Atmosphere. Korean Meteorological Society Vol. 28, No. 4 (2018) pp. 1-12 https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.1 pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

기 술 노 트 (Technical Note)

# PNU CGCM과 WRF를 이용한 남한 지역 기온 예측성 검증

안중배<sup>1)</sup> · 심교문<sup>2)</sup> · 정명표<sup>2)</sup> · 정하규<sup>1)\*</sup> · 김영현<sup>1)</sup> · 김응섭<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>2)</sup>농촌진흥청 국립농업과학원

(접수일: 2018년 8월 17일, 수정일: 2018년 9월 18일, 게재확정일: 2018년 9월 19일)

# Predictability of Temperature over South Korea in PNU CGCM and WRF Hindcast

Joong-Bae Ahn<sup>1)</sup>, Kyo-Moon Shim<sup>2)</sup>, Myung-Pyo Jung<sup>2)</sup>, Ha-Gyu Jeong<sup>1)</sup>\*, Young-Hyun Kim<sup>1)</sup>, and Eung-Sup Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea <sup>2)</sup>National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, Korea

(Manuscript received 17 August 2018; revised 18 September 2018; accepted 19 September 2018)

**Abstract** This study assesses the prediction skill of regional scale model for the mean temperature anomaly over South Korea produced by Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM)-Weather Research and Forecasting (WRF) chain. The initial and boundary conditions of WRF are derived from PNU CGCM. The hindcast period is 11 years from 2007 to 2017. The model's prediction skill of mean temperature anomaly is evaluated in terms of the temporal correlation coefficient (TCC), root mean square error (RMSE) and skill scores which are Heidke skill score (HSS), hit rate (HR), false alarm rate (FAR). The predictions of WRF and PNU CGCM are overall similar to observation (OBS). However, TCC of WRF with OBS is higher than that of PNU CGCM. The prediction skill of WRF is higher in March and April but lower in October to December. HSS is as high as above 0.25 and HR (FAR) is as high (low) as above (below) 0.35 in 2-month lead time. According to the spatial distribution of HSS, predictability is not concentrated in a specific region but homogeneously spread throughout the whole region of South Korea.

Key words: PNU CGCM, WRF, dynamical downscaling, hindcast, prediction skill

## 1. 서 론

장기 기상 및 기후 예측을 위해서는 열용량이 큰 해양의 상태를 예측하는 것이 매우 중요한데, 해양의 상태는 대기와 해빙 등 지구 아시스템(subsystem)들과 의 상호작용에 의해 결정된다. 따라서 정확한 장기 예 측을 위해서는 지구 아시스템들의 상호작용을 고려하 는 접합대순환모형의 사용이 필수적이다(Meehl and Washington, 1995; IPCC, 2014).

그 동안 중장기 계절예측의 정확성을 향상시키기 위한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 MacLachlan et al. (2015), Jung et al. (2015), Lee et al. (2016)은 GloSea5 (Global Seasonal forecast system version 5)를 이용하여 대기의 주요 경년 변동 모드인 El Niño Southern Oscillation (ENSO), North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO)의 성능을 검증하거나, Indian Ocean Dipole (IOD), 몬순

<sup>\*</sup>Corresponding Author: Ha-Gyu Jeong, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea. Phone: +82-51-514-1932, Fax: +82-51-514-1932 E-mail: hagyu@pusan.ac.kr

Component model	Resolution		Reference		
Atmosphere	Horizontal	Spectral truncation T42	Community Climate Model		
	Vertical	18 hybrid sigma-pressure levels (top: 2.917mb)	[CCM3, Kiehl et al., 1996]		
Land	Horizontal	Spectral truncation T42	Land Surface Model		
	Vertical	6 Levels	[LSM, Bonan, 1998]		
Ocean	Horizontal	$2.8125^{\circ}$ longitude, ${\sim}0.7^{\circ}$ (low lat.), ${\sim}1.4^{\circ}$ (mid lat) and ${\sim}2.8^{\circ}$ (high lat) latitude	Modular Ocean Model - [MOM3, Pacanowski and Griffies, 2000]		
	Vertical	40 levels (top: 10 m, bottom: 5258 m)			
Sea-ice	Horizontal	$2.8125^{\circ}$ longitude, ${\sim}0.7^{\circ}$ (low lat.), ${\sim}1.4^{\circ}$ (mid lat) and ${\sim}2.8^{\circ}$ (high lat) latitude	Elastic-Viscous-Plastic Model		
	Vertical	3 levels	[E v1, Ann and Lee, 2001]		

Table 1.	Description	of PNU-CGCN
----------	-------------	-------------

지수 등과 같은 주요 지수들을 통하여 GloSea5의 6 개월 기후 예측 능력을 평가하였다. 또한, Ahn et al. (2012), Sun and Ahn (2015), Ahn and Lee (2015), Kim and Ahn (2015)는 PNU CGCM (Pusan National University Coupled General Circulation Model)을 이용 하여 12개월 앙상블 예측 시스템을 개발하고 검증하 였으며, AO의 예측성을 평가하였고 지면 초기조건 및 해양 자료동화에 따른 북반구 겨울철 기온과 해수면 온도의 예측성을 연구하였다.

한반도의 경우 산악 지형이 많고 해안선이 복잡하 여 다양한 규모의 기상현상이 복합적으로 나타나므로, 전지구 접합대순환모형(Coupled General Circulation Model, CGCM)을 이용한 기후 예측을 하는 것에 한 계가 있다(Hong and Kanamitsu, 2014). 이러한 한계 를 극복하고자 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM)을 통한 역학적 규모축소법을 이용하여 고해상 도의 기후 자료를 생산하는 방법들이 이용되고 있다. 또한 지역기후모형의 특징을 파악하고 모형을 개선하 는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Im et al., 2008; Lee et al., 2013; Ahn et al., 2016b). Ahn et al. (2014) 과 Lee et al. (2014)은 각각 WRF와 GRIMs-RPM을 이용하여 21세기 한반도 및 동아시아 기후변화를 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 전망하였고, Im et al. (2015)는 HadGEM2-AO를 WRF의 초기조건으로 처방 하여 RCP 시나리오에 따른 남한 지역의 기후를 전망 하기도 하였다. 또한, Ahn et al. (2016b) 및 Lee et al. (2017)은 Multi-RCM을 이용하여 남한 지역이나 동아 시아 지역의 여름철 강수 및 극한 강수 변화를 RCP 시나리오에 적용시켜 전망했다. Im et al. (2017)은 미 래 기후에서의 남한 지역 heat stress 변화에 대하여 연구하기도 하였다. Lee and Hong (2014)은 지역기후 모형의 공간해상도 증가에 따른 한반도 영역의 극한 기후 모의 능력 상승에 대해 연구하였다. 이 밖에도

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)

Ahn et al. (2016a), Hur and Ahn (2017)은 WRF를 사용하여 동아시아 농업기후를 전망하거나 Multi-RCM 을 이용하여 한반도 주요 과수작물의 개화일을 예측 하는 등 지역기후모형은 한반도 영역에 대한 다양한 분야의 연구에서 사용되어왔다.

상세 장기 예측을 수행함에 있어서 CGCM의 해상 도 한계와 RCM의 장기 예측성의 한계를 동시에 극 복하기 위해서는 CGCM과 RCM의 chain을 통한 예 측이 필요하다. Kim et al. (2011)의 연구에서는 AGCM (Atmospheric General Circulation Model)인 GDAPS (Global Data Assimilation and Prediction System)와 RCM인 RegCM3 (Regional Climate Model 3)를 이용 하여 3개월의 계절예측을 수행하였으며 남한지역 겨 울철에 대해 분석하였다. Ratnam et al. (2017)은 Scale Interaction Experiment (SINTEX)-Frontier Research Center for Global Change (FRCGC) version 2.0 (SINTEX-F2v)을 WRF를 통해 역학적 규모축소하여 남반구 여름철 호주의 기후 예측을 하였다. 선행연구 에서는 특정 계절에 대한 예측 및 분석을 수행한 것 이므로 CGCM-RCM chain을 이용하여 매달의 초기조 건으로부터 상세 장기 예측을 실시하고 검증한 연구 는 국내·외적으로 부재하다. 본 연구에서는 PNU CGCM 을 이용하여 적분한 전지구 장기 예측 결과를 지역기 후모형인 WRF의 초기 및 경계조건으로 처방하여 한 반도 지역에 대해 고해상도의 예측 자료를 생산하고, 남한 지역 평균 기온의 예측성능을 살펴보고자 한다.

### 2. 자료 및 방법

#### 2.1 전지구 접합대순환모형

본 연구에서 사용된 전지구 접합대순환모형은 PNU CGCM (Pusan National University Coupled general circulation model; Sun and Ahn, 2011, 2015; Ahn and Lee, 2015)이다. PNU CGCM은 APEC Climate Center (APCC)의 장기예측을 위한 다중모형 앙상블(Multi-Model Ensemble) 시스템의 참여모형이다. 각 성분 모형 인 NCEP Community Climate Model version 3 (CCM3; Kiehl et al., 1996) AGCM, GFDL Modular Ocean Model version 3 (MOM3; Pacanowski and Griffies, 2000) OGCM, Los Alamos National Laboratory (LANL) Elastic-Viscous-Plastic Model (EVP) Sea-Ice Model (Ahn and Lee, 2001)으로 구성된다.

대기 성분 모형 CCM3는 T42의 수평해상도(동서방 향 2.8125°)를 가지며 연직으로는 18층으로 구성된다. 해양 성분 모형 MOM3는 CCM3와 같은 2.8125°의 동 서방향 해상도를 가지고 있고 남북방향으로는 저위도 에서는 ~0.7°, 중위도에서는 ~1.4°, 고위도에서는 ~2.8° 의 가변 격자를 가지고 있으며 연직으로는 40층으로 구성된다. PNU CGCM의 성분 모형 및 해상도에 대 한 정보는 Table 1에 나타내었다.

PNU CGCM의 대기 초기장은 NCEP Reanalysis 2 자료를 이용하여 생산하였으며, AMIP-type 적분을 통 해 지면 초기장을 생산하였다. 해양 초기장은 Global Ocean Data Assimilation System (GODAS)의 자료를 사용했으며, Variational Analysis using a Filter (VAF) 로 해양의 각 40층에 대하여 자료동화를 적용하였다. PNU CGCM에 사용되는 대기, 해양 및 지면 초기장 생산 방법에 대한 자세한 설명은 Ahn and Lee (2015) 에 나타나 있다.

### 2.2 지역기후모형

지역기후모형으로는 WRF version 3.5 (Weather Research and Forecasting model; Skamarock et al., 2008)을 사용하였다. WRF 적분의 수평해상도는 5 km 로 한반도를 포함하는 동서방향 150개, 남북방향 245

Table 2. WRF configuration used in this study.



**Fig. 1.** The topography heights (in meters) of the WRF domain and locations of ASOS (bigger dots) and AWS (smaller dots) in South Korea.

개의 격자로 구성된다(Fig. 1). 사용된 물리 방안은 구 름물리 과정에 WRF Single-Moment 3-class (WSM3) scheme (Hong et al., 2004), 단파복사 모수화에 Dudhia scheme (Dudhia, 1989), 장파복사 모수화에 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) scheme (Mlawer et al., 1997), 지표층에 Monin-Obukhov scheme (Paulson,

	Contents	Description				
	Horizontal dimensions	$150 \times 245$				
	Horizontal resolution	$5 \times 5 \text{ km}$				
Confirmation	Vertical layer (top)	30 eta levels (50 hPa)				
Configuration	Lateral boundary condition	PNU-CGCM				
	Relaxation zone	4				
	Integration time step	PNU-CGCM 4 40 s WSM3 [Hong et al., 2004] Dudhia Scheme [Dudhia, 1989] PDFM c. b. c. b. fl. (2007)				
	Microphysics	WSM3 [Hong et al., 2004]				
	Shortwave radiation	Dudhia Scheme [Dudhia, 1989]				
	Longwave radiation	orizontal resolution $5 \times 5 \text{ km}$ artical layer (top)30 eta levels (50 hPa)ateral boundary conditionPNU-CGCMelaxation zone4tegration time step40 sticrophysicsWSM3 [Hong et al., 2004]portwave radiationDudhia Scheme [Dudhia, 1989]ongwave radiationRRTM scheme [Mlawer et al., 1997]urface layerMM5 Monin-Obukhov Scheme [Paulson, 1970; etc.]and surfaceNoah Land-Surface Model [Chen and Dudhia, 2001]Yonsei University [Hong et al. 2006]				
Schemes	Surface layer	MM5 Monin-Obukhov Scheme [Paulson, 1970; etc.]				
	Land surface	Noah Land-Surface Model [Chen and Dudhia, 2001]				
	Planetary boundary layer	Yonsei University [Hong et al., 2006]				
	Cumulus	Kain-Fritsch [Kain, 2004]				

	5-month lead hindcast							WRF downscaling		
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul		Nov	Dec
01RUN	Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4					
02RUN		Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4				
03RUN			Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4			
04RUN				Lead0	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4		
11RUN	Lead2	Lead3	Lead4						Lead0	Lead1
12RUN	Lead1	Lead2	Lead3	Lead4						Lead0

Fig. 2. Lead-times in 5-month lead hindcast experiment. Left column indicates initialized month and top line indicates predicted month. Lead2~4 (dark-gray shaded) are dynamically downscaled by WRF.

1970), 지면 과정에 Noah Land-Surface Model (Chen and Dudhia, 2001), 행성 경계층에 Yonsei University (YSU) scheme (Hong et al., 2006), 적운 모수화에 Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004)이다(Table 2).

#### 2.3 실험 방법

본 연구에서는 PNU CGCM으로 전구 예측자료를 생산하고 그 결과를 초기 및 경계조건으로 하여 WRF 로 한반도 지역에 대한 역학적 규모축소를 수행함으 로써 남한 지역 상세 예측자료를 생산하였다. PNU CGCM은 매월 초기화하여 5개월의 lead (lead 0~lead 4)로 적분을 수행하였다. 본 논문에서는 1월 초기장으 로부터 예측을 시작(RUN)하는 적분을 01RUN, 2월 초기장으로부터 시작하는 적분을 02RUN 등으로 명 명하기로 한다. PNU CGCM을 이용한 Hindcast는 2007 년부터 2017년까지 11년에 대해 수행하였으며 시간별 (hourly)로 자료를 생산하였다. PNU CGCM의 적분 결 과는 역학적 규모축소를 하는 lead 2~lead 4에 대해서 만 분석하였다(Fig. 2).

WRF는 PNU CGCM의 hindcast 결과 중 매달 시작 된 적분의 lead 2~lead 4에 대하여 역학적 규모축소를 하였으며, 각 lead의 1일부터 1개월의 연속 적분을 하 였고 4일의 spin-up을 수행하였다. 예를 들어 01RUN 의 경우 2007~2017년 3월과 4월, 5월에 대해 WRF 적분을 수행하며, 적분 시작일은 spin-up을 위해 각각 2월 25일(윤년의 경우 26일), 3월 28일, 4월 27일이다. PNU CGCM의 결과로부터 생산된 경계조건은 WRF 적분에 1시간 간격으로 처방되고, 후처리를 통하여 일 별(daily) 자료를 생산하였다. WRF의 적분 결과도 매 달 생산된 lead 2~lead 4에 대하여 분석하였다.

본 연구에서는 남한 지역의 일평균 기온 예측성 검 증을 위하여 기상청의 72개 지점의 ASOS (Automated

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)

Surface Observing System)와 352개 지점의 AWS (Automatic Weather System) 자료를 사용하였다(Fig. 1). 자료 기간은 2007년부터 2017년까지의 일평균 기 온 자료이다. 또한 PNU CGCM과 WRF의 모의성능 검증을 위한 재분석 자료로 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002, 이하 NCEP-R2) 지표면 기온자료를 사용하였으며, 자료 기 간은 2007년부터 2017년이다. 검증을 위하여 시간상 관계수(Temporal Correlation Coefficient; TCC), 평균 제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE) 및 Heidke 기술 점수(Heidke Skill Score; HSS), 적중률 (Hit Rate; HR), 오경보율(False Alarm Rate; FAR) 등 의 Skill Score들을 활용하였으며, 모형 적분 결과 및 관측의 아노말리에 대해 검증하였다. 각 Skill Score들 은 관측자료와 WRF 적분결과의 아노말리를 ±0.43σ (Standard deviation) 기준으로 normal, above normal, below normal으로 나누어 예측성을 평가하였다(Wilks, 1995).

#### 3. 예측성 평가

#### 3.1 PNU CGCM과 WRF의 모의 성능

CGCM-WRF chain에 의한 예측성 검증에 앞서 PNU CGCM과 WRF의 모의 성능을 검증하였다. Figure 3 은 PNU CGCM과 WRF에서 모의된 1, 4, 7, 10월의 평균 기온 공간분포를 NCEP-R2와 함께 나타낸 그림 이다. 각 월은 lead time 2의 적분 결과이며, 2007~2017 년의 Hindcast에 대한 기후값이다. 각 그림의 오른쪽 상단에 표기한 값은 남한 지역 평균기온의 영역 평균 값(33.5-39°N, 125-130°E)이다. 먼저 PNU CGCM의 공 간 분포를 살펴보면(Figs. 3e-h), PNU CGCM에서 모

#### 안중배·심교문·정명표·정하규·김영현·김응섭



**Fig. 3.** Spatial distribution of mean temperature (°C) derived from NCEP-R2 (upper), PNU CGCM (middle) and WRF (bottom) in the WRF domain for the period of hindcast (2007~2017).

의한 1월, 4월, 7월, 10월 남한 지역 평균기온은 각각 1.13°C, 8.40°C, 23.21°C, 15.89°C로 NCEP-R2 (Figs. 3a-d)의 남한 지역 평균기온(1.03°C, 11.01°C, 23.57°C, 16.43°C)과 마찬가지로 계절에 따른 기온 특성이 잘 나타난다. 남북 기온 경도도 잘 나타나며 특히 1월과 10월은 4월과 7월에 비해 위도에 따른 기온 분포가 더 뚜렷하게 나타나는데, 이러한 특징은 NCEP-R2와 일치한다. 하지만 PNU CGCM은 전지구 규모이므로 한반도의 상세한 지형적 특징을 해상도 내에 모의하 는데 한계가 있다. WRF의 결과(Figs. 3i-l)에서는 보 다 상세한 기온 분포가 나타난다. 한반도의 경우 북 동부지역의 개마고원으로부터 동부지역을 따라 태백



**Fig. 4.** Taylor Diagram of surface temperature (°C) for the period of hindcast (2007~2017) during (a) MAM, (b) JJA, (c) SON and (d) DJF for 2~4 month lead-times.

산맥이 위치하는 동고서저의 지형적 특징이 있다. WRF에서 모의된 기온은 위도에 따른 분포뿐만 아니 라 지형적 특성에 따른 분포도 잘 나타난다. 고도 및 위도에 따른 기온의 분포는 겨울철인 1월에서 가장 뚜렷하게 나타나는데, 이러한 특징은 NCEP-R2의 1월 기온 분포(Fig. 3a)와 한국 기후도(KMA, 2012)의 기 온 기후값(1981~2010) 분포에서도 유사하게 나타난다. WRF에서 모의한 4월과 10월의 남한 지역 평균기온 은 각각 8.65°C, 16.56°C로 PNU CGCM에 비해 평균 기온을 높게, 1월과 7월의 남한 지역 평균기온은 각 각 -0.06°C, 21°C로 PNU CGCM에 비해 낮게 모의하 지만 전반적인 기온 분포, 계절적 특성과 남한 영역 평균값이 NCEP-R2 및 PNU CGCM과 유사하게 나타

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)

난다.

Figure 4는 남한 지역 평균기온에 대한 PNU CGCM 과 WRF의 모의성능을 계절별로 나타낸 Taylor 다이 어그램이다. 관측 표준편차에 대한 모형의 표준편차 비(Normalized Standardized Deviations, NSD) 및 TCC (Temporal Correlation Coefficient)를 나타낸 그 림으로 1에 가까울수록 관측과 비슷함을 의미한다. 즉, 그림에서 OBS로 표시되어있는 점에 가까울수록 모의 성능이 우수한 모형이다(Taylor, 2001). TCC의 90% (0.521), 95% (0.602), 99% (0.735) 신뢰수준은 파선으 로 표시하였다. 전반적으로 관측과 비교한 WRF와 PNU CGCM의 모의 수준은 유사하게 나타나나, 관측 과의 상관성은 PNU CGCM보다 WRF에서 다소 높게



**Fig. 5.** The (a) temporal correlation coefficient (TCC) and (b) root mean squared error (RMSE) of WRF prediction result. The upper x-axis indicates initialized month, lower x-axis indicates predicted month. Each line indicates prediction from lead-time 2 to lead-time 4 of initialized month. Filled (open) circle of (a) TCC indicates the values that are statistically significant at the 95% (90%) confidence level.

나타나고, 기온의 변동성은 WRF가 PNU CGCM에 비 해 더 크게 모의한다. 계절별 모의 특성을 살펴보면, 봄철 평균기온의 경우 PNU CGCM과 WRF의 TCC 가 신뢰수준 90% 또는 95% 이상인 지점에 많이 분 포하여 관측과 관련성이 높은 편이고, NSD는 비교적 1 근처에 많이 분포하여 변동성이 관측과 유사하게 나타난다. 여름철 평균기온의 경우 NSD가 6월의 lead 3 WRF 결과를 제외하고 모두 0.75 미만으로 변동성 이 관측에 비해 작고, TCC는 PNU CGCM은 모든 경 우, WRF는 8월의 lead 2를 제외한 모든 경우에 신뢰 수준 90% 이하로 낮게 나타난다. 가을철에도 전반적 으로 기온의 변동성이 관측보다 낮고, TCC도 0.5 이 하로 나타나나, 9월의 경우에는 PNU CGCM과 WRF 의 lead 2 에서 관측과의 상관성이 각각 99% 신뢰수 준 이상인 0.782, 0.734로 12개월 중 가장 높게 나타 난다. 겨울의 평균기온 변동성은 WRF와 PNU CGCM 모두 NSD가 1 이하로 관측보다 작게 나타나고 TCC 도 1월 lead 2를 제외하고 PNU CGCM과 WRF에서 모두 0.5 미만으로 나타난다. 따라서 WRF가 PNU CGCM 결과를 잘 따라가면서 유사하게 모의하나 WRF 에 의해 모의된 자료는 지역적 특성을 잘 반영하여 PNU CGCM에 비해 다소 예측성이 높게 나타나며, 3~5월(봄철)과 9월의 평균기온의 모의 성능이 다른 달 보다 높음을 알 수 있다.

#### 3.2WRF의 예측성 평가

Figure 5는 WRF 아노말리와 관측 아노말리의 TCC 와 RMSE를 나타낸 그림이다. 각각의 실선들은 lead 2에서 lead 4까지의 결과를 연결하여 나타냈으며, TCC (Fig. 5a)의 경우 통계적으로 95% (90%) 유의한 경우 채워진 원(빈 원)으로 표시하였다. 예를 들어 TCC 결 과의 가장 왼쪽의 실선을 살펴보면 01RUN의 TCC를 lead 2(3월)에서 lead 4(5월)까지 나타낸 것이며 lead 2(3 월)의 TCC는 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의함 을 의미한다. RUN 별 예측성을 살펴보면 01RUN, 02RUN, 06RUN, 07RUN 그리고 11RUN의 lead 2에 서 TCC가 통계적으로 90% 이상 신뢰수준으로 높게 나타난다. 02RUN, 06RUN, 07RUN 그리고 08RUN에 서는 lead time이 증가함에 따라 TCC가 낮아졌고, 나 머지 RUN들은 lead time이 증가함에 따라 TCC가 높 아지거나, 불규칙한 패턴이 나타난다. 3~4월을 예측하 는 01RUN과 02RUN에서는 TCC가 비교적 높게 나 타나고, 10~12월을 예측하는 08RUN, 09RUN 그리고 10RUN에서는 TCC가 비교적 낮게 나타난다.



Fig. 6. Same as Fig. 5 but for (a) Heidke Skill Score (HSS), (b) Hit Rate (HR) and (c) False Alarm Rate (FAR).

RMSE (Fig. 5b)는 0에 가까울수록 예측성이 높음 을 의미한다. RUN별 예측성을 살펴보면 03RUN, 04RUN, 07RUN, 08RUN, 09RUN 그리고 10RUN이 lead 2에서 가장 낮은 RMSE를 보인다. 이 RUN들 중 09RUN을 제외한 나머지 RUN들은 lead time이 증가 함에 따라 RMSE가 증가한다. 이 밖에 lead time이 증 가함에 따라 06RUN은 RMSE가 감소하고, 01RUN, 02RUN, 05RUN, 11RUN, 12RUN은 RMSE가 증가하 다가 감소하는 등 불규칙한 패턴을 보인다.

RMSE는 겨울 예측 결과를 제외하면 전반적으로 1.5 미만으로 비교적 낮은 값을 나타낸다. TCC와 RMSE를 종합해보면, WRF 예측성의 변화는 lead time 의 영향 보다는 계절 및 월별(10~12월) 영향이 더 큰 것으로 보인다. 이와 같은 특징은 Ahn et al. (2012) 에서도 유사하게 나타난다.

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)

Figure 6은 WRF의 HSS, HR, FAR을 나타낸 그림 이다. Figure 5와 마찬가지로 각각의 실선들은 lead 2 에서 lead 4까지의 결과를 연결하여 나타냈다. HSS는 정확한 예측일수록 1의 값을 가지며, 0은 no skill을 나타낸다. HSS 역시 RUN별로 살펴보면 01RUN, 02RUN, 04RUN, 06RUN, 07RUN, 08RUN 그리고 11RUN에서 lead 2의 예측성이 lead 3과 lead 4에 비 해 상대적으로 좋게 나타난다. 07RUN과 11RUN은 lead time이 증가할수록 HSS가 감소하는 모습을 보이 고, 01RUN, 02RUN, 04RUN, 08RUN 그리고 12RUN 은 lead 3까지는 HSS 값이 감소하다가 lead 4까지는 HSS 값이 다시 증가하는 모습을 보인다. HSS는 다른 검증 결과들과는 다르게 계절 및 월별 특성이 뚜렷하 게 나타나지 않았고, 03RUN, 05RUN, 09RUN 그리 고 10RUN을 제외한 모든 RUN의 lead 2에서 0.25 이



**Fig. 7.** Spatial distribution of Heidke Skill Score (HSS) for surface temperature in March (top), April (middle) and May (bottom). The values at the top right of each figure are mean HSS.

상으로 예측성이 비교적 높게 나타난다.

Figure 6b-c는 HR과 FAR을 나타낸 그림이다. HR 이 높으면서 FAR이 낮을수록 예측성이 좋음을 의미 한다. Figure 6b와 6c를 살펴보면, HR과 FAR은 05RUN, 09RUN, 10RUN 그리고 12RUN을 제외한 모 든 RUN의 lead 2에서 상대적으로 높은 예측성을 보 인다. 01RUN, 02RUN, 03RUN, 04RUN, 06RUN, 07RUN, 08RUN 그리고 11RUN은 lead time이 증가 함에 따라 HR (FAR)이 낮아(높아)지거나 같다. 나머 지 RUN들의 HR과 FAR은 lead time의 증가에 따라

불규칙한 변화를 보인다. HR (FAR)은 03RUN과 09RUN 등을 제외한 거의 대부분의 RUN에서 0.35 이 상(미만)의 점수를 나타내며, 예측성이 높게 나타난다.

앞의 분석에서 예측성이 가장 높았던 봄철(3~5월) 에 대하여 각 lead 별 HSS의 분포를 Fig. 7에 나타냈 다. 3월(Fig. 7a-c)은 lead 2, lead 3, lead 4 모두 지역 별로 고른 HSS 분포를 보이며, 지점 평균값은 각각 0.26, 0.29, 0.24로 나타난다. 4월(Fig. 7d-f)의 경우 lead 2에서는 대부분의 지역에서 양의 HSS를 보이나, lead 3에서는 경상도 지역 및 강원 북부, 경기도 북서부 지 역을 제외하고는 0 이하의 HSS를 보인다. 그러나 lead 4에서는 강원도 동부 및 내륙지역을 제외하고 0 이상 의 HSS를 보인다. 4월의 지점 평균값은 lead 2~4에 대하여 각각 0.38, -0.02, 0.27으로 나타난다. 5월(Fig. 7g-h)은 앞의 두 달과는 달리 lead 2에서 가장 낮은 HSS가 나타나며 HSS가 높거나 낮은 지점이 남한 전 역에 산발적으로 분포한다. Lead 3의 경우 서부 및 남서부 지방을 제외하고 양의 HSS가 나타난다. Lead 4에서는 일부 0 이하의 HSS가 나타나는 지역이 존재 하나 대부분의 지역에서 양의 HSS를 보인다. 종합적 으로 살펴보면 남한 지역 내의 예측성은 지형의 영향 을 받지 않고 전체 지역에 걸쳐 고르게 나타나는 경 향이 있다. 또한 같은 RUN (Figs. 7a, e, i)인 경우에 도 lead time이 변함에 따라 예측성이 낮은 지역이 특 정 지역에만 국한되어 있지는 않은 것으로 보인다.

#### 4. 요약 및 결론

정확한 장기 예측을 위해서는 대기-해양 상호작용 을 고려하는 접합대순환 모형의 사용이 필수적이다. 하지만 접합대순환모형은 전지구 규모이므로 한반도 의 상세한 지형적 특징을 해상도 내에 모의하는데 한 계가 있다. 본 연구에서는 이를 극복하고자 PNU CGCM으로부터 생산된 자료를 초기 및 경계 조건으 로 처방한 WRF를 통해 한반도 지역에 대한 고해상 도의 예측자료를 매달 준실시간 생산하고 이를 검증 하고자 하였다.

PNU CGCM과 WRF가 모의한 한반도 영역의 평균 기온 공간분포와 Taylor Diagram 분석을 수행한 결과 PNU CGCM과 WRF의 모의 수준이 유사하지만, WRF 결과에서 상세한 지역적 특성이 더 잘 나타났으며 관 측과 상관성을 더 높게 모의하는 것을 확인하였다. PNU CGCM은 남한 지역 평균기온의 계절에 따른 기 온 특성과 남북 기온 경도는 잘 모의하지만, 한반도의 상세한 지형적 특성은 잘 나타나지 않았다. 반면, WRF 에서 모의된 기온은 위도에 따른 분포뿐만 아니라 지 형적 특성에 따른 분포도 잘 나타났으며, PNU CGCM 과 기온의 분포 및 계절적 특성 등이 전반적으로 유

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)

사하게 나타났다. Taylor Diagram 분석에서 관측과 비 교한 WRF와 PNU CGCM의 모의 수준은 전반적으로 유사하게 나타났으나, 관측과의 TCC는 PNU CGCM 보다 WRF에서 다소 높고, 기온의 변동성은 WRF가 PNU CGCM에 비해 관측과 유사하게 모의했다. 계절 별로 분석해본 결과, PNU CGCM과 WRF에서 모의 된 평균 기온의 예측성은 봄철에 가장 높게 나타났다.

TCC와 RMSE를 통해 살펴본 WRF의 RUN별 예측 성은 대체적으로 lead time이 증가함에 따라 불규칙한 패턴을 보였다. 하지만 01RUN의 lead 2(3월)과 02RUN 의 lead 2(4월) 등에서 예측성이 높았고, 10~12월에 대해서는 RUN에 관계없이 예측성이 낮았다. 이는 WRF 예측성의 변화가 lead time의 영향보다 계절 및 월별 영향을 더 크게 받은 것으로 사료된다. Skill Score들을 통해 살펴본 WRF의 RUN 별 예측성은 lead time의 증가에 따라 예측성 변화가 불규칙하게 나타 났지만 대부분의 RUN에서 0.25 이상의 비교적 높은 HSS 값을 나타냈고, 0.35 이상(미만)의 비교적 높은 (낮은) HR (FAR) 값을 나타내면서 예측성이 높게 평 가되었다. 비교적 예측성이 높게 나타났던 봄철 HSS 의 공간분포를 살펴보면 나타나 있다. 예측성이 특정 지역에만 편중되어 있지 않고 남한 전체 영역에 걸쳐 고르게 나타나는 특징이 있었다.

동아시아지역의 기후는 큰 계절 변동성을 가지기 때문에 시간에 따른 편차가 크므로 다른 여러 기후 모델에서도 동아시아지역의 예측성이 낮은 것으로 알 려져 있다(Wang et al., 2009; Lee et al., 2011; Jung et al., 2015). 본 연구에서는 전지구 접합대순환 모형 의 결과를 역학적 규모축소하여 평균 기온에 대한 예 측을 수행한 결과 통계적으로 유의한 예측성이 나타 나기도 하였다. 그러나 예측 영역이 남한 지역을 대 상으로 살펴봤을 뿐만 아니라 분석 기간이 11년(2007~ 2017)으로 기후를 분석하기에는 다소 짧고 적분 초기 장으로부터 2개월 뒤인 lead 2부터 살펴봤기 때문에 한계가 있다. 향후 연구에서 hindcast 기간을 늘리고, 앙상블 예측기법 등을 활용한다면 더 정확하고 높은 예측성능을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01229302)의 지원에 의해 이루어진 것임. 본 논문 의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심 사위원께 감사를 드립니다.

#### 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 2 m 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).
- \_\_\_\_\_, Y.-W. Choi, S. Jo, and J.-Y. Hong, 2014: Projection of 21st century climate over Korean Peninsula: temperature and precipitation simulated by WRFV3.4 based on RCP4.5 and 8.5 scenarios. *Atmosphere*, 24, 541-554, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.541 (in Korean with English abstract).
- J.-Y. Hong, and K.-M. Shim, 2016a: Agro-climate changes over Northeast Asia in RCP scenarios simulated by WRF. *Int. J. Climatol.*, **36**, 1278-1290, doi:10.1002/joc.4423.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2016b: Changes of precipitation extremes over South Korea projected by the 5 RCMs under RCP scenarios. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **52**, 223-236, doi:10.1007/s13143-016-0021-0.
- Bonan, G. B., 1998: The land surface climatology of the NCAR Land Surface Model (LSM 1.0) coupled to the NCAR Community Climate Model (CCM3). 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.
- 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.
- Hong, S.-Y., and M. Kanamitsu, 2014: Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 50, 83-104, doi:10.1007/s13143-014-0029-2.
- \_\_\_\_\_, 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.
- \_\_\_\_\_, Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.

- Hur, J., and J.-B. Ahn, 2017: Assessment and prediction of the first-flowering dates for the major fruit trees in Korea using a multi-RCM ensemble. *Int. J. Climatol.*, 37, 1603-1618, doi:10.1002/joc.4800.
- Im, E.-S., J.-B. Ahn, A. R. Remedio, and W.-T. Kwon, 2008: Sensitivity of the regional climate of East/ Southeast Asia to convective parameterizations in the RegCM3 modelling system. Part 1: Focus on the Korean peninsula. *Int. J. Climatol.*, 28, 1861-1877.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_, and S.-R. Jo, 2015: Regional climate projection over South Korea simulated by the Had-GEM2-AO and WRF model chain under RCP emission scenarios. *Clim. Res.*, **63**, 249-266, doi:10.3354/ cr01292.
- Y.-W. Choi, and J.-B. Ahn, 2017: Worsening of heat stress due to global warming in South Korea based on multi-RCM ensemble projections, *J. Geophys. Res.*, **122**, 11444-11461, doi:10.1002/2017JD026731.
- IPCC, 2014: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- Jung, M.-I., S.-W. Son, J. Choi, and H.-S. Kang, 2015: Assessment of 6-month lead prediction skill of the GloSea5 hindcast experiment. *Atmosphere*, 25, 323-337, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.323 (in Korean with English abstract).
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor. Climatol., 43, 170-181.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1631-1643.
- 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, 152 pp.
- Kim, H. J., and J. B. Ahn, 2015: Improvement in prediction of the arctic oscillation with a realistic ocean initial condition in a CGCM. *Climate Dyn.*, 28, 8951-8967, doi:10.1175/JCLI-D-14-00457.1.
- Kim, M.-H., H.-S. Kang, Y.-H. Byun, S. Park, and W.-T. Kwon, 2011: Construction of the regional prediction system using a regional climate model and validation of its wintertime forecast. *Atmosphere*, **21**, 17-33 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2012: The Climate Atlas of Korea. Korea Meteoro-

logical Administration, 174 pp (in Korean).

- Lee, D.-K., D.-H. Cha, C.-S. Jin, and S.-J. Choi, 2013: A regional climate change simulation over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 655-664, doi:10.1007/ s13143-013-0058-2.
- 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, J.-W., and S.-Y. Hong, 2014: Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model. *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 667-677.
- \_\_\_\_\_, E.-C. Chang, M.-S. Suh, and H.-S. Kang, 2014: Assessment of future climate change over East Asia due to the RCP scenarios downscaled by GRIMs-RMP. *Climate Dyn*, **42**, 733-747, doi:10.1007/s00382-013-1841-6.
- Lee, S.-M., H.-S. Kang, Y.-H. Kim, Y.-H. Byun, and C. H. Cho, 2016: Verification and comparison of forecast skill between Global seasonal forecasting system version 5 and unified model during 2014. *Atmosphere*, 26, 59-72, doi:10.14191/Atmos.2016.26.1.059.
- Lee, S.-S., J.-Y. Lee, K.-J. Ha, B. Wang, and J. K. E. Schemm, 2011: Deficiencies and possibilities for long-lead coupled climate prediction of the Western North Pacific-East Asian summer monsoon. *Climate Dyn.*, **36**, 1173-1188, doi:10.1007/s00382-010-0832-0.
- MacLachlan, C., and Coauthors, 2015: Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system. *Quart. J. Roy. Meteor: Soc.*, **141**, 1072-1084, doi: 10.1002/qj.2396
- Meehl, G. A., and W. M. Washington, 1995: Cloud albedo feedback and the super greenhouse effect in a global coupled GCM. *Climate Dyn.*, **11**, 399-411.

- 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.*, **102**, 16663-16682.
- Pacanowski, R. C., and S. M. Griffies, 2000: MOM 3.0 Manual. NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, USA 08542, 708 pp.
- 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.
- Ratnam, J. V., T. Doi, and S. K. Behera, 2017: Dynamical downscaling of SINTEX-F2v CGCM seasonal retrospective austral summer forecasts over australia. J. Climate, 30, 3219-3235, doi:10.1175/JCLI-D-16-0585.1.
- 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 NCAR/TN-475+STR, 125 pp.
- Sun, J.m and J. B. Ahn, 2011: A GCM-Based Forecasting Model for the Landfall of Tropical Cyclones in China. Adv. Atmos. Sci., 28, 1049-1055.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2015: Dynamical seasonal predictability of the Arctic Oscillation using a CGCM. *Int. J. Climatol.*, **35**, 1342-1353, doi:10.1002/joc.4060.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. J. Geophys. Res., 106, 7183-7192.
- Wang, B., and Coauthors, 2009: Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/Cli-PAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980-2004). *Climate Dyn.*, 33, 93-117.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.

12

한국기상학회대기 제28권 4호 (2018)