	0.014	0.827	0.019	0.877	0.023	
WRF_C	Midwest	0.859	0.017	0.853	0.020	0.883	0.020	
_	Southeast	0.806	0.015	0.809	0.019	0.869	0.024	
	Northeast	0.870	0.018	0.902	0.023	0.908	0.021	
	U.S.	0.838	0.014	0.843	0.019	0.879	0.021	

만 개선된 부분은 옅은 회색영역: 두 값 모두 개선 된 부분은 짙은 회색영역). 각 지역별 평균한 HR과 FAR은 Table 8에 나타냈다. 극심한 가뭄의 경우(Fig. 11a), 남부 지역은 HR이 0.073 증가하였으나 FAR에 는 큰 변화가 없었다. 서부 지역과 북동부 지역에서 는 FAR이 각각 0.011씩 감소하여 개선된 예측성을 보였으나, 오히려 HR의 측면에서는 각각 0.020, 0.018 감소하여 예측성이 낮아졌다. 그 외의 지역에서는 HR 이 최대 0.019 감소하고 FAR은 큰 변화가 나타나지 않았다. 미국 전역에 대해서는 HR은 큰 변화가 나 타나지 않았으나 FAR은 0.01 감소하였다. 이와 같은 가뭄 예측의 개선은 심한 가뭄(Fig. 11b)과 보통 가 뭄(Fig. 11c)에서도 발견된다. 심한 가뭄의 경우 대부 분의 지역에서 FAR에 큰 변화가 없었으며, 그 중 0.003 감소한 남부 지역이 가장 크게 개선되었다. 또 한 HR은 일부 지역(중서부 지역과 남동부 지역)에서 WRF UC에 비해 감소되었으나, 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역, 북동부 지역에서 각각 0.027, 0.010, 0.082, 0.016 증가하였다. 즉 대부분의 지역에서 HR 의 개선이 나타났으며, 이로 인해 미국 전역에 대해 FAR은 큰 변화가 없으나 HR은 0.021 증가하였다. 보통 가뭄의 경우 남부 지역에서 FAR이 0.008 감소 하였으며, 해당 지역을 제외한 지역에서는 FAR의 변 화가 뚜렷하지 않았다. HR의 측면에서는 남부 지역 에서 0.024 증가하였고, 고평원 지역, 중서부 지역, 남동부 지역에서 각각 0.014, 0.013, 0.027 감소하였 다. 편의보정효과는 각 가뭄 단계에 따라 지역별 차 이가 있으나, 남부 지역에서 가장 뚜렷하게 예측성이 향상되었다.

3.4 장기 가뭄 지수(SPI12) 예측성

각 단계별 장기가뭄(SPI12)은 단기가뭄(SPI3)에 비 해 드물게 발생하였다(Fig. 12). 모든 가뭄 단계에서 대부분의 가뭄이 북동부 지역에 집중적으로 나타났으 며, 보통 가뭄의 경우 중서부 지역과 남동부 지역에 서도 +10~15회 정도로 빈번하게 나타났다. SPI3에 비 해 SPI12를 예측할 때 관측의 비중이 더 높기 때문에, WRF_UC에서의 편의와 WRF_C에서의 편의가 Fig. 10에 비해 상대적으로 관측과 유사하다. WRF_UC의 경우 극심한 가뭄과 심한 가뭄에 대해 북동부 지역에 서 약 +3~5회 편의가, 보통 가뭄에 대해서는 약 -2~3 회 편의가 나타났으며, 해당 편의는 편의보정을 통해 대부분 WRF C에서 개선되었다.

Figure 13은 SPI12를 통한 각 단계별 장기 가뭄의 ROC 분석 결과이며, 각 지역별 평균한 값은 Table 9 에 나타냈다. 극심한 가뭄(Fig. 13a)의 경우 FAR이 모 든 지역에서 최대 0.017 감소하였고 미국 전역에 대 해서는 0.010 감소하여, WRF_UC에 비해 WRF_C에 서 예측성이 향상된 모습을 보였다. 한편 HR은 서부 지역, 고평원 지역, 남부 지역에서 각각 0.003, 0.078, 0.030 증가하고, 중서부, 남동부, 북동부 지역에서 각 각 0.050, 0.028, 0.028 감소하였다. 이는 편의보정 효



Fig. 12. Same as Fig. 10, but for long-term drought (SPI12).

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

송찬영 · 김소희 · 안중배



Fig. 13. Same as Fig. 11, but for SPI12.

 Table 9. Same as Table 8, but for the long-term drought (SPI12).

			Extreme Dry		Severe Dry		Moderate Dry	
		HR	FAR	HR	FAR	HR	FAR	
	West	0.847	0.026	0.857	0.026	0.925	0.032	
	High Plains	0.843	0.019	0.918	0.015	0.952	0.017	
	South	0.890	0.012	0.873	0.016	0.905	0.029	
WRF UC	Midwest	0.891	0.035	0.913	0.030	0.925	0.023	
	Southeast	0.896	0.015	0.907	0.022	0.923	0.034	
	Northeast	0.904	0.036	0.916	0.035	0.925	0.021	
	U. S .	0.889	0.027	0.895	0.026	0.921	0.028	
	West	0.850	0.019	0.872	0.022	0.922	0.026	
	High Plains	0.921	0.010	0.922	0.010	0.927	0.014	
	South	0.920	0.012	0.900	0.016	0.919	0.027	
WRF C	Midwest	0.841	0.020	0.908	0.027	0.925	0.023	
_	Southeast	0.868	0.014	0.893	0.021	0.914	0.027	
	Northeast	0.876	0.019	0.936	0.027	0.946	0.022	
	U.S.	0.871	0.017	0.904	0.023	0.924	0.025	

과가 HR 측면에서 지역에 따라 상이하게 나타남을 시사한다. 심한 가뭄(Fig. 13b)의 경우 중서부 지역에 서 HR이 0.014 감소하였으나, 대부분의 지역에서 증 가하는 양상이 나타났다. 서부지역, 고평원 지역, 남 부 지역, 남동부 지역에서 각각 0.015, 0.004, 0.027, 0.020 증가하였다. 한편 FAR도 편의보정을 통해 대부 분 감소하였으며, 특히 북동부 지역에서 0.008 감소하 여 다른 지역에 비해 FAR이 가장 많이 향상되었다. 그 결과 미국 전역에 대해 HR은 0.009 증가하고, FAR 은 0.003 감소하여 다른 가뭄 단계보다 편의 보정을 통해 예측성이 뚜렷하게 개선되었다. 보통 가뭄(Fig. 13c)의 경우 상대적으로 HR 또는 FAR의 변화가 크 지 않았다. 그 중 남부 지역과 북동부 지역에서 HR 이 각각 0.014, 0.021 증가하였으며, 다른 지역에서는 감소하였다. FAR의 측면에서는 북동부 지역에서만 0.001 증가하고 다른 지역에서는 최대 0.007 감소하 는 모습을 보였다. 편의 보정을 통한 HR의 개선효과 는 가뭄 단계에 따라 다르게 나타났다. 그러나 FAR 은 대부분 감소하여 예측성의 향상을 나타내며, 이는 편의 보정을 통해 실제로 극심한 가뭄이 발생하지 않 있을 때 극심한 가뭄을 예측하는 빈도가 감소하였음 을 의미한다. 또한 HR과 FAR을 같이 고려할 때 심 한 장기가뭄에 대해 보정효과가 가장 뚜렷하게 관찰 되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 APCC 참여 모형인 PNU CGCM의 전 지구 예측자료(2000~2020년, 3~10월)를 WRF의 초 기 및 측면 경계조건으로 사용하여 미국 지역을 대상 으로 역학적 규모축소를 수행한 후 EQM을 이용한 강 수 보정 효과를 검증하였다. WRF_UC와 WRF_C의 예측성 비교 평가는 크게 생육기간 및 계절-월 규모 강수, 일 규모 강수, 가뭄지수의 세 가지 부분에 대해 수행되었다.

WRF UC의 경우 계절-월 규모 강수에 대해 미국 남부 지역에서는 건조 편의, 나머지 지역에서는 습윤 편의를 보여 전반적으로 미국 전역에 대해 습윤 편의 를 나타냈다. WRF C에서는 전체 분석 기간 동안 미 국 전역에 나타난 습윤 편의 및 RMSTE가 WRF UC 에 비해 감소했다. 또한 연도 별로 관측과 비교된 공 간상관계수와 RMSSE 분석에서 강수 공간 분포에 대 한 예측성이 WRF UC에 비해 대체적으로 향상되었 다. 계절별 분석 결과, WRF UC는 예측 선행 시간이 길어질수록 공간상관계수가 감소하고 RMSTE가 증가 하는 결과를 보였으나, WRF_C에서는 해당 부분들에 대해 개선된 결과를 보였다. 본 연구에서 사용한 EQM 은 일 강수량에 대해 수행되었기 때문에 일 강수량에 대한 예측 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 본 연구에 서는 WRF C의 강수 일수, 최대 연속 강수 일수, 강 한 강수 강도 및 극한 강수 강도 지수에 대한 모의 성능이 미국 내 대부분의 지역에서 개선되었음을 확 인하였다. 또한 가뭄지수를 통해 장단기 가뭄 예측에 대한 편의보정효과를 평가하였다. 모든 단계의 장단 기 가뭄 발생빈도 예측은 WRF UC에 비해 WRF C 에서 편의가 감소되었다. ROC 분석에서는 가뭄 단계 와 발생 지역에 따라 HR과 FAR의 변화가 다르게 나 타났으나, 대부분 둘 중 한 측면에서는 예측성의 개 선을 보였다. 특히 장기가뭄에 대해 일부지역에서 HR 과 FAR 모두 향상되는 결과가 나타났다(극심한 가뭄: 고평원 지역과 남부지역; 심한 가뭄: 서부 지역과 북 동부 지역).

EQM은 강수의 평균 값, 강수 일수 그리고 극한 값 에 대한 편의를 감소시키고 공간 규모 예측 성능을 크게 향상시킬 수 있으나, 자체적으로 모형이 갖고 있 는 시간 변동성은 개선되지 않는다. 선행 연구에서는 모형 산출물에 편의 보정을 적용하게 되면 경년 변동 성과 같은 예측 성능은 오히려 하락할 수 있음을 지 적한 바 있다(Maraun, 2013; Manzanas et al., 2018). 따라서 지역 규모 강수의 경년 변동성에 대한 예측성 을 향상시키기 위해서는 RCM의 초기 및 측면 경계 자료로 활용되는 CGCM 변수들의 예측 성능 향상이 선행되어야 한다. 또한, 단일 CGCM 내 다수의 앙상

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

불을 RCM을 이용해 역학적 규모 축소한 후 그 결과 물들을 이용한 앙상블 예측을 수행하거나, 동일한 과 정을 다중 CGCM을 이용하는 방법도 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 단일 모형인 PNU CGCM의 단일 앙상블을 사용하여 WRF 및 EQM을 이용한 편 의 보정을 수행했지만, 향후 PNU CGCM의 다수 앙 상블을 활용하여 동일한 분석을 수행할 예정이다. 다 중 모형 앙상블 계절 예측을 위해서 NMME Phase 2 에 참여하고 있는 NCEP의 CFS version 2의 다수 앙 상블을 활용하는 방안도 가능하다(https://www.ncdc. noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/climateforecast-system-version2-cfsv2#CFSv2%20Operational %20Forecasts).

한편 본 연구에서 사용한 가뭄지수는 오직 강수만 을 변수로 갖는 SPI로, 물 공급 측면은 잘 반영하나 증발산량과 같은 물 수요 측면은 고려하기 어렵다. 그 러나 2014년 미국 캘리포니아에서 발생한 가뭄처럼 일부 가뭄은 강수보다 온도로 인한 토양수분 및 유출 이 주된 악화요인이다(Shukla et al., 2015). 이와 같은 가뭄사례는 강수만 고려한 본 연구에서는 잘 나타나 지 않는다. 이는 가뭄예측에 있어 가뭄발생에 중요한 역할을 하는 물 수요 측면도 고려해야함을 시사하며, 해당 개념을 바탕으로 파머가뭄지수나 표준강수증발 산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 등이 가뭄을 진단하기 위한 지수로 널리 사용 되고 있다(e.g., Vicente-Serrano et al., 2010; Williams et al., 2015; Choi and Kim, 2018). 따라서 향후 강수 외에 기온, 토양수분 등 다른 주요 가뭄 변수에 대해 서도 편의보정을 적용한 후 각 변수들과 물 공급 및 수요를 모두 고려한 가뭄지수의 예측성 개선 정도를 종합적으로 평가할 예정이다. 다수의 변수 특성이 고 려된 가뭄지수의 예측성이 개선된다면 다양한 수문기 후가 존재하는 미국지역의 더 현실적인 가뭄 예측이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사드립니다. 이 연구는 농촌진 흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01475503)의 지원으 로 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn, J.-B., Y.-W. Choi, and S. Jo, 2018a: Evaluation of reproduced precipitation by WRF in the Region of CORDEX-East Asia phase 2. *Atmosphere*, 28, 85-97, doi:10.14191/Atmos.2018.28.1.085 (in Korean with English abstract).

- _____, K.-M. Shim, M.-P. Jung, H.-G. Jeong, Y.-H. Kim, and E.-S. Kim, 2018b: Predictability of temperature over South Korea in PNU CGCM and WRF hindcast. *Atmosphere*, 28, 479-490, doi:10.14191/Atmos. 2018.28.4.479 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors, 2021: Climatic yield potential of Japonica-type rice in the Korean Peninsula under RCP scenarios using the ensemble of multi-GCM and multi-RCM chains. *Int. J. Climatol.*, **41**, E1287-E1302, doi:10.1002/joc.6767.
- Behnke, R., S. Vavrus, A. Allstadt, T. Albright, W. E. Thogmartin, and V. C. Radeloff, 2016: Evaluation of downscaled, gridded climate data for the conterminous United States. *Ecol. Appl.*, 26, 1338-1351, doi: 10.1002/15-1061.
- Bonan, G. B., 1998: The Land Surface Climatology of the NCAR Land Surface Model Coupled to the NCAR Community Climate Model. J. Climate, 11, 1307-1326, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<1307:Tlscot> 2.0.Co;2.
- 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.
- Chen, J., F. P. Brissette, D. Chaumont, and M. Braun, 2013: Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resour. Res.*, 49, 4187-4205, doi:10.1002/wrcr.20331.
- Chen, M., W. Shi, P. Xie, V. B. S. Silva, V. E. Kousky, R. Wayne Higgins, and J. E. Janowiak, 2008: Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D04110, doi:10.1029/2007JD009132.
- Choi, S.-C., J.-K. Kim, and S.-Y. Ock, 2021: The Current Status of Korean Agriculture in the World. Korea Rural Economic Institute, 192 pp [Available online at http://www.krei.re.kr/krei/researchReportView.do?key= 67&pageType=010101&biblioId=527754&pageUnit= 10&searchCnd=all&searchKrwd=&pageIndex=1] (in Korean).
- Choi, W., and K.-Y. Kim, 2018: Physical mechanism of spring and early summer drought over North America associated with the boreal warming. *Sci. Rep.*, 8, 7533, doi:10.1038/s41598-018-25932-5.
- Choi, Y.-W., 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).

- Cocke, S., and T. E. LaRow, 2000: Seasonal predictions using a regional spectral model embedded within a coupled ocean-atmosphere model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 689-708, doi:10.1175/1520-0493(2000)128<0689: Spuars>2.0.Co;2.
- , T. E. LaRow, and D. W. Shin, 2007: Seasonal rainfall predictions over the southeast United States using the Florida State University nested regional spectral model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112**, D04106, doi:10.1029/2006JD007535.
- De Sales, F., and Y. Xue, 2013: Dynamic downscaling of 22-year CFS winter seasonal hindcasts with the UCLA-ETA regional climate model over the United States. *Climate Dyn.*, **41**, 255-275, doi:10.1007/s00382-012-1567-x.
- DelSole, T., and J. Shukla, 2006: Specification of wintertime North American surface temperature. J. Climate, 19, 2691-2716, doi:10.1175/jcli3704.1.
- Devi, U., M. S. Shekhar, and G. P. Singh, 2021: Correction of mesoscale model daily precipitation data over Northwestern Himalaya. *Theor. Appl. Climatol.*, 143, 51-60, doi:10.1007/s00704-020-03409-8.
- Dominguez, F., E. Rivera, D. P. Lettenmaier, and C. L. Castro, 2012: Changes in winter precipitation extremes for the western United States under a warmer climate as simulated by regional climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L05803, doi:10.1029/2011GL050762.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077: Nsocod>2.0.Co;2.
- Fang, G. H., J. Yang, Y. N. Chen, and C. Zammit, 2015: Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2547-2559, doi:10.5194/hess-19-2547-2015.
- Fernando, D. N., and Coauthors, 2016: What caused the spring intensification and winter demise of the 2011 drought over Texas?. *Clim. Dyn.*, 47, 3077-3090, doi: 10.1007/s00382-016-3014-x.
- Fluixá-Sanmartín, J., D. Pan, L. Fischer, B. Orlowsky, J. García-Hernández, F. Jordan, C. Haemmig, F. Zhang, and J. Xu, 2018: Searching for the optimal drought index and timescale combination to detect drought: a

case study from the lower Jinsha River basin, China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **22**, 889-910, doi:10.5194/ hess-22-889-2018.

- Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen-Skaugen, 2012: Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations-a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3383-3390, doi:10.5194/hess-16-3383-2012.
- Gutjahr, O., and G. Heinemann, 2013: Comparing precipitation bias correction methods for high-resolution regional climate simulations using COSMO-CLM. *Theor. Appl. Climatol.*, **114**, 511-529, doi:10.1007/ s00704-013-0834-z.
- Guttman, N. B., 1999: Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. J. Am. Water Resour: Assoc., 35, 311-322, doi:10.1111/j.1752-1688. 1999.tb03592.x.
- Ham, S., A.-Y. Lim, S. Kang, H. Jeong, and Y. Jeong, 2019: A newly developed APCC SCoPS and its prediction of East Asia seasonal climate variability. *Climate Dyn.*, **52**, 6391-6410, doi:10.1007/s00382-018-4516-5.
- Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall, and M. Widhalm, 2011: The lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **92**, 485-488, doi:10.1175/2010 bams3103.1.
- Hoerling, M., and Coauthors, 2013: Anatomy of an extreme event. J. Climate, 26, 2811-2832, doi:10.1175/jcli-d-12-00270.1.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF singlemoment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor: Soc.*, **42**, 129-151.
- 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.
- Hunke, E. C., and J. K. Dukowicz, 1997: An elastic-viscous-plastic model for sea ice dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 1849-1867, doi:10.1175/1520-0485 (1997)027<1849:Aevpmf>2.0.Co;2.
- Hur, J., and J.-B. Ahn, 2015: Seasonal prediction of regional surface air temperature and first-flowering date over South Korea. *Int. J. Climatol.*, 35, 4791-4801, doi:10.1002/joc.4323.
- _____, and _____, 2017: Assessment and prediction of the first-flowering dates for the major fruit trees in Korea using a multi-RCM ensemble. *Int. J. Clima-*

tol., 37, 1603-1618, doi:10.1002/joc.4800.

- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor. Climatol., 43, 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:Tkcpau> 2.0.Co;2.
- Kiehl, J. T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Briegleb, D. L. Williamson, and P. J. Rasch, 1996: Description of the NCAR community climate model (CCM3). Tech. Rep. No. NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research, 152 pp [Available online at https://opensky.ucar.edu/islandora/object/ technotes:187].
- Kim, H.-J., and J.-B. Ahn, 2015: Improvement in prediction of the Arctic Oscillation with a realistic ocean initial condition in a CGCM. J. Climate, 28, 8951-8967, doi:10.1175/jcli-d-14-00457.1.
- Kim, M.-S., 2019: World agricultural supply and demand estimates. In D. Huh et al. Eds., World Grain Market vol. 8 no. 6, KREI, 10-26 (in Korean) [Available online at http://www.krei.re.kr/krei/researchReportView.do?key= 311&pageType=0304&biblioId=521449&pageUnit= 10&searchCnd=all&searchKrwd=&pageIndex=2].
- Kim, Y.-H., E.-S. Kim, M.-J. Choi, K.-M. Shim, and J.-B. Ahn, 2019: Evaluation of long-term seasonal predictability of heatwave over South Korea using PNU CGCM-WRF Chain. *Atmosphere*, **29**, 671-687, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.671 (in Korean with English abstract).
- Kirtman, B. P., and Coauthors, 2014: The North American multimodel ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; Phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 585-601, doi:10.1175/bams-d-12-00050.1.
- Kwak, J., S. Kim, J. Jung, V. P. Singh, D. R. Lee, and H. S. Kim, 2016: Assessment of meteorological drought in Korea under climate change. *Adv. Meteorol.*, 2016, 1879024, doi:10.1155/2016/1879024.
- Leng, G, 2021: Maize yield loss risk under droughts in observations and crop models in the United States. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 024016, doi:10.1088/1748-9326/abd500.
- Li, W., R. Fu, R. I. N. Juárez, and K. Fernandes, 2008: Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, **363**, 1767-1772, doi:10.1098/rstb.2007.0022.
- Li, Y., K. Guan, G. D. Schnitkey, E. DeLucia, and B. Peng, 2019: Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the

한국기상학회대기 제31권 5호 (2021)

United States. *Glob. Change Biol.*, **25**, 2325-2337, doi:10.1111/gcb.14628.

- Lim, E.-P., H. H. Hendon, S. Langford, and O. Alves, 2012: Improvements in POAMA2 for the prediction of major climate drivers and south eastern Australian rainfall. CAWCR Tech. Rep. No. 051, Centre for Australian Weather and Climate Research, 23 pp [Available online at https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR 051.pdf].
- Linderholm, H. W., 2006: Growing season changes in the last century. *Agric. Forest. Meteor.*, **137**, 1-14, doi: 10.1016/j.agrformet.2006.03.006.
- Lobell, D. B., M. J. Roberts, W. Schlenker, N. Braun, B. B. Little, R. M. Rejesus, and G L. Hammer, 2014: Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the U.S. Midwest. *Science*, **344**, 516-519, doi:10. 1126/science.1251423.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 141, 1072-1084, doi:10.1002/qj.2396.
- Manzanas, R., A. Lucero, A. Weisheimer, and J. M. Gutiérrez, 2018: Can bias correction and statistical downscaling methods improve the skill of seasonal precipitation forecasts?. *Climate Dyn.*, **50**, 1161-1176, doi:10.1007/s00382-017-3668-z.
- Maraun, D., 2013: Bias correction, quantile mapping, and downscaling: Revisiting the inflation issue. J. Climate, 26, 2137-2143, doi:10.1175/jcli-d-12-00821.1.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proc., The 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, United States, Amer. Meteor. Soc., 179-184.
- _____, ____, and _____, 1995: Drought monitoring with multiple time scales. *Proc., The 9th Conference on Applied Climatology*, Dallas, TX, United States, Amer. Meteor. Soc., 233-236.
- Michaelsen, J., 1987: Cross-validation in statistical climate forecast models. J. Appl. Meteor. Climatol., 26, 1589-1600, doi:10.1175/1520-0450(1987)026<1589:Cviscf> 2.0.Co;2.
- Mishra, V., and K. A. Cherkauer, 2010: Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the Midwestern United States. *Agric. For. Meteorol.*, **150**, 1030-1045, doi:10. 1016/j.agrformet.2010.04.002.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inho-

mogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 16663-16682, doi:10.1029/97JD00237.

- Molteni, F., and Coauthors, 2011: The new ECMWF seasonal forecast system (System 4). ECMWF Tech. Memo. No. 656, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 49 pp [Available online at https:// www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2011/11209new-ecmwf-seasonal-forecast-system-system-4.pdf].
- M'Po, Y. N., A. E. Lawin, G. T. Oyerinde, B. K. Yao, and A. A. Afouda, 2016: Comparison of daily precipitation bias correction methods based on four regional climate model outputs in Ouémé Basin, Benin. *Hydrology*, 4, 58-71, doi:10.11648/j.hyd.20160406.11.
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, 2000: MOM 3.0 Manual. NOAA/GFDL, 682 pp [Available online at https://www.gfdl.noaa.gov/wp-content/uploads/files/ model_development/ocean/mom3_manual.pdf].
- Palmer, W. C., 1965: Meteorological drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58 pp [Available online at https://www.ncdc. noaa.gov/temp-and-precip/drought/docs/palmer.pdf].
- Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 9, 857-861, doi:10.1175/1520-0450(1970)009<0857: Tmrows>2.0.Co;2.
- Piani, C., J. O. Haerter, and E. Coppola, 2010: Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 187-192, doi:10.1007/s00704-009-0134-9.
- RDA, 2014: The construction of agrometeorological information and climate modeling in major crop production area. Rural Development Administration, 138 pp [Available online at https://scienceon.kisti.re.kr/srch/ selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201400011432].
- _____, 2018: Production of dissemination of agro-climate information in major crop production areas. Rural Development Administration, 86 pp [Available online at https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201800043070&dbt=TRKO].
- _____, 2020: Development of environment information and monitoring service system for grain yield in foreign countries. Rural Development Administration, 232 pp [Available online at https://scienceon.kisti.re.kr/ srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000030378].
- Saha, S., and Coauthors, 2006: The NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, **19**, 3483-3517, doi:10.1175/ jcli3812.1.

- Seo, G.-Y., Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2019: Near future projection of extreme temperature over CORDEX-East Asia phase 2 region using the WRF model based on RCP scenarios. *Atmosphere*, **29**, 585-597, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.585 (in Korean with English abstract).
- Shukla, S., and D. P. Lettenmaier, 2013: Multi-RCM ensemble downscaling of NCEP CFS winter season forecasts: Implications for seasonal hydrologic forecast skill. J. Geophys. Res. Atmos., 118, 10770-10790, doi:10.1002/jgrd.50628.
- _____, M. Safeeq, A. AghaKouchak, K. Guan, and C. Funk, 2015: Temperature impacts on the water year 2014 drought in California. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4384-4393. doi:10.1002/2015GL063666.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, 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. Tech. Rep. No. NCAR/TN-468+STR, National Center for Atmospheric Research, 88 pp [Available online at https://opensky.ucar.edu/islandora/ object/technotes:500].
- Son, K.-H., D.-H. Bae, and H.-S. Cheong, 2015: Construction & evaluation of GloSea5-based hydrological drought outlook system. *Atmosphere*, 25, 271-281, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.271 (in Korean with English abstract).
- Teutschbein, C., and J. Seibert, 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *J. Hydrol.*, **456**, 12-29, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- Themeßl, M. J., A. Gobiet, and A. Leuprecht, 2011: Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.*, **31**, 1530-1544, doi:10.1002/joc.2168.
- _____, ____, and G. Heinrich, 2012: Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, **112**, 449-468, doi:10.1007/ s10584-011-0224-4.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno,

2010: A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, **23**, 1696-1718, doi:10.1175/2009jcli2909.1.

- WMO, 2012: Standardized Precipitation Index User Guide. WMO-No. 1090, World Meteorological Organization, 16 pp [Available online at https://library.wmo.int/index. php?lvl=notice display&id=13682#.YREZUogzaUm].
- Williams, A. P., R. Seager, J. T. Abatzoglou, B. I. Cook, J. E. Smerdon, and E. R. Cook, 2015: Contribution of anthropogenic warming to California drought during 2012~2014. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6819-6828, doi: 10.1002/2015GL064924.
- Wood, A. W., L. R. Leung, V. Sridhar, and D. P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model Outputs. *Climatic Change*, 62, 189-216, doi:10.1023/ B:CLIM.0000013685.99609.9e.
- Xie, P., M. Chen, S. Yang, A. Yatagai, T. Hayasaka, Y. Fukushima, and C. Liu, 2007: A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia. *J. Hydrometeor.*, 8, 607-626, doi:10.1175/jhm583.1.
- Yoo, J. Y., H. Song, T.-W. Kim, and J.-H. Ahn, 2013: Evaluation of short-term drought using daily standardized precipitation index and ROC analysis. *J. Korean Soc. Civil Engineers*, **33**, 1851-1860, doi:10.12652/Ksce. 2013.33.5.1851 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S.-H., and M.-S. Won, 2016: Correlation analysis of forest fire occurrences by change of standardized precipitation index. *J. Korean Assoc. Geogr. Infor. Studies*, **19**, 14-26, doi:10.11108/kagis.2016.19.2.014 (in Korean with English abstract).
- Yuan, X., X.-Z. Liang, and E. F. Wood, 2012: WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008. *Climate Dyn.*, **39**, 2041-2058, doi:10.1007/s00382-011-1241-8.
- Zipper, S. C., J. Qiu, and C. J. Kucharik, 2016: Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environ. Res. Lett.*, **11**, 094021, doi:10.1088/1748-9326/11/9/ 094021.