한국농림기상학회지, 제23권 제4호(2021) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859) Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 23, No. 4, (2021), pp. 405~414 DOI: 10.5532/KJAFM.2021.23.4.405 ⓒ Author(s) 2021. CC Attribution 3.0 License.

PNU CGCM-WRF Chain을 활용한 남한지역 찰옥수수 수확일 추정

허지나¹, 김용석¹, 조세라^{1*}, 심교문¹, 안중배², 최명주^{2,3}, 김영현², 강민구¹, 최원준¹

¹국립농업과학원 기후변화평가과, ²부산대학교 대기환경과학과, ³부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단 대기환경과학과 (2021년 9월 24일 접수; 2021년 11월 18일 수정; 2021년 11월 26일 수락)

Estimation of Waxy Corn Harvest Date over South Korea Using PNU CGCM-WRF Chain

Jina Hur¹, Yong Seok Kim¹, Sera Jo^{1*}, Kyo Moon Shim¹, Joong-Bae Ahn²,

Myeong-Ju Choi^{2,3}, Young-Hyun Kim², Mingu Kang¹, Won Jun Choi¹

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

²Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan 46241, Republic of Korea

³Department of Atmospheric Sciences, Hasan Valional Oniversity, Fusian 40241, Republic of Rorea ³Department of Atmospheric Sciences, BK21 School of Earth and Environmental Systems,

Pusan National University Pusan 46241, Republic of Korea

(Received September 24, 2021; Revised November 18, 2021; Accepted November 26, 2021)

ABSTRACT

This study predicted waxy corn harvest date in South Korea using 30-year (1991-2020) hindcasts (1-6 month lead) produced by the Pusan National University Coupled General Circulation Model (PNU CGCM)-Weather Research and Forecasting (WRF) chain. To estimate corn harvest date, the cumulative temperature is used, which accumulated the daily observed and predicted temperatures from the seeding date (5 April) to the reference temperature (1,650~2,200°C) for harvest. In terms of the mean air temperature, the hindcasts with a bias correction (20.2°C) tends to have a cold bias of about 0.1°C for the 6 months (April to September) compared to the observation (20.3°C). The harvest date derived from bias-corrected hindcasts (DOY 187~210) well simulates one from observation (DOY 188~211), despite a slight margin of $1.1 \sim 1.3$ days. The study shows the possibility of obtaining the gridded (5 km) daily temperature and corn harvest date information based on the cumulative temperature in advance for all regions of South Korea.

Key words: Air temperature, Waxy corn harvest date, PNU CGCM, WRF, Dynamical downscaling



I. 서 론

기온, 강수, 일사 등 다양한 기후요소는 농작물의 생리·생태적 변화 및 생산성과 밀접한 관계를 가진 다. 이러한 특성 때문에 기후 정보는 농작물의 생육과 수량을 추측하고, 영농활동 계획 수립을 위해 자주 활 용된다. 세계 3대 작물 중의 하나이며, 우리나라 전국 적으로 확대하여 재배되고 있는 옥수수를 예로 들면, 선행연구(RDA, 2019; RDA, 2021; Jung et al., 2012; Shim et al., 2019; Kim et al., 2017)들은 온도가 발아 율, 발아 기간 등 옥수수 생육과 아주 밀접한 관계를 갖고 있으며, 파종기에서 성숙기까지 매일 평균 기온 을 합계한 적산온도(cumulative temperature)가 적정 파종시기, 출수기, 수확일 등 생육시기 추정에 활용될 수 있음을 보였다. 이러한 측면에서 정밀한 기후 예측 정보는 해당 지역의 미래 기후 변동성 및 농작물 생육 환경 변화를 전망하는데 활용될 뿐만 아니라 적산온 도, 생물계절 모형 등 다양한 농업모형과 연계하면 사 전에 농작물의 생육시기를 추정하고, 농업생산 장기계 획 수립을 위한 기초정보로 활용될 수 있다.

미래 기후 정보를 얻기 위해 지난 수십 년 동안 중장 기 기후 예측 정보를 생산하고 정확성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 장기 예측정보를 생산하기 위해 지구 아시스템들(대기권, 지권, 수권, 빙권 등)의 상호 작용을 고려한 전지구 접합대순환 모 형(Coupled General Circulation Model, CGCM)이 활 용되어 왔다. 그러나 CGCM은 낮은 해상도(50km 이 상)에 의해 작고 다양한 지리학적 특성을 가진 우리나 라의 지역적 기후 특성을 모의하고 농업적으로 활용하 는 데는 한계가 있다(Im et al., 2021). 이러한 해상도 의 한계는 한반도의 복잡한 지형적 특성을 반영할 수 있는 지역기후모형(Regional Climate Model, RCM) 을 이용하면 극복할 수 있지만, 모형을 구동하기 위해 서는 측면 경계조건이 필요하다는 물리적 한계가 존재 한다. CGCM의 전지구 장기예측 결과를 RCM의 초기 및 경계조건으로 처방해 주는 CGCM-RCM chain방 법을 이용하면, CGCM의 해상도와 RCM의 물리적 한 계를 동시에 극복할 수 있다(Kim et al., 2019).

본 연구에서는 CGCM-RCM chain 방법을 이용하여 남한 전지역에 대한 5 km 해상도의 6개월 과거 일별 기온 예측자료를 30년(1991-2020) 기간에 대해 생산 하였다. 또한 예측 자료의 농업부문 활용 가능성을 살 펴보기 위해, 파종기부터 수확기까지의 적산온도가 연 차 변동이 적고 비교적 일정 범위를 나타내고 있는 찰옥수수에 대해 기온 예측자료를 활용하여 수확일을 추정하였다(Jung *et al.*, 2012: RDA, 2021; Kim *et al.*, 2017). 즉, CGCM-RCM chain의 미래 기온 예측자료 에 적산온도를 적용하여 남한 전역 찰옥수수 수확일에 대한 6개월 사전 전망 가능성을 살펴보았다.

II. 재료 및 방법

2.1. 기온 예측 방법

본 연구에서는 남한지역에 대한 장기 기온 예측자 료를 생산하기 위해 PNU CGCM (Pusan National University CGCM; Sun and Ahn, 2011, 2015; Ahn and Lee, 2015; Ahn *et al.*, 2018a; 2018b)으로부터 생 산된 초기 및 경계조건을 WRF (Weather Research and Forecasting model; Skamarock *et al.*, 2008) 모형에 처 방하는 PNU CGCM-WRF chain을 이용하였다.

PNU CGCM은 APCC (APEC Climate Center)의 장 기예측 다중모형 앙상블 시스템의 참여 모형 중의 하나 로, 대기, 지면, 해양, 해빙 성분 모형으로 구성되어있는 전지구 접합대순환 모형이다. 대기 성분 모형은 T42 (동 서방향 2.8125°)의 수평 해상도와 18층의 연직 해상도 를 가진다. PNU CGCM의 대기 초기장은 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/ Department of Energy Reanalysis2 (Kanamitsu *et al.*, 2002) 자료를 이용하여 생산하였고, 해양 초기장은 Global Ocean Data Assimilation System (Behringer *et al.*, 1998)의 자료를 이용하여 사용하였다.

WRF v3은 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발된 지역기후모형으로, 한 반도를 중심으로 5km의 수평 해상도와 30층의 연직 해상도를 가지도록 구축되었다. 상세 장기 예측자료를 생산하기 위해 PNU CGCM에서 생산한 전지구 예측 자료를 지역기후모형에 매달 초기화하여 1시간 간격으로 처방하고, 8개월의 lead (lead0~7)로 적분하는 방식으로 생산하였다(Kim *et al.*, 2019). 예측성 검증을 위해서 1991년부터 2020년까지 30년에 대해 과거 예측(Hindcast)을 수행하였으며, 찰옥수수 생육기간이 포함된 봄-여름철(4~9월, lead2~7) 기후를 예측하는 2월 초기장으로부터 시작하는 적분을 이용하였다. 전 지구 모형 및 지역기후 모형에 대한 상세한 정보는 Ahn and Lee(2015)와 Ahn *et al.*(2018a; 2018b)에 나 타나있다.

2.2. 찰옥수수 수확일 예측 방법

본 연구에서는 찰옥수수 생육단계를 추정하기 위해 일평균 관측 및 예측 기온을 파종일로부터 수확 기준 온도까지 생육기간에 대해 적산하는 적산온도 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 찰옥수수 파종일을 우리나 라 전역에 대해 4월 5일로 가정하였으며, 파종일부터 평균 기온(°C)을 누적하였다. 선행연구(Jung et al., 2012; RDA, 2021)에서 제시한 파종부터 수확기까지 의 생육적산온도 범위들(1,700~2,100°C; 1,944~ 2,120°C)을 고려하여 생태형에 따라 3가지 적산온도 로 임의 설정하였다. 즉, 파종일로부터 누적된 적산온 도가 조생종의 경우 1,650°C, 중생종의 경우 1,750°C, 중만생종의 경우 2,200°C이 된 날을 찰옥수수 수확기 로 가정하고, 이 기준값 기반의 수확일 예측 가능성을 살펴보았다. 적산온도 기준값 및 파종일은 품종, 작물 에 따라 변경하며, 다양한 적산온도 기준값 및 파종일 을 예측자료에 적용 가능하다.

2.3. 검증 방법 및 오차 보정 방법

검증을 위해 분석기간(4~9월)에 대한 61개 지점의 남한지역 기온 관측 자료를 수집하였다(Fig. 1). PNU CGCM-WRF chain의 평균 기온과 찰옥수수 수확일에 대한 예측성을 검증하기 위하여 5 km 격자형 자료에



Fig. 1. Topography used for simulations with 5 km resolution. The 61 blue dots denote the location of in-situ observational stations.

서 61개 기상 관측지점과 가장 가까운 격자점들을 선 별하여 관측과 비교 분석하였다. 즉, 61개 지점의 기온 예측자료는 실측된 기온 관측 자료와 비교한 반면, 찰 옥수수 수확일 예측자료는 전국 규모의 수확일 관측 정보의 부재로 관측 기온으로 추정한 찰옥수수 수확일 을 참값으로 가정하고 비교하였다. 따라서 찰옥수수 수 확일의 모의능력은 적산온도 추정 방법에 대한 신뢰성 보다 기온 예측 자료에 대한 신뢰성에 의존한다.



Fig. 2. Spatial distribution of daily mean temperature averaged over 30 years (1991-2020) for 6 months (April to September).

격자형 분포도 분석(i.e., Fig. 2)을 위해, 지점별 관 측 기온 자료를 거리 가중치를 이용하는 이중선형보간 법(bilinear interpolation)을 이용하여 모형과 동일한 5 km 격자 해상도를 가지도록 내삽하였다.

모형 예측 자료에 내포되어 있는 오차를 개선하기 위해, 4~9월까지의 일별 기온 관측자료와 PNU CGCM-WRF chain을 통해 생산된 일별 기온 예측자 료의 월평균 기후값 차이를 모형의 계통적 오차라고 가정하고 예측자료에서 추정한 계통적 오차를 제거하 였다(Eq. 1). 앞으로 그림과 수식에서 관측자료를 OBS, 계통적 오차 보정전 모형 결과를 MDL, 보정후 모형 결과를 MDL_corr로 명명하기로 한다.

 $MDL_corr_{(daily)} = MDL_{(daily)} + (\overline{OBS}_{(monthly)} - \overline{MDL}_{(monthly)})$ (Eq. 1)

여기서 MDL_(monthly)와 OBS_{(monthly})는 1986년부 터 2019년까지 평균한 월평균 기후값이다. 이때 관측 자료의 기후값을 생산하기 위해 1981~1996년까지는 기상청 종관기상관측자료 72개 지점, 1997년 이후부 터는 종관기상관측자료와 자동기상관측자료 424개 지점을 활용하였으며, 역거리 가중법을 이용하여 관측 지점자료를 모형격자로 내삽하였다. 보정후 모형 결과 검증 시 교차검증을 수행하지 않아 월 평균값에서 과 적합(overfitting)될 가능성이 존재하나, 월 단위에서 오차 보정을 수행하여 모형의 일 평균 변동성은 유지 되는 것이 특징이다.

III. 모의능력 평가

3.1. 일평균 기온

찰옥수수 수확일 추정에 앞서, PNU CGCM-WRF chain에 의한 일평균 기온 자료의 예측성을 살펴보았 다. Fig. 2는 모형에서 모의된 분석기간(4~9월)의 평 균 기온 공간분포를 기온 관측 자료와 함께 나타낸 그 림이다. 모형은 2월 출발 런의 lead time 2~7(4~9월) 의 적분 결과를 평균한 결과이며, 1991~2020년의 과 거예측자료(Hindcast)에 대한 기후값이다. 먼저, 분포 도를 정성적으로 평가하기 위해, 선형 보간법을 이용 하여 모형 격자체계로 내삽한 관측, 보정 전 모형, 보 정 후 모형에서 생산한 남한 지역 평균 기온을 5 km 해상도의 공간 분포(Figs. 2a-c)로 나타내었다. 관측 분 포도는 지형적 패턴을 성기게 추정하고 있으며, 남서 쪽 해안가 지역과 경상도 지역(남동쪽)에서 높은 기온 이 나타나고, 상대적으로 북동쪽에 위치한 태백산맥 부 근에서 낮은 기온이 나타나는 특징을 가진다. 보정 전 모형 결과는 고해상도 지면 경계 조건으로부터 처방 받 은 상세한 지형 정보로 인해 지형적 변화에 따른 기온 의 변화를 상세히 모의하고 있으나, 계통적 오차로 인 해 전반적으로 과소모의하는 경향이 나타난다. 그러나 동해안을 따라 나타난 높은 기온은 지형적 효과가 반영 되었을 뿐만 아니라 아니라 5 km 해상도의 모형이 육 지와 해양의 경계선에 있는 좁고 경사진 지역을 추정 할 때 나타난 과대추정 오차도 포함된 것으로 보인다. 보정 후 모형 결과는 음의 오차가 개선되었으며, 관측 에서 나타난 기온의 공간적 패턴들을 잘 모의한다. 평 균 기온을 정량적으로 평가하기 위해, 61개 지점에서 관측된 기온값과 관측 지점에서 가장 가까운 모형 격 자점의 기온값을 비교해보았다(Figs. 2d-f). 61개 지점 평균된 관측, 보정 전 모형, 보정 후 모형의 평균 기온 은 각각 20.3℃, 17.4℃, 20.2℃이다. 보정 전 모형 결 과는 관측과 비교하여 2.9℃ 낮은 반면, 보정 후 모형 결과는 0.1℃ 낮게 나타났다. 즉, 보정 후 모형결과는 관측의 공간패턴을 정성적으로 잘 모의할 뿐만 아니 라, 정량적으로도 평균 0.1℃ 차이로 관측과 유사하게 모의하였다.

Fig. 3은 61개 지점에 대해 평균된 월평균 기온을 나타낸 그래프이다. 관측된 기온은 6개월 평균 20.3℃ 로, 분석 기간 중 4월에 12.3℃로 가장 낮았으며, 8월에 25.3℃로 가장 높았다. 보정 전 모형 결과는 6개월 평



Fig. 3. Monthly mean temperature averaged over 30 years (1991-2020).

균 17.4℃로 관측보다 2.9℃ 낮았으며, 관측과 유사하 게 분석 기간 중 4월에 8.8°C로 가장 낮았으며, 8월에 22.4°C로 가장 높았다. 보정 전 모형은 분석 기간 동안 약 -0.7~-3.5°C의 오차로 모든 월에 대해 과소모의하 는 경향이 나타났으며, 음의 오차는 4~8월에 높게 나 타났으며, 상대적으로 9월에 낮게 나타났다. 즉, 보정 전 모형은 비록 음의 오차가 있지만 관측의 계절내 변 동성을 잘 모의하고 있으며, 계통적 오차는 월별로 다 르게 나타나는 것이 특징이다. 보정 후 모형 결과에서 는 평균 약 -0.1°C의 오차를 가지며, 분석 기간 동안 약 0~-0.2℃의 오차 범위를 가진다. 보정 후 모형은 관측과 유사하게 4월에 12.3℃로 가장 낮았으며, 8월 25.1°C로 점차 높아지다 9월부터 감소하였다. 즉, 보정 후 모형은 통계적 보정을 통해 음의 오차가 개선되었으 며, 관측의 변동성을 잘 모의하는 것으로 나타났다. Fig. 4는 61개 지점의 일평균 기온에 대한 모형의 모의성능을 월별로 나타낸 Taylor 다이어그램으로, 관 측 대비 모형의 표준편차비(Normalized Standardized Deviations) 및 시간상관계수(Temporal Correlation Coefficient)를 나타낸 그림이다. 즉, 표준편차비와 상 관계수가 1에 가까울수록 모형이 관측의 변동성을 잘 모의하는 것을 의미한다. 월별로 살펴보면, 관측과의 시간 상관성은 보정 후 모형 결과가 5월을 제외한 나머 지 달에서 보정 전 모형결과보다 다소 높아졌으며, 표 준편차비는 보정 후 모형 결과가 5월과 9월을 제외한 나머지 달에서 보정 전 모형결과보다 1에서 가까워진



Fig. 4. Taylor diagram of daily mean air temperature over the period 1991-2020 for 6 months (April to September).

것으로 분석되었다. 특히 보정 후(보정 전) 모형 결과의 4월과 9월 상관성이 각각 0.32 (0.29), 0.35 (0.33)으로 6개월 예측기간 중 가장 높게 나타났다(85% 신뢰수준 이상). 선행연구(Ahn et al., 2018a)에서도 PNU CGCM-WRF chain의 평균 기온 모의 성능이 3~5월 봄철과 9월에서 다른 달과 비교하여 높게 나타났으며, 이는 모 형의 계절별 모의 특성인 것으로 분석된다. 보정 후(보 정 전) 모형 결과의 표준편차비는 5월에서 8월까지 0.93 ~1.03으로 1에 가깝게 나타났다. 그러나 이러한 기온 예측성은 출발런에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 PNU CGCM-WRF chain의 기온 예측성은 일반적으로 (단, 9월 출발런 제외) 예측 기간(lead time)이 길수록 오차제곱근이 증가하는 특징이 있어(Ahn et al., 2018a), 최신의 초기자료를 사용할수록 해당 월의 예측성이 높 아질 수 있다. 전반적으로 보정 전과 보정 후 모형은 표준편차비와 상관계수가 유사하게 나타나, 모형의 모 의 수준이 서로 유사한 것으로 나타났다. 즉, 본 연구에 서 사용된 통계적 보정 방법이 모형 고유의 시간적 변 동성을 변화시키지 않고 평균값만 변화시키기 때문에, 보정 전·후 모형 결과는 상관계수 및 표준편차비 측면 에서 모의 능력이 유사하게 나타난다.

3.2. 찰옥수수 수확일

관측 및 예측된 일별 기온 자료를 이용하여 5km 해 상도로 찰옥수수 수확일 분포도를 추정하였다. Fig. 5 는 모형에서 추정한 찰옥수수 수확일을 나타낸 것으로 오른쪽 상단의 숫자(Ave)는 남한지역 평균 수확일 (DOY)을 의미한다. 모형 결과들은 지형적 효과가 반 영되어 높은 산맥이 존재하여 상대적으로 온도가 낮은 북동쪽은 찰옥수수 수확일이 늦고, 저위도에 위치하여 상대적으로 평균 온도가 높은 남부지역은 찰옥수수 수 확일이 빠른 분포도 패턴을 가진다. 특히, 각 도의 면적 대비 비율로 찰옥수수가 가장 많이 생산되는 강원도의 경우, 복잡한 지형적 특성 때문에 지역적 변이가 다른 지역보다 큰 특징을 보였다. 전반적으로 모형으로 추정 된 찰옥수수 수확일은 기온의 공간적 분포도(Fig. 2)와 유사하게 나타났다. 조생종의 경우, 남한지역 평균 수 확일이 보정 전 및 보정 후 모형결과에서 DOY 204.9 (7월 중하순)과 DOY 192.9 (7월 중순)로 각각 나타났 다. 중생종의 경우, 남한지역 평균 수확일이 보정 전 및 보정 후 모형결과에서 DOY 209.6 (7월 하순)과 DOY 197.3 (7월 중하순)로 각각 나타났다. 중만생종 의 경우, 남한지역 평균 수확일이 보정 전 및 보정 후



Fig. 5. Spatial distribution of the gridded waxy corn harvest date averaged over 30 years (1991-2020) for early, medium, mid-late maturing cultivars.

모형결과에서 DOY 230.0 (8월 중순)과 DOY 216.1 (8월 상순)로 각각 나타났다. 보정 전 모형 결과는 음의 오차가 포함되어 있어 보정 후 모형 결과보다 수확일을 약 12~14일 정도 늦게 모의하였다.

정량적으로 평가하기 위해, 관측 지점과 가까운 격 자점의 기온 자료를 이용하여 찰옥수수 수확일을 추정 하고 기온 관측 자료로 추정한 찰옥수수 수확일과 비교 하였다(Fig. 6). 관측으로 추정한 수확일의 경우, 조생 종은 평균 DOY 188.4 (7월 상순), 중생종은 DOY 192.7 (7월 중순), 중만생종은 DOY 210.8 (7월 하순) 로 나타났으며, 태백산백과 소백산맥으로 인한 고지대 는 상대적으로 늦게 추정하였다. 보정전 모형자료는 일 기온 오차가 적산온도에 반영되어 관측자료와 비교하 여 조생종은 약 14.4일, 중생종은 약 14.8일, 중만생종 은 약 16.9일 늦게 찰옥수수 수확일을 추정하였다. 보 정 후 모형자료는 음의 오차가 개선되어 관측자료와 비 교하여 조생종은 약 1.1일, 중생종은 약 1.2일, 중만생 종은 약 1.3일 늦게 찰옥수수 수확일을 추정하였다. 또 한 보정 후(보정 전) 모형 결과의 경우, 61개 지점 평균 수확일은 5 km 해상도 기반 남한지역 평균 수확일과 약 5.6~6.6일(2.1~2.3일) 차이가 발생하는데, 이는 고 도차에 기인한 것으로 보인다. 즉, 관측 지점들이 저지대 에 위치하여 평균 94.8 m의 평균 고도에 위치한 반면, 모형에 처방된 지형은 185.5 m의 평균 고도를 가진다.

연변동성을 살펴보기 위해, 61개 지점에 대한 평균 찰옥수수 수확일을 30년 기간에 대해 시계열로 살펴보 았다(Fig. 7). 관측의 경우, 조생종, 중생종, 중만생종의 수확일은 각각 약 2.5, 2.5, 2.9일의 표준편차를 가지고, 약 -1.4 days/10yrs -1.6 days/10yrs, -1.7 days/10yrs (99% 신뢰수준)의 경향성을 가진다. 즉, 모든 출수생태 형에서 수확일은 30년 동안 평균적으로 2~3일 이내로 변화하고, 최근 다소 빨라지는 경향이 나타난다. 보정 전 모형결과는 2.2~2.4일의 표준편차를 가지고, -1.3 ~-1.4 days/10yrs (98% 신뢰수준)의 경향성을 가진다. 보정 전 모형 결과는 수확일의 시간 경향성과 연 변동 폭을 유사하게 모의하나, 전반적으로 약 15일 이상으 로 늦게 모의하는 것으로 나타났다. 보정 후 모형결과 는 약 1.8일의 표준편차를 가지고, -1.0~-1.3 days/10yrs (98% 신뢰수준)의 경향을 가진다. 통계적 보정 후, 관 측자료 대비 수확일의 오차는 감소하였지만 연 변동폭 (표준편차)와 경향성이 감소하였다. 즉, 통계적 보정은 절대량은 보정이 되는 반면, 변화폭을 감소시키는 특징 이 있다.

출수생태형에 따른 오차제곱근을 지점별로 살펴보



Early maturing cultivar Medium maturing cultivar Mid-late maturing cultivar

Fig. 6. Spatial distribution of the waxy corn harvest date at 61 stations averaged over 30 years (1991-2020) for early, medium, mid-late maturing cultivars.



Fig. 7. Annual variation of waxy corn harvest date over 30 years (1991-2020).

았다(Fig. 8). 조생종, 중생종, 중만생종에 대한 보정 전 모형 결과의 평균 오차제곱근은 각각 16.1, 16.5, 18.7 일이고, 보정 후 모형 결과의 평균 오차제곱근은 각각 3.5, 3.5, 4.0일로 나타났다. 보정 전 모형 결과에서는 경기도 및 강원도 일부 지역, 남해 인근 지역에서 오차 가 크게 나타났다. 통계적 보정 결과, 수확일에 대한 오차는 모든 지점에 대해 감소했으며, 특히 오차제곱근 이 높았던 일부 지역에서 많이 감소하였다. 또한 고온 요구량이 더 많은 중만생종으로 갈수록 누적 오차가 커 서 오차제곱근이 커지는 것으로 나타났다.



Fig. 8. Root Mean Squared Error (RMSE) of predicted waxy corn harvest date over 30 years (1991-2020).

IV. 고찰 및 결과

본 연구에서는 30년(1991-2020)에 대한 6개월 과거 기온예측 자료를 적산온도에 적용하여 남한전역에 대 한 찰옥수수 수확일을 추정하고 평가하였다. PNU CGCM-WRF chain으로 예측된 분석기간(4~9월)의 기온은 지형효과를 잘 반영하고 있지만, 평균 17.4℃ 로 2.9℃ 낮게 모의하였다. 통계적 보정이 적용된 모형 결과는 음의 기온 오차가 0.1℃로 감소하였으며, 관측 에서 나타난 공간적 패턴을 잘 모의하였다. 모형결과로 추정한 수확일은 기온의 과소모사 경향에 의해 관측으 로 추정한 수확일보다 약 14.4~16.9일 늦게 모의되었 다. 본 연구에서 사용된 통계적 보정 방법은 모형의 수 확일 지연 오차를 약 1.1~1.3일로 감소시켜 정량적으 로 관측과 유사하게 모의할 수 있도록 도왔으나, 시간 적 변동성을 감소시켰다.

기온뿐만 아니라 강수량, 일조시간(Liu et al., 2013) 등 다양한 기후요소도 찰옥수수의 생육에 영향을 미치 기 때문에, 기온만으로 남한 전역에 대한 찰옥수수 생 육단계를 정확히 추정하기에는 한계가 있다. 그러나 Kim et al.(2017)에서는 찰옥수수의 생육에는 출사기 까지 적산온도가 가장 중요한 요인으로 작용하였다고 밝힌 바 있으며, Jung et al.(2012)은 옥수수의 재배기 간 및 생육기간은 파종 시기에 따라 조금씩 차이는 있 으나 적산온도가 가장 크게 작용하였다고 밝힌 바 있 다. 따라서 찰옥수수와 같이 적산온도가 생육에 큰 영 향을 미치는 작물의 경우, 본 연구에서 사용된 적산온 도 방법에 품종 및 작물에 따라 적합한 파종시기와 적 산온도 기준값을 설정한다면 다양한 작물에 대한 생육 시기 정보를 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PNU CGCM-WRF chain의 미래 기온 예측자료에 적 산온도 생육추정 방법을 적용하여 찰옥수수 수확일을 추정함으로써 기후 예측자료의 농업부문 활용성을 확 인하였다. 또한 미래 예측 기상 정보를 기반으로 남한 전지역에 대한 5km 격자형 찰옥수수 수확일 분포도를 전망하고 있다는 점에서, 경과 기상 정보를 기반으로 분석·추정한 기존 연구들과는 차별성이 있다. 다만, 남한 전역에 대한 출수생태별 찰옥수수 수확일에 대한 관측 자료의 부재로 정밀한 예측성 검증에는 한계가 있 으며, 향후 정확한 관측정보를 확보한다면 연구의 신뢰 성을 더 확보할 수 있을 것으로 보인다.

적 요

본 연구에서는 30년(1991-2020)에 대한 PNU CGCM -WRF chain에서 생산된 6개월 과거예측 자료를 이용 하여 남한 전역에 대한 찰옥수수 수확일을 추정하고 평 가하였다. 찰옥수수 수확일을 추정하기 위해 61개 지 점의 기온 관측 자료와 모형의 기온 예측 자료를 파종 일부터 수확 기준 온도까지 적산하는 적산온도 방법을 이용하였다. 평균 기온의 경우, 모형예측 자료는 분석 기간(4~9월)에 대해 관측과 비교하여 약 2.9°C도 정 도 기온을 과소모의하였다. 이러한 모형의 기온 오차가 적산온도에 반영되어, 관측으로 추정한 수확일과 비교 하여 모형은 약 14.4~16.9일 늦게 찰옥수수 수확일을 모의하였다. 오차가 개선된 모형 결과는 기온 예측 자 료의 평균 오차가 0.1℃로 감소되고, 수확일 지연이 약 1.1~1.3일로 감소되어 정량적으로 관측과 유사하게 모의하였다. 따라서, 본 연구에서는 PNU CGCM-WRF chain의 미래 기온 예측자료에 적산온도 생육추정 방 법을 적용하여 찰옥수수 수확일을 추정함으로써 기후 예측자료의 농업부문 활용성을 확인하였다. 찰옥수수 와 같이 적산온도가 생육에 큰 영향을 미치는 작물의 경우, 본 연구에서 사용된 방법에 적합한 파종시기와 적산온도 기준값을 설정한다면 다양한 작물에 대한 생 육시기 정보를 6개월 사전에 예측하고 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 "신농업기후변화대응체계구 축사업(과제번호: PJ0148912021)"의 지원으로 수행되 었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J. B., and J. L. 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. (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, 479-490. (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, 509-520. (in Korean with English abstract).
- Behringer, D. W., M. Ji, and A. Leetmaa, 1998: An

improved coupled model for ENSO prediction and implications for ocean initialization. Part I: The ocean data assimilation system. *Monthly Weather Review* **126**, 1013-1021.

- Im, E. S., S. Ha, L. Qiu, J. Hur, S. Jo, and K. M. Shim, 2021: An evaluation of temperature-based agricultural indices over Korea from the highresolution WRF simulation, *Frontiers in Earth Science* 9, 357.
- Jung, G. H, J. E. Lee, J. H. Seo, S. L. Kim, D. W. Kim, J. T. Kim, T.-Y. Hwang, and Y. U. Kwon, 2012: Effects of seeding dates on harvesting time of double cropped waxy corn. *Korean Journal of Crop Science* 57(2), 195-201.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEPDOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bulletin American Meteorological Society 83, 1631-1643.
- Kim, M. J., G. H. Jung, S. K. Kim, J. E. Lee, W. T. Jeon, K. B. Shim, M. T. Kim, K. S. Woo, Y. U. Kwon, and S. Heu, 2017: Effects of growing degree days on growth and yield of maize depending on the sowing date. *Korean Journal of Crop Science* 62(3), 214-223. (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. (in Korean with English abstract)
- Liu, Y., R. Xie, P. Hou, S. Li, H. Zhang, B. Ming, H. Long, and S. Liang, 2013: Phenological responses of maize to changes in environment when grown at different latitudes in China. *Field Crops Research* 144, 192-199.
- RDA (Rural Development Administration), 2019: Agricultural technology guide 35: CORN, Rural Development Administration, 1-169.
- RDA (Rural Development Administration), 2021: Accumulated temperature required for silking and harvesting of major varieties of waxy corn. NONGSARO (Portal for agricultural technology)
- Shim, K. B., J. K. Lee, B. I. Koo, M. N. Shin, and S. T. Yoon, 2019: Determination of adaptable sowing dates of waxy corn using growing degree days in the central northern area of Korea. *Korean Journal of Crop Science* 64(3), 269-277 (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.

Sun, J., and J. B. Ahn, 2011: A GCM-based forecasting model for the landfall of tropical cyclones in China. *Advances Atmospheric Sciences* **28**, 1049-1055.

Sun, J., and J. B. Ahn, 2015: Dynamical seasonal predictability of the Arctic Oscillation using a CGCM. *International Journal of Climatology* 35, 1342-1353.