한국농림기상학회지, 제24권 제4호(2022) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 24, No. 4, (2022), pp. 218~233
DOI: 10.5532/KJAFM.2022.24.4.218

PNU CGCM-WRF Chain을 이용한 우리나라 콩의 고온해 및 저온해에 대한 예측성 검증

최명주[1], 안중배[2*], 김영현[2], 정민경[1], 심교문[3], 허지나[3], 조세라[3]
[1]부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단 대기환경과학과, [2]부산대학교 대기환경과학과,
[3]국립농업과학원 기후변화평가과
(2022년 9월 14일 접수; 2022년 11월 15일 수정; 2022년 11월 17일 수락)

Evaluating the Predictability of Heat and Cold Damages of Soybean in South Korea using PNU CGCM-WRF Chain

Myeong-Ju Choi[1], Joong-Bae Ahn[2*], Young-Hyun Kim[2], Min-Kyung Jung[1],
Kyo-Moon Shim[3], Jina Hur[3], Sera Jo[3]
[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
[3]Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, Korea
(Received September 14, 2022; Revised November 15, 2022; Accepted November 17, 2022)

ABSTRACT

The long-term (1986～2020) predictability of the number of days of heat and cold damages for each growth stage of soybean is evaluated using the daily maximum and minimum temperature (Tmax and Tmin) data produced by Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM)-Weather Research and Forecasting (WRF). The Predictability evaluation methods for the number of days of damages are Normalized Standard Deviations (NSD), Root Mean Square Error (RMSE), Hit Rate (HR), and Heidke Skill Score (HSS). First, we verified the simulation performance of the Tmax and Tmin, which are the variables that define the heat and cold damages of soybean. As a result, although there are some differences depending on the month starting with initial conditions from January (01RUN) to May (05RUN), the result after a systematic bias correction by the Variance Scaling method is similar to the observation compared to the bias-uncorrected one. The simulation performance for correction Tmax and Tmin from March to October is overall high in the results (ENS) averaged by applying the Simple Composite Method (SCM) from 01RUN to 05RUN. In addition, the model well simulates the regional patterns and characteristics of the number of days of heat and cold damages by according to the growth stages of soybean, compared with observations. In ENS, HR and HSS for heat damage (cold damage) of soybean have ranged from 0.45～0.75, 0.02～0.10 (0.49～0.76, -0.04～0.11) during each growth stage. In conclusion, 01RUN～05RUN and ENS of PNU CGCM-WRF Chain have the reasonable performance to predict heat and cold damages for each growth stage of soybean in South Korea.

***Key words*: PNU CGCM, WRF, Prediction skill, Soybean, Heat damage, Cold damage**

* Corresponding Author : Joong-Bae, Ahn
(jbahn@pusan.ac.kr)

I. 서 론

국제연합 인구기금(UNFPA)에 따르면 2012년 세계 인구가 70억명을 넘어섰으며, 2050년에 90억명, 2100년에 100억명을 초과할 것이라고 전망하고 있다. 현재 전 세계적으로 기후변화 및 인구증가 등으로 인해 식량 생산 및 공급이 불안정한 상황이며, 식량안보에도 위협이 되고 있다(Myeong, 2018). 세계 식량생산량은 정체와 증감을 반복하면서도 혁신적인 농업 과학기술 발전에 따른 생산량이 증가하는 추세인 반면, 식량 소비량은 지속적으로 증가하고 있는데, 이로 인하여 전 세계 영양실조 인구는 8억 7천만명(2012년 기준)에 달한다(Lee, 2009; Sin, 2013). 특히, 대한민국은 2009년 기준 식량자급률은 51.4%, 사료용을 포함하는 곡물자급율은 26.7%로 Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) 국가들 중 하위에 머무는 등 세계 5위의 곡물 수입국이다(Park, 2008; Kim, 2011).

농작물의 재배는 해당 지역의 평년 기후에 맞추어 진행되기 때문에, 그 지역의 기후에 벗어나는 기상이변은 농작물에 많은 피해를 준다(Shim *et al*., 2003; Seo *et al*., 2006; Lee *et al*., 2008; Kim and Kim 2013; Lee *et al*., 2013; Kang *et al*., 2014; Park *et al*., 2014; Shim *et al*., 2014; Lee *et al*., 2019; Jang *et al*., 2021). 또한 한 지역의 농업 생태계는 토양 및 기후와 같은 주어진 환경조건에 의해 오랜 기간에 걸쳐 평균적인 형태가 정해지며, 이를 토대로 품종, 작부체계 및 재배기술의 최적화가 이루어진다(Yun, 1999; Shim *et al*., 2018; Hur *et al*., 2020). 최근 지구온난화와 더불어, 지역 기후의 정상적인 범위로부터 벗어나는 이상기상의 발생빈도 또한 증가할 것이라고 본다(Min *et al*., 2006; NIMS, 2012; Lee *et al*., 2012; Kim *et al*., 2021). 실제로 최근 온난화로 인해 개화일이 과거에 비해 빨라지고 있는 추세인 반면, 이상저온 현상이 자주 발생하고 있는데, 개화된 꽃이 일정 온도 이하의 저온 상태에 놓이게 되면 수정 불량, 낙화 등의 피해가 발생할 수 있다(Kim and Kim, 2018). 2018년 4월에는 전라북도 및 경기도 남부지역을 중심으로 갑작스러운 저온 현상이 나타나 배, 사과 등 과수의 꽃이 얼어 죽는 저온 피해가 발생하였다(Shim *et al*., 2018). 전라북도의 경우 4월 7～8일에 발생한 이상저온으로 인한 농작물 피해 면적이 2,916 ha였고, 이 중 과수작물의 피해가 2,260 ha에 이르렀다. KMA (2021)에 따르면 2021년 4월 14～15일 및 19일 등 과수 주산지 중심으로 최저기온이 영하권으로 떨어져 사과와 배의 꽃눈 고사 등의 피해(27,716 ha) 및 산림작물 피해(2,713 ha)가 발생하였다. 농림축산식품부에 따르면 봄철 이상저온으로, 2018～2020년 3년간 각각 50,466 ha, 14,589 ha, 43,554 ha로 총 108,600여 ha에서 농작물 피해가 발생하였다. RDA (2016)에 따르면 2001년부터 2013년까지 13년간 재해 원인별 농작물 피해 면적을 집계하여 분석한 결과, 태풍, 호우, 동해(냉해 포함), 우박, 서리, 대설, 저온의 순서로 피해 면적이 컸다. 농업기상재해로 인한 농작물 피해 면적의 규모는 연간 평균 95,644 ha이고, 재해 원인별로는 태풍에 의한 농작물 피해 면적이 가장 컸는데 (연간 평균 65,248 ha), 전체 피해 면적의 68% 정도 차지하였다. 기후는 농업에 직접적으로 영향을 미칠 뿐만 아니라 토양 및 생물환경 등에도 간접적으로 영향을 미치기도 한다(Lee, 2012).

이상기상으로 인한 농작물 피해를 최소화하기 위하여 농업에 영향을 미치는 기상 요소를 정확하게 예측하는 것은 필수적이다. 이상고온 및 저온 현상에 따른 농업기후 자원의 지리적 및 계절적 변화를 초래하여 작물의 발육속도, 생산량 및 품질에 직간접적으로 영향을 미치며, 여러 선행연구에서도 이상고온 현상이 다른 이상기상보다 작물의 생산량 감소에 더 큰 영향을 미친다고 한다(Lim *et al*., 2000; Park *et al*., 2002; Lee *et al*., 2008; Chung 2010; Kim *et al*., 2010; Kim *et al*., 2013; Lee, 2012; Lee *et al*., 2013; Son *et al*., 2015; Lesk *et al*., 2016; Kim *et al*., 2021). 따라서 본 연구에서는 우리나라 콩의 생육단계별 고온해와 저온해 발생일수를 Pusan National University Coupled General Circulation Model-Weather Research and Forecasting model chain (이하 PNU CGCM-WRF Chain)을 이용하여 예측하고 예측성능을 평가하였다. PNU CGCM-WRF Chain은 지구 아시스템들(subsystems)의 상호작용을 고려하는 접합대순환 모형(PNU CGCM)을 이용하여 생산한 예측자료를 지역기후모형(WRF)의 초기 및 경계 조건으로 활용하여 시간 및 공간적으로 고해상도의 예측 자료를 생산하는 모형이다. 선행 연구들에 따르면 복잡한 해안선과 대부분 산으로 이루어져 다양한 규모 및 강도의 기후 현상이 나타나는 한반도의 경우 지역기후모형을 사용함으로써 예측성이 전반적으로 증가함을 보인다(Ahn *et al*., 2016; Park *et al*., 2016; Lee *et al*., 2017; Park *et al*., 2020).

II. 재료 및 방법

2.1. PNU CGCM-WRF Chain

본 연구에 사용된 전지구 접합대순환모형 PNU CGCM은 APEC Climate Center (APCC)의 장기예측을 위한 다중모형 앙상블 시스템의 참여 모형 중 하나이다(Sun and Ahn, 2011, 2015; Ahn and Lee, 2015; Ahn *et al*., 2018a, b). PNU CGCM의 대기, 해양, 지면 및 해빙 성분 모형은 각각 National Center for Atmospheric Research (NCAR) Community Climate Model version 3 (CCM3; Kiehl *et al*., 1996), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) Modular Ocean Model version 3 (MOM3; Pacanowski and Griffies, 1998), Land Surface Model (LSM; Bonan, 1998), Los Alamos National Laboratory (LANL) Elastic-Viscous-Plastic (EVP) Sea-Ice Model (Hunke and Dukowicz, 1997; Ahn and Lee, 2001)로 구성된다(Table 1). 대기 성분 초기장은 National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy Reanalysis 2 (NCEP/DOE), 해양 성분 초기장은 Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 지면 성분 초기장은 Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP)-type 적분을 이용하였다. 추가로 해양 성분 초기장은 변분법(Variational Analysis using a Filter, VAF)을 선택하여 해양 전층(40층)에 대하여 자료동화를 적용하였으며, 대기, 지면 및 해양 성분 초기장의 생산 방법은 Ahn and Lee(2015)와 Ahn *et al*.(2018a; b)에 설명되어 있다.

PNU CGCM에서 생산한 예측자료를 이용하여 지역 기후모형인 WRF version 3.5 (Weather Research and Forecasting model; Skamarock *et al*., 2008)를 통해 역학적으로 규모 축소하여 생산한 자료는 5km의 수평 해상도와 한반도를 중심으로 하여 동서 및 남북 방향으로 각각 150개, 245개의 격자로 구성된다(Fig. 1). 해당 부분에서 사용된 물리 방안은 지면, 지표층, 단파와 장파복사 모수화, 적운 모수화, 행성 경계층 및 미세물리

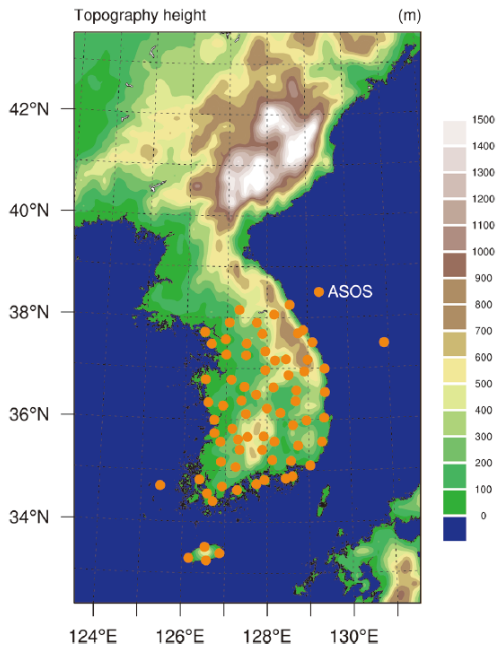

Fig. 1. The locations of ASOS in South Korea and topography heights (in meters) of the WRF domain.

Table 1. Description 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 : 2.917mb)	
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 : 10m, bottom : 5258m)	
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, Ahn *et al*., 2001]
	Vertical	3 levels	

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	40s
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, 1979; etc.]
Planetary boundary layer	Yonsei University [Hong *et al*., 2006]
Cumulus	Kain-Fritsch [Kain, 2004]
Microphysics	WSM3 [Hong *et al*., 2004]

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

PNU CGCM으로 전지구 영역에 대해 매월 초기화하여 8개월의 lead (lead0~lead7)로 적분하여 1986~2020의 시간별 Hindcast 자료를 생산하였다. 예를 들어, 3~5월 초기장으로부터 출발하는 적분을 각각 03RUN, 04RUN, 05RUN으로 명명한다. WRF의 경계조건은 60분 간격으로 처방되어 남한 지역에 대해 역학적으로 규모 축소된 lead2~lead7의 Hindcast자료(6개월치)를 생산하였다(Ahn *et al*., 2018b; Kim *et al*., 2019; Kim *et al*., 2021). 본 연구에서는 분석하고자 하는 콩의 생육시기가 7~10월에 해당함으로 이를 포함하는 01RUN~05RUN의 자료를 사용하였다(Fig. 2). 단일 모형의 불확실성을 줄이기 위하여 콩의 생육시기를 포함하는 RUN들의 결과에 simple composite method (SCM)를 적용하여 평균한 ENS도 분석하였다.

2.2. 콩의 고온해 및 저온해 기준

콩은 1년 단위로 재배할 수 있는 작물로 생육기간이 가장 짧은 것과 긴 것은 각각 75일, 200일로 다양하지

8-month lead hindcast

WRF downscaling

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
01RUN	Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7				
02RUN		Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7			
03RUN			Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7		
04RUN				Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7	
05RUN					Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7
06RUN	Lead7					Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6
07RUN	Lead6	Lead7					Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5
08RUN	Lead5	Lead6	Lead7					Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4
09RUN	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					Lead0	Lead1	Lead2	Lead3
10RUN	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					Lead0	Lead1	Lead2
11RUN	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					Lead0	Lead1
12RUN	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					Lead0

Fig. 2. Lead-times in 8-month lead hindcast experiment. Left column indicates initialized month and top line indicates predicted month. Lead2~7 (dark apricot shaded) are dynamically downscaled by WRF.

만 실제로 우리나라에서 재배되는 콩의 품종은 90～160일 범위에 속한다(Park, 2015). 다양한 품종의 콩은 각각 다른 생육단계 기간을 가지지만, 영농시기에 따라 고온해 및 저온해의 발생 위험성이 높은 시기를 고려하여 화아분화기(7월 1일～20일), 개화기(7월 20일～8월 10일), 성숙기(8월 20일～9월 30일)동안 발생하는 고온해와 저온해에 대하여 분석하고자 하였다(RDA, 2018a). 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 기준 또한 연구별로 매우 다양하지만, 일반적으로 통용되는 기준을 적용하였다(Gibson and Mullen, 1996; RDA, 2018b). 콩의 개화기와 성숙기 모두 일 최고기온(Tmax)이 35℃ 이상일 때 고온해라고 정의 내린다(Table 3). 고온해에 따른 피해에는 등숙지연, 종실 크기 감소 및 수량 감소 등이 있다. 콩의 화아분화기는 일 최저기온(Tmin)이 16℃ 미만, 개화기는 Tmin이 17℃ 미만, 성숙기는 Tmin이 8℃ 미만일 때 저온해라고 정의 내린다(Table 3). 저온해에 따른 피해에는 유효화분수 감소, 개화 및 성숙의 지연, 절수 및 꽃수 감소 등이 있다.

2.3. 보정 방법

일반적으로 모형과 관측의 기후는 다르기 때문에 동일한 기준을 사용하여 고온해와 저온해를 구별하는데 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 모형과 관측의 오차를 줄이기 위하여 Tmax와 Tmin의 평균 및 분산을 보정해주는 Variance Scaling 기법을 사용하였다(Teutschbein and Seibert, 2012). 보정 기법에 사용된 Tmax 및 Tmin 관측 자료는 기상청 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observation System, ASOS)의 72개 지점을 사용하였다(Fig. 1). Variance Scaling 기법의 식은 Eq. 1부터 Eq. 4까지이며, 각 문자의 의미는 Table 4에 나타냈다.

$$T^{*1}_{model}(d) = T_{model}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{model}(d)) \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$T^{*2}_{model}(d) = T^{*1}_{model}(d) - \mu_m\left(T^{*1}_{model}(d)\right) \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$T^{*3}_{model}(d) = T^{*2}_{model}(d) \cdot \left[\frac{\sigma_m(T_{obs}(d))}{\sigma_m(T^{*2}_{model}(d))}\right] \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$T^{*}_{model}(d) = T^{*3}_{model}(d) + \mu_m\left(T^{*1}_{model}(d)\right) \quad \text{(Eq. 4)}$$

2.4. 검증 방법

본 연구에서는 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수의 예측성을 검증하기 위한 방법으로 적중률

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

Growth Stage	Cold damage	Heat damage
Floral Differentitation Stage (From 1 July to 20 July)	16℃	-
Flowering Stage (From 20 July to 10 August)	17℃	35℃
Maturation Preiod Stage (From 20 August to 30 September)	8℃	35℃

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

Table 5. The computational formula of HR (Hit Rate), HSS (Heidke Skill Score)

Verification method	Define

	Above Normal	**Normal**	**Below Normal**
variable	**Ano ≥ +val**	**-val < Ano < +val**	**Ano ≤ -val**

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

OBS \ FCST	+	**0**	**-**	**Total**
+	**A**	**B**	**C**	**D**
0	**E**	**F**	**G**	**H**
-	**I**	**J**	**K**	**L**
Total	**M**	**N**	**O**	**P**

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

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

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

(Hit Rate, HR), Heidke 기술 점수(Heidke Skill Score, HSS)를 이용하였다(Table 5). HR과 HSS에 대한 자세한 설명은 Kim *et al*.(2019)와 Kim *et al*.(2021)에 나타나있다. HR과 HSS는 고온해 및 저온해 발생일수의 편차 시계열의 ±0.43σ (Standard deviation)을 기준으로 하여 3분위(Above normal, Normal, Below normal)로 나누어 관측과 비교 평가하였다(Wilks, 1995). HR은 0.33 이상, HSS는 0 이상이면 예측성이 있다고 판단하였다. 예측성을 평가하기 위하여 기상청 종관기상관측자료(ASOS)의 72개의 관측 지점과 가장 가까운 모형의 격자 값을 추출하였다.

III. 결 과

3.1. Tmax 및 Tmin의 모의 성능

Kim *et al*.(2021)에서 사용한 방법을 참고하여 본 연구에서 사용하는 Tmax 및 Tmin의 모의성능에 대하여 살펴보았다. Fig. 3은 3월부터 10월까지 각 월별 Tmax와 Tmin의 NSD와 RMSE의 우리나라 영역의 평균값을 나타낸 그림이다. 빨간색, 보라색, 파란색, 초록색, 노란색, 검은색의 원과 삼각형은 각각 01RUN∼05RUN 및 ENS의 보정 전 Tmax 및 Tmin(Tmax_ORG 및 Tmin_ORG)과 Variance Scaling으로 보정한 Tmax 및 Tmin(Tmax_VS 및 Tmin_VS)이다. Kim *et al*.(2021) 결과와 마찬가지로 01RUN∼05RUN 및 ENS 모두에서 보정한 값이 원값에 비해 NSD가 1.0에 가깝고 RMSE가 작게 나타나는 것으로 보아 Variance Scaling의 필요성을 볼 수 있다. 보정된 결과(Tmax_VS 및 Tmin_VS)의 모의성능을 보면(Fig. 3), 먼저 3월의 Tmax는 01RUN이 관측과 유사하게 나타난다. 4∼10월의 Tmax는 각 월을 포함하는 RUN 및 ENS에서 모의성능이 관측과 유사하게 나타나며, 특히, 4월은 02RUN, 5월은 ENS, 6∼7월은 04RUN, 8월은 04RUN, 9∼10월은 03RUN이 관측과 유사하게 나타난다. 다음으로 Tmin의 경우 4∼10월의 Tmin은 각 월을 포함하는 RUN 및 ENS에서 모의성능이 관측과 유사하게 나타난다. 특히, 4월과 7월은 02RUN, 5월, 9월 및 10월은 03RUN, 6월과 8월은 04RUN, 7월과 9월은 ENS이 관측과 가장 유사하게 나타난다. 보정된 결과의 월별 모의성능을 보면, Tmax의 경우 5∼6월, Tmin의 경우 7월이 다른 월에 비해 모의성능이 높다. PNU CGCM-WRF Chain을 사용하여 3∼10월의 Tmax 및 Tmin에 대한 NSD와 RMSE 모의성능 결과는 Variance Scaling으로 보정한 값이 원값에 비해 관측과 유사하게 나타났으며, 보정한 각 월별의 Tmax 및 Tmin의 모의성능은 전반적으로 모든 RUN 및 ENS, 특히, ENS에서 모의성능이 높게 나타났다. 본 연구에서는 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수를 Variance Scaling을 통해 보정된 01RUN∼05RUN 및 ENS의 Tmax 및 Tmin을 사용하여 분석하였고, 추후 언급되는 01RUN∼05RUN 및 ENS는 보정된 결과를 의미한다.

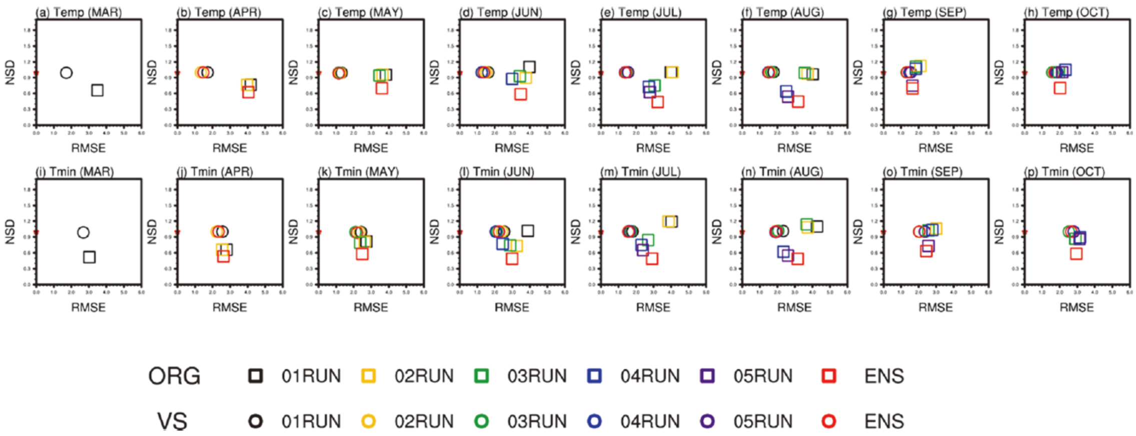

Fig. 3. Mean Normalized Standard Deviations (NSD) and Root Mean Square Error (RMSE) for daily maximum temperature (Tmax) in (a) March, (b) April, (c) May, (d) June, (e) July, (f) August, (g) September, (h) October and for daily minimum temperature (Tmin) in (i) March, (j) April, (k) May, (l) June, (m) July, (n) August, (o) September, (p) October. Circles (Triangle) of red, purple, blue, green, yellow and black are Tmax_ORG and Tmin_ORG (Tmax_VS and Tmin_VS) of 01RUN, 02RUN, 03RUN, 04RUN, 05RUN, and ENS. Tmax_VS (Tmin_VS) is the value obtained by correcting Tmax_ORG (Tmin_ORG) through the Variance Scaling method.

3.2. 콩의 고온해 및 저온해 발생일수 및 예측성 평가

Fig. 4는 콩의 생육시기별(개화기 및 성숙기) 고온해 발생일수에 대한 관측(OBS) 및 모형(01RUN~05RUN 및 ENS)의 결과를 나타낸 공간분포이다. 개화기의 관측, 01RUN~05RUN 및 ENS 결과를 보면, 우리나라 영역 평균값이 차례로 1.6일, 2.8일, 2.9일, 3.3일, 3.7일, 3.9일 및 4.9일로 모형이 관측에 비해 약 1.2~3.3일 더 많이 발생하는 것으로 나타난다. 모형에서 고온해가 주로 발생하는 지역은 남동부로 관측과 일치한다. 성숙기의 관측, 02RUN~05RUN 및 ENS 결과를 보면, 우리나라 영역 평균값이 차례로 0.1일, 0.4일, 0.6일, 0.3일, 0.4일 및 0.2일로 모형이 관측에 비해 약 0.1~0.5일 더 많이 발생하는 것으로 나타난다. 모형에서 고온해가 빈번하게 발생하는 지역은 강원 산지를 제외한 우리나라 대부분 특히, 남동부 지역으로 관측과 일치한다. 콩의 생육시기별 고온해 발생일수에 대한 전반적인 결과로는 관측에 비해 모형이 개화기 및 성숙기 고온해 발생일수를 약간 과대모의하는 경향이 나타나지만, 발생일수가 많이 나타나는 지역적인 특성은 잘 나타낸다.

Fig. 5는 콩의 생육시기별(화아분화기, 개화기 및 성숙기) 저온해 발생일수에 대한 관측(OBS) 및 모형(01RUN~05RUN 및 ENS)의 결과를 나타낸 공간분포이다. 화아분화기의 관측, 01RUN~05RUN 및 ENS 결과를 보면, 우리나라 영역 평균값이 차례로 0.8일, 2.7일, 3.0일, 3.9일, 3.8일, 3.5일 및 3.6일로 관측에 비해 약 1.9~3.1일 더 많이 발생하는 것으로 나타난다. 관측에서는 우리나라 대부분 지역에서 저온해가 발생하며, 특히, 봉화, 태백 및 대관령 지점에서 차례로 3.0일, 7.0일, 10.0일 이상으로 다른 지역에 비해 많이 발생한다. 마찬가지로 모형에서도 저온해가 빈번하게 발생하는 지역은 봉화, 태백 및 대관령 지점을 포함하는 강원 산지로 관측과 일치한다. 개화기의 관측, 01RUN~05RUN 및 ENS 결과를 보면, 우리나라 영역 평균값이 차례로 0.5일, 2.1일, 1.9일, 2.4일, 2.0일, 1.6일 및 0.8일로 관측에 비해 약 0.3~1.9일 더 많이 발생하는 것으로 나타난다. 관측에서는 화아분화기와 동일하게 우리나라 대부분 지역에서 저온해가 발생하며, 특히, 다른 지역에 비해 봉화, 태백 및 대관령 지점에서 저온해 발생일수가 약 2.0~8.0일로 더 많이 발생한다. 마찬가지로 모형에서도 저온해가 빈번하게 발생하는 지역은 대관령, 태백 및 봉화 지점을 포함하는 강원 산지로 관측과 일치한다. 성숙기의 관측, 02RUN~05RUN 및 ENS 결과를 보면, 우리나라 영역 평균값이 차례로 0.8일, 1.2일, 1.3일, 1.2일, 1.1일 및 1.0일로 약 0.2~0.5일 더 많이 발생하지만, 그 차이가 화아분화기 및 개화기

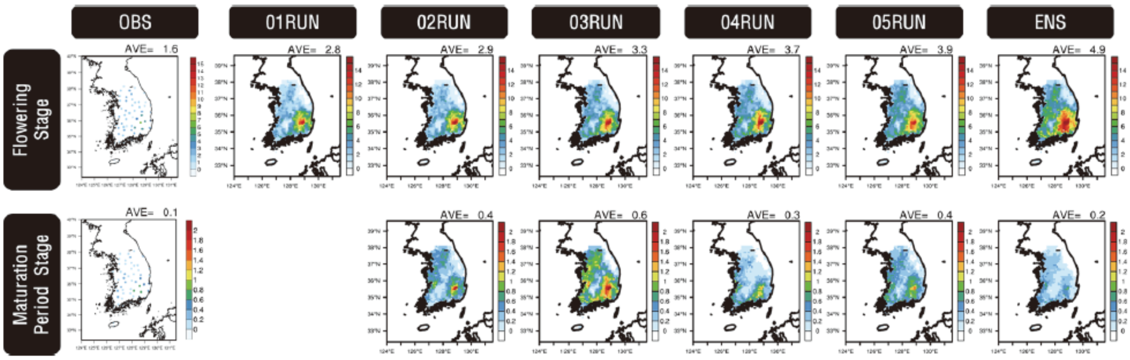

Fig. 4. Spatial distribution of number of days of heat damage in soybean during Flowering Stage (top), Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean number of days of heat damage.

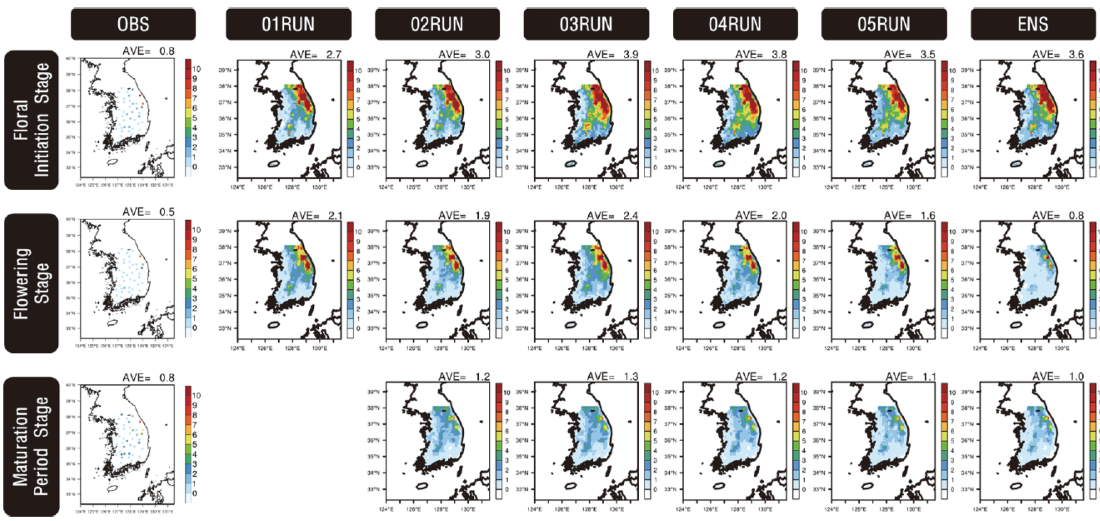

Fig. 5. Spatial distribution of number of days of cold damage in soybean during Floral Initiation Stage (top), Flowering Stage (middle) and Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean number of days of cold damage.

보다 작고 지역적 특성을 가장 잘 모의하는 것으로 나타난다. 콩의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 전반적인 결과로는 관측에 비해 모형이 화아분화기, 개화기 및 성숙기 저온해 발생일수를 과대모의하는 경향이 나타나지만, 고온해와 마찬가지로 발생일수가 많이 나타나는 지역적인 특성은 잘 나타내는 것을 알 수 있다.

콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 PNU CGCM-WRF Chain의 예측성을 HR과 HSS를 이용하여 검증하였다. 본문에 나타낸 그림에서 검은색 x표식으로 표시된 지점들은 본 연구에서 분석하는 35년 동안 관측과 모형 모두 고온해 및 저온해가 발생하지 않은 지점이다(우리나라 영역 평균값에서 제외). Fig. 6은 콩의 생육시기별(개화기 및 성숙기) 고온해 발생일수에 대한 HR을 나타낸 공간분포이다. 개화기 HR의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.45, 0.40, 0.45, 0.44, 0.43 및 0.45로 나타난다. 03RUN, 05RUN 및 ENS는 고온해가 빈번하게 발생하는 남동부 지역에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 또한, 고온해가 드물게 발생하는 대부분의 지점에서도 01RUN~05RUN 및 ENS 모두 HR의 예

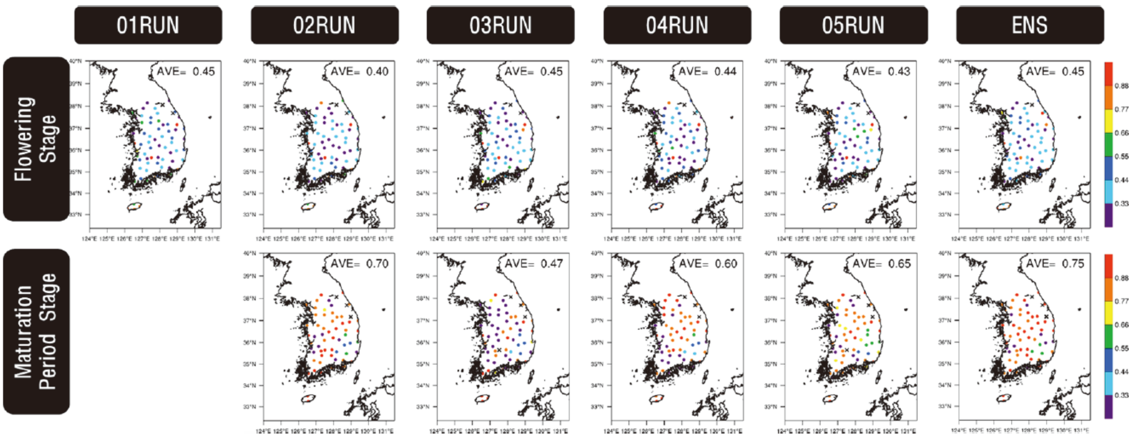

Fig. 6. Spatial distribution of Hit Rate for heat damage in soybean during Flowering Stage (top), Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean Hit Rate of 72 stations. Black (x-marked) stations are points where no heat damage occurred during the 35-year analysis period for both observations and models (Excluded from the average value of South Korea).

측성이 높다. 성숙기 HR의 경우, 우리나라 영역 평균값이 02RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.70, 0.47, 0.60, 0.65 및 0.75로 고온해가 빈번하게 발생하는 남동부 지역에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 개화기와 마찬가지로 고온해가 드물게 발생하는 지역에서도 HR이 0.66 이상으로 매우 높게 나타나는데, 이러한 지점들은 다른 01RUN~05RUN에 비해 ENS에서 더 높게 나타난다.

Fig. 7은 콩의 생육시기별 고온해 발생일수에 대한 HSS를 나타낸 그림이다. 개화기 HSS의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.05, -0.01, 0.05, 0.06, 0.02 및 0.02로 나타난다. 01RUN, 05RUN 및 ENS는 고온해가 빈번하게 발생하는 남동부 지역의 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 02RUN을 제외한 RUN 및 ENS에서는 고온해가 발생하지 않는 지역의 대부분 지점에서도

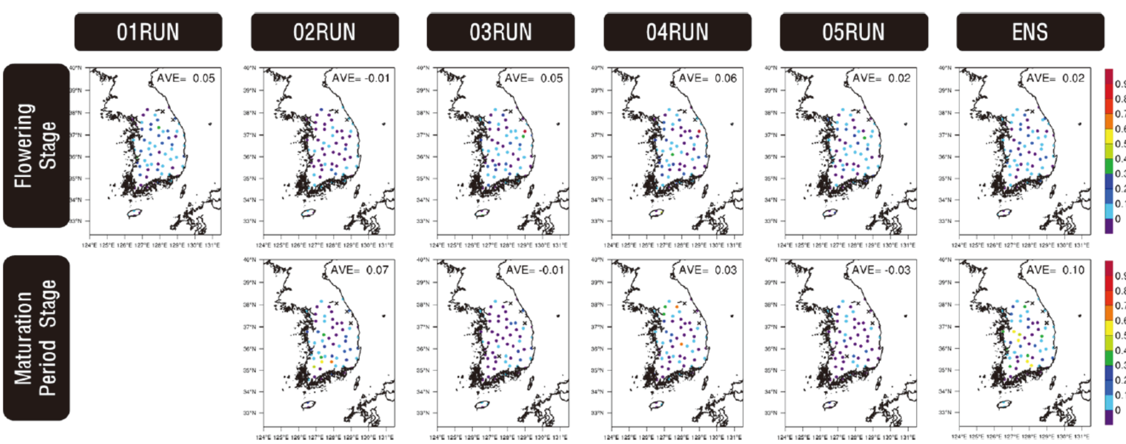

Fig. 7. Spatial distribution of Heidke Skill Score for heat damage in soybean during Flowering Stage (top), Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean Heidke Skill Score of 72 stations. Black (x-marked) stations are points where no heat damage occurred during the 35-year analysis period for both observations and models (Excluded from the average value of South Korea).

HSS가 0 이상으로 나타난다. 성숙기 HSS의 경우, 우리나라 영역 평균값이 02RUIN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.07, -0.01, 0.03, -0.03 및 0.10으로 나타난다. 02RUN과 ENS는 고온해가 빈번하게 발생하는 남동부 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 고온해가 드물게 발생한 지역의 HSS를 살펴보면, 02RUN은 서부 및 남서부 지역, 04RUN은 서부 지역, ENS는 중부내륙 및 남서부 지역의 일부 지점을 제외한 우리나라 전 지역에서 고르게 HSS가 0 이상으로 나타난다. 콩의 생육시기별 고온해 발생일수에 대한 검증의 전반적인 결과로는 RUN에 따라 차이는 있지만 개화기와 성숙기 모두 고온해가 주로 발생하는 남동부 지역에서 예측성이 나타난다. 01RUN~05RUN에 비해 ENS에서는 고온해가 빈번하거나 드물게 발생하는 지역에서도 HR과 HSS가 높게 나타남에 따라 콩의 생육시기별 고온해 발생일수에 대한 예측성이 다른 RUN들에 비해 안정적으로 높게 나타나는 편이다.

Fig. 8은 콩의 생육시기별(화아분화기, 개화기 및 성숙기) 저온해 발생일수에 대한 HR을 나타낸 공간분포이다. 화아분화기 HR의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.48, 0.49, 0.48, 0.47, 0.55 및 0.53으로 모든 RUN 및 ENS는 우리나라 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타나고, 특히 서부 지역에서 HR이 0.66 이상으로 매우 높다. 다른 지역에 비해 저온해가 빈번하게 발생하는 지점(봉화, 태백 및 대관령)의 HR은 02RUN, 03RUN 및 ENS는 봉화, 태백 및 대관령 지점, 04RUN 및 05RUN은 봉화 및 태백 지점, 01RUN은 대관령 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 개화기 HR의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.43, 0.57, 0.49, 0.51, 0.66 및 0.76으로 05RUN 및 ENS는 우리나라 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타나고, 특히 서부 및 남동부 지역에서 HR이 0.77 이상으로 매우 높다. ENS는 저온해가 드물게 발생하는 지역에서도 HR이 대부분 0.55 이상으로 다른 RUN보다 높을 뿐만 아니라, HR이 0.77 이상으로 높은 지점도 다른 RUN에 비해 더 많다. 저온해가 빈번하게 발생하는 지점의 HR은 03RUN은 봉화, 태백 및 대관령 지점, 01RUN 및 ENS는 봉화 및 대관령 지점, 04RUN 및 05RUN은 봉화 지점, 02RUN은 태백 지점에서 예측성

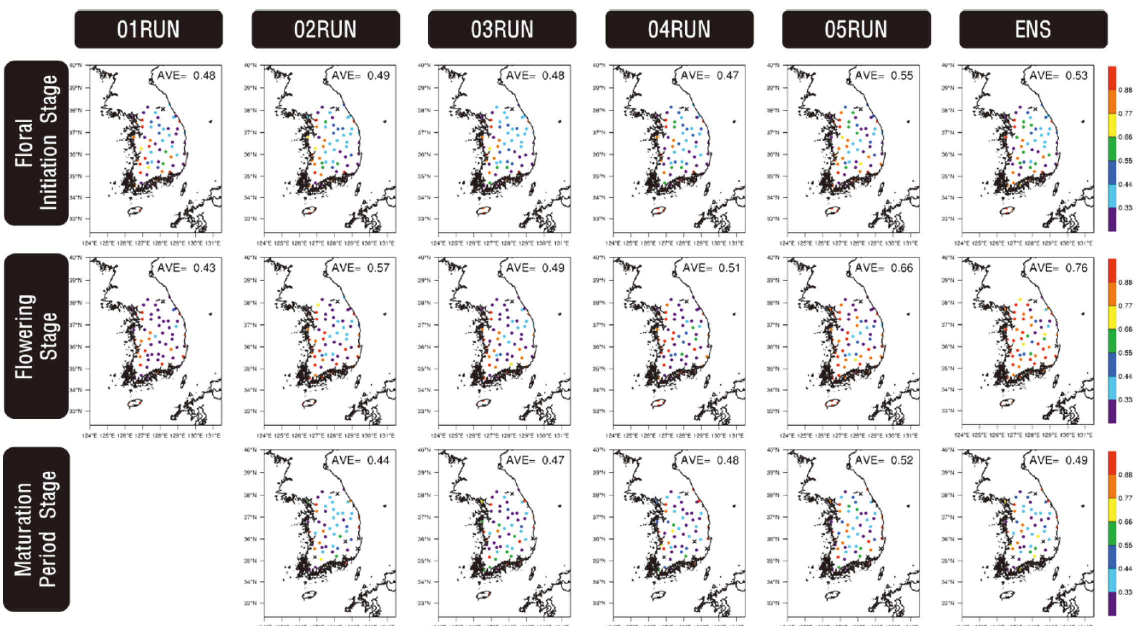

Fig. 8. Spatial distribution of Hit Rate for cold damage in soybean during Floral Initiation Stage (top), Flowering Stage (middle) and Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean Hit Rate of 72 stations. Black (x-marked) stations are points where no cold damage occurred during the 35-year analysis period for both observations and models (Excluded from the average value of South Korea).

이 있는 것으로 나타난다. 성숙기 HR의 경우, 우리나라 영역 평균값이 02RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.44, 0.47, 0.48, 0.52 및 0.49로 대체적으로 우리나라 대부분 지역에서 예측성이 있는 것으로 나타나고, 특히 서부 지역에서 HR이 0.77 이상으로 매우 높다. 저온해가 빈번하게 발생하는 지점(제천, 봉화, 태백 및 대관령)의 HR은 02RUN은 제천, 봉화, 태백 및 대관령 지점, ENS는 제천, 태백 및 대관령 지점, 03RUN 및 05RUN은 태백 및 대관령 지점, 04RUN은 태백 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다.

Fig. 9는 콩의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 HSS를 나타낸 공간분포이다. 화아분화기 HSS의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 -0.03, 0.01, 0.03, 0.03, 0.08 및 0.11로 03RUN~05RUN 및 ENS는 우리나라 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 특히, ENS는 저온해가 드물게 발생하는 지점에서도 HSS가 0.30 이상으로 다른 RUN에 비해 더 많이 나타난다. 저온해가 빈번하게 발생하는 지점(봉화, 태백 및 대관령)의 HSS는 02RUN, 03RUN 및 ENS는 봉화, 태백 및 대관령 지점, 04RUN은 봉화 및 태백 지점, 05RUN은 봉화 지점, 01RUN은 대관령 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 개화기 HSS의 경우, 우리나라 영역 평균값이 01RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 -0.03, 0.08, -0.01, 0.13, 0.02 및 0.03으로 02RUN 및 04RUN은 우리나라 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 저온해가 빈번하게 발생하는 지점의 HSS는 03RUN은 봉화, 태백 및 대관령 지점, 01RUN 및 ENS는 봉화 및 대관령 지점, 04RUN 및 05RUN은 봉화 지점, 02RUN은 태백 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 등숙기 HSS의 경우, 우리나라 영역 평균값이 02RUN~05RUN 및 ENS에서 각각 0.02, 0.01, -0.09, 0.04 및 −0.04로 04RUN은 우리나라 대부분 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 저온해가 빈번하게 발생하는 지점(제천, 봉화, 태백 및 대관령)의 HSS는 02RUN은 제천, 봉화, 태백 및 대관령 지점, ENS는 제천, 태백 및 대관령 지점, 03RUN 및 05RUN은 태백 및 대관령 지점, 04RUN은 태백 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 콩의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 검증의 전반적인 결과로는 RUN에 따라 차이는 있지만 화아분

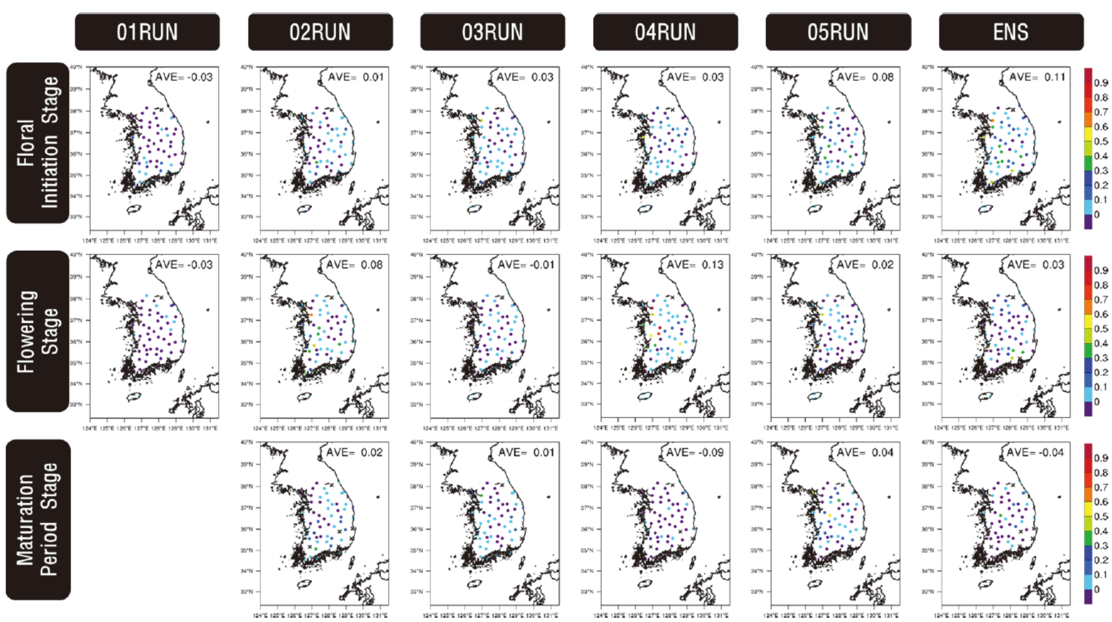

Fig. 9. Spatial distribution of Heidke Skill Score for cold damage in soybean during Floral Initiation Stage (top), Flowering Stage (middle) and Maturation Period Stage (bottom). The values at the top right of each figure are mean Heidke Skill Score of 72 stations. Black (x-marked) stations are points where no cold damage occurred during the 35-year analysis period for both observations and models (Excluded from the average value of South Korea).

화기, 개화기 및 성숙기 모두 저온해가 빈번하게 발생하는 제천, 봉화, 태백 및 대관령을 포함하는 강원 산지에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 01RUN～05RUN에 비해 ENS에서는 저온해가 빈번하거나 드물게 발생하는 지역에서도 HR과 HSS가 높게 나타남에 따라 콩의 생육시기별 저온해 발생일수에 대한 예측성이 다른 RUN들에 비해 안정적으로 높게 나타나는 편이다(성숙기 HSS 제외).

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 우리나라 주요 곡물 중 하나인 콩의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측자료를 PNU CGCM-WRF Chain을 이용하여 생산하고 예측성을 평가하였다. PNU CGCM-WRF Chain으로부터 생산된 다른 초기조건을 가진 01RUN～05RUN과 함께 모형의 불확실성을 줄이기 위하여 각 RUN들의 결과에 Simple Composite Method (SCM)를 적용하여 평균한 ENS도 분석하였다. 콩의 고온해와 저온해를 판별하는 변수인 일 최고기온(Tmax)와 일 최저기온(Tmin)에 대한 모형의 모의성능을 살펴보았다. 일반적으로 모형과 관측의 기후적 특성이 다르기 때문에 고온해와 저온해를 동일한 기준으로 정의할 수 없다. 따라서 모형과 관측의 오차를 줄이기 위하여 Tmax와 Tmin의 평균 및 분산을 보정해주는 Variance Scaling 기법을 사용하였다(Kim *et al*., 2021). PNU CGCM-WRF Chain을 사용하여 3～10월의 Tmax 및 Tmin에 대한 NSD와 RMSE 모의성능 결과는 보정을 진행한 값이 원값에 비해 관측과 유사하게 나타났다. 각 월별로 보정한 Tmax 및 Tmin의 모의성능은 전반적으로 모든 RUN 및 ENS, 특히, ENS에서 모의성능이 높게 나타남을 알 수 있다.

콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 PNU CGCM-WRF Chain의 예측성을 HR과 HSS의 검증을 통해 살펴보았다. 고온해의 경우, 개화기 및 성숙기 모두 RUN에 따라 차이는 있지만 대부분 고온해가 빈번하게 발생하는 대부분의 지점에서 예측성이 있는 것으로 나타난다. 01RUN～05RUN에 비해 ENS는 고온해가 드물게 발생하는 지역에서도 예측성이 높게 나타났다. 저온해의 경우, 모든 화아분화기, 개화기 및 성숙기의 모든 생육시기에서 저온해가 빈번하게 발생하는 제천, 봉화, 태백, 및 대관령 등의 지점에서 RUN에 따라 차이는 있지만 모든 생육시기에서 대부분 예측성이 있는 것으로 나타났다. 고온해의 경우와 마찬가지로, ENS는 저온해가 드물게 발생하는 지역에서도 예측성이 높게 나타났다. 이러한 결론을 통하여 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성은 01RUN～05RUN에 비해 ENS에서 비교적 높게 난다.

본 연구에서는 PNU CGCM-WRF Chain을 통해 생산한 Tmax 및 Tmin 자료를 이용하여 우리나라 주요 식량자원 중 하나인 콩의 생육시기별 이상기온 발생일수에 대한 장기적인 예측자료를 생산하고 검증한 것에 큰 의의가 있다. 분석결과 예측성능이 작물이나 작물의 생육시기에 따라 차이가 있지만, 예측성능이 신뢰수준에서 유의하게 나타나므로 생산된 예측자료는 이상기온으로 인한 농업 피해를 최소화하는데 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 지형이 복잡한 우리나라에서 단일 모형인 PNU CGCM-WRF Chain을 통해 생산한 Tmax 및 Tmin을 사용하여 콩의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수를 살펴보았으나 분명 한계가 존재한다. 향후 장기 예측 결과를 일별로 생산하고 제공하는 다른 모형들을 활용 가능하게 된다면 다중 모형 앙상블 기법을 적용하여 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해 발생일수에 대한 예측성을 지금보다 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 Pusan National University Coupled General Circulation Model-Weather Research and Forecasting (PNU CGCM-WRF)에서 생산된 hindcast 자료(1986～2020)를 이용하여 우리나라의 주요 곡물 중 하나인 콩의 생육단계별 고온해 및 저온해 발생일수의 예측성을 평가하였다. 예측성을 평가하는 방법으로는 Normalized Standard Deviations (NSD), Root Mean Square Error (RMSE), Hit Rate (HR), Heidke Skill Score (HSS)이다. 이를 위해 먼저 콩의 고온해 및 저온해를 정의하는 변수인 일 최고기온(Tmax) 및 일 최저기온(Tmin)의 모의성능을 검증하였다. 그 결과 1～5월(01RUN～05RUN)의 초기조건을 가지고 시작하는 월에 따라 다소 차이가 있지만, Variance Scaling 방법을 적용하여 보정한 결과가 보정전보다 관측과 유사하게 나타났으며, 보정한 3～10월의 Tmax 및 Tmin에 대한 모의성능은 전반적으로 01RUN～05RUN에 Simple Composite Method (SCM)을 적용하여 평균한 결과(ENS)에서 높게 나타났다. 또한, 콩의 생육시기별

고온해 및 저온해 발생일수의 지역적 패턴과 특성을 관측과 비교하였을 때 모형이 잘 모의하고 있다. ENS에서 콩의 고온해(저온해)에 대한 HR과 HSS는 생육시기별로 0.45～0.75, 0.02～0.10(0.49～0.76, -0.04～0.11)의 범위를 가진다. 결론적으로, PNU CGCM-WRF chain의 01RUN～05RUN 및 ENS는 우리나라 콩의 생육시기별 고온해 및 저온해를 예측할 수 있는 성능을 가지고 있다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01489102)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn, J.-B., and J.-A. Lee, 2001: Numerical study on the role of sea-ice using ocean general circulation model. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **6**(4), 225-233. (in Korean with English abstract)

Ahn, J.-B., and J.-L. Lee, 2015: Comparative Study on the Seasonal Predictability Dependency of Boreal Winter 2m Temperature and Sea Surface Temperature on CGCM Initial Conditions. *Atmosphere* **25**(2), 353-366. doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.353 (in Korean with English abstract)

Ahn, J.-B., and J.-L. Lee, and S. R. Jo, 2018a: Evaluation of PNU CGCM Ensemble Forecast System for Boreal Winter Temperature over South Korea. *Atmosphere* **28**(4), 509-520. doi:10.14191/Atmos.2018.28.4.509 (in Korean with English abstract)

Ahn, J.-B., 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**(4), 479-490. doi: 10.14191/Atmos.2018.28.4.479 (in Korean with English abstract)

Ahn, J.-B., S. R. Jo, M.-S. Suh, D.-H. Cha, D.-K. Lee, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, H.-S. Kang, and K.-M. Shim, 2016: Changes of Precipitation Extremes over South Korea Projected by the 5 RCMs under RCP Scenarios. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **52**(2), 223-236. doi: 10.1007/s13143-016-0021-0

Bonan, G. B., 1998: The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR community climate model. *Journal of Climate* **11**(6), 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. *Monthly Weather Review* **129**(4), 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. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* **52**(3), 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. *Journal of Atmospheric Sciences* **46**(20), 3077-3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

Gibson, L. R., and R. E. Mullen, 1996: Influence of day and night temperature on soybean seed yield. *Crop Science* **36**(1), 98-104. doi:10.2135/cropsci1996.0011183X003600010018x

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. *Monthly Weather Review* **132**(1), 103-120. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2

Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review* **134**(9), 2318-2341. doi:10.1175/MWR3199.1

Hunke, E. C., and J. K. Dukowicz, 1997: An Elastic-Viscous-Plastic model for sea ice dynamics. *Journal of Physical Oceanography* **27**(9), 1849-1867. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<1849:AEVPMF>2.0.CO;2

Hur, J. N., J. H. Park, K. M. Shim, Y. S. Kim, and S. R. Jo, 2020: A High-Resolution Agro-Climatic Dataset for Assessment of Climate Change over South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 128-134. (in Korean with English abstract)

Jang, S.-H., C.-S. Ryu, Y.-S. Kang, J.-W. Park, T.-Y. Kim, K.-S. Kang, M.-J. Park, H.-C. Baek, Y.-H. Park, D.-W. Kang, K. Zou, M.-C. Kim, Y.-J. Kwon, S.-A. Han, and T.-H. Jun, 2021: Estimation of Fresh Weight and Leaf Area Index of Soybean (Glycine max) Using Multi-year

Spectral Data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **23**(4), 329-339. doi:10.5532/KJAFM.2019.21.4.327 (in Korean with English abstract)

Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of applied meteorology* **43**(1), 170-181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2

Kang, S.-T., J.-S. Lee, I.-Y. Baek, W.-Y. Han, D.-C. Shin, and M.-G. Choung, 2014: Effect of Rainfall in Harvest Period on Seed Quality in Soybean. *Korea Soybean Digest* **31**(1), 1-10. (in Korean with English abstract)

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 Technical note, 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, 176pp. [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 Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(4), 313-320. doi:10.5532/KJAFM.2018.20.4.313 (in Korean with English abstract)

Kim, M.-R., 2011: The Status of Korea's Rice Industry and the Rice Processing Industry. *Food Industry and Nutrition* **16**(1), 22-26. (in Korean)

Kim, S.-M., and S.-M. Kim, 2013: Agricultural production base disaster vulnerability assessment due to meteorological disasterst. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* **55**(1), 40-46. (in Korean)

Kim, S.-Y., I.-H. Heo, and S.-H. Lee, 2010: Impacts of Temperature Rising on Changing of Cultivation Area of Apple in Korea. *Journal of the Korean association of regional geographers* **16**(3), 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**(5), 671-687. doi:10.14191/Atmos.2019.29.5.671 (in Korean with English abstract)

Kim, Y.-H., M.-J. Choi, K.-M. Shim, J. N. Hur, S. R. Jo, and J.-B. Ahn, 2021: 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. *Atmosphere* **31**(5), 577-592. doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.577 (in Korean with English abstract)

KMA (Korea Meteorological Administration), 2021: Annual report for 2018 extreme climate. Korea Meteorological Administration, 198pp. (in Korean)

Lee, B.-U., 2009: The global food crisis and the importance of crop protection. *Life and Agrochemicals* **30**(1), 20-23. (in Korean)

Lee, B.-U., 2012: Impacts and responses of climate change on global agriculture. *KOREA RURAL ECONOMIC INSTITUTE (KREI) research reports* **146**, 79-94.

Lee, D. H., S.-K. Min, J. H. Jin, J.-W. Lee, D.-H. Cha, M.-S. Suh, J.-B. Ahn, S.-Y. Hong, H.-S. Kang, and M. S. Joh, 2017: Thermodynamic and dynamic contributions to future changes in summer precipitation over Northeast Asia and Korea: a multi-RCM study. *Climate Dynamics* **49**(11), 4121-4139.

Lee, J.-W., Y. J. Jang, K.-K. Ko, and J.-K. Park, 2013: Effects of Meteorological Elements in the Production of Food Crops: Focused on Regression Analysis using Panel Data. *Journal of Environmental Science International* **22**(9), 1171-1180. doi:10.5322/JESI.2013.22.9.1171 (in Korean with English abstract)

Lee, K.-M., H.-J. Baek, S.-H. Park, H.-S. Kang, and C.-H. Cho, 2012: Future projection of changes in extreme temperatures using high resolution regional climate change scenario in the Republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* **47**(2), 208-225. (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 phonology and growth of crops: In the case of Naju. *Journal of the Korean Geographical Society* **43**(1), 20-35. (in Korean with English abstract)

Lee, Y.-H., W.-G. Sang, J.-I. Cho, and M.-C. Seo, 2019: Effects of high temperature on soybean physiology, protein and oil content, and yield. *Korean Journal of Crop Science* **64**(4), 395-405. doi:10.7740/kjcs.2019.64.4.395 (in Korean with English abstract)

Lesk, C., P. Rowhani, and N. Ramankutty, 2016: Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature* **529**(7584), 84-87.

doi:10.1038/nature16467

Lim, M. S., K. Y. Shin, J. G. Woo, Y. S. Kwon, S. W. Jang, W. B. Kim, J. N. Lee, J. T. Lee, H. J. Kwon, J. T. Seo, J. H. Ahn, Y. G. Kang, Y. I. Ham, M. Kwon, and K. R. Ryu, 2000: *Vegetable cultivation technique in highland area*. Kwahakwonyae press, Seoul, 52-56.

Min, S.-K., S. Legutke, A. Hense, U. Cubasch, W.-T. Kwon, J.-H. Oh, and U. Schlese, 2006: East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO-G under IPCC SRES scenarios. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* **84**(1), 1-26. doi:10.2151/jmsj.84.1

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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **102**(D14), 16663-16682. doi:10.1029/97JD00237

Myeong, S. J., 2018: Impact of Climate Change Related Natural Disasters on Rice Production in South Korea. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* **18**(7), 53-60. doi:10.9798/KOSHAM.2018.18.7.53 (in Korean with English Abstract)

NIMS (National Institute of Meteorological Science), 2012: Global Climate Change Report 2012 for Response to “IPCC Fifth Assessment Report”, 59-89. (in Korean)

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. Y., D.-H. Cha, G. Y. 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. *International Journal of Climatology* **40**(4), 2270-2284.

Park, C. Y., S.-K. Min, D. H. Lee, D.-H. Cha, M.-S. Suh, H.-S. Kang, S.-Y. Hong, D.-K. Lee, H.-J. Baek, K.-O. Boo, and W.-T. Kwon, 2016: Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. *Climate Dynamics* **46**(7), 2469-2486.

Park, J. H., S. K. Kim, Y. S. Shin, M. I. Ahn, and Y. K. Han, 2014: Implementation of a Weather Hazard Warning System at a Catchment Scale. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(4), 389-395. doi:10.5532/KJAFM.2014.16.4.389 (in Korean with English abstract)

Park, K. Y., 2015: Soybean cultivation technology : Overcoming disasters by disseminating new soybean raising seeding technology. - The planting time can be adjusted according to the weather conditions, and there is no need to be decapitation during the growing season -, Understanding the growth characteristics of soybeans. *Korea Soybean Society* **326**, 5-6.

Park, P.-S., 2008: The status of Korea’s rice industry and the rice processing industry. *Food preservation and processing industry* **7**(2), 3-19.

Park, S. H., J. S. Lee, M, H. Seo, and J. S. Lee, 2002: Radish Cultivation. Rural Development Administration, Suwon, 39-40.

Paulson, C. A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **9**(6), 857-861. doi:10.1175/1520-0450(1970)009<0857:TMROWS>2.0.CO;2

RDA (Rural Development Administration), 2016: A Research on Agro-meteorological Disaster Hazards Mapping. National Academy of Agricultural Science. (in Korean)

RDA (Rural Development Administration), 2018a: Final report of Development of production prospects and risk assessment evaluation technology for decreasing climate disaster on upland crops. National Academy of Agricultural Science. (in Korean)

RDA (Rural Development Administration), 2018b: Technical support datas for reduce of heatwave and drought damage for food crops. National Academy of Agricultural Science. (in Korean)

Seo, H.-C., S.-K. Kim, Y.-S. Lee, and Y.-C. Cho, 2006: Geographical Shift of Quality Soybean Production Area in Northern Gyeonggi Province by Year 2100. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **8**(4), 242-249. (in Korean with English abstract)

Shim, K.-M., J.-T. Lee, Y.-S. Lee, and G.-Y. Kim, 2003: Traits of Agro-meteorological Disasters in 20th Century Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(4), 255-260. (in Korean with English abstract)

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 Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(1), 83-91. doi:10.5532/KJAFM.2014.16.1.83 (in Korean with

English abstract)

Shim, K.-M., Y.-S. Kim, M.-P. Jung, J. W. Kim, M. S. Park, S. H. Hong, and K. K. Kang, 2018: Recent Changes in the Frequency of Occurrence of Extreme Weather Events in South Korea. *Journal of Climate Change Research* **9**(4), 461-470. doi:10.15531/KSCCR.2018.9.4.461 (in Korean with English abstract)

Sin, Y.-H., 2013: Research on global food security and climate change in agriculture. *Water for future* **46**(7), 66-71.

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 Technical note-475+STR, 125pp.

Son, I.-C., K.-H. Moon, E. Y. Song, S. J. Oh, H. H. Seo, and J. Y. Yang, 2015: Effects of differentiated temperature based on growing season temperature on growth and physiological response in Chinese cabbage 'Chunkwang'. *Korean Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(3), 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. *Advances in atmospheric sciences* **28**(5), 1049-1055. doi:10.1007/s00376-011-0122-8

Sun, J., and J. B. Ahn, 2015: Dynamical Seasonal Predictability of the Arctic Oscillation Using a CGCM. *International Journal of Climatology* **35**(7), 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. *Journal of hydrology* **456**, 12-29.

Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.* Academic Press, 467pp.

Yun, J. I., 1999: *Agricultural Meteorology*. Arche Publishing House. 15-21. (in Korean)