

WRF를 이용한 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하의 21세기 벚, 복숭아, 배 개화일 변화 전망

허지나¹⁾ · 안중배^{2)*} · 심교문³⁾

¹⁾Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore,

²⁾부산대학교 지구환경시스템학부, ³⁾농촌진흥청 국립농업과학원

(접수일: 2015년 9월 8일, 수정일: 2015년 9월 20일, 게재확정일: 2015년 9월 20일)

Projection on First Flowering Date of Cherry, Peach and Pear in 21st Century Simulated by WRFv3.4 Based on RCP 4.5 and 8.5 Scenarios

Jina Hur¹⁾, Joong-Bae Ahn^{2)*}, and Kyo-Moon Shim³⁾

¹⁾Tropical Marine Science Institute, National University of Singapore, Singapore

²⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

³⁾National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, Korea

(Manuscript received 8 September 2015; revised 20 September 2015; accepted 20 September 2015)

Abstract A shift of first flowering date (FFD) of spring blossoms (cherry, peach and pear) over the northeast Asia under global warming is investigated using dynamically downscaled daily temperature data with 12.5 km resolution. For the study, we obtained gridded daily data with Historical (1981~2010), and Representative Concentration Pathway (RCP) (2021~2100) 4.5 and 8.5 scenarios which were produced by WRFv3.4 in conjunction with HadGEM2-AO. A change on FFDs in 21st century is estimated by applying daily outputs of WRFv3.4 to DTS phenological model. Prior to projection on future climate, the performances of both WRFv3.4 and DTS models are evaluated using spatial distribution of climatology and SCR diagram (Normalized standard deviation-Pattern correlation coefficient-Root mean square difference). According to the result, WRFv3.4 and DTS models well simulated a feature of the terrain following characteristics and a general pattern of observation with a margin of 1.4°C and 5~6 days. The analysis reveals a projected advance in FFDs of cherry, peach and pear over the northeast Asia by 2100 of 15.4 days (9.4 days), 16.9 days (10.4 days) and 15.2 days (9.5 days), respectively, compared to the Historical simulation due to a increasing early spring (February to April) temperature of about 4.9°C (2.9°C) under the RCP 8.5 (RCP 4.5) scenarios. This indicates that the current flowering of the cherry, peach and pear over analysis area in middle or end of April is expected to start blooming in early or middle of April, at the end of this century. The present study shows the dynamically downscaled daily data with high-resolution is helpful in offering various useful information to end-users as well as in understanding regional climate change.

Key words: RCP scenario, cherry first flowering date, peach first flowering date, pear first flowering date, regional climate projection

*Corresponding Author: Joong-Bae Ahn, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609735, Korea.
Phone : +82-51-514-1932, Fax : +82-51-514-1932
E-mail : jbahn@pusan.ac.kr

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 최근 제 5차 평가 보고서(Fifth Assessment Report, AR5)를 통해, 여러 증거(예: 대기중 온실기체의 농도, 기온 상승 등)에 의해 기후 시스템의 변화는 자명한 사실이며, 이러한 기후변화가 인간계뿐만 아니라 자연계까지 광범위하게 영향을 미친다고 발표하였다. 즉, 기후변화가 다양한 종의 계절 활동, 개체 수, 종의 상호 작용에도 영향을 미쳤으며, 작물의 수확량에는 일반적으로 부정적인 영향을 준다고 평가하였다. 또한 IPCC는 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 기후 변화 전망을 통해 표면 온도가 모든 배출 시나리오에서 21세기 전반에 걸쳐 상승할 것이며, 지역적으로 상이한 패턴과 영향을 미칠 것이라고 추정하였다(IPCC, 2013). 따라서 기후 시스템의 변화가 자명한 현실점에서 미래 기후 변화에 대한 대응책 마련을 위해 기후 변화의 지역적인 이해와 이에 의한 영향 평가가 요구된다.

우리나라에서도 기후변화에 대응하기 위해 국립기상과학원은 RCP 시나리오를 적용한 전지구 기후 변화 자료를 산출하고 배포하였다. 자세히 설명하면, 국립기상과학원은 The phase five of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) 사업을 통해서 전 지구 대기-해양 결합모형인 Hadley Centre Global Environmental Model version 2 - Atmosphere and Ocean (HadGEM2-AO)을 이용하여 Historical(현재 기후) 및 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5(미래 전망) 시나리오별 전지구 기후 자료를 생산하였다(Ahn et al., 2014). 이렇게 생산된 전지구 기후 변화 정보는 전구 및 중관 규모의 대기특성, 해수 온도의 분포, 에너지 및 물 순환의 변화 등 다양한 연구 분야에서 유용하게 활용되고 있다(e.g., Baek et al., 2013; Kim et al., 2013; Wie et al., 2014).

HadGEM2-AO 자료는 이러한 높은 활용성에도 불구하고, 수 백 km ($1.875^{\circ}\text{lon} \times 1.25^{\circ}\text{lat}$)의 저해상도 격자 체계 때문에 지역적인 변동성 및 다양한 영향 평가에 활용되기에는 여전히 한계가 있다고 지적된다. 특히 국지적인 기후 요소에 영향을 받는 생물 계절(Phenology)을 분석하기 위해서는 시공간적으로 조밀한 기후 자료가 필요하다(Chung et al., 2009; Hur et al., 2014; Hur and Ahn, 2015). 이러한 기상학, 농학, 보건학 등 다양한 분야의 요구에 의해 국립기상과학원은 최근 3년에 걸쳐 HadGEM2-AO 자료를 지역기후모형의 입력자료로 활용하여 한반도 중심의 12.5 km 해상도의 상세 기후 자료를 시나리오별로 생산하였다(Ahn et al., 2013, 2014).

생물계절 중에서 개화일은 기후에 민감하게 반응하고 쉽게 관측되며, 특히 장기간의 기록이 존재한다는 점에서 기후변화 연구에서 생물지표로서 많이 활용된다(Menzel and Fabian, 1999; Menzel and Dose, 2005). 이러한 이유로 RCP 시나리오에 따른 한반도 봄꽃 개화일 전망에 관한 연구가 최근에 수행되었다. Hur et al. (2014)과 Hur and Ahn (2014)는 CMIP5에 참여한 5~6개 모델에서 생산된 일별 RCP 4.5와 8.5 자료를 통계적으로 규모축소하여 봄꽃 개화일 변화를 전망하였으며, Kim et al. (2013)는 역학적 규모축소를 통해 생산된 12.5 km 해상도의 RCP 8.5 자료를 이용하여 봄꽃 개화일의 변화를 추정하였다. 그러나 Hur et al. (2014)과 Hur and Ahn (2014)는 지점별 기후 자료를 사용하고, Kim et al. (2013)은 30년 평균된 과거 자료와 RCP 8.5 시나리오 자료만 분석에 활용하고 있다는 점에서 다양한 시나리오에 대한 상세 격자형 기상자료의 분석이 부족하며, 개화일의 시계열 분석과 자료의 신뢰성 분석이 추가로 필요하다.

따라서 본 연구에서는 HadGEM2-AO 자료에 역학적 규모축소 기법을 적용하여 생산된 격자형 Historical (1981~2010), RCP 4.5, 8.5 (2021~2100) 자료를 이용하여 기후변화에 따른 우리나라의 봄꽃(벚, 복숭아, 배) 개화일 변화를 시공간적으로 살펴보았으며, 오차 분석을 통해 자료의 신뢰성도 함께 분석하였다. 본 연구는 국립기상과학원에서 생산한 5종의 상세 기상자료 중에서 부산대학교와 함께 생산한 Weather Research and Forecasting (WRF) v3.4 결과에 초점을 두었으며, 이 자료의 농업적 활용 가능성을 살펴보는데 의의가 있다.

2. 자료 및 실험 방법

2.1 상세 기후 자료

본 연구에서는 상세한 미래 기후 변화를 전망하기 위해 HadGEM2-AO 자료를 WRF v3.4의 초기 및 경계조건으로 처방하여 12.5 km의 해상도로 역학적 규모축소된 이른 봄철(2~4월) 기간의 격자형 일 평균 기온 자료를 이용하였다. 2월부터 4월까지의 일 평균 기온이 벚, 복숭아, 배 개화일과 강한 양의 상관을 가진다는 Hur and Ahn (2014)과 Jeong et al. (2011)의 연구 결과를 바탕으로 이 기간을 이른 봄철로 설정하고 분석 하였다. 본 연구에서 사용된 Historical (1981~2010) 자료와 RCP 4.5와 8.5 (2021~2100) 자료는 기존의 Ahn et al. (2013, 2014)의 연구자료를 일별로 산출하여 활용하였다. 자료 생산 방법을 간단히 설명하면, HadGEM2-AO를 이용하여 생산한 전지구 대기 변수는 $1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 의 수평해상도와 6시간 간격의 시간해상도를 가지며, 이 자료는 중간 과정(intermediate format)을 거쳐 WRF v3.4의 입력자료로 활용된다.

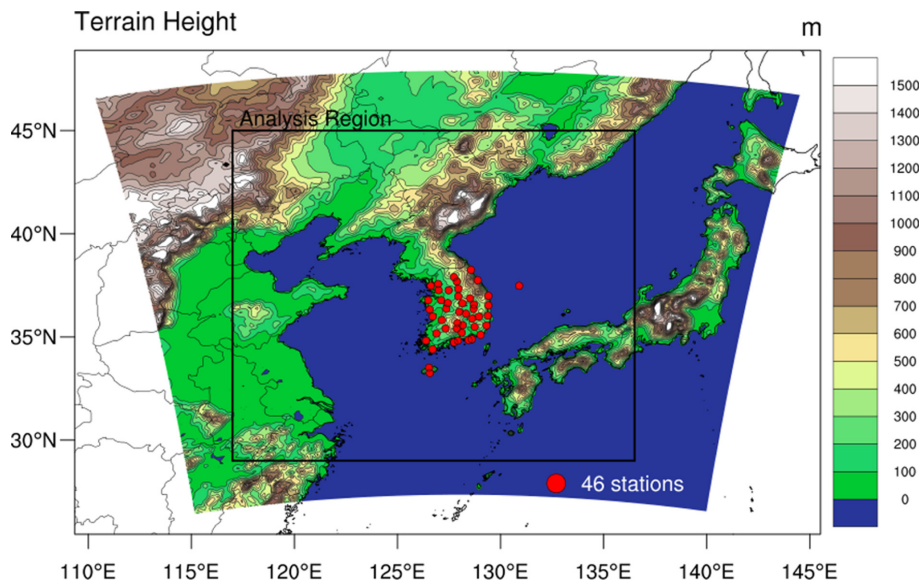


Fig. 1. Locations of 46 stations (red dots) observing temperature and first flowering dates of cherry, peach and pear overlaid with terrain height (unit: meter) over WRF v3.4 domain.

WRF v3.4은 12.5 km(격자수 201 × 180), 3시간 간격의 해상도를 가지도록 구축하였고, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 Lambert-Conformal 지도 투영법에 기준 경도를 37.5°, 127.5°로 설정하여 한반도 중심의 장기 간 적분 결과를 생산하였다(Fig. 1). 1979~1981년과 2019~2021년을 각각 Historical과 RCP 실험의 스펀업 기간으로 설정하였으며, 분석에 사용하지 않았다. 실험 방법에 대한 보다 자세한 내용은 Ahn et al. (2013, 2014)에서 확인할 수 있다.

기상청 국립기상과학원에서 생산한 HadGEM2-AO의 결과는 여러 선행연구(e.g., Choi et al., 2011; Ahn et al., 2013; Hong and Ahn, 2015)에서 다른 CMIP5 결과 및 재분석 자료와의 비교를 통해 검증되었기 때문에 본 연구에서는 전지구 기후 자료에 대한 추가적인 분석은 하지 않았다. WRF v3.4의 모의결과를 재분석 자료와 비교하기 위해 분석 지역(117°E~138°E, 29°N~46°N)에 대한 0.5° 격자 간격의 월별 Climatic Research Unit (CRU) v3.2 (Harris et al., 2014) 기온자료를 사용하였다. 비교를 위해 모델 자료의 해양 지역 자료도 CRU와 동일하게 결측값으로 처리하였으며(Ahn et al., 2013), CRU를 역거리가중법을 이용하여 WRF의 격자 체계로 내삽하였다. 또한 기후 자료의 신뢰성을 정밀하게 측정하기 위해서 우리나라에서 30년 동안 관측된 46개 지점의 기온 자료도 함께 사용되었다(Fig. 1).

현재 기후와 미래 기후 간의 차이가 통계적으로 유의한지 살펴보기 위해 Student's t-test (Bretherton et al., 1999)를 추가적으로 수행하였다. 좀 더 자세히 설

명하면, 30년 동안의 Historical 자료(1981~2010)와 RCP 자료(2021~2050, 2071~2100)를 두 개의 표본으로 설정하여, 대응비교 t-검정(Paired t-test)을 수행하였다. 즉, Eq. 1와 같이 계산된 T 값을 이용하여 통계적 유의성을 검정하였다.

$$T = (\overline{DIFF}) / (S_{DIFF} / \sqrt{N}), \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 DIFF는 Historical과 RCP 모사 자료의 차이(RCP-Historical)를 의미하며, $\overline{DIFF}$ 와 S_{DIFF} 는 DIFF의 30년 평균 값과 표준편차를 각각 의미한다. N은 자유도 29를 의미하고, 계산은 각 격자점별로 독립적으로 이루어졌다.

2.2 봄꽃 개화일 자료

온난화에 따른 개화일 변화를 살펴보기 위해, WRF v3.4의 일 평균 기온을 입력자료로하여 생물계절 모형을 구동하였으며, 최종적으로 12.5 km 해상도의 격자형 벚, 복숭아, 배의 개화일 전망 자료를 1종의 과거 기후 시나리오(Historical)와 2종의 미래 기후 시나리오(RCP 4.5, 8.5)에 대해 생산하고 분석하였다. 본 연구에서 사용된 생물계절 모형은 이미 여러 선행연구(e.g., Hur et al., 2014; Hur and Ahn, 2014; Hur and Ahn, 2015)를 통해 우리나라 봄꽃 개화일 추정에 적합하다고 평가된 온도시간 모형(thermal-time model)의 일종인 The number of days transformed to standard temperature (DTS) 모형(Ono and Konno, 1999)이다. 간략하게 설명하면 DTS 모형은 수치적으로 일 평균

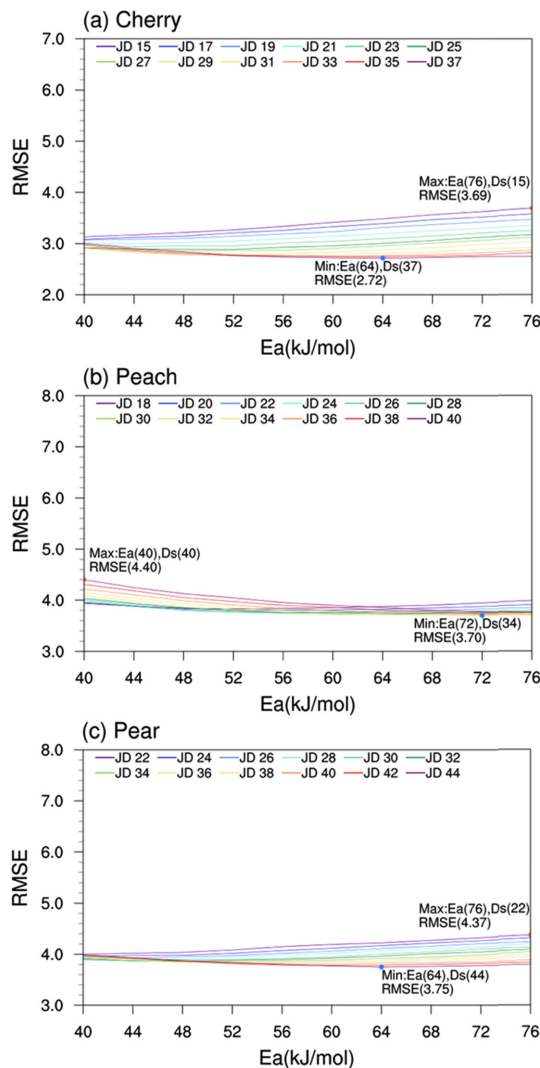


Fig. 2. Changes in root mean square error (RMSE) of first flowering dates (FFD) according to the variation of parameters in the DTS model using temperature and FFD data observed at 46 stations for a period of 30 yrs (1981~2010).

기온의 지수 함수의 합으로 설명될 수 있으며, 물리적으로는 고온요구량(heating requirement)을 만족할 경우 개화가 시작된다는 생장도일(growing degree days)과 같은 개념으로 해석될 수 있다. DTS 수식은 다음의 Eq. 2과 같다.

$$\sum_{i=1}^{nday} (daily\ DTS)_{ij} = \sum_{i=1}^{nday} (\exp(Ea(T_{ij} - T_s)/R \cdot T_{ij} \cdot T_s)), \quad (Eq. 2)$$

여기서 T_{ij} 와 $daily\ DTS_{ij}$ 는 각각 i 번째 날에 j 번째 관

측 지점에서의 일 평균 온도와 일 누적 DTS를 의미하며, R , T_s , Ea 는 각각 이상 기체 상수($8.314\ JK^{-1}mol^{-1}$), 표준 온도($271.4\ K$) 그리고 식물의 온도 반응을 나타낸다. 따라서 DTS 모형을 사용하기 위해서는 (1) DTS 누적(계산) 시작일 Ds (Julian Day, JD), (2) 식물 온도 반응도 Ea ($KJ\ mol^{-1}$), (3) 총 누적량 DTS (days)가 각 식물에 맞게 선택 되어야 한다. 누적 시작일 (Ds)은 각 식물의 평균 개화일 등을 고려하여 벚, 복숭아, 배에 대해 각각 JD 15-37, JD 18-40, JD 22-44을 2 간격으로 12종을 설정하고, Ea 는 $40\ KJ\ mol^{-1}$ 부터 $76\ KJ\ mol^{-1}$ 까지 $4\ KJ\ mol^{-1}$ 간격으로 10종을 두어, 총 120 개의 조합[(12(Ds 의 수) $\times$ 10(Ea 의 수))]을 분석하였다. 모든 관측소에 120개의 조합을 적용하여 개화일을 각각 추정하고, 이때 해당되는 DTS 누적량을 계산한다. 추정된 개화일 중에 실제 관측된 개화일과 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Error, RMSE)가 가장 낮은 조합을 최적의 조합으로 선발하였다. 변수 최적화를 위해 사용된 입력 자료와 검증 자료는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 46개의 지점에서 1981년부터 2010까지 30년 동안 관측된 일 평균 기온과 개화일 자료이다. 여기서 46개 지점은 분석된 30년 기간 중 결측률 10% 이하인 지점들만 선별된 것이며, 변수 최적화는 식물 3 종(벚, 복숭아, 배)에 대해 모두 독립적으로 수행되었다. Figure 2는 120개 조합에 대한 RMSE의 변화를 나타낸 것이며, 최종적으로 벚은 $Ea: 64$, $Ds: 37$, DTS: 134, 복숭아는 $Ea: 72$, $Ds: 34$, DTS: 170, 배는 $Ea: 64$, $Ds: 44$, DTS: 152의 조합이 선택되었다. 사용된 자료 및 분석된 식물 중에는 차이가 있으나, DTS 모형 및 변수 최적화 방법에 대한 기본적인 설명은 Hur and Ahn (2014)에서 더 자세히 확인할 수 있다.

3. 결 과

3.1 일 평균 기온

3.1.1 일 평균 기온의 평균 오차

Figure 3의 (a)와 (b)는 Historical 기간(1981~2010)에 대해 CRU와 WRF에서 유도된 이른 봄철 기간의 평균 기온 분포도이다. Figure 3c는 WRF의 평균 오차를 정량적으로 살펴보기 위해 재분석 자료에서 유도된 평균 기온과 지역기후모형에서 모의된 평균 기온의 차이를 나타낸것이다. 분석 영역에 대한 평균값은 그림의 오른쪽 상단에 표기하였다. Figure 3a와 b에서 보듯이, WRF로 모의된 기온은 CRU에서 나타난 전반적인 패턴 및 위도에 따른 온도 변화를 잘 나타내고 있다. 또한 동일 위도대와 비교하여 고지대(개마고원, 흑룡강성, 길림성 일대)에서 보여지는 상대적으로 낮은 온도 분포와 중국 동북 지방 일부 지역

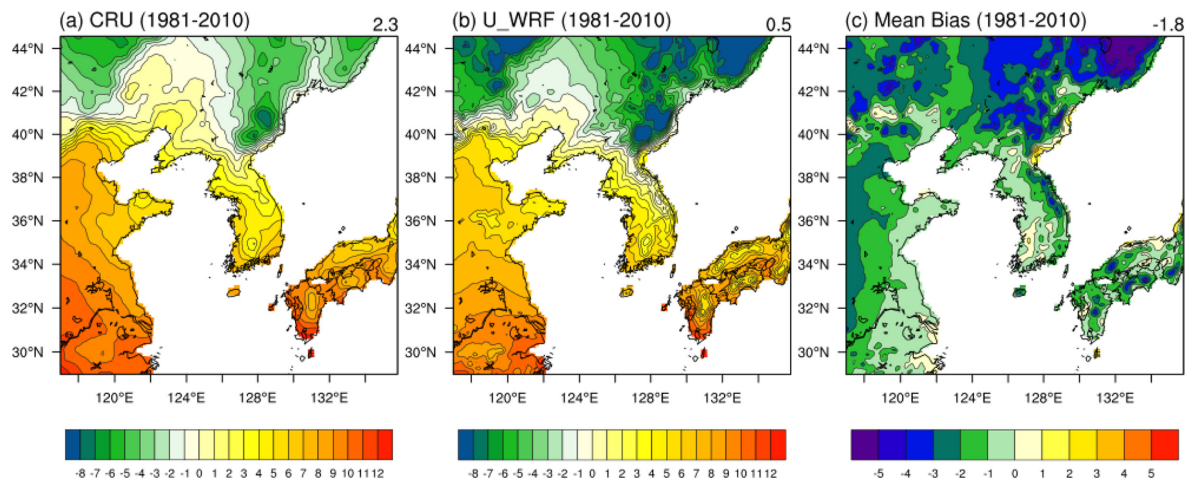


Fig. 3. Early spring (February–April, FMA) mean temperature averaged over 30 yrs (1981–2005) derived from (a) CRU and (b) uncorrected WRF (U_WRF) historical simulations, and (c) mean difference between CRU and U_WRF. Unit is $^{\circ}\text{C}$.

($118^{\circ}\text{E}\sim 126^{\circ}\text{E}$, $40^{\circ}\text{N}\sim 46^{\circ}\text{N}$)에 보여지는 상대적으로 높은 온도 분포가 CRU 뿐만 아니라 WRF의 분포도에서도 나타난다. 정성적으로 WRF는 CRU에서 나타나는 공간적인 패턴을 유사하게 묘사하면서 지형 효과를 잘 반영한다고 평가될 수 있다. 그러나 정량적으로 살펴보았을 때(Fig. 3c), WRF는 0.5°C 의 평균 온도로 CRU (2.3°C)와 비교하여 전반적으로 1.8°C 정도 과소모사되는 것을 알 수 있다. 특히 기온 차이는 개마고원, 함경산맥, 태백산맥 그리고 중국 동북부($125^{\circ}\text{E}\sim 132^{\circ}\text{E}$, $42^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$)의 고지대에서 -3°C 이상으로 크게 나타난다. WRF의 기온 과소모사 경향이 생물계절 모형에 반영되면 개화일이 지연되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 본 연구에서는 평균 기온의 차이를 WRF의 계통적 오차로 간주하였으며, 기후 변화 분석시 기온 자료에 평균 오차를 제거하여 살펴보았다. 이후 계통적 오차 보정을 U_WRF (Uncorrected WRF), 보정 후를 C_WRF (Corrected WRF)로 표현하였다.

Ahn et al. (2013)은 WRF가 동아시아지역에 대해 여름철 기온을 과소모사하는 특성이 있다고 분석하였다. 이러한 음의 오차가 이른 봄철뿐만 아니라 모든 달에도 유사하게 나타나는지 살펴보기 위해 월평균 기온 및 오차의 시계열을 분석해보았다. Figure 4는 분석 영역에 대한 CRU(검은 실선)와 U_WRF(파란 실선)의 월평균 기온과 월 평균 오차(CRU와 U_WRF의 차이, 막대그래프)를 나타낸다. CRU를 살펴보면, 연평균 기온은 9.0°C 이며, 7, 8월에 기온이 높고, 12, 1월에 기온이 낮은 전형적인 동아시아의 계절 변동성이 나타난다. U_WRF는 CRU의 변화 패턴을 유사하게 묘사하고 있으나, 평균적으로 1.2°C 가 낮게 묘사한

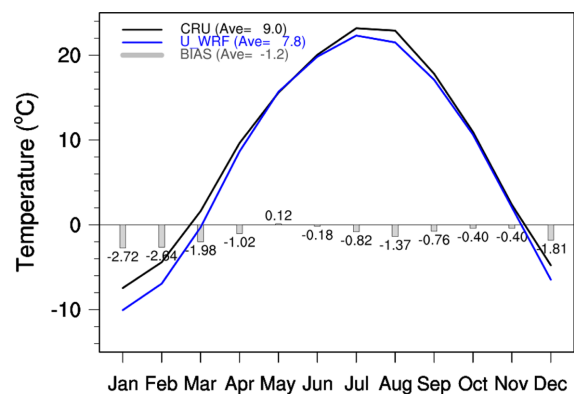


Fig. 4. Time series of monthly mean temperature averaged over 30 yrs (1981–2010) derived from CRU (black line) and U_WRF (blue line) historical simulation, and mean difference between CRU and U_WRF (gray bar). Unit is $^{\circ}\text{C}$.

다. 이른 봄철(2~4월)의 경우, 오차가 2, 3, 4월 순으로 가장 크게 나타나는데, 특히 2, 3월은 -2.64 , -1.98°C 로 연중 2, 3번째로 가장 큰 오차를 가진다. 이러한 과소모사 경향은 5월을 제외한 모든 달에 나타나며, 특히 여름철(7~9월)과 겨울철(12~3월)에 뚜렷하게 나타난다. 따라서 WRF는 월평균 $-2.72 \sim +0.12^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 오차를 가지며, 이러한 WRF의 과소모사경향은 분석 영역에 대해 연중 나타나는 일반적인 특성으로 해석될 수 있다.

그러나 오차 분석시 CRU 자료가 관측 자료들을 이용해서 만든 재분석 자료라는 점은 주의해야 한다. 자세히 설명하면, 비록 CRU가 4000개 이상의 지

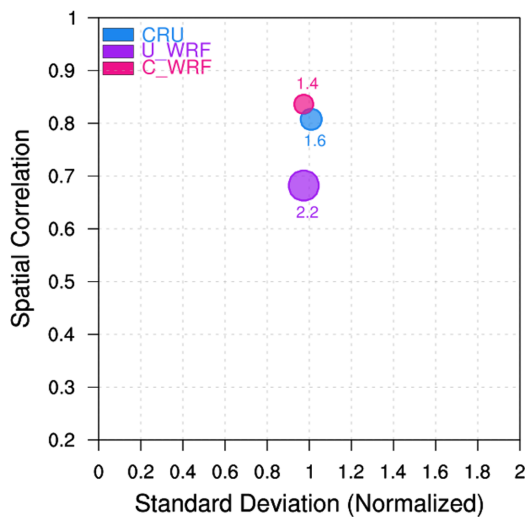


Fig. 5. The SCR diagram of early spring temperature over 30 yrs (1981~2010) for CRU (blue), U_WRF (purple) and corrected WRF (C_WRF, red). Here circle size and number indicate RMSE.

상 기상 관측자료가 고려된 신뢰성이 확보된 자료지만, 다른 재분석자료와 마찬가지로 엄밀히 시공간적으로 균일한 자료가 아니라는 것이다(Harris et al., 2014). 예를 들어 CRU는 The World Meteorological Organisation (WMO)와 The US National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) National Climatic Data Center (NCDC), 각 국가 기관 등 여러 기관에서 수집된 지점별 관측 자료를 기본적으로 사용하는데, 이 관측 자료들이 유지 보수 등의 문제로 일반적으로 관리하기 용이한 곳, 즉 낮은 고도에서 관측되었다는 것이다. Hur and Ahn (2015)와 Ahn et al. (2012)에서 언급된 바와 같이, WRF의 남한 평균 고도가 약 210 m인데 반해, 검증에 사용된 관측 지점의 평균 고도는 약 70~120 m로 약 2배 이상 차이가 난다. CRU와 같이 관측 자료를 기본으로 하는 자료는 일반적으로 지형효과가 적게 반영 되면서, 지역기후 모형에서 모의된 기온보다 산맥, 고지대 등에서 기온이 높게 나타날 수 있다는 점을 고려할 필요가 있다.

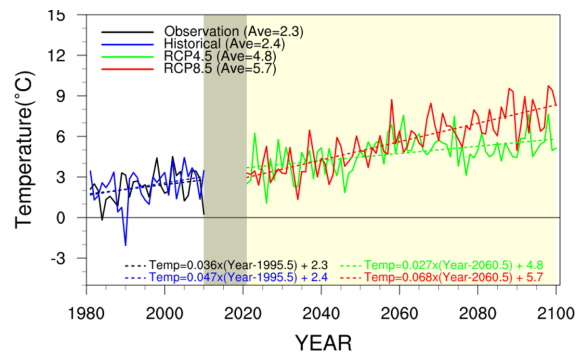


Fig. 6. Time series of early spring (February~April) temperature averaged over northeast Asia (117°E~138°E, 29°N~46°N) under Historical (1981~2010) and RCP 4.5 and 8.5 (2021~2100) scenarios. Unit is °C.

이러한 맥락에서 우리나라에 위치한 46개 지점에서 관측된 기온자료를 이용하여 WRF 모사 결과 뿐만 아니라 CRU 재분석 자료까지 신뢰성을 살펴보았다. Figure 5는 CRU(파란색 원), U_WRF(보라색 원), C_WRF(빨간색 원)의 Standard deviation-Correlation-Root mean square error (SCR) 다이어그램을 나타낸 것으로, 가로축, 세로축, 원의 크기는 각각 정규 표준 편차 (normalized standard deviation), 공간 상관계수 (spatial correlation coefficient, PCC), RMSE를 의미한다. CRU, U_WRF, C_WRF는 약 1.0의 정규 표준 편차 값으로 관측과 유사한 변동성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 분별력이 없는 정규 표준 편차와 다르게, CRU, U_WRF, C_WRF는 PCC와 RMSE에서 차이가 났다. RMSE는 U_WRF (2.2°C), CRU (1.6°C), C_WRF (1.4°C) 순으로 크게 나타났으며, PCC는 CRU와 C_WRF에서 약 0.8, U_WRF에서 약 0.7로 나타났다. 즉, C_WRF, CRU, U_WRF 순으로 관측의 패턴을 잘 모의하는 것을 확인할 수 있다. SCR 다이어그램 분석을 통해 WRF는 보정 후 CRU와 유사한 수준의 RMSE, PCC로 향상되었다는 것과, CRU 역시 실제 관측자료와 완벽히 일치하지 않는 것으로 확인하였다. 이러한 CRU, C_WRF의 오차 수준을 감안하고 기후 자료를 분석하고 이해하는 것이 필요하다.

Table 1. Future mean temperature change in early and late 21st century from February to April over northeast Asia derived from RCP 4.5 and 8.5 simulation.

Scenarios		Feb	Mar	Apr	Early Spring (Feb-Apr) Mean
2021~2050	RCP 4.5	1.5*	1.3*	1.5**	1.5**
	RCP 8.5	1.6**	1.6**	1.5**	1.5**
2071~2100	RCP 4.5	2.6**	2.8**	3.2**	2.9**
	RCP 8.5	5.1**	5.1**	4.6**	4.9**

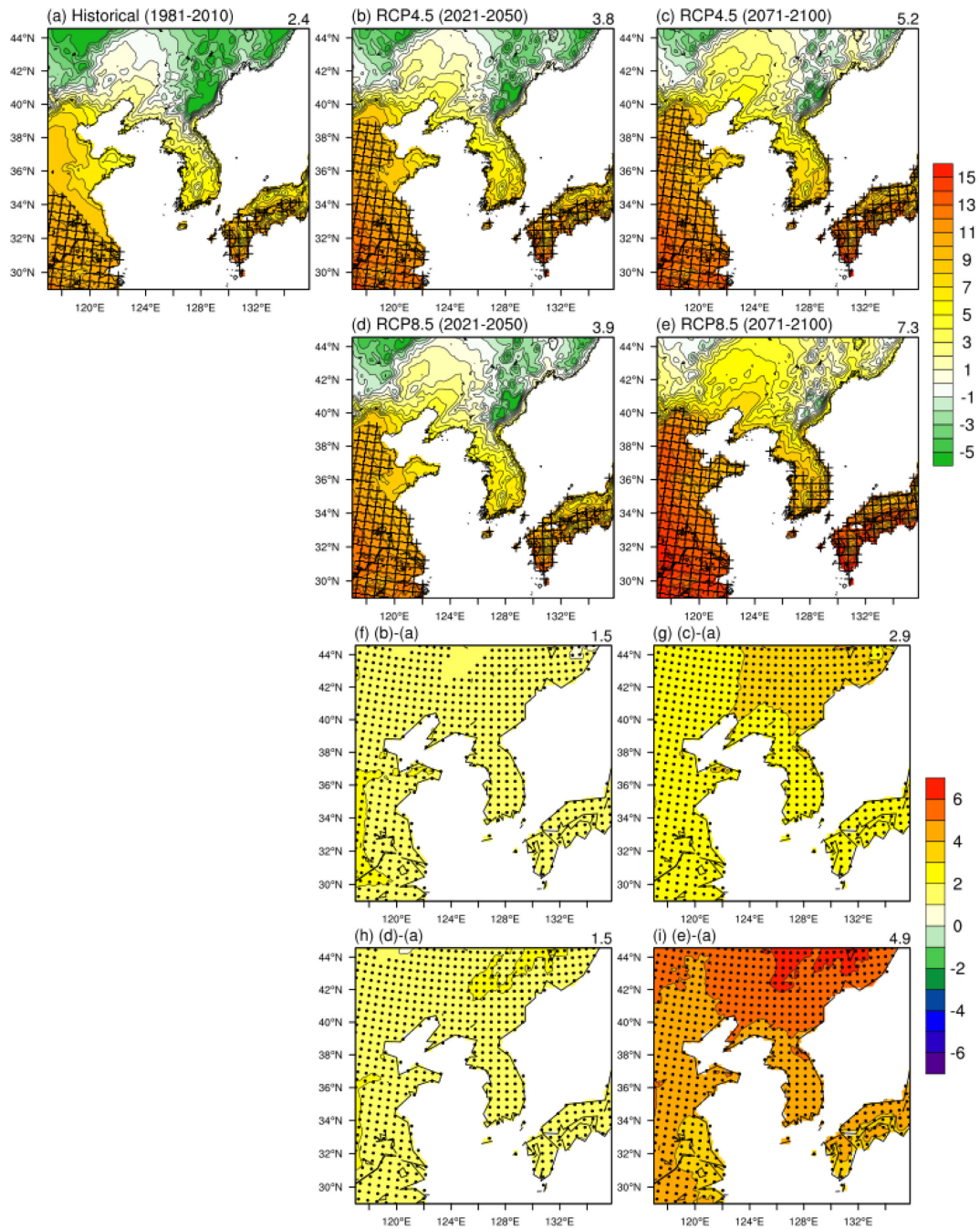


Fig. 7. Spatial distribution of early spring mean temperature derived from Historical (a), RCP 4.5 (b, c) and 8.5 (d, e) simulations and the differences (f-i) between RCPs and Historical simulations. The black crosses in (a)-(e) and dots in (f)-(i) indicate areas above 9°C and above the 95% confidence level, respectively.

3.1.2 일 평균 기온의 미래 변화

WRF로 모의한 RCP 시나리오에 따를 이른 봄철 기온의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 검은색

실선은 CRU, 파란색 실선은 Historical, 빨간색과 초록색 실선은 각각 RCP 4.5와 8.5 자료를 나타내며, 점선은 각 자료의 추세선을 의미한다. 이른 봄철 기

온은 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 $0.3^{\circ}\text{C } 10\text{ yr}^{-1}$, $0.7^{\circ}\text{C } 10\text{ yr}^{-1}$ 의 추세로 21세기 전반에 걸쳐 상승한다. 즉, RCP 8.5의 기온 상승 속도는 현재 기후(Historical)보다 $0.2^{\circ}\text{C } 10\text{ yr}^{-1}$ 정도, RCP 4.5보다 $0.5^{\circ}\text{C } 10\text{ yr}^{-1}$ 정도 높을 것으로 추정된다. 현재와 비교하여 RCP 4.5, 8.5 하에서 가까운 미래(2021~2050)에는 1.5°C , 먼 미래에(2071~2100)는 각각 2.9 , 4.9°C 가량 상승할 것으로 전망된다(Table 1). 결과적으로 21세기 후반에서는 RCP 8.5가 RCP 4.5와 Historical보다 이른 봄철 기온이 평균적으로 높게 나타날 것으로 전망된다. 이러한 기온 변화를 Student's t-test를 통해 통계적 유의성 검증을 수행 하였을 때, 모두 신뢰구간 99%에 포함되었다. 기온 변화를 월별로 살펴보면(Table 1), 가까운 미래에서는 두 RCP 시나리오 하에서 기온이 $1.3\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ 의 범위로 2, 3, 4월에 고르게 증가하여, 시나리오의 종류 및 월에 상관없이 모두 유사하게 변화하였다. RCP 4.5 시나리오 하에서 먼 미래에서는 기온이 $2.6\sim 3.2^{\circ}\text{C}$ 가량 변화하였으며, 4, 3, 2월 순으로 크게 증가하였다. 반면에 RCP 8.5에서는 2월에 5.1°C , 3월에 5.1°C , 4월에 4.6°C 가량 증가하여, 4월보다는 2, 3월에 크게 증가하였다. 두 RCP 시나리오 하에서의 먼 미래 변화는 모두 99% 신뢰구간에서 유의하였다.

Figure 7은 이른 봄철 기온의 현재(1981~2010) 및 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서의 가까운 미래(2021~2050)와 먼 미래(2071~2100)에 대한 변화를 나타낸 그림이다. 변화에 대한 유의성을 살펴보기 위해, 현재 기후와의 차이를 나타낸 그림(Figs. 7f-i)에서는 95%의 신뢰구간에 포함되는 영역을 검은 점으로 표시하였다. WRF에 의해 모의된 현재 기후의 이른 봄철 평균 기온은 2.4°C 이며, 북한 및 중국 동북부의 고지대에서는 전반적으로 0°C 이하, 저위도에 위치하는 일본 및 중국 남부(상해 일대)에서는 전반적으로 10°C 이상의 기온 분포가 나타난다(Fig. 7a). 미래 기온 분포도(Figs. 7b-e)를 살펴보면, RCP 4.5와 8.5 시나리오 하의 미래 기온은 21세기 중반에는 각각 3.8°C , 3.9°C , 후반에는 각각 5.2°C , 7.3°C 의 평균 값으로, 현재 기후의 공간적인 패턴을 유지하면서 통계적으로 유의한 수준에서 전 영역에 걸쳐 상승할 것으로 보인다. 기온은 현재 기후와 비교하여 고농도 시나리오 일수록, 그리고 먼 미래로 갈수록 크게 상승할 것으로 전망되며, 특히 고지대 및 고위도에서 크게 변화할 것으로 추정된다.

기온의 변화를 좀 더 정량적으로 분석하기 위해, 기온 분포도(Figs. 7a-e)에서 9°C 이상인 영역(십자 기호)을 간략하게 비교하여 살펴보았다. 분석에 사용된 9°C 는 현재 기후에서 3월 안(JD 90)에 개화가 발생하는 영역과 평균적으로 9°C 가 나타나는 지역이 유사하다는 점을 착안하여 선택된 임의의 기준이다. 현재 기

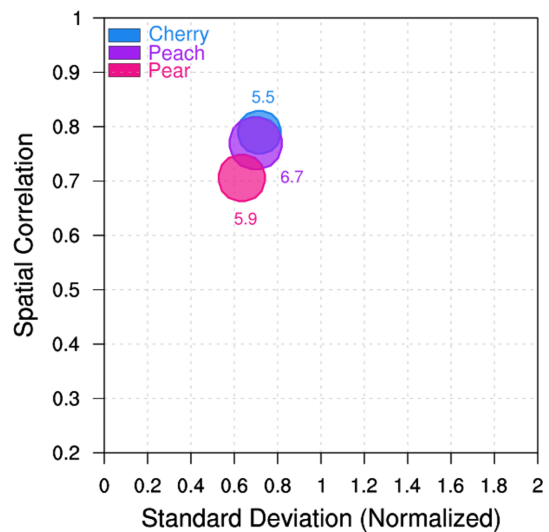


Fig. 8. The SCR diagram of first flowering date (FFD) over 30 yrs (1981~2010) for cherry (blue), peach (purple) and pear (red). Here circle size and number indicate RMSE.

후에서 분석영역 대비 19.5%가 나타나던 9°C 이상인 영역이 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 21세기 후반(전반)에 각각 32.4% (28.1%), 38.8% (27.7%)로 증가하였다. 즉, 현재 기후에서는 우리나라에 평균 9°C 인 영역이 나타나지 않는데 반해, 21세기 중반에는 제주도 지역에 나타나고, 21세기 후반에는 제주도 및 남부 지역까지 나타날 것으로 전망된다. 이러한 이른 봄철 기온의 증가는 봄꽃 개화일을 앞당길 수 있는 환경적 조건을 제공한다. 다음 장에서는 이러한 기온 변화에 의해 개화일이 어떻게 달라질 수 있는지 좀 더 자세히 다루도록 하겠다.

3.2 봄꽃 개화일

3.2.1 봄꽃 개화일의 평균 오차

C_WRF에서 모의된 일별 기온 자료를 DTS 모형의 입력자료로 하여 12.5 km 해상도의 봄꽃(벚, 복숭아, 배) 개화일 자료를 Historical과 2종의 RCP 시나리오에 대해 각각 생산하였다. RCP 시나리오에 따른 개화일 변화를 전망하기에 앞서 Historical 자료를 이용하여 개화일 자료의 신뢰성을 먼저 평가하였다. 앞 장에서 CRU 재분석 자료와 46개 지점의 관측 자료를 모두 이용하여 WRF의 기온 모사 능력을 평가하였다. 그러나 개화일은 분석 영역을 모두 포괄할 수 있는 광역적인 관측 자료가 없기 때문에, 본 연구에서는 46개의 지점의 관측 자료를 이용한 SCR 다이어그램을 통해 간략하게 오차를 분석하였다.

Figure 8은 46개 지점의 개화일 관측 자료를 근거

로하여 계산된 벚, 복숭아, 배의 개화일의 SCR 다이어그램이다. 벚, 복숭아, 배가 각각 0.7, 0.7, 0.6 정도의 정규 표준 편차값을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 모델이 실제 개화일 보다 변동성을 낮게 모의한다는 것을 의미한다. 기온의 정규 표준 편차가 약 1.0임을 감안한다면, DTS 모형에 의해 개화일의 변동성이 낮게 나타난다고 해석할 수 있다. 공간 상관 계수의 경우, 벚, 복숭아가 약 0.8로 배의 0.7보다 0.1 가량 높게 나타나, 모형이 벚과 복숭아 개화일을 배 개화일과 비교하여 관측의 변동성 뿐만아니라 공간적인 분포도까지 잘 모의하는 것으로 나타났다. RMSE의 경우, 복숭아가 6.7일, 배가 5.9일, 벚이 5.5일로 나타나, DTS 모형에 의해 모의된 개화일이 관측된 개화일을 약 5~6일 차이로 모의되는 것을 확인하였다. 이러한 DTS 모형의 개화일 오차 수준을 고려하면서 온난화에 따른 봄꽃 개화일의 미래 변화를 살펴보는 것이 중요하다.

3.2.2 봄꽃 개화일의 미래 변화

DTS 모형으로 모의한 Historical과 RCP 시나리오에 따른 봄꽃 개화일 변화를 Fig. 9와 같이 시계열로 분석해 보았다. Figure 9에서 보듯이, 개화일은 식물의 종류와 상관없이 2종의 RCP 시나리오 하에서 21세기 전반에 걸쳐 모두 앞당겨지는 것으로 전망된다. 평균적인 개화일은 RCP 8.5, RCP 4.5, Historical 순으로 빠르며, 먼 미래로 갈수록 개화일의 변화는 크게 나타난다. 즉 기온의 상승으로 인해 식물 성장 속도는 가속화 되어, RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 벚은 $0.9 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$, $2.0 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$, 복숭아는 $0.9 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$, $2.2 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$, 배는 $0.9 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$, $2.0 \text{ day } 10 \text{ yr}^{-1}$ 의 추세로 꽃이 빨리 필 것으로 전망된다. 이로 인해 벚은 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 하에서 가까운 미래(2021~2050)에 4.7일, 5.1일, 먼 미래(2071~2100)에 9.4일, 15.4일만큼 개화일이 각각 빨라 질 것으로 추정된다. 복숭아는 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 하에서 가까운 미래에 5.4일, 5.6일, 먼 미래에 10.4일, 16.9일 만큼 개화일이 각각 빨라 질 것으로 추정된다. 배도 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 하에서 가까운 미래에 4.8일, 5.2일, 먼 미래에 9.5일, 15.2일 만큼 다른 두 식물과 유사한 수준으로 개화일이 빨라질 것으로 전망된다. 이 변화량은 student t-test에 의해 99%의 신뢰구간에 포함된 결과이다. 결과적으로 가장 고농도 시나리오(RCP 8.5)에 따라 기후가 변한다고 가정할 때 21세기 후반(2071~2100)에 가면, 현재 평균적으로 4월 중순(JD 109)에 피는 벚은 4월 초순(JD 93.5)에 4월 중하순에 피는 복숭아(JD 113)와 배(JD 115)는 4월 중순(JD 95.8, JD 100)에 개화가 일어날 것으로 전망된다.

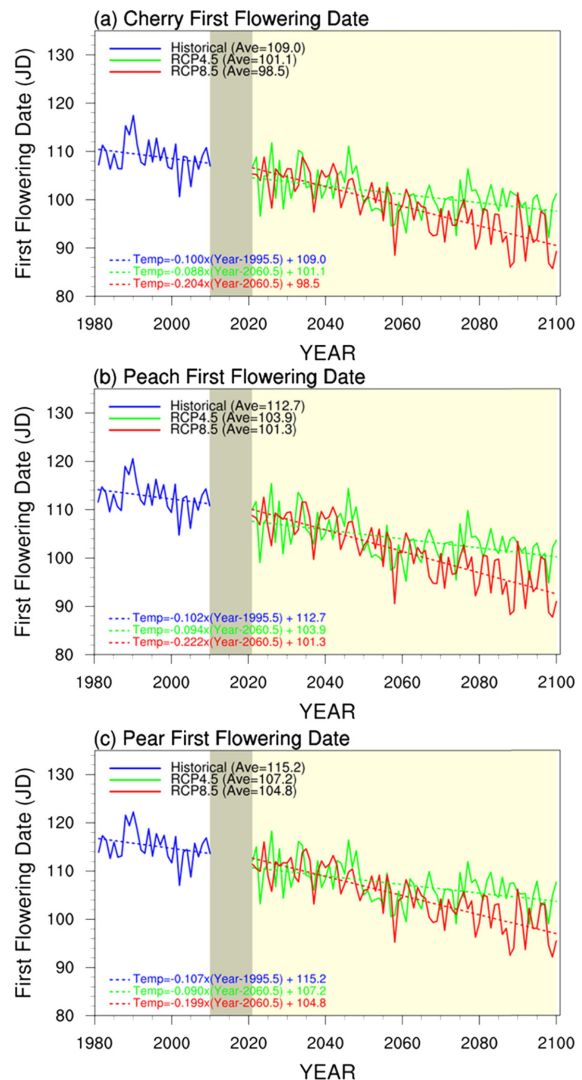


Fig. 9. Time series of FFDs averaged over northeast Asia ($117^{\circ}\text{E}\sim 138^{\circ}\text{E}$, $29^{\circ}\text{N}\sim 46^{\circ}\text{N}$) for (a) cherry, (b) peach and (c) pear under Historical (1981~2010) and RCP 4.5 and 8.5 (2021~2100) scenarios. Unit is Julian day (JD).

분포도를 통해 봄꽃 개화일의 지역적인 변화를 살펴 보았다. Figures 10-12은 벚, 복숭아, 배 개화일의 현재(1981~2010) 및 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서의 가까운 미래(2021~2050)와 먼 미래(2071~2100)에 대한 변화를 분포도로 나타낸 그림이다. 기온과 마찬가지로 변화에 대한 유의성을 살펴보기 위해, 변화 수준이 95%의 신뢰구간에 포함되는 영역은 검은 점으로 표시하였다. 본 연구에서는 3종 수목류의 개화일을 개별적으로 분석하였지만, 중복된 설명을 피하기 위해 Figs. 10-12에 나타내었다. 현재 기후의 분포도

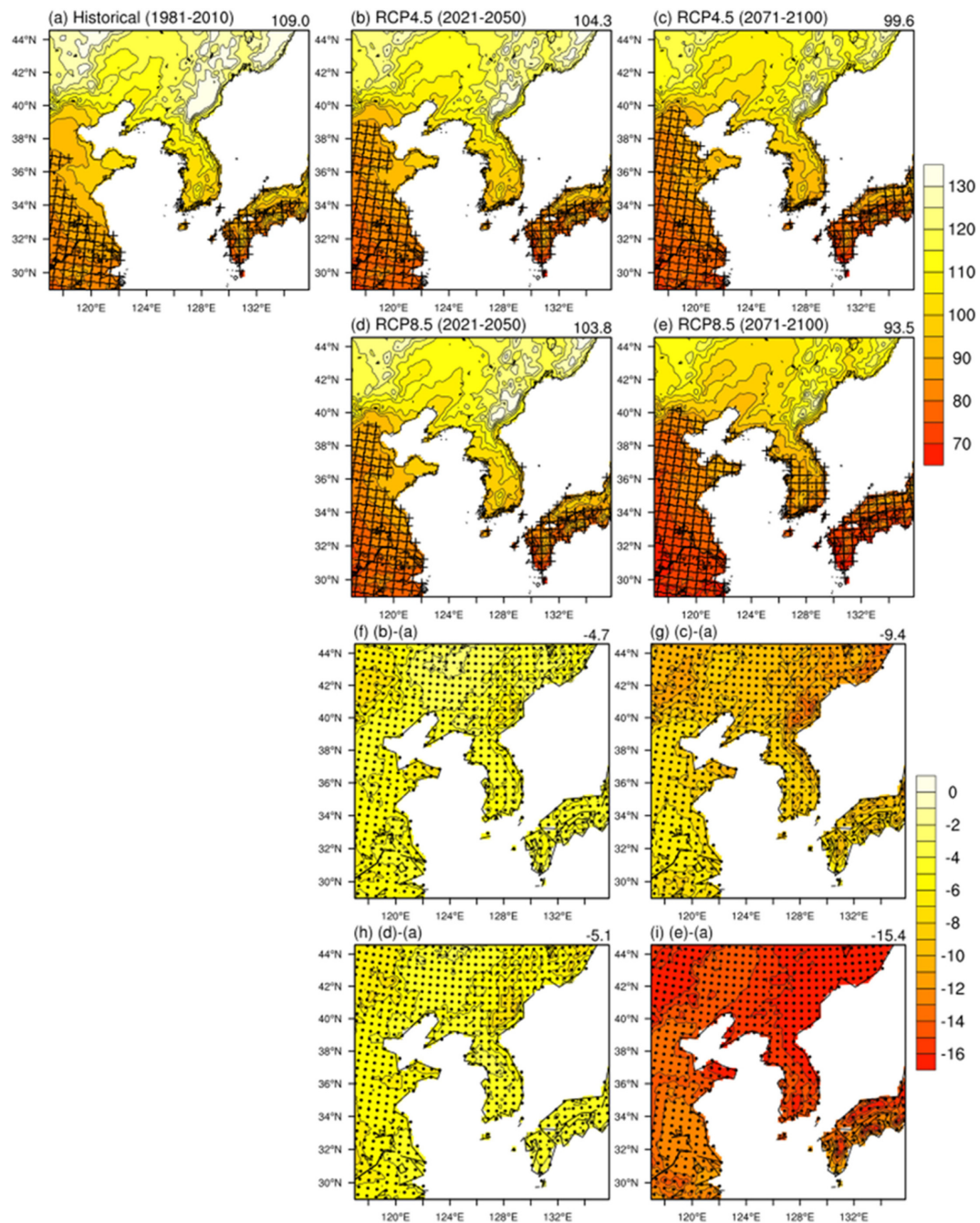


Fig. 10. Spatial distribution of cherry FFD derived from Historical (a), RCP 4.5 (b, c) and 8.5 (d, e) simulations and the differences (f-i) between RCPs and Historical simulations. The black crosses in (a)-(e) and dots in (f)-(i) indicate areas below 90 days and above the 95% confidence level, respectively.

를 살펴보면, 3종의 봄꽃은 평균적으로 JD 109, 113, 115에 개화가 일어나지만, 낮은 온도 때문에 고위도 및 산맥 지역에는 늦게 개화가 발생한다. 2종의 RCP

시나리오 모사결과는 Historical에 나타난 지형적 효과가 잘 반영되어, 저위도 및 저지대로 갈수록 개화일이 빨라지는 특성을 보인다. 개화일은 전 분석영역에

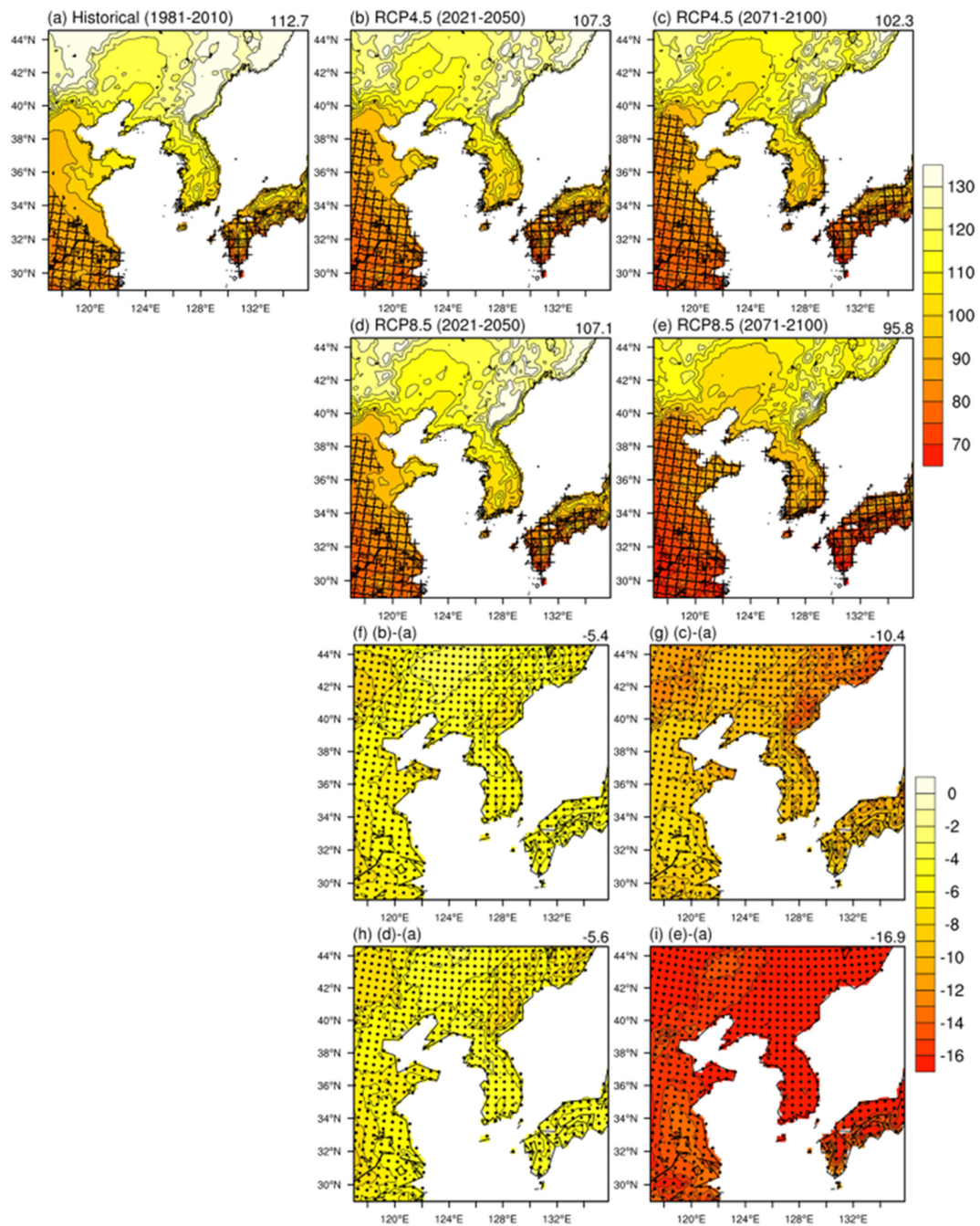


Fig. 11. Spatial distribution of peach FFD derived from Historical (a), RCP 4.5 (b, c) and 8.5 (d, e) simulations and the differences (f-i) between RCPs and Historical simulations. The black crosses in (a)-(e) and dots in (f)-(i) indicate areas below 90days and above the 95% confidence level, respectively.

서 고르게 증가하나, 기온에서 큰 상승률을 보였던 고
위도 및 고지대에서 특히 변화가 큰 것으로 나타났다.
이러한 변화는 분석 영역에 대해 3종의 식물에서 모

두 95% 신뢰수준으로 유의한 것으로 분석된다.
개화일의 변화를 좀 더 정량적으로 분석하기 위해,
개화일 분포도에서 3월(JD 90) 안에 개화가 발생하는

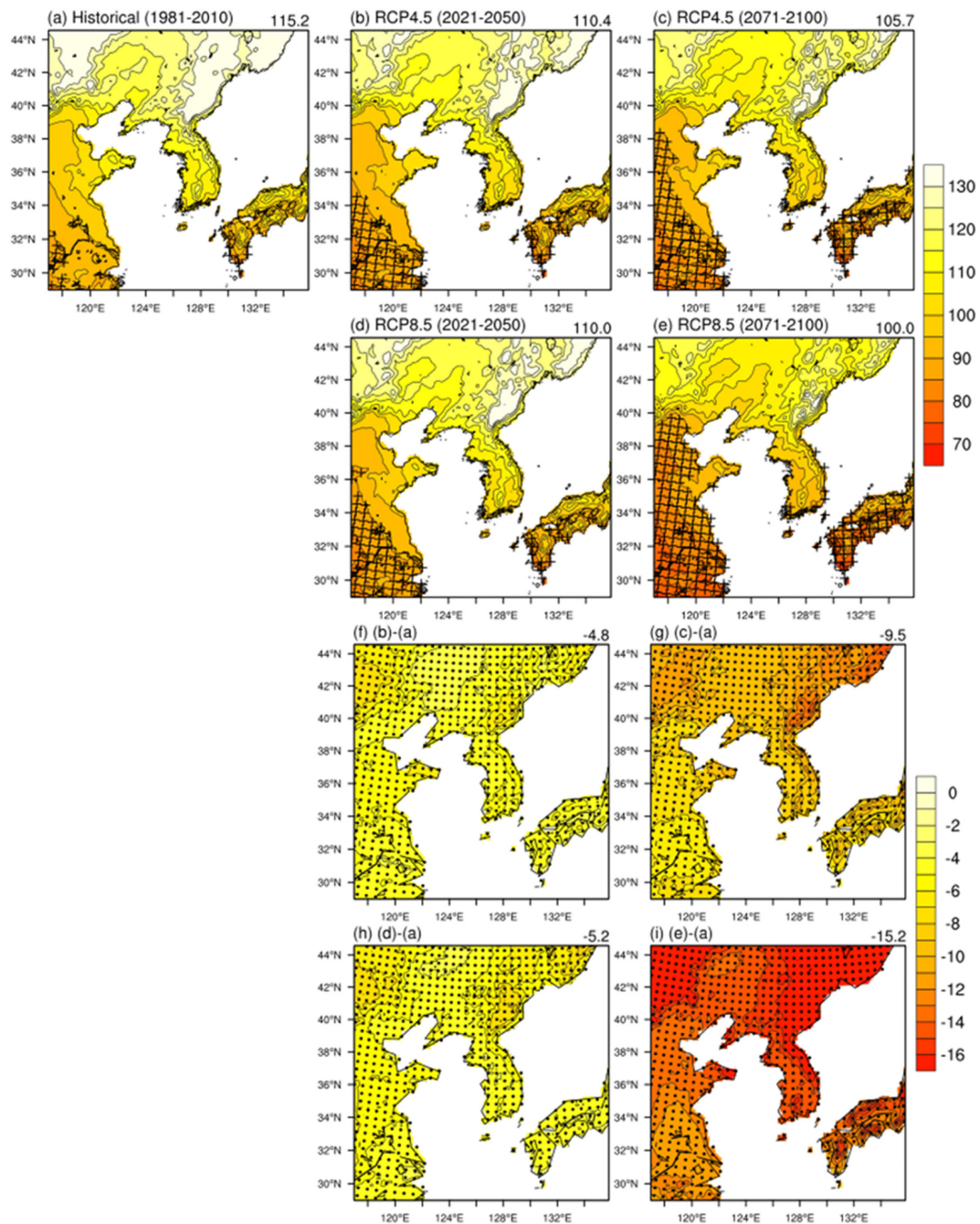


Fig. 12. Spatial distribution of pear FFD derived from Historical (a), RCP 4.5 (b, c) and 8.5 (d, e) simulations and the differences (f-i) between RCPs and Historical simulations. The black crosses in (a)-(e) and dots in (f)-(i) indicate areas below 90 days and above the 95% confidence level, respectively.

영역(십자 기호)을 비교하여 살펴보았다. 현재 기후에서 벚은 분석 영역의 22.6%, 복숭아는 18.8%, 배는 8.7%에서 3월 안에 개화가 발생한다. RCP 4.5 시나

리오에 따르면 21세기 후반(전반)에 벚, 복숭아, 배는 각각 32.8% (28.9%), 30.3% (25.9%), 23.3% (17.7%)의 영역에서 3월 안에 개화가 일어날 것으로 전망된

다. 고농도 시나리오인 RCP 8.5 시나리오 하에서는 3월 안에 개화가 발생하는 영역은 21세기 후반(전반)에 각각 40.1% (29.0%), 37.6% (26.1%), 31.4% (18.6%)로 증가할 것으로 추정된다. 우리나라의 경우도, 제주도 및 남부 지역에만 보여지던 봄꽃이 온난화가 진행됨에 따라 중부지역 및 동해안 지역에도 3월에 볼 수 있을 것으로 전망된다. 벚꽃 개화일 분포도에서 나타난 90일 이하인 영역이 온도 분포도에서 나타난 9°C 이상인 영역과 유사한 패턴으로 변화하는 것을 볼 수 있는데, 이는 개화일의 공간적 변화 패턴이 기온의 변화 패턴과 유사하다는 것을 의미한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 국립기상과학원과 부산대학교가 공동으로 생산한 12.5 km 해상도의 일별 Historical (1981~2010), RCP (2021~2100) 4.5와 8.5 모의 자료를 이용하여, 동아시아 영역에 대한 이른 봄철 기온 자료의 오차 및 온난화에 의한 상세 기온 변화를 분석하였다. 또한 역학적으로 규모축소된 일별 기온 자료를 이용하여 DTS 생물계절 모형을 구동하였으며, 최종적으로 12.5 km 해상도의 격자형 봄꽃(벚, 복숭아, 배) 개화일 자료를 생산하고, 자료의 신뢰성 및 개화일의 미래 변화를 분석하였다.

먼저, 이른 봄철 기온 및 개화일 변화를 살펴보기 앞서, 각 자료의 신뢰성을 분석하였다. WRF v3.4은 CRU와 비교하여 이른 봄철 기온을 정성적으로 잘 모의하고 있지만, 정량적으로 1.8°C 정도 낮게 모사되었다. 본 연구에서는 이러한 평균적인 차이를 계통적 오차로 간주하고 제거하였다. 46개 지점의 관측 자료와의 비교를 통해, 보정 후 WRF (C_WRF)가 CRU와 유사한 수준의 RSMD (1.4°C), PCC (0.8)로 향상되었다는 것을 확인하였다. 이러한 기온자료를 입력자료로 사용하였을 때, DTS 모형은 우리나라 봄꽃 개화일을 약 5~6일 오차로 모의하였다.

이른 봄철 기온은 RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 0.3°C 10 yr⁻¹, 0.7°C 10 yr⁻¹의 추세로 21세기 전반에 걸쳐 상승하여, 21세기 후반(전반)에는 현재 기후와 비교하여 각각 2.9°C, 4.9°C (1.5°C, 1.5°C) 가량 상승할 것으로 전망되었다. 기온은 95%의 신뢰수준에서 동아시아 영역에 대해 모두 상승하였으며, 특히 고지대 및 고위도에서 크게 변화하였다. 이러한 기온 상승은 봄꽃의 개화율을 가속시켜, RCP 4.5와 8.5 시나리오 하에서 벚은 0.9 day 10 yr⁻¹, 2.0 day 10 yr⁻¹, 복숭아는 0.9 day 10 yr⁻¹, 2.2 day 10 yr⁻¹, 배는 0.9 day 10 yr⁻¹, 2.0 day 10 yr⁻¹의 추세로 꽃이 빨리 필 것으로 전망되었다. 결과적으로 RCP 8.5 시나리오에 따르면 현재 4월 중하순에 볼 수 있었던 벚, 복숭아, 배

(벚: JD 109, 복숭아: JD 113, 배: JD 115)의 꽃을 21세기 후반에는 4월 초중순(벚: JD 93.5, 복숭아: JD 95.8, 배: JD 100)에 볼 수 있을 것으로 전망되었다. 이러한 변화는 기온의 변화 패턴과 유사했으며, 변화수준은 95% 신뢰수준에서 유의한 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 역학적으로 규모축소된 격자형 일별 기온 자료를 이용하여 기후변화에 따른 개화일 변화 정보를 생산하였다. 즉, HadGEM2-AO와 WRF v3.4을 이용해서 생산된 상세 기후 정보가 지역적인 정보를 요구하는 농업 등 다양한 응용분야에서 활용 가능할 수 있다는 것을 의미한다. 이렇게 생산된 정보는 최종 정보 수요자가 온난화에 따른 잠재적인 기후 변화 및 영향을 이해할 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 예를 들어 개화일 변화 정보는 벚꽃 축제를 주관하는 지자체, 양봉 업자, 지역 상업인, 관광업계, 농업 경영인 등에게 일반적인 기온 변화 정보 보다 활용 가치가 더 높을 수 있다. 본 연구를 통해 생산된 결과는 향후 다른 지역기후모델에서 생산된 기후 자료와 앙상블을 통해 더 신뢰성 있는 자료를 생산하는데 사용될 수 있으며, 이 자료들을 다양한 분야에 활용하여 많은 유용한 정보들을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ009353)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., 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 RCP 4.5 and 8.5 Scenarios. *Atmosphere*, **24**, 541-554.
- _____, J.-Y. Hong, and M.-S. Seo, 2013: Present-Day Climate of the Korean Peninsula Centered Northern East Asia Based on CMIP5 Historical Scenario Using Fine-Resolution WRF. *Atmosphere*, **23**, 527-538.
- _____, J. Lee, and E.-S. Im, 2012: The reproducibility of surface air temperature over South Korea using dynamical downscaling and statistical correction. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **90**, 493-507, doi:10.2151/jmsj.2012-404.
- Baek, H.-J., and Coauthors, 2013: Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 603-618.
- Bretherton, C. S., M. Widmann, V. P. Dymnikov, J. M. Wallace, and I. Blade, 1999: The effective number of

- spatial degrees of freedom of a time-varying field. *J. Clim.*, **12**, 1990-2009.
- Choi, S.-J., D.-K. Lee, and S.-G. Oh, 2011: Regional climate simulations over East-Asia by using SNURCM and WRF forced by HadGEM2-AO. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **32**, 750-760.
- Chung, U., J.-E. Jung, H.-C. Seo, and J. I. Yun, 2009: Using urban effect corrected temperature data and a tree phenology model to project geographical shift of cherry flowering date in South Korea. *Clim. Change*, **93**, 447-463, doi:10.1007/s10584-008-9504-z.
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister, 2014: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623-642, doi:10.1002/joc.3711.
- Hong, J. Y., and J.-B. Ahn, 2015: Changes of early summer precipitation in the Korean Peninsula and nearby regions based on RCP simulations. *J. Clim.*, **28**, 3557-3578, doi:10.1175/JCLI-D-14-00504.1.
- Hur, J., and J.-B. Ahn, 2015: Seasonal prediction of regional surface air temperature and first-flowering date over South Korea. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.4323 (online published).
- _____, and _____, 2014: The change of first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation: peach and pear. *Int. J. Climatol.*, **35**, 1926-1937, doi:10.1002/joc.4098.
- _____, _____, and K.-M. Shim, 2014: The change of cherry first-flowering date over South Korea projected from downscaled IPCC AR5 simulation. *Int. J. Climatol.*, **34**, 2308-2319, doi:10.1002/joc.3839.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker et al., Eds., Cambridge University Press, 1-9.
- Jeong, J.-H., C.-H. Ho, H. W. Linderholm, S.-J. Jeong, D. Chen, and Y.-S. Choi, 2011: Impact of urban warming on earlier spring flowering in Korea. *Int. J. Climatol.*, **31**, 1488-1497, doi:10.1002/joc.2178.
- Kim, M.-H., H.-S. Kang, J. Lee, H.-J. Baek, and C. Cho, 2013: Estimates of the Water Cycle and River Discharge Change over the Global Land at the End of 21st Century Based on RCP Scenarios of HadGEM2-AO Climate Model. *Atmosphere*, **23**, 425-441.
- Menzel, A., and P. Fabian, 1999: Growing season extended in Europe, *Nature*, **397**, 659, doi:10.1038/17709.
- _____, and V. Dose, 2005: Analysis of long-term time series of the beginning of flowering by Bayesian function estimation. *Meteorol. Z.*, **14**, 429-434, doi:10.1127/0941-2948/2005/0040.
- Ono, S., and T. Konno, 1999: Estimation of flowering date and temperature characteristics of fruit trees by DTS method. *Japan Agric. Res. Q.*, **33**, 105-108.
- Wie, J., B.-K. Moon, K.-Y. Kim, and J. Lee, 2014: The Global Warming Hiatus Simulated in HadGEM2-AO Based on RCP 8.5. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **35**, 249-258.