

PNU CGCM-WRF Chain을 이용한 남한지역 벼의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성 연구

김영현¹⁾ · 최명주^{1),2)} · 심교문³⁾ · 허지나³⁾ · 조세라³⁾ · 안중배^{1)*}

¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단 대기환경과학과,
³⁾국립농업과학원

(접수일: 2021년 8월 22일, 수정일: 2021년 10월 27일, 게재확정일: 2021년 10월 28일)

A Study on the Predictability of the Number of Days of Heat and Cold Damages by Growth Stages of Rice Using PNU CGCM-WRF Chain in South Korea

Young-Hyun Kim¹⁾, Myeong-Ju Choi^{1),2)}, Kyo-Moon Shim³⁾, Jina Hur³⁾,
Sera Jo³⁾, and Joong-Bae Ahn^{1)*}

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

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

³⁾National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju, Korea

(Manuscript received 22 August 2021; revised 27 October 2021; accepted 28 October 2021)

Abstract This study evaluates the predictability of the number of days of heat and cold damages by growth stages of rice in South Korea using the hindcast data (1986~2020) produced by Pusan National University Coupled General Circulation Model-Weather Research and Forecasting (PNU CGCM-WRF) model chain. The predictability is accessed in terms of Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Standardized Deviations (NSD), Hit Rate (HR) and Heidke Skill Score (HSS). For the purpose, the model predictability to produce the daily maximum and minimum temperatures, which are the variables used to define heat and cold damages for rice, are evaluated first. The result shows that most of the predictions starting the initial conditions from January to May (01RUN to 05RUN) have reasonable predictability, although it varies to some extent depending on the month at which integration starts. In particular, the ensemble average of 01RUN to 05RUN with equal weighting (ENS) has more reasonable predictability (RMSE is in the range of 1.2~2.6°C and NSD is about 1.0) than individual RUNs. Accordingly, the regional patterns and characteristics of the predicted damages for rice due to excessive high- and low-temperatures are well captured by the model chain when compared with observation, particularly in regions where the damages occur frequently, in spite that hindcasted data somewhat overestimate the damages in terms of number of occurrence days. In ENS, the HR and HSS for heat (cold) damages in rice is in the ranges of 0.44~0.84 and 0.05~0.13 (0.58~0.81 and -0.01~0.10) by growth stage. Overall, it is concluded that the PNU CGCM-WRF chain of 01RUN~05RUN and ENS has reasonable capability to predict the heat and cold damages for rice in South Korea.

Key words: PNU CGCM, WRF, predictability, rice, heat damage, cold damage

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Department of Atmospheric Sciences, 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

전 세계 인구는 약 1.1% year⁻¹ 증가율(2015~2020년 기준)로 계속해서 증가하는 반면, 기후변화에 따른 이상기상 증가 및 경제적 침체 등으로 인해 농업 생산량은 감소하는 추세이다. 전 세계적으로 식량 생산 및 공급이 불안정하여 전 세계 인구의 약 12%에 해당하는 9억 2800만명(2020년 기준)이 심각한 수준의 식량위기에 직면해 있다(UN, 2019; FAO et al., 2021). 특히, 대한민국은 식량자급률이 Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) 국가 중 최하위에 머물 정도로 매우 낮고 식량의 외부 의존도가 높은 편이므로 식량안보에 취약하다(Kim, 2011; Myeong, 2018; Kim, 2020; Ahn et al., 2021).

작물은 생육단계별로 적합한 기후조건이 충족되지 못할 경우 생육이 정지되거나 비정상적으로 성장할 수 있으므로 작물의 생산 및 품질에 큰 영향을 미치는 이상기상은 식량 안보를 위협하는 주요 요인 중 하나이다(Lee et al., 2008; Jeong et al., 2013; Lesk et al., 2016; Lee et al., 2020; Ahn et al., 2021). 최근 지구온난화로 인해 이상기상의 빈도와 강도가 증가함에 따라 농작물 피해가 증가하고 있다. 국회입법조사처는 ‘농업분야 기후변화 영향 및 온실가스 배출 현황과 시사점’ 보고서(2020)에서 2010~2019년까지 연도별 이상기후로 인한 농업재해 피해 현황을 분석한 결과, 발생원인으로 겨울철의 한파, 폭설, 대설, 봄과 가을철의 이상저온, 일조량 부족, 우박, 서리, 여름철의 집중호우, 태풍, 강풍, 폭염, 가뭄 등이 있으며, 이상기후로 인한 농업재해 피해가 증가하는 추세라 밝혔다. 또한 2010~2014년까지는 기상이변으로 인한 농업재해의 발생원인이 연 4종류였으나, 최근에는 연 5~7종류로 증가했다. 기상청의 2011~2020년 이상기후 보고서에 따르면, 최근 3년 동안 봄철 이상저온으로 인한 농작물 피해 면적(10년간 연 평균 약 14,224 ha)은 50,466 ha (2018년), 7,378 ha (2019년), 43,554 ha (2020년), 여름철 폭염으로 인한 농작물 피해 면적(10년간 연 평균 약 3,910 ha)은 22,509 ha (2018년), 여름철 집중 호우로 인한 농작물 피해 면적 (10년간 연 평균 약 10,799 ha)은 4,039 ha (2018년), 2,827 ha (2019년), 33,492 ha (2020년)로 이상저온과 폭염으로 인한 농작물 피해 면적이 증가하는 추세를 보인다.

따라서 안정적인 식량공급을 위하여 이상기상을 적절히 예측함으로써 농업 피해를 최소화하는 것은 필요하다. 대부분의 작물은 각 생육단계에 따라 정상적으로 생육할 수 있는 적산온도를 가지고 있기 때문에 이상고온 및 저온현상은 작물의 생산량과 품질에 영향을 미칠 수 있으며, 여러 선행연구에서도 이상고온 및 저온현상이 작물 생산량 감소에 미치는 영향이 크

다고 분석하였다(Lee et al., 1989; Yun, 1999; Heo, 2006; Lee et al., 2008; Chung 2010; Kim et al., 2010; Kim et al., 2013; Shim et al., 2014; Son et al., 2015; Lesk et al., 2016; Kim and Kim, 2018). 따라서 본 연구에서는 Pusan National University Coupled General Circulation Model-Weather Research and Forecasting model chain (PNU CGCM-WRF chain)을 이용하여 대한민국의 주요 식량인 벼의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수를 예측하고, 그 예측성을 평가하고자 하였다. PNU CGCM-WRF chain이란 지구 아시스템(subsystem)의 상호작용을 고려하는 전지구 접합대순환모형인 PNU CGCM을 통해 생산한 예측자료를 지역기후모형인 WRF의 경계 및 초기조건으로 활용하여 역학적으로 규모축소된 시공간적으로 상세한 예측 결과를 생산하는 시스템을 의미한다. 많은 선행연구들은 지형과 해안선이 복잡한 대한민국에서 발생하는 극한기후현상을 분석할 때 전지구기후모형보다 지역기후모형을 사용할 경우 시공간적으로 상세한 예측 결과를 얻는 것은 물론이고, 전반적으로 예측 능력이 향상됨을 보여준다(Ahn et al., 2012, 2016; Park et al., 2016; Lee et al., 2017; Park et al., 2020).

2. 자료 및 방법

2.1 PNU CGCM-WRF Chain

본 연구에 사용된 전지구 접합대순환 모형인 PNU CGCM (Sun and Ahn, 2011, 2015; Ahn and Lee, 2015; Ahn et al., 2018a, b)은 APEC Climate Center (APCC)의 장기예측 다중모형 앙상블 시스템의 참여 모형 중 하나이며, 이 모형의 대기 성분모형은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Community Climate Model version 3 (CCM3; Kiehl et al., 1996), 해양 성분모형은 GFDL Modular Ocean Model version 3 (MOM3; Pacanowski and Griffies, 2000), 해빙 성분모형은 Los Alamos National Laboratory (LANL) Elastic-Viscous-Plastic (EVP) Sea-Ice Model (Hunke and Dukowicz, 1997; Ahn and Lee, 2001)로 구성된다 (Table 1). PNU CGCM의 대기성분 초기장은 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy (NCEP/DOE) Reanalysis2 자료를 이용하여 생산하였다. 지면성분 초기장은 Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)-type 적분을 통해 생산하였다. 해양성분 초기장은 Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)의 자료를 사용했으며, Variational Analysis using a Filter (VAF)로 40층 전체에 대하여 자료동화를 적용하였다. PNU CGCM에 사용되는 대기, 해양 및 지면 초기장 생산 방법은 Ahn and Lee (2015)와 Ahn et al. (2018a)에서 자세히 설

Table 1. Specification of PNU-CGCM.

| Component model | Resolution | | Reference |
|-----------------|------------|--|--|
| Atmosphere | Horizontal | Spectral truncation T42 | Community Climate Model [CCM3; Kiehl et al., 1996] |
| | Vertical | 18 hybrid sigma-pressure levels (top: 2.917 mb) | |
| Ocean | Horizontal | 2.8125° longitude, ~0.7° (low lat.), ~1.4° (mid lat) and ~2.8° (high lat) latitude | Modular Ocean Model [MOM3; Pacanowski and Griffies, 1998] |
| | Vertical | 40 levels (top: 10 m, bottom: 5258 m) | |
| Land | Horizontal | Spectral truncation T42 | Land Surface Model [LSM; Bonan, 1998] |
| | Vertical | 6 levels | |
| Sea-ice | Horizontal | 2.8125° longitude, ~0.7° (low lat.), ~1.4° (mid lat) and ~2.8° (high lat) latitude | Elastic-Viscous-Plastic Model [EVP; Hunke and Dukowics, 1997; Ahn and Lee, 2001] |
| | Vertical | 3 levels | |

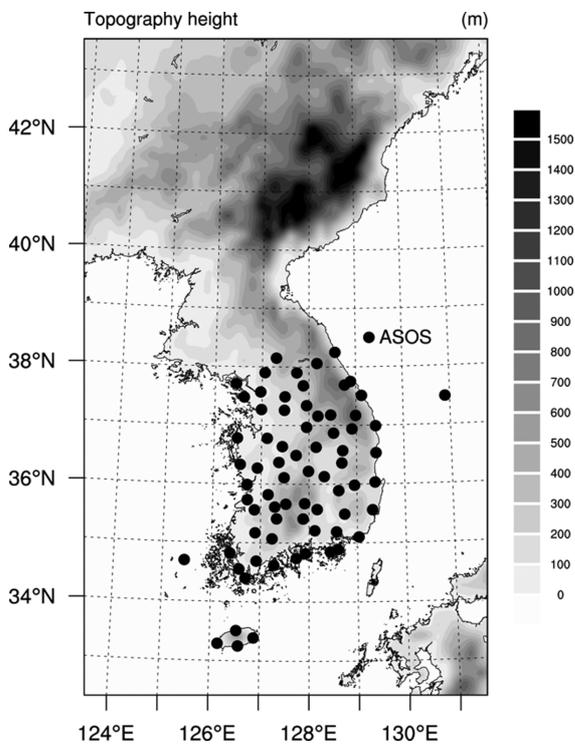


Fig. 1. Domain of WRF and ASOS sites with topography (in meters).

명하고 있다.

PNU CGCM의 예측자료를 지역기후모형인 WRF version 3.5 (Weather Research and Forecasting model; Skamarock et al., 2008)를 통해 역학적 규모축소한 자료는 5 km의 수평해상도를 가지며 한반도를 중심으로 동서 및 남북방향으로 각각 150개, 245개의 격자로 구성된다(Fig. 1). 사용된 물리 방안은 단파와 장파복

사 모수화에 각각 Dudhia scheme (Dudhia, 1989), Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997), 지면 과정에 Noah Land-Surface Model (Chen and Dudhia, 2001), 지표층에 MM5 Monin-Obukhov scheme (Paulson, 1970), 행성 경계층에 Yonsei University (YSU) scheme (Hong et al., 2006), 적운 모수화에 Kain-Fritsch (Kain, 2004) scheme, 그리고 미세물리 과정에 WRF Single-Moment 3-class (WSM3) scheme (Hong et al., 2004)이다(Table 2).

PNU CGCM을 이용하여 전지구 영역에 대해 매월 초기화하여 8개월의 lead (lead 0~7)로 1986년부터 2020년까지 시간별(hourly) Hindcast 자료를 생산하였다. PNU CGCM으로 생산한 Hindcast 자료를 WRF의 경계 조건으로 60분마다 처방하여 남한 지역에 대해 역학적 규모축소한 6개월(lead 2~7)의 Hindcast 자료를 생산하였다(Ahn et al., 2018b; Kim et al., 2019). 1월 초기장으로부터 예측을 시작하는 적분을 01RUN, 2월 초기장으로부터 시작하는 적분을 02RUN 등으로 명명하였다. 본 연구에서 분석하는 벼의 생육시기는 7월부터 10월까지에 해당하므로 이 기간을 포함하는 01RUN~05RUN 자료를 분석에 사용하였다(Fig. 2). 단일 모형의 불확실성을 줄이기 위하여 각 RUN의 결과에 동일한 가중치(weighting)를 주고 평균한 결과도 함께 분석하고, 이러한 앙상블 예측결과를 ENS라고 명명하였다. 즉, 7월과 8월의 경우 01RUN부터 05RUN까지, 9월의 경우 02RUN부터 05RUN까지, 10월의 경우 03RUN부터 05RUN까지 동일한 가중치를 주고 평균한 결과가 각 월의 ENS이다.

2.2 벼의 고온해 및 저온해 기준

벼는 기온이 높은 여름철에 자라는 작물로 우리나라는 온대 지역에서 재배되는 자포니카 벼 품종 위주로 재배하고 있으며, 벼 품종은 생육기간에 따라 크

Table 2. WRF configuration used in this study.

| Contents | Description |
|----------------------------|---|
| Horizontal dimensions | 150 × 245 |
| Horizontal resolution | 5 × 5 km |
| Vertical layer (top) | 30 eta levels (50 hPa) |
| Lateral boundary condition | PNU-CGCM |
| Relaxation zone | 4 |
| Integration time step | 40 s |
| Shortwave radiation | Dudhia Scheme [Dudhia, 1989] |
| Longwave radiation | RRTM Scheme [Mlawer et al., 1997] |
| Land surface | Noah Land-Surface Model [Chen and Dudhia, 2001] |
| Surface layer | MM5 Monin-Obukhov Scheme [Paulson, 1970; etc.] |
| Planetary boundary layer | Yonsei University [Hong et al., 2006] |
| Cumulus | Kain-Fritsch [Kain, 2004] |
| Microphysics | WSM3 [Hong et al., 2004] |

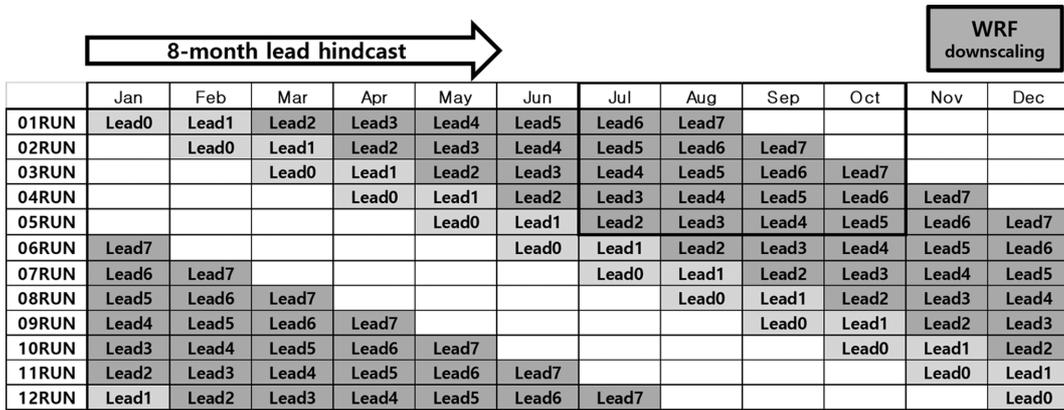


Fig. 2. 8-month lead hindcast experiment. Left column and upper row indicate initialized month and predicted month, respectively. Lead 2~7 (dark grey shaded) are dynamically downscaled by WRF.

계 조생중, 중생중, 중만생중으로 분류한다. 벼의 주요 생육단계는 발아기, 출아기, 묘대기, 활착기, 분얼기, 유수형성기, 감수분열기, 출수기, 등숙기로 나누어진다. 농촌진흥청에 따르면, 우리나라에서 벼의 저온해 피해가 큰 생육시기는 감수분열기, 출수기 및 등숙기이고, 벼의 고온해 피해는 개화기, 감수분열기(출수 전 10일경) 및 등숙기에 발생하고 그 외 생육시기에서는 비교적 고온에 강하다. 따라서 본 연구에서는 벼의 생육시기 중 감수분열기, 출수기 및 등숙기 동안 발생하는 고온해와 저온해에 대하여 분석하고자 하였다. 감수분열기는 조생중, 중생중, 중만생중이 각각 7월 15일, 8월 1일, 8월 5일부터 8월 15일까지이므로 7월 15일부터 8월 15일까지로 선정하였다. 출수기는 조생중, 중생중, 중만생중이 각각 7월 25일, 8월 10일, 8월 15일부터 8월 28일까지이므로 7월 25일부터 8월 28일까지로 선정하였다. 등숙기는 출수기 후

40일 동안이므로 출수기가 7월 25일인 경우에는 7월 26일부터 9월 3일, 출수기가 8월 28일인 경우에는 8월 29일부터 10월 7일이 된다. 따라서 등숙기는 7월 26일부터 10월 7일까지로 선정하였다. 벼의 생육단계별 고온해 기준을 살펴보면(Table 3), 감수분열기는 일 최고기온이 38°C 이상, 출수기는 일 최고기온이 35°C 이상, 등숙기는 출수기 이후 40일 동안 평균한 일 최고기온이 30°C 이상인 경우를 고온해라고 정의하였다(RDA, 2018). 생육시기별 고온해의 피해증상을 살펴보면, 감수분열기에는 영화수 감소, 출수지연, 불임발생, 출수기에는 꽃가루의 임성 소실로 인한 불임 발생, 등숙기에는 등숙 지연, 등숙 불량, 입중감소 및 품질저하 등이 있다. 벼의 생육단계별 저온해 기준을 살펴보면(Table 3), 감수분열기는 일 최저기온이 17°C 미만, 출수기는 일 최저기온이 15°C 미만, 등숙기는 출수기 이후 40일 동안 평균한 일 최저기온이 10°C

Table 3. Threshold of cold and heat damages in rice by growth stage.

| Growth Stage | Cold damage | Heat damage |
|---|--|--|
| Reduction Division Period (From 15 July to 15 August) | 17°C | 38°C |
| Heading Period (From 25 July to 28 August) | 15°C | 35°C |
| Grain Filling Period (during 40 days after heading date) | 10°C (average temperature during 40 days) | 30°C (average temperature during 40 days) |

Table 4. Definition of symbols and sub-/superscripts used in text.

| Symbols | |
|-------------------|---|
| μ | Mean (location parameter of Gaussian distribution) |
| σ | Standard deviation (scale parameter of Gaussian distribution) |
| (d) | Daily |
| Sub-/superscripts | |
| * | Final bias-corrected |
| *1, *2, *3 | Bias-corrected in an intermediate step |
| m | Within monthly interval |
| obs | Observed |
| model | Model simulated |

미만인 경우를 저온해라고 정의하였다(RDA, 2018). 생육시기별 저온해의 피해증상을 살펴보면, 감수분열기에는 화분발육 저해, 출수 지연, 불임 유발, 추출 지연, 출수기에는 출수 및 개화 지연, 수정장애, 불임유발, 추출 불량, 등숙기에는 등숙 지연, 등숙 불량, 입중감소 및 미질저하 등이 있다.

2.3 보정 방법

벼의 고온해와 저온해는 일 최고기온 및 일 최저기온의 절댓값을 기준으로 정의되는데, 모형의 기후는 관측의 기후와 다르기 때문에 관측과 동일한 절댓값 기준을 적용하여 고온해와 저온해를 판별하기에 어려움이 있다. 따라서 모형의 오차를 줄이기 위하여 일 최고기온과 일 최저기온에 대하여 평균과 분산을 모두 보정해주는 방법인 Variance Scaling 기법을 적용하였다(Deutschbein and Seibert, 2012). 보정에 사용된 관측 자료는 총 분석 기간(1986~2020년, 총 35년)동안 일 최고기온 및 일 최저기온을 모두 제공하는 72개 지점의 기상청 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observation System, ASOS)이다(Fig. 1). 72개 지점의 일 최고기온 및 일 최저기온 자료에 역거리가중기법을 적용하여 5 km 격자로 내삽한 자료를 사용하여 모형의 일 최고기온 및 일 최저기온을 보정하였다. Variance Scaling 기법의 식은 식(1)부터 (4)까지이며, 각 문자의 의미는 Table 4에 나타났다.

$$T_{model}^{*1}(d) = T_{model}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{model}(d)) \tag{1}$$

$$T_{model}^{*2}(d) = T_{model}^{*1}(d) - \mu_m(T_{model}^{*1}(d)) \tag{2}$$

$$T_{model}^{*3}(d) = T_{model}^{*2}(d) \cdot \left[\frac{\sigma_m(T_{obs}(d))}{\sigma_m(T_{model}^{*2}(d))} \right] \tag{3}$$

$$T_{model}^*(d) = T_{model}^{*3}(d) + \mu_m(T_{model}^{*1}(d)) \tag{4}$$

2.4 검증 방법

일 최고기온 및 일 최저기온의 모의성능을 검증하기 위하여 관측 시계열과 모형 시계열간의 오차를 제공하여 평균한 값의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 및 관측 표준편차에 대한 모형의 표준편차비(Normalized Standardized Deviations, NSD)를 사용하였다. RMSE는 0, NSD는 1에 가까울수록 모형이 일 최고기온 및 일 최저기온을 관측과 유사하게 모의함을 의미한다. 벼의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수의 예측성을 검증하기 위하여 적중률(Hit Rate, HR)과 Heidke 기술 점수(Heidke Skill Score, HSS)를 사용하였다. HR은 예측의 정확성을 백분율로 나타낸 것으로 그 정도가 클수록 좋으며, 정확도가 완벽할 경우 1을 나타낸다. HSS는 당연히 올바르게 예측한 경우를 제거한 정확도로 예를 들어 사막에서 비

Table 5. Contingency table for the calculation of RMSE, NSD, HR and HSS.

| Verification method | Define |
|---|---|
| RMSE (Root Mean Square Error) | $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{n}}$ (Perfect: 0) |
| NSD (Normalized Standardized Deviations) | $NSD = \frac{\sigma_M}{\sigma_O}$ (Perfect: 2) |

| FCST / OBS | above normal | normal | below normal | Total |
|---------------|--------------|--------|--------------|-------|
| above normal | A | B | C | D |
| normal | E | F | G | H |
| below normal | I | J | K | L |
| Total | M | N | O | P |

HR (Hit Rate)
and
HSS (Heidke Skill Score)

$$Hit\ Rate = \frac{A + F + K}{P} \quad (Perfect: 1)$$

$$Heidke\ Skill\ Score = \frac{\frac{A + F + K}{P} - C1}{1 - C1} \quad (Perfect: 1)$$

$$C1 = ((M \times D) + (N \times H) + (O \times L)) \div (P \times P)$$

가 오지 않을 확률처럼 당연한 경우는 예측성에서 배제한 것이다. HSS가 1에 가까울수록 예측성이 좋고 0에 가까울수록 예측성이 없음을, 0 미만일 경우 당연히 올바르게 예측할 확률(C1)이 예측성보다 높음을 의미한다. HR과 HSS는 매년의 고온해 및 저온해 발생일수의 편차(Anomaly)를 시계열 분포로 나타냈을 때, 시계열의 $\pm 0.43\sigma$ (Standard deviation)을 기준으로 하여, 분포를 Above normal, Normal, Below normal로 나누어 관측과 비교 평가하였다(Wilks, 1995). 또한, HR은 3분위로 나누어 무작위의 수로 예측했을 때 실제와 일치할 확률이 약 0.33이므로 0.33 이상의 점수를 나타내는 경우 예측성이 있다고 판단하였다. 검증 지수를 구하는 수식은 Table 5에 나타났다. 검증에 사용된 자료는 72개 지점의 기상청 중관기상관측자료(ASOS)이다. 72개 지점의 관측자료를 통해 예측성을 평가하기 위하여 72개 관측지점과 가장 가까운 모형의 격자 값을 추출하였다.

3. 결 과

3.1 일 최고기온 및 일 최저기온의 모의성능

비의 고온해 및 저온해를 판별하는 변수인 일 최고기온과 일 최저기온의 모의성능을 살펴보았다. Figure

3은 월별(7~10월) 일 최고기온 및 일 최저기온에 대한 RMSE와 NSD의 남한 영역 평균값을 나타낸 그림으로 빨간색 별로 표시된 지점에 가까울수록 모형의 모의성능이 관측과 유사함을 의미한다. 검은색, 노란색, 초록색, 파란색, 보라색, 빨간색 사각형과 원은 각각 01RUN, 02RUN, 03RUN, 04RUN, 05RUN, ENS의 일 최고기온 및 일 최저기온 원값(Tmax_ORG 및 Tmin_ORG)과 Variance Scaling 방법을 통해 보정한 값(Tmax_VS 및 Tmin_VS)을 나타낸다. 각 월별 ENS는 7~8월의 경우 01RUN~05RUN, 9월은 02RUN~05RUN, 10월은 03RUN~05RUN을 평균한 뒤 Variance Scaling 방법으로 보정한 결과이므로 ENS를 계산할 때 사용한 RUN의 개수가 월별로 다르다. 모든 RUN 및 ENS에서 Tmax_ORG와 Tmin_ORG에 비해 Tmax_VS와 Tmin_VS의 RMSE가 더 작고 NSD가 1.0에 더 가깝게 나타나는 것을 통해 편차보정의 필요성을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 Tmax_VS와 Tmin_VS에 대한 RUN 및 ENS의 모의성능을 비교해보면, 7월의 일 최고기온(Fig. 3a)은 01RUN~04RUN 및 ENS의 모의성능이 유사하게 나타나며, 특히 04RUN이 관측과 가장 유사하다. 반면, 05RUN의 NSD는 다른 RUN 및 ENS와 큰 차이가 없지만, RMSE는 상대적으로 높다. 8~10월의 일 최고기온(Figs. 3c, e, f)은 사용된 모

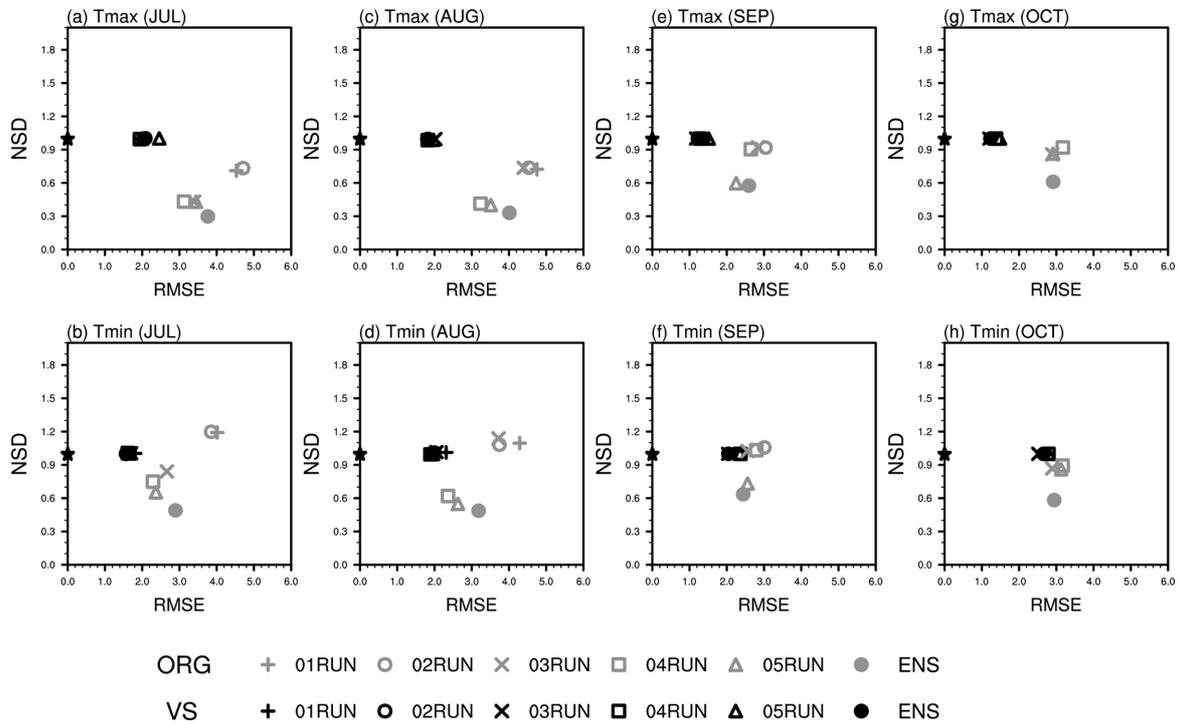


Fig. 3. Root Mean Square Error (RMSE) and Normalized Standardized Deviations (NSD) for daily maximum temperature (Tmax) in (a) July, (c) August, (e) September, (g) October and for daily minimum temperature (Tmin) in (b) July, (d) August, (f) September, (h) October for in-situ 72 stations.

은 RUN 및 ENS의 모의성능이 유사하게 나타나며, 특히, 8월은 02RUN, 9~10월은 03RUN이 관측과 가장 유사하다. 7월, 9월 및 10월의 일 최저기온(Figs. 3b, f, h)은 사용된 모든 RUN과 ENS의 모의성능이 유사하며, 특히, 7월은 02RUN과 ENS, 9월은 03RUN과 ENS, 10월은 03RUN이 관측과 가장 유사하게 나타난다. 8월의 일 최저기온(Fig. 3d)은 02RUN~05RUN 및 ENS의 모의성능이 유사하며, 특히 04RUN 및 ENS가 관측과 가장 유사하게 나타난다. 반면, 01RUN의 NSD는 다른 RUN 및 ENS와 큰 차이가 없지만, RMSE는 상대적으로 높다. Tmax_VS와 Tmin_VS에 대한 월별 모의성능을 비교해보면, 일 최고기온의 경우 9~10월이 7~8월에 비해 모의성능이 높고, 일 최저기온의 경우 7월, 8월, 9월, 10월 순서로 모의성능이 높다. 또한 전반적으로 Tmin_VS에 비해 Tmax_VS에 대한 모의성능이 높다. RMSE와 NSD를 통해 7~10월의 일 최고기온 및 일 최저기온에 대한 PNU CGCM-WRF chain의 모의성능을 살펴본 결과, Variance Scaling 방법으로 보정한 결과가 보정 전에 비해 관측과 유사하게 나타났으며, 보정한 7~10월의 일 최고기온과 일 최저기온에 대한 모의성능은 전반적으로 ENS에서 안

정적으로 높은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 01RUN~05RUN 및 ENS의 보정된 일 최고기온 및 일 최저기온을 사용하여 비의 고온해 및 저온해 발생 일수를 분석하였으며, 앞으로 언급되는 01RUN~05RUN 및 ENS는 Variance Scaling 방법으로 보정된 결과이다.

3.2 비의 고온해 및 저온해 발생일수 및 예측성 평가

Figure 4는 비의 생육시기별(감수분열기, 출수기 및 등숙기) 고온해 발생일수에 대한 관측(OBS), 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과를 나타낸 공간분포이다. 먼저, 감수분열기의 관측 결과를 살펴보면, 동부 산간 지역을 제외한 남한 대부분 지역에서 고온해가 발생하지만 남한 영역 평균 값이 0.1일로 발생일수가 매우 적으며, 남동부 지역에서는 약 0.4~0.8일로 상대적으로 많이 발생한다. 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균 값이 각각 0.1일, 0.2일, 0.2일, 0.3일, 0.6일 및 0.7일로 01RUN을 제외하고 관측에 비해 약 0.1~0.6일 범위에서 과대 모의하는 것으로 나타나지만, 주로 발생하는 지역은 남동부 지역으로 관측과 일치한다. 출수기의 관측 결과를 살펴보면, 남한 영역 평균 값이 1.7일로 감수분열기보다 발생일수가 많다. 남

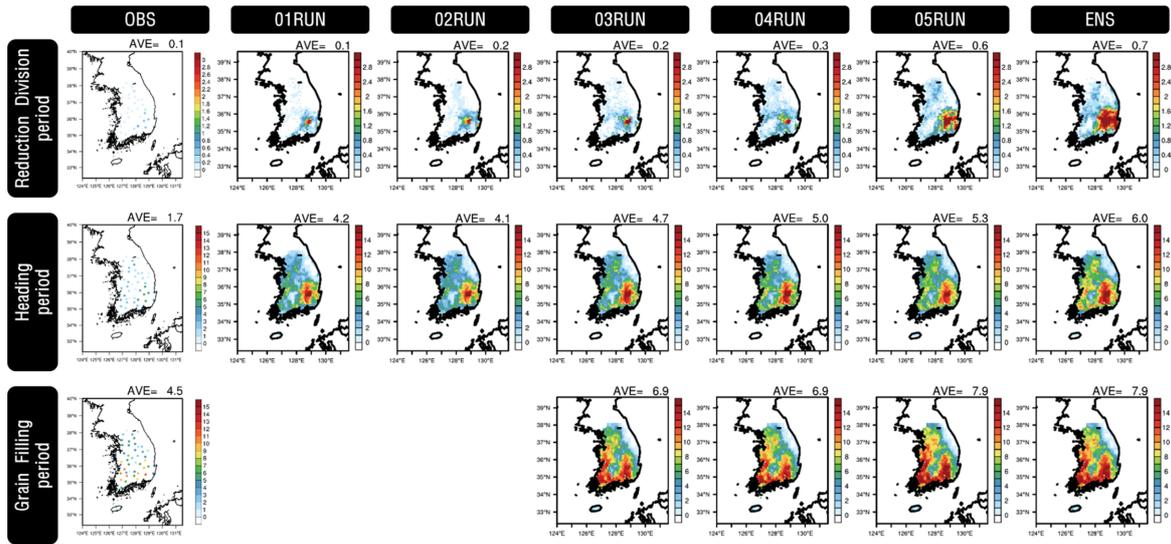


Fig. 4. Spatial distribution of number of days of heat damage in rice during Reduction Division period (top), Heading period (middle) and Grain Filling period (bottom). The values at the top right of each figure are mean number of days of heat damage.

한 대부분 지역에서 고온해가 발생하지만, 동부 산간 지역에서는 상대적으로 발생일수가 적고 남동부 지역에서 약 5.0~7.0일로 다른 지역보다 많이 발생한다. 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균 값이 각각 4.2일, 4.1일, 4.7일, 5.0일, 5.3일 및 6.0일로 관측에 비해 약 2.4~4.3일 범위에서 과대 모의하는 것으로 나타나지만, 주로 발생하는 지역은 남동부 지역으로 관측과 일치한다. 등숙기의 관측 결과를 살펴보면, 남한 영역 평균 값이 4.5일로 다른 생육시기에 비해 발생일수가 많은 편이다. 동부 산간 지역에서는 상대적으로 발생일수가 적고 남부 지역에서 8.0일 이상으로 다른 지역에 비해 많이 발생한다. 03RUN~05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균 값이 각각 6.9일, 6.9일, 7.9일 및 7.9일로 관측에 비해 약 2.4~3.4일 범위에서 과대 모의하는 것으로 나타나지만, 주로 발생하는 지역은 남부 지역으로 관측과 일치한다. 전반적으로 모형이 관측에 비해 벼의 생육시기별 고온해 발생일수를 과대 모의하는 경향이 있으나, 고온해 발생일수의 지역적 특성은 매우 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 벼의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 관측(OBS), 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과를 나타낸 공간분포이다. 먼저, 감수분열기의 관측 결과를 살펴보면, 남한 영역 평균 값이 0.8일로 남한 대부분 지역에서 저온해가 발생하며, 특히 대관령과 태백 지점은 저온해 일수가 약 8.0일 이상, 봉화 지점은 4.0일 이상으로 다른 지역보다 많이 발생한다. 01RUN~

05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균 값이 각각 5.3일, 5.1일, 5.1일, 4.4일, 3.7일 및 2.3일로 관측에 비해 약 1.5~4.5일 범위에서 과대 모의하는 것으로 나타나며, 저온해가 상대적으로 많이 발생하는 지역은 동부 산간 지역으로 관측보다 범위가 넓다. 출수기의 관측 결과를 살펴보면, 남한 영역 평균 값이 0.4일로 감수분열기보다 발생일수가 적다. 남한 대부분 지역에서 저온해가 발생하지만, 감수분열기와 마찬가지로 대관령과 태백 지점은 약 4.5일 이상, 봉화 지점은 약 2.5일 이상으로 다른 지역보다 많이 발생한다. 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균 값이 각각 1.6일, 1.5일, 1.6일, 1.9일, 1.5일 및 1.1일로 관측에 비해 0.7~1.5일 범위에서 과대 모의하는 것으로 나타나며, 저온해가 상대적으로 많이 발생하는 지역은 동부 산간 지역으로 관측과 일치한다. 등숙기의 관측 결과를 살펴보면, 남한 영역 평균값이 0.1일 미만으로 대관령, 태백 및 봉화 지점에서만 저온해가 0.1일 이상으로 발생하고 그 외 지역에서는 저온해가 거의 발생하지 않는다. 01RUN~05RUN 및 ENS의 결과는 남한 영역 평균값이 모두 0.1일 미만으로 관측과 일치하며, 주로 발생하는 지역 또한 대관령, 태백 및 봉화 지점을 포함한 동부 산간 일부 지역으로 관측과 일치한다. 등숙기의 저온해 발생일수는 모형이 관측과 매우 유사하게 모의하는 반면, 감수분열기와 출수기의 저온해 발생일수는 모형이 관측에 비해 과대모의하는 경향이 있다. 하지만, 저온해 발생일수의 지역적 특성은 매우 잘 모의하는 것을 알 수 있다.

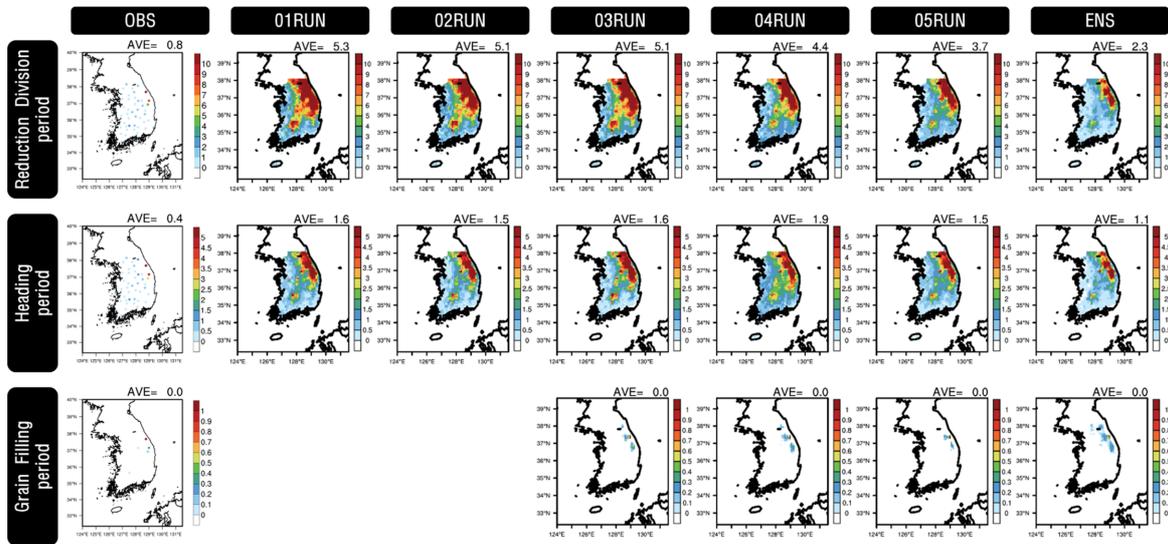


Fig. 5. Same as in Fig. 4 but for cold damage.

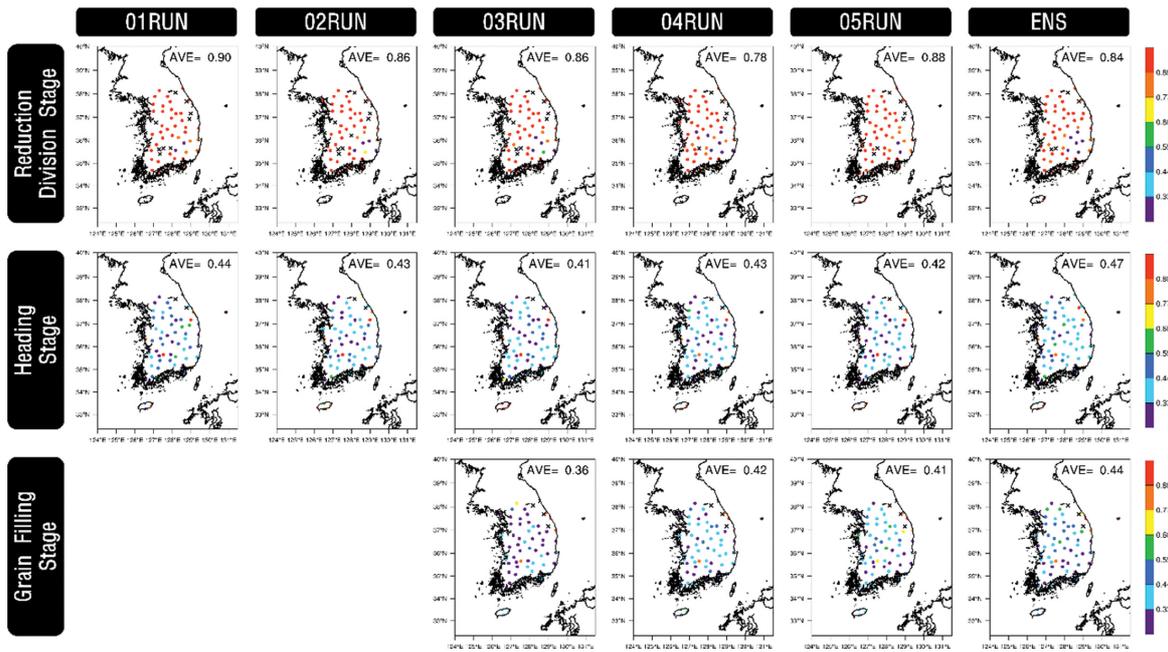


Fig. 6. Spatial distributions of Hit Rate for heat damage to rice during reduction division period (top), heading period (middle) and grain filling period (bottom). The values at the top right of each figure are mean Hit Rate for the 72 in-situ stations.

HR과 HSS를 이용하여 벼의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 PNU CGCM-WRF chain의 예측성을 살펴보았다. 검은색(x 표시)으로 표시된 지점들은 관측과 모형 모두 분석기간(총 35년)동안 고온해 및 저온해가 발생하지 않는 지점이므로 HR과

HSS의 남한 영역 평균값을 구할 때 제외하였다. Figure 6은 벼의 생육시기별(감수분열기, 출수기 및 등숙기) 고온해의 발생일수에 대한 01RUN~05RUN 및 ENS의 HR을 나타낸 그림이다. 감수분열기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각

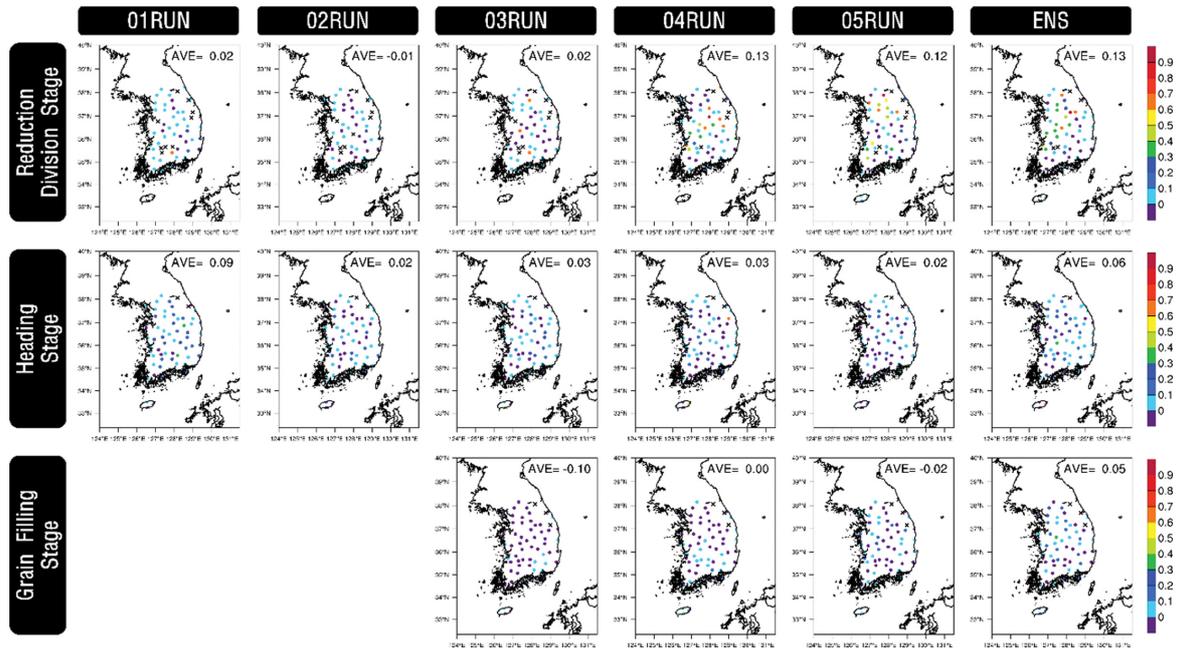


Fig. 7. Spatial distributions of Heidke Skill Score for heat damage to rice during reduction division period (top), heading period (middle) and grain filling period (bottom). The values at the top right of each figure are mean Heidke Skill Score for the 72 in-situ stations.

각 0.90, 0.86, 0.86, 0.78, 0.88 및 0.84로 나타난다. 01RUN~05RUN 및 ENS 모두 고온해가 거의 발생하지 않는 지역의 대부분 지점에서 HR이 0.77 이상으로 높은 반면, 고온해가 많이 발생하는 남동부 지역은 일부 지점에서만 HR이 0.55 이상으로 나타난다. 출수기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.44, 0.43, 0.41, 0.43, 0.42 및 0.47로 고온해가 많이 발생하는 남동부 지역의 대부분 지점에서 HR이 0.33 이상으로 높다. 또한 고온해가 적게 발생하는 지역에서도 HR이 0.33 이상으로 나타나며, 이러한 지점들은 다른 RUN들에 비해 ENS에서 더 많다. 등숙기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 03RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.36, 0.42, 0.41 및 0.44로 04RUN은 고온해가 많이 발생하는 남부 대부분 지점에서 HR이 0.33 이상으로 나타난다. 반면, 03RUN, 05RUN 및 ENS는 남부 지역 중 일부 지점에서만 HR이 0.33 이상으로 나타난다. 04RUN~05RUN 및 ENS는 고온해가 적게 발생하는 지역에서도 HR이 0.33 이상으로 나타난다.

Figure 7은 벼의 생육시기별 고온해의 발생일수에 대한 01RUN~05RUN 및 ENS의 HSS를 나타낸 그림이다. 감수분열기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 각각 0.02, -0.01, 0.02, 0.13, 0.12 및 0.13으로 01RUN~

05RUN 및 ENS 모두 고온해가 많이 발생하는 남동부 지역의 일부 지점에서만 HSS가 0 이상으로 나타난다. 고온해가 거의 발생하지 않는 지역의 대부분 지점에서도 HSS가 0 이상으로 나타나며, 특히, 04RUN, 05RUN 및 ENS는 중부 내륙과 남서부 지역에서 HSS가 0.30 이상으로 매우 높다. 출수기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 각각 0.09, 0.02, 0.03, 0.03, 0.02 및 0.06으로 01RUN~03RUN 및 ENS는 고온해가 많이 발생하는 남동부 지역의 대부분 지점, 04RUN과 05RUN은 남동부 지역의 일부 지점에서만 HSS가 0 이상으로 나타난다. 또한 고온해가 적게 발생하는 지역에서도 HSS가 0 이상으로 나타나며, 이러한 지점들은 다른 RUN들에 비해 ENS에서 더 많다. 등숙기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 03RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 -0.10, 0.00, -0.02 및 0.05로 HSS가 0 이상인 지점이 다른 RUN들에 비해 ENS에서 더 많다. 03RUN~05RUN 및 ENS 모두 남부 지역 중 일부 지점에서만 HSS가 0 이상이고, ENS는 고온해가 적게 발생하는 발생하는 지역에서도 HSS가 0 이상으로 나타난다. 03RUN~05RUN에서 HSS의 남한 영역 평균값이 비교적 낮지만, 고온해가 주로 발생하는 일부 지점에서는 HSS가 0 이상으로 나타난다. HR과 HSS를 통해 벼의 생육시기별 고온해 발생일수에 대

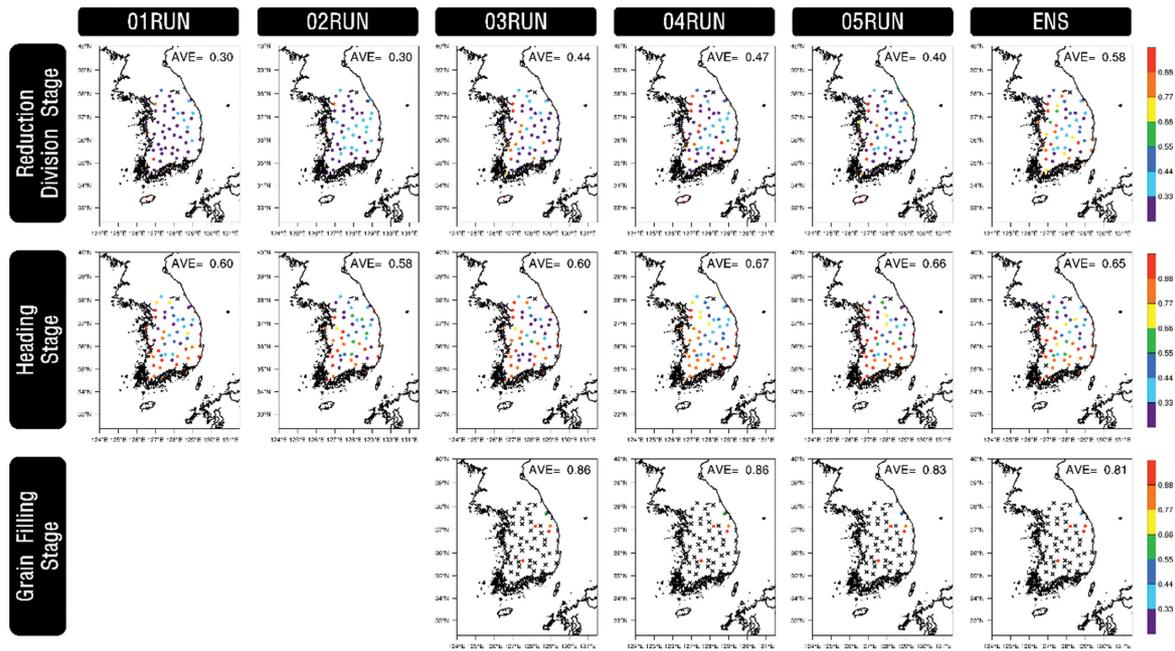


Fig. 8. Same as in Fig. 6 but for cold damage.

한 예측성을 종합하여 살펴보면, 전반적으로 감수분열기와 등숙기는 고온해가 주로 발생하는 지역 중 일부 지점에서만 예측성이 있는 것으로 나타나고, 출수기는 고온해가 주로 발생하는 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 특히, ENS는 남한 대부분 지역에서 HR과 HSS가 높게 나타남에 따라 벼의 생육시기별 고온해 발생일수에 대한 예측성이 다른 RUN들에 비해 안정적으로 높게 나타나는 편이다.

Figure 8은 벼의 생육시기별 저온해의 발생일수에 대한 01RUN~05RUN 및 ENS의 HR을 나타낸 그림이다. 감수분열기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.30, 0.30, 0.44, 0.47, 0.40 및 0.58로 03RUN~05RUN 및 ENS는 남한 대부분 지점에서 HR이 0.33 이상으로 나타난다. 저온해가 많이 발생하는 지점(대관령, 태백 및 봉화)의 HR을 살펴보면, 04RUN은 대관령, 태백 및 봉화 지점, 01RUN, 05RUN 및 ENS는 대관령과 태백 지점, 02RUN은 태백 및 봉화 지점, 03RUN은 대관령 지점에서 0.33 이상으로 나타난다. 출수기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.60, 0.58, 0.60, 0.67, 0.66 및 0.65로 전반적으로 남한 대부분 지역에서 HR이 0.33 이상으로 높고, 특히 서부 및 남부지역에서 HR이 0.77 이상으로 매우 높다. 저온해가 많이 발생하는 지역의 HR을 살펴보면, 02RUN, 04RUN 및 ENS는 대관령, 태백 및 봉화

지점, 01RUN은 태백 및 봉화 지점에서 0.33 이상으로 나타난다. 등숙기의 경우, HR의 남한 영역 평균값이 03RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.86, 0.86, 0.83 및 0.81로 저온해가 발생하는 모든 지점(대관령, 태백, 봉화, 제천 및 장수)에서 HR이 0.33 이상이고, 대관령을 제외한 남한 모든 지점에서 HR이 0.77 이상으로 매우 높다.

Figure 9는 벼의 생육시기별 저온해의 발생일수에 대한 01RUN~05RUN 및 ENS의 HSS를 나타낸 그림이다. 감수분열기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 각각 -0.03, 0.02, -0.04, 0.09, 0.05 및 -0.01로 02RUN, 04RUN 및 05RUN은 남한 대부분 지점에서 HSS가 0 이상으로 나타난다. 저온해가 많이 발생하는 지점(대관령, 태백 및 봉화)의 HSS를 살펴보면, 04RUN은 대관령 및 태백 지점, 02RUN은 태백 지점, 03RUN은 대관령 지점에서 0 이상으로 나타난다. 출수기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 각각 0.07, 0.04, 0.02, -0.02, 0.10 및 0.03으로 01RUN, 05RUN 및 ENS는 대부분의 지점에서 HSS가 0 이상으로 높다. 저온해가 많이 발생하는 지점(대관령, 태백 및 봉화)의 HSS를 살펴보면, 02RUN, 04RUN 및 ENS는 대관령, 태백 및 봉화 지점, 01RUN은 태백 및 봉화 지점, 05RUN은 봉화 지점에서 0 이상으로 나타난다. 등숙기의 경우, HSS의 남한 영역 평균값이 03RUN~05RUN 및

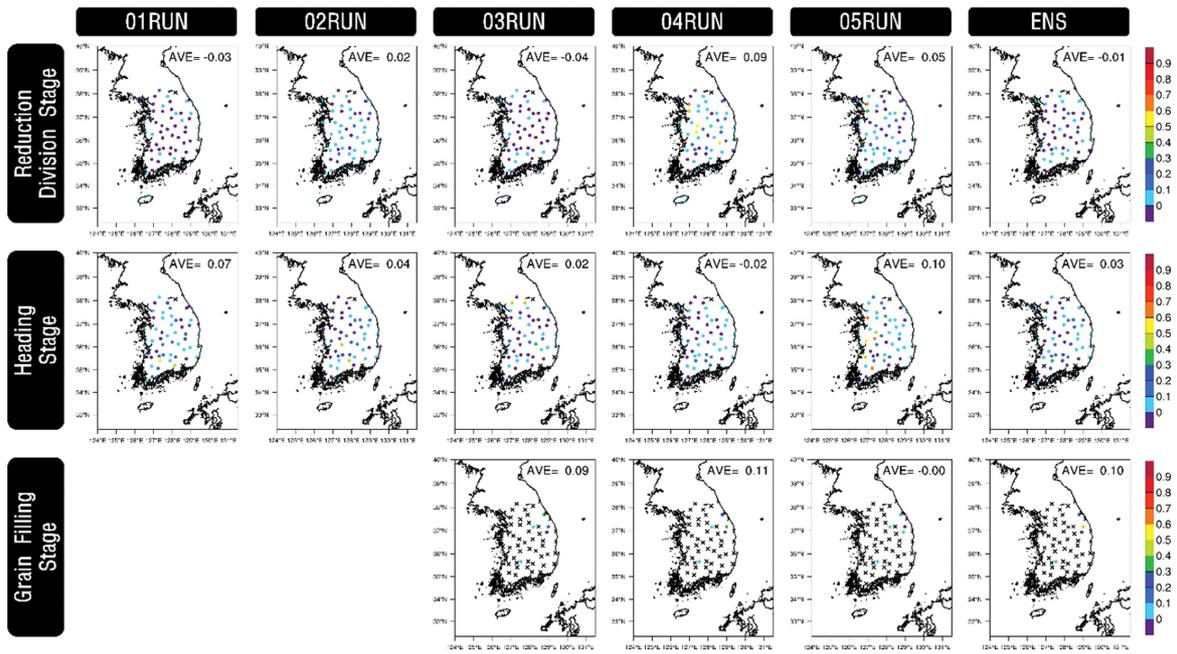


Fig. 9. Same as in Fig. 7 but for cold damage.

ENS에서 각각 0.09, 0.11, -0.00 및 0.10으로 나타난다. 저온해가 많이 발생하는 지점(대관령, 태백, 봉화, 제천 및 장수)의 HSS를 살펴보면, 03RUN, 04RUN 및 05RUN은 봉화를 제외한 모든 지점, ENS는 봉화와 제천을 제외한 모든 지점에서 0 이상으로 나타난다. HR과 HSS를 통해 벼의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 예측성을 종합하여 살펴보면, RUN에 따라 차이는 있지만 모든 생육시기에서 저온해가 주로 발생하는 대관령, 태백 및 봉화 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 특히, ENS는 저온해가 많이 발생하는 지역뿐만 아니라 남한 대부분 지역에서 HR과 HSS가 높게 나타남에 따라 벼의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 예측성이 다른 RUN들에 비해 안정적으로 높게 나타나는 편이다.

농업 피해를 최소화하기 위해서는 고온해 및 저온해 발생일수가 많은 지역 중에서도 쌀이 주로 생산되는 지역에 대한 예측이 중요하다. 고온해 및 저온해 발생일수가 많은 지점은 관측과 모든 RUN 및 ENS에서 고온해 또는 저온해 발생일수와 남한영역 평균한 고온해 또는 저온해 발생일수의 차이가 0.43σ (남한영역에 대한 고온해 또는 저온해 발생일수의 표준편차)보다 큰 지점으로 분류하였다. 쌀 생산량이 많은 지점은 통계청에서 제공하는 시·군·구 행정구역 단위별 쌀 생산량 자료를 이용하여 분석기간(1986~2020년) 동안 평균한 쌀 생산량이 모든 시·군·구 행정구역의

쌀 생산량 평균(27,705톤)보다 많은 지점으로 분류하였다. 최종적으로 고온해 발생일수가 높으면서 쌀 생산량이 많은 지점을 감수분열기는 합천 및 밀양, 출수기는 안동, 포항, 울산, 부여, 정읍, 의성, 구미, 합천 및 밀양, 등숙기는 광주, 진주, 부여, 부안, 정읍, 남원, 순천, 장흥, 해남, 의성, 구미, 합천 및 밀양으로 선정하였다. 저온해의 경우, 쌀 생산량이 많으면서 저온해 발생일수가 높은 지점이 존재하지 않으므로 분석에서 제외하였다. 쌀 생산량이 많으면서 고온해 발생일수가 높은 지점에서 고온해 발생일수에 대한 HR을 살펴보면, 감수분열기의 경우(Fig. 10a), 합천 지점은 05RUN, 밀양 지점은 01RUN~03RUN에서 0.77 이상으로 매우 높다. 출수기의 경우(Fig. 10b), 울산 및 합천 지점은 01RUN~05RUN 및 ENS, 포항 및 밀양 지점은 05RUN을 제외한 RUN 및 ENS, 구미 지점은 02RUN~03RUN을 제외한 RUN 및 ENS, 부여 지점은 01RUN, 03RUN 및 ENS, 의성, 안동, 정읍 지점은 각각 02RUN, 04RUN, 05RUN을 제외한 RUN 및 ENS에서 HR이 0.33 이상으로 나타난다. 등숙기의 경우(Fig. 10c), 진주 및 부안 지점은 03RUN~05RUN 및 ENS, 해남 및 의성 지점은 04RUN~05RUN 및 ENS, 밀양 지점은 03RUN~04RUN 및 ENS, 장흥 지점은 04RUN~05RUN, 합천 지점은 03RUN, 구미 지점은 04RUN, 정읍 및 순천 지점은 05RUN, 광주 및 부여 지점은 ENS에서만 HR이 0.33 이상으로 나타난다. 쌀

Heat damage

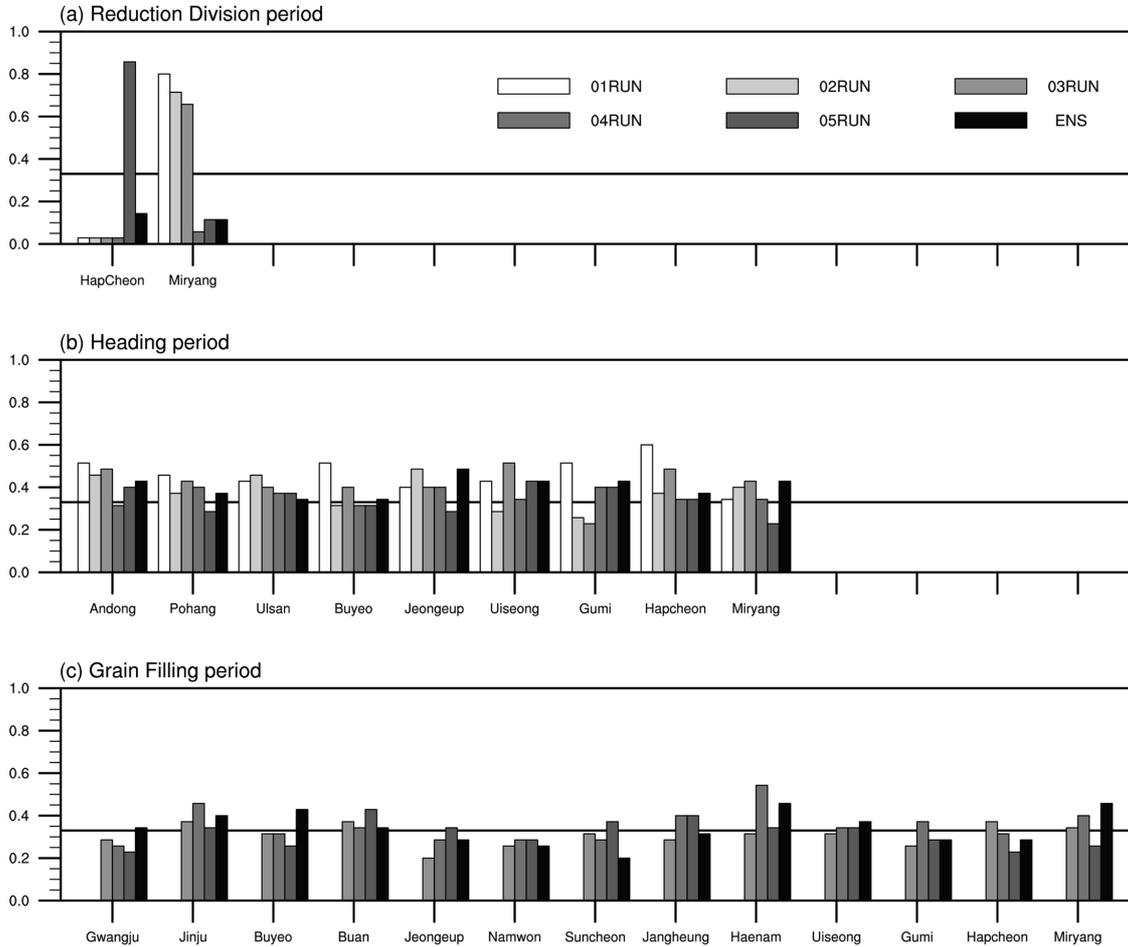


Fig. 10. Hit Rate for heat damage to rice during (a) reduction division period, (b) heading period and (c) grain filling period at the ASOS stations.

생산량과 생육단계별 고온해 발생일수가 많은 지역의 예측성은 출수기의 경우 01RUN, 03RUN 및 ENS, 등숙기의 경우 04RUN~05RUN 및 ENS에서 일관되게 높은 편이다. 반면, 감수분열기의 경우 예측성이 높은 RUN이 두 지점에서 다르게 나타난다.

4. 요약 및 결론

식량안보에 취약한 지역인 대한민국에서 안정적인 식량공급을 위하여 작물 생산 및 품질에 영향을 미치는 이상기상을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 PNU CGCM-WRF chain을 이용하여 대한민국의 주요 식량인 벼의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측자료를 생산하고 그

예측성을 평가하였다. 단일 전지구모형 및 지역기후모형을 사용하였으나, 초기조건을 달리한 01RUN~05RUN의 결과와 함께 각 월별로 사용된 RUN들의 결과에 동일한 가중치(weighting)를 주고 평균한 결과인 ENS도 함께 분석하였다.

먼저 고온해 및 저온해를 정의하는 변수인 일 최고기온과 일 최저기온에 대한 PNU CGCM-WRF chain의 모의성능을 살펴보았다. 벼의 고온해와 저온해는 일 최고기온 및 일 최저기온의 절댓값을 기준으로 정의되는데, 모형의 기후는 관측의 기후와 다르기 때문에 관측과 동일한 절댓값 기준을 적용하여 고온해와 저온해를 판별하기에 어려움이 있다. 따라서 일 최고기온과 일 최저기온은 모형의 오차를 줄이기 위하여 평균과 분산을 보정해주는 Variance Scaling 방법을 적

용하여 보정하였다. 보정 전과 보정 후의 일 최고기온 및 일 최저기온에 대한 RMSE와 NSD를 비교해본 결과, 보정 전보다 보정 후에 관측과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 모의성능이 관측과 가장 유사한 RUN은 월별 및 변수별로 차이가 있으나, 전반적으로 ENS의 모의성능이 안정적으로 높게 나타났다.

HR과 HSS를 통해 비의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 PNU CGCM-WRF chain의 예측성을 살펴본 결과, 감수분열기와 등숙기에는 고온해가 주로 발생하는 일부 지점에서만 예측성이 있는 것으로 나타났고, 출수기에는 고온해가 주로 발생하는 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타났다. 저온해의 경우 모든 생육시기에서 저온해가 주로 발생하는 대관령, 태백 및 봉화 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타났다. ENS는 고온해 및 저온해가 상대적으로 많이 발생하는 지역뿐만 아니라 남한 대부분 지역에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 이를 통해 비의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성은 ENS에서 대체적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 고온해 발생일수가 많은 지역에서 쌀 생산량이 많은 지점을 선정하여 예측성을 살펴본 결과, 고온해 발생일수에 대한 예측성이 가장 높은 RUN은 생육기간 및 지점에 따라 다양하게 나타나지만, 출수기 및 등숙기의 경우 ENS의 HR이 모든 지점에서 전반적으로 0.33 이상으로 높게 나타났다.

본 연구는 PNU CGCM-WRF chain을 통해 생산한 5 km 해상도의 격자형 일 최고기온 및 일 최저기온 자료를 이용하여 남한 지역의 주요 곡물인 비의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측자료를 생산한 것에 의미가 있다. 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성이 작물 및 생육단계에 따라 차이는 있으나 통계적으로 유의하게 나타나므로 생산된 예측자료는 이상기상으로 인한 농업 피해를 줄이는데 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 단일 전지구모형 및 지역기후모형을 통해 생산한 일 최고기온 및 일 최저기온을 사용하여 비의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수를 살펴보았으므로 한계가 있다. 향후 6개월 이상 기간에 대하여 일별 예측자료를 생산하는 다른 모형 결과들을 활용할 수 있게 된다면, 다중 모형 결과에 앙상블 예측기법을 적용하여 비의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성을 더 향상시킬 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01489102)의 지원에 의해 이루어진 것임.

한국기상학회 대기 제31권 5호 (2021)

REFERENCES

- Ahn, J.-B., and J.-A. Lee, 2001: Numerical study on the role of sea-ice using ocean general circulation model. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **6**, 225-233 (in Korean with English abstract).
- _____, and J. Lee, 2015: Comparative study on the seasonal predictability dependency of boreal winter 2m temperature and sea surface temperature on CGCM initial conditions. *Atmosphere*, **25**, 353-366, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.353 (in Korean with English abstract).
- _____, S.-B. Lee, and S.-B. Ryoo, 2012: Development of 12-month ensemble prediction system using PNU CGCM V1.1. *Atmosphere*, **22**, 455-464, doi:10.14191/Atmos.2012.22.4.455 (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.
- _____, J. Lee, and S. Jo, 2018a: Evaluation of PNU CGCM ensemble forecast system for boreal winter temperature over South Korea. *Atmosphere*, **28**, 509-520, doi:10.14191/Atmos.2018.28.4.509 (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.
- 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.
- 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.
- Chung, S.-O., 2010: Simulating evapotranspiration and yield responses of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, **52**, 57-64, doi:10.5389/KSAE.2010.52.3.057 (in Korean with English abstract).

- 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.
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, and WHO, 2021: *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. Transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 240 pp, doi:10.4060/cb4474en.
- Heo, I. H., 2006: The distribution of regional unusual temperature Korea. *J. Korean Assoc. Reg. Geogr.*, **12**, 461-474 (in Korean with English abstract).
- 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.
- 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.
- Jeong, H.-K., C.-G. Kim, and D.-H. Moon, 2013: Impacts of abnormal weather factors on rice production. *J. Climate Change Res.*, **4**, 317-330 (in Korean with English abstract).
- 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). NCAR Tech. Rep., NCAR/TN-420+STR, 152 pp, doi:10.5065/D6FF3Q99.
- Kim, C.-K., H.-K. Jeong, S.-H. Han, J.-S. Kim, and D.-H. Moon, 2013: Impacts and countermeasures of climate change on food supply in Korea. Korea Rural Economic Institute, 176 pp [Available online at <https://repository.krei.re.kr/handle/2018.oak/21015>].
- Kim, D.-J., and J.-H. Kim, 2018: An outlook of changes in the flowering dates and low temperature after flowering under the RCP8.5 projected climate condition. *Korean J. Agric. Forest Meteorol.*, **20**, 313-320, doi:10.5532/KJAFM.2018.20.4.313 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.-H., 2020: Development of an agrophotovoltaic system and analysis of the agronomic characteristic of crops under agrophotovoltaic system. *Bull. Korea Photovoltaic Soc.*, **6**, 15-24 (in Korean).
- Kim, M.-R., 2011: The Status of Korea's rice industry and the rice processing industry. *Food Indust. Nutr.*, **16**, 22-26 (in Korean).
- Kim, S., I. Heo, and S. Lee, 2010: Impacts of temperature rising on changing of cultivation area of apple in Korea. *J. Korean Assoc. Reg. Geograph.*, **16**, 201-215 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Lee, D., and Coauthors, 2017: 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, M.-H., N.-K. Park, and S.-H. Park, 1989: Mechanisms of cold injury and cultural practices for reducing damage of rice. *Korean J. Crop Sci.*, **34**, 34-44 (in Korean with English abstract).
- Lee, I., M.-J. Seo, M. R. Park, N.-G. Kim, G. Yi, Y.-Y. Lee, M. Kim, B. W. Lee, and H.-T. Yun, 2020: Yield and seed quality changes according to delayed harvest with rainfall treatment in soybean (*Glycine max* L.). *Korean J. Crop Sci.*, **65**, 353-364 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-H., I.-H. Heo, K.-M. Lee, S.-Y. Kim, Y.-S. Lee, and W.-T. Kwon, 2008: Impacts of climate change on phenology and growth of crops: In the case of Naju. *J. Korean Geograph. Soc.*, **43**, 20-35 (in Korean with English abstract).
- Lesk, C., P. Rowhani, and N. Ramankutty, 2016: Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, **529**, 84-87, doi:10.1038/nature16467.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **102**, 16663-16682, doi:10.1029/97JD00237.
- Myeong, S., 2018: Impact of climate change related natural disasters on rice production in South Korea. *J.*

- Korean Soc. Hazard Mitig.* **18**, 53-60, doi:10.9798/KOSHAM.2018.18.7.53 (in Korean with English abstract).
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, cited 1998: MOM 3.0 manual. NOAA/GFDL [Available online at <http://www.gfdl.noaa.gov/ocean-model>].
- Park, C., and Coauthors, 2016: 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.
- _____, D.-H. Cha, G. Kim, G. Lee, D.-K. Lee, M.-S. Suh, S.-Y. Hong, J.-B. Ahn, and S.-K. Min, 2020: Evaluation of summer precipitation over Far East Asia and South Korea simulated by multiple regional climate models. *Int. J. Climatol.*, **40**, 2270-2284, doi:10.1002/joc.6331.
- 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.
- RDA, 2018: Development of production prospects and risk assessment evaluation technology for decreasing climate disaster on upland crops. National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 159 pp, doi:10.23000/TRKO201800043543 (in Korean).
- Shim, K.-M., Y.-S. Kim, M.-P. Jung, I.-T. Choi, and S.-H. Min, 2014: Agro-climatic zonal characteristics of the frequency of abnormal duration of sunshine in South Korea. *Korean J. Agric. Forest Meteorol.*, **16**, 83-91, doi:10.5532/KJAFM.2014.16.1.83 (in Korean with English abstract).
- 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. NCAR Tech. Rep., NCAR/TN475+STR, 113 pp, doi:10.5065/D68S4MVH.
- Son, I.-C., K. H. Moon, E. Y. Song, S. Oh, H. Seo, and J. Yang, 2015: Effects of differentiated temperature based on growing season temperature on growth and physiological response in Chinese cabbage 'Chunkwang'. *Korean J. Agric. Forest Meteorol.*, **17**, 254-260, doi:10.5532/KJAFM.2015.17.3.254 (in Korean with English abstract).
- Sun, J., and J. B. Ahn, 2011: A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**, 1049-1055, doi:10.1007/s00376-011-0122-8.
- _____, and _____, 2015: Dynamical seasonal predictability of the Arctic Oscillation using a CGCM. *Int. J. Climatol.*, **35**, 1342-1353, doi:10.1002/joc.4060.
- 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.
- UN, 2019: World Population Prospects 2019. Highlights. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, ST/ESA/SER.A/423, 39 pp.
- Yun, J. I., 1999: Agricultural meteorology. Arche Inc., 337 pp.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.