

PNU/RDA 전지구-한반도 앙상블 장기기후 예측자료 소개 및 평가

조세라¹, 이준리², 김응섭^{1*}, 안중배³, 허지나¹, 김용석¹, 심교문¹

¹국립농업과학원 기후변화평가과, ²울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, ³부산대학교 대기환경과학과
(2024년 09월 13일 접수; 2024년 09월 30일 수정; 2024년 09월 30일 수락)

Introduction and Evaluation of the Pusan National University/Rural Development Administration Global-Korea Ensemble Long-range Climate Forecast Data

Sera Jo¹, Joonlee Lee², Eung-Sup Kim^{1*}, Joong-Bae Ahn³,
Jina Hur¹, Yongseok Kim¹, Kyo-Moon Shim¹

¹Climate Change Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Wanju, 55365, Republic of Korea

²Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, 44919, Republic of Korea

³Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, 46241, Republic of Korea

(Received September 13, 2024; Revised September 30, 2024; Accepted September 30, 2024)

ABSTRACT

The National Institute of Agricultural Sciences (NAS) operates in-house long-range climate forecasting system to support the agricultural use of climate forecast data. This system, developed through collaborative research with Pusan National University, is based on the PNU/RDA Coupled General Circulation Model (CGCM) and includes the regional climate model WRF (Weather Research and Forecasting). It generates detailed climate forecast data for periods ranging from 1 to 6 months, covering 20 key variables such as daily maximum, minimum, and average temperatures, precipitation, and agricultural meteorological elements like solar radiation, soil moisture, and ground temperature—factors essential for agricultural forecasting. The data are provided at a daily temporal resolution with a spatial resolution of a 5km grid, which can be used in point form (interpolated) or averaged across administrative regions. The system's seasonal temperature and precipitation forecasts align closely with observed climatological data, accurately reflecting spatial and topographical influences, confirming its reliability. These long-range forecasts from NAS are expected to offer valuable insights for agricultural planning and decision-making. The detailed forecast data can be accessed through the Climate Change Assessment Division of NAS.

Key words: Climate prediction system, Agro-climate, Seasonal forecast, Long-range forecast



* Corresponding Author : Eung-Sup Kim
(eung0302@korea.kr)

I. 서 론

농업은 인류의 삶과 직결된 필수 산업으로, 기상과 기후 조건에 큰 영향을 받는다. 기상 및 기후는 작물의 생장과 생산성, 병해충, 농업의 형태, 품질 등 농업 전반에 걸쳐 중요한 변수로 작용한다(Lee, 2012). 특히, 기온, 일조량, 강수량 등의 기상요소는 작물의 생육에 직접적으로 영향을 미친다(Meza and Silva, 2009; Shim *et al.*, 2014). 최근 기후변화의 가속화로 지금까지 경험하지 못했던 극단적 이상기상(폭염, 폭우, 가뭄, 한파, 태풍 등)이 발생하고 있으며, 그 빈도도 높아지고 있다(IPCC, 2021). 이는 농업 생산에 있어 불확실성을 증가시키고, 작물의 생육 및 생산성에 대한 예측을 어렵게 만든다. 예를 들어, 이상 고온이나 폭우, 가뭄 등의 기상이변은 작물의 생장과 수확 시기에 큰 영향을 미쳐 농업 생산성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Shim *et al.*, 2014; 2016; Jo *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2023). 이러한 각종 이상기상 현상에 대응하기 위해서 농업기상분야는 농작물 주산지의 변화하는 기후 조건을 감시함과 더불어, 농업 생산 계획에 장기적인 기상 예측 자료를 활용하는 방안을 마련하는 것이 매우 중요하다.

농업기상 자료는 작물의 생육 단계별 기상 조건을 분석하고, 이를 바탕으로 최적의 농업 관리 방안을 제시하는 데 기여할 수 있다. 특히, 농업기상 장기예측은 농업 경영자들이 기상 조건을 사전에 파악하고, 이에 대응하는 전략을 수립하는 데 있어 핵심적인 역할을 한다(Yun *et al.*, 2001). 이는 농업 생산의 안정성을 높이고, 기상 변화로 인한 피해를 최소화하는 데 도움이 된다. 예를 들어, 작물 재배지 변경, 병해충 관리, 냉해 및 한해 대응 전략 수립 등 다양한 분야에서 농업 기상 장기예측정보가 필요하며(Yun *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2022, Kim *et al.*, 2023), 농업 분야의 특성을 고려할 때 1~6개월 및 그 이상의 장기예측정보가 요구된다.

현재 기상청에서는 장기 전망을 위해 기후예측모형을 운영하여 그 결과를 주기적으로 발표하고 있다. 기상청은 2014년부터 Global Seasonal Forecast System (GloSea)를 영국으로부터 도입하여 기후 예측에 활용하기 시작했고, 2021년부터는 GloSea6를 운영하고 있다(Kim *et al.*, 2021a; Hyun *et al.*, 2022). 기상청에서 제공하는 예측 결과는 격자별 데이터가 아닌 1개월 전망을 위한 주별 예측자료, 3개월 및 계절 기후전망

을 위한 월별 예측자료를 평년보다 높거나 낮음을 나타내는 3분위 예측결과 및 도표 등 정성적인 형태로 제공하여 타 산업에 응용하는 데 어려움이 있다. 이에 농촌진흥청 국립농업과학원은 부산대학교와 공동연구를 통해 Pusan National University/Rural Development Administration (PNU/RDA) 전지구-한반도 앙상블 장기예측시스템을 개발하였고, 2023년 5월에 부산대학교로부터 이관하여 국립농업과학원 자체 시스템으로써 운영 중이다. 국립농업과학원에서는 해당 시스템을 통해 우리나라 영역에 대한 시공간적으로 고해상도(5×5km)인 30년 이상의 과거예측(hindcast)자료를 구축하고, 매달 상세 농업기상 장기(6개월) 예측정보를 생산한다(Ahn *et al.*, 2018a; Kim *et al.*, 2019). PNU/RDA 전지구-한반도 앙상블 장기기후예측시스템은 농업에 필수적인 기온뿐만 아니라 토양수분, 지중온도, 일사량 등 기존 기상청에서 제공하지 않는 요소도 생산한다. 농업관련 연구기관에서 기후예측모형을 직접 운영하고 생산 데이터를 관리함으로써 원시 격자데이터를 활용한 다양한 농업 분야 연구 및 서비스에 직접적인 활용이 가능해져, 보다 능동적인 연구, 대응 전략 수립, 서비스 제공이 가능하다(Kim *et al.*, 2021b; Hur *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2022).

본 논문은 PNU/RDA 전지구-한반도 앙상블 장기 기후예측시스템을 통해 생산된 상세 농업기상 장기 예측자료에 대한 정보와 예측 성능에 대해 소개하고 작황 전망, 병해충 예측 등 각종 농업 전망에 장기 예측 자료의 활용성을 높이는데 목적이 있다.

II. PNU/RDA 모형

본 시스템에서는 전지구 기후 예측모형과 지역 기후 예측모형이 사용된다. 전지구 기후 예측모형은 부산대학교에서 개발되어 국립농업과학원에서 운영 중인 PNU/RDA Coupled General Circulation Model (CGCM)을 사용한다. PNU/RDA CGCM은 Asia-Pacific Economic Cooperation Climate Center (APEC 기후센터)의 Multi-Model Ensemble (MME) 시스템에 참여하여 월별 전 지구 예측 자료의 경우 매 월 APCC 서버를 통해 대중에게 공개되고 있으며, 유관기관 및 학계에서 다양한 연구를 통해 성능이 검증된 모형이다(Sun and Ahn, 2011; Ahn and Kim, 2014; Ahn and Lee, 2015; Sun and Ahn, 2015; Kim and Ahn, 2015; Ahn *et al.*, 2018b; Lee *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2024).

PNU/RDA CGCM은 대기, 지면, 해양, 해빙 성분모형으로 구성되어 있으며 약 280km의 수평해상도를 갖는데, 해양 성분모형의 경우 위도가 낮아질수록 격자 간격이 좁아지는 가변격자를 갖고 있다. 각 성분모형에 대한 자세한 설명은 Table 1의 전지구(Global) 부분에 나타냈으며, 성분모형의 초기화에 대한 자세한 설명은 Ahn and Lee (2015), Sun and Ahn (2015), Kim and Ahn (2015), Lee *et al.* (2022) 등에서 확인할 수 있다. 예측자료의 활용성을 높이기 위해 해당 시스템은 지역 기후 모형을 이용한 역학적 상세화를 수행하고 있다. 지역 기후 예측모형은 미국 국립대기환경연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)를 중심으로 개발된 Weather Research and Forecasting Model (WRF) version 3을 사용한다(Skamarock *et al.*, 2008). WRF의 입력 및 경계자료는 PNU/RDA CGCM 예측자료가 처방되며, 규모축소 과정에서 사

용된 물리 모수화 방법(scheme)들은 Table 1의 지역(Regional) 부분에 나타났다.

본 시스템을 통한 상세기후예측자료의 생산 과정은 다음과 같다(Fig. 1). 매 월 초 전지구 기후 예측모형인 PNU/RDA CGCM을 구동하여, 약 280km의 해상도를 갖는 1~6개월 미래 기후예측자료를 생산 후 (PNU_RDA_global), 이들 중 네 개의 앙상블 멤버를 WRF의 초기 및 경계자료로 입력한다. 입력된 네 개의 전지구 기후예측자료는 WRF를 통해 한반도를 중심으로 하는 5km 해상도의 자료로 각각 역학적 규모축소하여 매월 말일까지 상세기후예측자료(PNU_RDA_Reg)가 생산된다. 이들 중 일최고, 일최저, 일평균기온, 일사량과 강수량의 일단위 예측자료는 국립농업과 학원에서 생산한 270m 해상도의 소기후모형 재분석자료(Hur *et al.*, 2020)와 Quantile Mapping (QM) 기법으로 보정하여(Cannon *et al.*, 2015; Jo *et al.*, 2022)

Table 1. Description of the PNU/RDA CGCM-WRF Chain system

Component models	Atmosphere	Community Climate Model (CCM3, Kiehl <i>et al.</i> , 1996)	
	Land	Land Surface Model (LSM, Bonan, 1998)	
	Ocean	Modular Ocean Model (MOM3, Pacanowski and Griffies, 1998)	
	Sea-Ice	Elastic-Viscous-Plastic Model (EVP, Hunke and Dukowicz, 1997; Ahn <i>et al.</i> , 2001)	
Global	Horizontal	Atmosphere Spectral truncation T42	
	Resolution	Land	Longitude: 2.8125°, Low latitude: ~0.7°, Mid latitude: ~1.4°, High latitude: ~2.8°
		Ocean	
		Sea-Ice	
Regional	Vertical	Atmosphere 18 hybrid sigma-pressure level (top: 2.917hPa)	
	Schemes	Land	6 levels
		Ocean	40 levels (top: 10m, bottom: 5258m)
		Sea-Ice	3 levels
Regional	Lateral boundary condition	PNU/RDA-CGCM	
	Schemes	Shortwave radiation	Dudhia Scheme (Dudhia, 1989)
		Longwave radiation	RRTM Scheme (Mlawer <i>et al.</i> , 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 <i>et al.</i> , 2006)
		Cumulus	Kain-Fritsch (Kain, 2004)
	Resolution	Microphysics	WSM3 (Hong <i>et al.</i> , 2004)
		Horizontal	5 × 5km
			Vertical

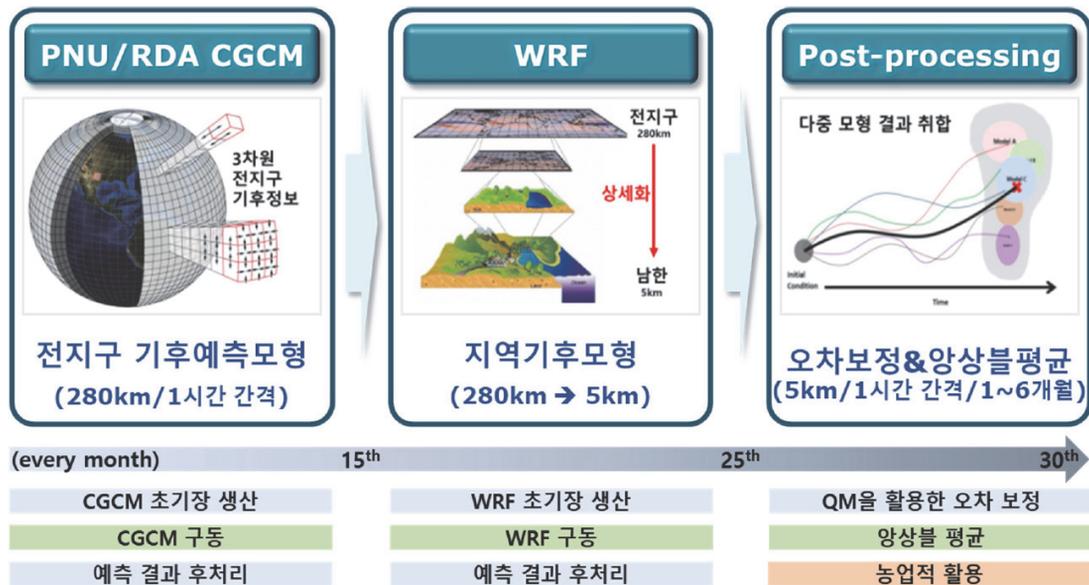


Fig. 1. Processes of the high-resolution regional climate forecast.

													WRF Downscaling
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	SEP	OCT	NOV	DEC	
01RUN (2월 발표)	→	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					
02RUN (3월 발표)		→	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7				
03RUN (4월 발표)			→	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7			
...						...							
10RUN (11월 발표)	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					→	Lead1	Lead2	
11RUN (12월 발표)	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					→	Lead1	
12RUN (1월 발표)	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4	Lead5	Lead6	Lead7					→	

Fig. 2. Forecast coverage range for each initialization month.

최종적으로 상세기후예측자료의 생산을 완료한다. 3월로 예를 들면, 2월의 전지구 관측자료를 전지구기후예측모형의 입력자료로 사용하여(02RUN) 3월 상순에 1~6개월전망(4~9월) PNU_RDA_global을 생산하고, 3월 중순에 이를 WRF의 입력자료로 사용하여 PNU_RDA_Reg를 생산한다(Fig. 2). 예보자료의 갱신 주기는 매 월이며 이는 가장 최신의 전지구 관측자료를 초기장(입력자료)으로 사용하여 예측 정확도를 높이기 위함이다.

III. 제공 자료

PNU_RDA_Reg는 일최고(t2max), 일최저(t2min), 일평균기온(t2), 강수량(prec) 등 총 20종의 변수로 구성되어있다(Table 2). 이 중에는 농업기상 주요 변수인 토양수분(smois), 지중온도(tslb), 일사량(하향단파복사, swdown) 등과 같은 변수들도 포함 되어있다. 또한, 기후전망을 위한 특정 지역이나 기간에 대한 평균값이 아닌 남한지역에 대한 5km 간격의 격자형태(150×245)

Table 2. Variables produced by the PNU/RDA CGCM-WRF Chain system

Variable name	Variable ID	Resolution/Interval	Period	Unit
Mean temperature at 2m	t2	5km/hourly 5km/daily	1990-present	℃
Maximum temperature at 2m	t2max	5km/daily	1990-present	℃
Minimum temperature at 2m	t2min	5km/daily	1990-present	℃
Precipitation	prec	5km/hourly 5km/daily	1990-present	mm
Relativity humidity at 2m	rh2	5km/daily	1990-present	%
Water vapor mixing ratio	qvapor	10level/5km/daily	1990-present	kg/kg
Saturated water vapor pressure at 2m	e2	5km/daily	1990-present	hPa
U-wind at 10m	u10	5km/daily	1990-present	m/s
Maximum U-wind at 10m	u10max	5km/daily	1990-present	m/s
V-wind at 10m	v10	5km/daily	1990-present	m/s
Maximum V-wind at 10m	v10max	5km/daily	1990-present	m/s
Wind speed at 10m	ws10	5km/daily	1990-present	m/s
Maximum wind speed at 10m	ws10max	5km/daily	1990-present	m/s
Wind speed at 2m	ws2m	5km/daily	1990-present	m/s
Maximum wind speed at 2m	ws2max	5km/daily	1990-present	m/s
Net solar radiation	nSR	5km/daily	1990-present	W/m ²
Short-wave downward radiation	swdown	5km/daily	1990-present	W/m ²
Sunshine duration	sund	5km/daily	1990-present	hr
Soil moisture	smois	4layer/5km/daily	1990-present	m ³ /m ³
Soil temperature	tslb	4layer/5km/daily	1990-present	℃

로 생산되며, 지점값을 추출(내삽)하거나 행정구역 단위로 가공하여 제공 가능하다. 시간해상도는 일단위(daily)이며 평균기온과 강수는 시간단위(hourly)로도 6개월까지 생산되기 때문에, 농업뿐만 아니라 수문학 등 다양한 분야에서 응용할 수 있는 장점이 있다. 지면 변수인 토양수분(smois), 토양온도(tslb)의 토양층(soil layer)은 연직 4층(5, 25, 70, 150cm) 로 구성되어 있으며, 대기변수인 수증기혼합비(qvapor)는 연직 10층(1000, 925, 850, 700, 500, 300, 200, 100, 50, 10hPa) 로 구성되어 있다. 포화수증기압(e)은 일평균기온과 Clausius-Clapeyron equation으로 후처리 하여 제공하며, 상대습도는 미국 National Center for Atmospheric Research (NCAR) Command Language (NCL)에서 제공하는 wrf_rh 함수로 계산하여 제공한다. 순태양복사(nSR)은 하향단파복사를 이용하여 계산하고, 2m 풍속(ws2m), 2m 최대풍속(ws2max)은 NCL의 u2_fao56 함수를 이용해 10m 풍속(ws10m), 10m 최대풍속

(ws10max)으로부터 추정하여 제공한다. NCL의 버전은 6.5.0이며, 함수에 대한 정보는 NCL 홈페이지에서 찾아볼 수 있다([https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/wrf_rh.shtml/\(2024. 9. 30\)](https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Built-in/wrf_rh.shtml/(2024. 9. 30)), [https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Crop/u2_fao56.shtml/\(2024. 9. 30\)](https://www.ncl.ucar.edu/Document/Functions/Crop/u2_fao56.shtml/(2024. 9. 30))).

자료의 기간은 1990년 01RUN 2~6월부터 현재(작성일 기준: 2024년 07RUN 8~이듬해 1월)까지이며, 매 월 말일까지 최신의 예측자료로 업데이트 한다.

IV. 장기예측시스템 모의 성능

PNU/RDA 전지구-한반도 앙상블 장기예측시스템의 모의성능을 평가하기 위해, 기온(Fig. 3)과 강수(Fig. 4)에 대한 계절별 기후값(평년 기간 평균)을 관측자료와 비교하였다. 관측(OBS)은 기상청의 61개 종관 기상 관측 지점을 사용하였고, 격자형 자료를 실측 자

료와 비교하기 위해 관측 지점에서 추출한 값을 PNU_RDA_Reg (ASOS), 5km 해상도의 전체 격자 자료의 기후값 분포를 PNU_RDA_Reg (GRID)로 나타내었다. 계절은 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~이듬해 2월)로 정의하였으며, 각 계절 예측에 사용된 초기 조건은 1월(봄), 4월(여름), 7월(가을), 10월(겨울)이며, 각 계절의 시작 전월인 2월(봄), 5월(여름), 8월(가을), 11월(겨울)에 발표된다.

평년 기간(1991~2020년) 동안의 계절 평균 기온을 살펴보면, 남한 지역의 계절별 평균 기온은 봄철 12.05℃, 여름철 23.83℃, 가을철 14.50℃, 겨울철 1.06℃로 나타났으며, 중부내륙 지역에 비해 남해 및 동해안 지역의 겨울철 기온이 상대적으로 높고 여름철 기온이 낮아 연간 기온 변동이 작은 특징을 보였다. 격자형

자료에서 추출한 지점 자료의 경우, 남한 지역의 평균 기온은 봄철 11.58℃, 여름철 23.70℃, 가을철 14.38℃, 겨울철 0.78℃로 관측과 유사하게 나타났으며, 관측과 비교해 -0.12℃에서 -0.47℃ 범위의 과소 모의 편차를 보였다. 5km 해상도의 격자형 상세 장기 기후 예측 자료는 관측 지점보다 해발고도가 높은 지역의 기온까지 포함하고 있어 영역 평균값은 다소 낮게 나타났으나, 미관측 지역의 기후를 지형적 효과를 반영하여 현실적으로 모의하는 것을 확인할 수 있었다.

남한 지역의 계절별 누적 강수량은 봄철 259.66mm, 여름철 726.83mm, 가을철 277.63mm, 겨울철 99.83mm로, 여름철 강수 집중이 뚜렷한 몬순 기후의 특성을 잘 나타낸다. 격자형 자료에서 추출한 지점 자료의 경우, 남한 지역의 계절별 누적 강수량은 봄철

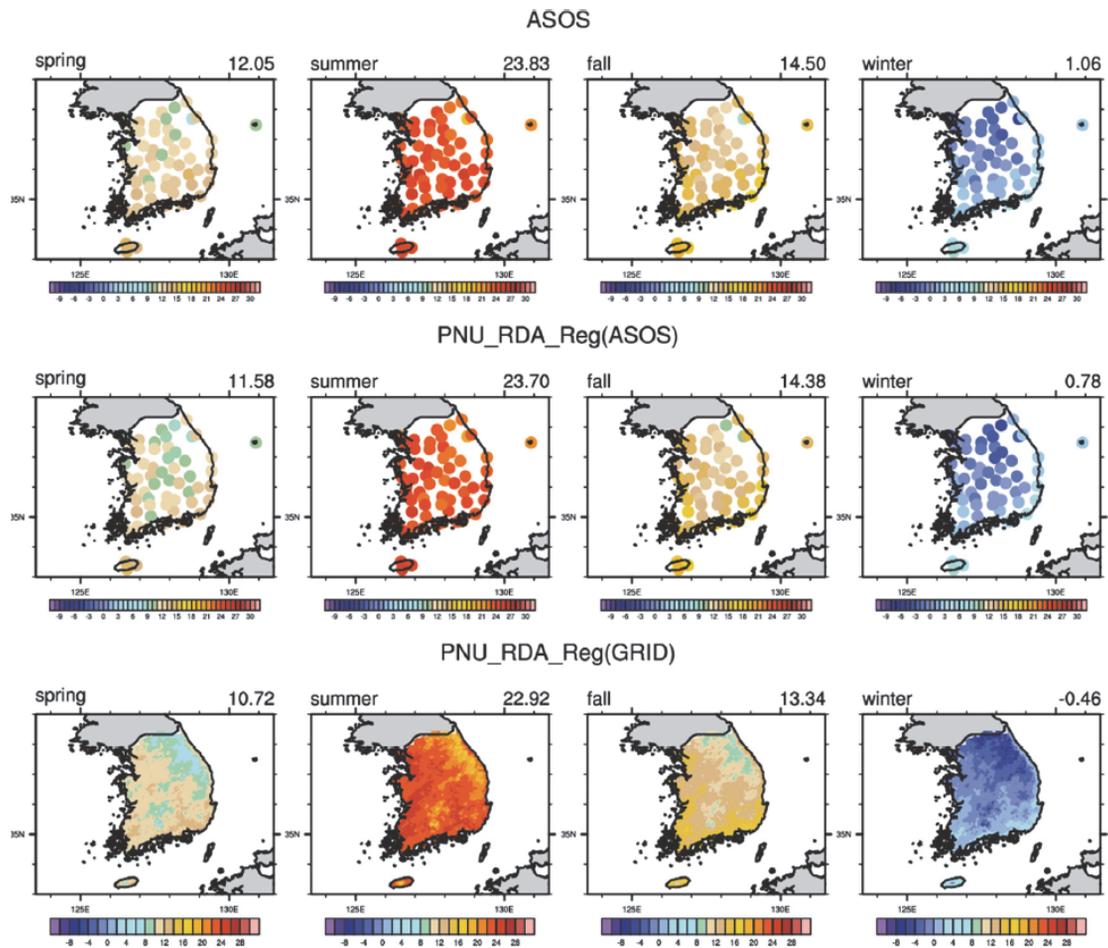


Fig. 3. Climatology of seasonal mean temperature from OBS (upper), PNU_RDA_REG (ASOS, middle) and PNU RDA REG (GRID, lower).

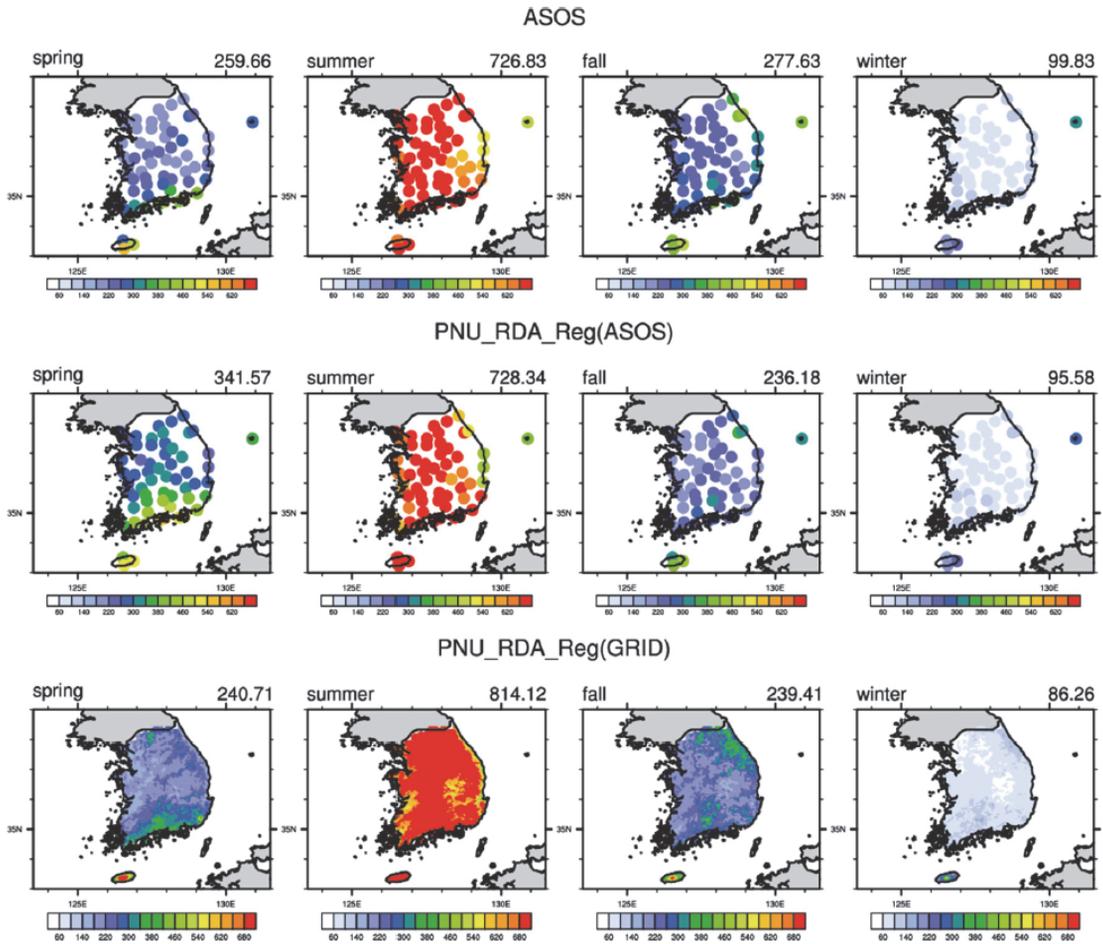


Fig. 4. Climatology of seasonal mean precipitation from OBS (upper), PNU_RDA_Reg (ASOS, middle) and PNU_RDA_Reg (GRID, lower).

341.57mm, 여름철 728.34mm, 가을철 236.18mm, 겨울철 95.58mm로 관측과 유사한 분포를 보였으며, 봄철에는 습윤 편차를 나타냈다. 이러한 모형의 봄철 강수 과대 모의는 강수와 기온의 역학적 관계를 통해 봄철 평균 기온의 과소 모의(Fig. 3)와 연관될 것으로 보인다. 5km 해상도의 격자형 상세 장기기후예측 자료 역시 관측된 계절별 강수 분포를 잘 모의하였으며, 지역적으로는 봄철 남해안 지역, 가을철 강원 영동 지역에서 상대적으로 높은 강수량의 공간분포 특징이 잘 나타났다. 제주도의 경우에도 지역 및 고도에 따라 평년 강수량의 차이가 잘 반영되었다.

이처럼 평년값을 합리적으로 모의한다는 것은 모형에서 생성된 자료가 실제 관측과 유사한 범위의 값을 가짐을 의미하며, 이는 다양한 농업 모형에 적용할 때

충격 없이 활용할 수 있음을 시사한다. 따라서 PNU_RDA_Reg 모형은 시의성이 높은 농업 전망 및 계획 수립에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 자료 수집 방법

생산된 상세기후예측자료는 국립농업과학원 기후 변화평가과에 요청하여 제공받을 수 있으며, 제공 가능한 변수는 3절에 설명하였다. 제공방법은 이메일이나 ftp 등과 같은 방법이 있으며, 자료의 크기나 상황에 따라 협의하여 결정할 수 있다. QM을 활용해 보정된 기온 3종, 강수, 일사량의 자료 형식은 NetCDF이며, 나머지 변수들은 바이너리(Binary) 형식이다. 특정 지

점에 대한 추출(내삽)값은 csv파일로 제공 가능하다. NetCDF 및 바이너리 형식의 자료 크기는 1개월 예측에 대한 일 단위 변수 하나가 약 5MB, 시간단위 변수의 경우 약 110MB이다. 예를 들어 2024년 6월에 예측한 2024년 7~12월의 일단위 최고기온, 최저기온, 일평균기온은 5MB 6개월 3개로 약 90MB이다. 바이너리 형식의 자료는 레코드 없이 unformatted, direct access 방식의 244×149(latitude×longitude)의 배열로 읽을 수 있다.

VI. 예상 활용 분야

국립농업과학원에서는 전지구예측모형의 1~6개월 예측 결과를 기상청, APEC 기후센터, 몽골 기상청 등에 제공하고 있다. 또한 상세기후예측자료는 기상재해 대응, 벼 작황예측, 생물계절 예측 등에 활용하고 있다. 본 자료는 자료의 예측 기간이 비교적 길고 활용성이 높아, 추후 병해충 예측이나 밭가뭄 예측 등의 농업분야뿐만 아니라 수문학과 같은 시간단위의 고해상도 기상예측 자료를 필요로 하는 타 분야에서도 재해 예측 및 대응의 기초자료로 활용 가능 할 것으로 기대된다.

적 요

농촌진흥청 국립농업과학원은 공동연구를 통해 개발한 Pusan National University/Rural Development Administration (PNU/RDA) 전지구-한반도 양상을 장기예측시스템을 운영 중이다. 이 시스템은 1~6개월의 미래 상세기후예측자료를 생산한다. 일최고, 일최저, 일평균기온, 강수량 등 20종의 변수로 구성되어 있으며, 농업예측 분야에서 필요로 하는 일사량, 토양수분, 지중온도 등과 같은 농업기상 변수를 포함한다. 시간해상도는 일단위이며, 공간해상도는 5km 간격의 격자형태로, 지점형태로 값을 추출(내삽)하거나 행정구역 평균하여 활용이 가능하다. 최종 생산된 상세기후예측자료의 계절별 평년 기온 및 강수분포를 살펴봤을 때, 평년값을 관측과 비슷한 값으로 나타냈으며 공간적 분포 또한 상세한 지형적 효과를 반영하여 관측과 유사하게 모의하여 신뢰성을 입증하였다. 따라서 국립농업과학원의 장기(1~6개월) 상세기후예측 자료는 농업 전망 및 계획 수립에 유용한 자료로 활용될

수 있을 것으로 기대된다. 이러한 상세기후예측자료는 국립농업과학원 기후변화평가과를 통해 제공받을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 “신농업기후변화대응체계구축사업(과제번호: RS-2024-00400632)”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 H. J. Kim, 2014: Improvement of 1-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteorological Applications* **21**(2), 415-418. doi:10.1002/met.1372.
- Ahn, J. B., 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**(2), 353-366. doi:10.14191/ATMOS. 2015.25.2.353. (in Korean with English abstract)
- Ahn, J. B., K. M. Shim, M. P. Jung, H. G. Jeong, Y. H. Kim, and E. S. Kim, 2018a: 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., J. Lee, and S. Jo, 2018b: 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).
- 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. doi:10.1175/1520-0442 (1998)011<1307:TLSCOT>2.0.CO;2.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, 2015: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate* **28**(17), 6938-6959. doi:10.1175/ JCLI-D-

- 14-00754.1.
- Choi, M. J., J. B. Ahn, Y. H. Kim, M. K. Jung, K. M. Shim, J. Hur, and S. Jo, 2022: Evaluating the Predictability of Heat and Cold Damages of Soybean in South Korea using PNU CGCM-WRF Chain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **24**(4), 218-233. doi:10.5532/KJAFM.2022.24.4.218. (in Korean with English Abstract).
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Hur, J., J. H. Park, K. M. Shim, Y. S. Kim, and S. 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. doi:10.5532/KJAFM.2020.22.3.12. (in Korean with English Abstract)
- Hur, J., Y. S. Kim, S. Jo, K. M. Shim, J. B. Ahn, M. J. Choi, Y. H. Kim, M. Kang, and W. J. Choi, 2021: Estimation of Waxy Corn Harvest Date over South Korea Using PNU CGCM-WRF Chain. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **23**(4), 405-414. doi:10.5532/KJAFM.2021.23.4.405. (in Korean with English Abstract).
- Hyun, Y. K., J. Lee, B. Shin, Y. Choi, J. Y. Kim, S. M. Lee, H. S. Ji, K. O. Boo, S. Lim, H. Kim, Y. Ryu, Y. H. Park, H. S. Park, S. H. Hyun, and S. O. Hwang, 2022: The KMA Global Seasonal forecasting system (GloSea6) - Part 2: Climatological Mean Bias Characteristics. *Atmosphere* **32**(2), 87-101. doi:10.14191/ATMOS.2022.32.2.087. (in Korean with English Abstract)
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Jo, S., K. M. Shim, J. Hur, Y. S. Kim, and J. B. Ahn, 2020: Future changes of agro-climate and heat extremes over S. Korea at 2 and 3°C global warming levels with CORDEX-EA phase 2 projection. *Atmosphere* **11**(12), 1336. doi:10.3390/atmos11121336.
- Jo, S., J. L. Lee, K. M. Shim, J. B. Ahn, J. Hur, Y. S. Kim, W. J. Choi, and M. Kang, 2022: The Advanced Bias Correction Method based on Quantile Mapping for Long-Range Ensemble Climate Prediction for Improved Applicability in the Agriculture Field. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **24**(3), 155-163. doi:10.5532/KJAFM.2022.24.3.155. (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.
- 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, H. J., and J. B. Ahn, 2015: Improvement in Prediction of the Arctic Oscillation with a Realistic Ocean Initial Condition in a CGCM. *Journal of Climate* **28**(22), 8951-8967. doi:10.1175/JCLI-D-14-00457.1
- 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, H., J. Lee, Y. K. Hyun, and S. O. Hwang, 2021a: The KMA Global Seasonal Forecasting System (GloSea6) - Part 1: Operational System and Improvements. *Atmosphere* **31**(3), 341-359. doi:10.14191/ATMOS.2021.31.3.341. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y. H., M. J. Choi, K. M. Shim, J. Hur, S. Jo, S., and J. B. Ahn, 2021b: 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)
- Kim, E. S., J. B. Ahn, K. M. Shim, J. Hur, S. Jo, M. S. Suh, D. H. Cha, S. K. Min, and H. S. Kang, 2023: Projections of suitable cultivation area for major fruit trees and climate-type in South Korea under representative concentration pathway scenarios using the ensemble of high-resolution regional climate models. *International Journal of Climatology* **43**(10), 4552-4571. Doi:10.1002/joc.8102.
- Kim, E. S., V. N. Kryjov, and J. B. Ahn, 2024: Seasonal prediction and simulation of the cold surges over the Korean Peninsula using a CGCM. *Theoretical and Applied Climatology* **155**(3), 1793-1806. doi:10.1007/s00704-023-04731-7.
- Lee, B. W., 2012: Impact and response of climate change on global agriculture. *World Agriculture* No. 146. Korea Rural Economic Research Institute, 1-16.
- Lee, J., M. I. Lee, and J. B. Ahn, 2022: Importance of ocean initial conditions of late autumn on winter seasonal prediction skill in atmosphere-land-ocean-sea ice coupled forecast system. *Climate Dynamics* **58**, 3427-3440. doi:10.1007/s00382-021-06106-y.
- Meza, F. J., and D. Silva, 2009: Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic Change* **94**(1), 143-156. doi:10.1007/s10584-009-9544-z.
- 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.
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, 1998: MOM 3.0 manual. NOAA/GFDL. Available online at <http://www.gfdl.noaa.gov/ocean-model>
- 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., M. J. Jung, Y. S. Kim, I. T. Choi, H. J. Kim, and K. K. Kang, 2016: Some Meteorological Anomalies and their Relationships with Rice Yield for El Niño Years in South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **18**(3), 143-150. doi:10.5532/KJAFM.2016.18.3.143. (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. Note, NCAR/TN- 475+STR, 125pp.
- 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.
- Sun, J. Q., and J. B. Ahn, 2011: A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Advances in atmospheric sciences* **28**, 1049-1055. doi:10.1007/s00376-011-0122-8.
- Sun, J. Q., 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.
- Yun S. H., J. N. Im, J. T. Lee, K. M. Shim, and K. H. Hwang, 2001: Climate Change and Coping with Vulnerability of Agricultural Productivity. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **3**(4), 220-237. (in Korean with English abstract)