

APEC기후센터

상세화 기후전망정보를 활용한 농업분야의 기후변화영향 평가방법 개선 및 개발 -농업기후지수의 변화 분석-

정유란 기후변화연구팀

상세화 기후전망정보를 활용한 농업분야의 기후변화영향 평가방법 개선 및 개발 - 농업기후지수의 변화 분석-

Improvement of Agricultural Assessment of Impact on Climate Change
Using Downscaled Climate Prediction - Case Study of Agro-Climatic Index-

정유란 기후변화연구팀

연구보고서 2015-19

발간사

인류는 인류가 거주하는 지역에서 날씨를 관찰하고 관측된 기상 및 기후자원을 바탕으로 몇 시간 뒤, 혹은 50년에서 100년까지의 먼 미래에 대한 날씨의 변화를 예측할 수 있는 다양한 기후모델을 개발하고자 노력해 왔습니다. 그런데 어떤 지역에서 장기간에 걸쳐 진행되어 온 기후변화가 더 이상 그 지역의 문제가 아닌 전 세계의 문제가 되었으며, 지역적 기후변화에 대한 영향평가 또한 그 지역만의 이슈로 끝나지 않게 되었습니다. 또한, 기후자원의 변화도 이제 더 이상 한 지역에 국한된 자원의 변화가 아닌 전 세계 혹은 지역(예, 아시아-태평양 도서국 등)의 농수산업 및 에너지 분야에서부터 사회문화에 이르기까지 다양한 분야의 의사결정에 영향을 미치는 중요한 요소가 되었습니다. 그러나 미래의 기상 및 기후변화를 예측하기 위해 개발해 온 기후모델의 불확실성이 제시되면서 각 분야의 기후변화에 따른 영향평가의 불확실성에 대한 염려 또한 제시되었습니다.

농업생산 활동은 특정 지역 및 국지적인 기후조건에 영향을 많이 받는 산업 중에 하나입니다. 따라서 농업생산의 관점에서 지역의 기후 자원량을 분석하고 작물의 생육과 수량을 추측하여 여러 가지 농업기술(예, 모내기 등)의 실시에 필요한 기초자료를 제공할 수 있는 지표가 요구되었습니다. 농업기후자원의 특징을 단순하게 표현한 것이 농업기후지수입니다. 그러나 기후변화에 따라 농업기후자원의 분포도 변화하고 농업기후지수도 절대적인 것이 아니기 때문에 항상 변화할 수 있습니다. 그렇다면, 미래 농업기후자원의 변화에 대한 평가 또한 최근 개선된 기후모델에 의해 도출된 미래 기후변화전망자료에 의해 평가되는 것이 맞을 것입니다.

최근 기후모델의 다중모델앙상블 접근을 이용하여 미래 기후변화전망의 불확실성을 최소화하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있습니다. 마찬가지로, 미래 농업기후자원의 변화에 대한 평가도 최근 개선된 기후모델과 신기술에 의해 도출된 미래 기후변화전망자료에 의해 평가되어야 할 것입니다. 또한 다중작물 모델 시뮬레이션을 통해 농업분야의 기후변화 영향평가에 대한 불확실성도 최소화되어야 할 것입니다.

이에 본 연구는 농업분야의 기후변화 영향평가의 불확실성을 최소화하고 그 방법을 개선하기 위한 첫 단추로써, 상세화된 미래 기후변화전망 정보와 다중모델앙상블 접근방법을 통해 도출된 한반도의 농업기후지수의 시공간적인 변화와 불확실성을 평가하고자 수행되었습니다.

본 연구는 정유란 박사에게 의해 수행되었으며 주어진 짧은 시간임에도 불구하고 본 연구결과에 대한 노력에 감사를 표합니다. 본 연구의 결과가 우리나라의 농업분야의 기후변화 적응 및 완화정책 등을 위한 의사결정 과정에서 실제적인 기능을 할 수 있기를 기대합니다.

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

The process of synthesis and determination which are analyzing climate and making agro-climatic index of agricultural areas makes it possible to easily understand the characteristics of agricultural climate resources in the agricultural region. Agro-climatic index is to assess the climate resources of particular agricultural areas on 'the view of agricultural production'; it can be a key indicator of agricultural productivity by providing the basic information required for the implementation of different and various farming techniques and probabilities to estimate the growth and yield of crops from the climate resources such as air temperature, solar radiation, and precipitation. However, the distribution of agricultural climate resources vary depending on the climate change and the index can always be changed because it is not an absolute. RCP(representative concentration pathways) future scenarios of the Fifth Assessment Report of IPCC(intergovernmental panel on climate change) have been used in many recent studies. By developing and improving dynamic downscaling of climate information as well as statistical downscaling, many studies which are considering on the uncertainty of future climate change have been being actively conducted with multiple ensemble approach.

In this study, agro-climatic index of Korean Peninsula, for example, plant and crop period based on each base temperature, growing degree day, frost free day, and heating and cooling degree day were calculated for assessment its temporal and spatial variations and uncertainties on climate change; the downscaled historical climate(1976-2005) and RCP future climate scenarios of AR5(2011-2040) were applied to the calculation of the index. In addition, we considered on the practicability of the agro-climatic indices in the study with agricultural digital climate map of RDA(rural development administration). It was compared with that between the agro-climatic index calculated by the historical climate and the agro-climatic index calculated by the observed data. The result showed each average of six agro-climatic indices of nine individual global climate models, as well as multiple ensembles agreed with

agro-climatic indices calculated by the observed data, and it was confirmed that multiple ensembles, as well as each individual global climate model can emulate well on past climate in the four Rivers(Han, Nakdong, Geum, and Yeoungsan and Seumjin). The six agro-climatic indices of Korean Peninsula were estimated to be increased at nine individual global climate models and multiple ensembles in future scenarios. However, the improvement of spatial downscaling methods still needs since the agro-climatic indices of some individual global climate models showed different variations with the observed indices in the change of spatial distribution in four Rivers.

Additionally, the differences and uncertainties of between agro-climatic indices calculated by the observed and global climate models haven't been reduced on unlimited coupling of multiple ensembles. Further research is still required, however, the differences were started improving at the combining of three or four individual global climate models, and the differences didn't improve anymore at the coupling of mostly seven or eight individual global climate models in the study. Agro-climatic indices derived and evaluated in the study will be the baseline for the assessment of agro-climatic abnormal indices and agro-productivity indices of the next research work. For example, if we can assume that the winter temperature will be decreased in the regions since the heating degree day has been estimated to be increased in Nakdong River, and YeoungSan and SeumJin River in the future climate, the assessment of the heating degree day of the regions will be able to take advantage of assessment of the increasing of the uncertainty of agro-productivity of winter crop or the increasing of the uncertainty of agricultural system(e.g., double cropping system) by analyzing agro-climatic abnormal index(e.g., frequency of frost).

목차

상세화 기후전망정보를 활용한 농업분야의 기후변화영향 평가방법 개선 및 개발 - 농업기후지수의 변화 분석 -

발간사	i
ABSTRACT	iii
1. 서론	1
2. 연구자료 및 방법	3
2.1 상세화된 기후예측정보	4
2.1.1 CMIP5 자료	4
2.1.2 편의보정 및 상세화	4
2.2 농업기후지수	5
2.2.1 농업기후지수 정의와 종류	5
2.3 분석방법	9
2.3.1 비교기간 및 공간규모	9
2.3.2 통계적 분석방법	9
2.3.3 공간내삽	11
3. 연구결과	12
3.1 농업기후지수의 변화	12
3.1.1 식물기간과 작물기간	12
3.1.2 생장도일의 변화	14
3.1.3 무상일수의 변화	16
3.1.4 난방도일과 냉방도일의 변화	18
3.2 농업기후지수의 공간분포 변화와 불확실성 전망	21
3.2.1 기후모델의 재현성	21
3.2.2 공간변화와 불확실성	27
3.2.3 농업기후지수의 미래전망과 불확실성	36
3.3 다중모델앙상블 효율성	49
3.3.1 Multimodel ensemble estimators	49

4. 결론 및 고찰	52
4.1 농업기후지수의 변화	52
4.2 농업기후지수의 재현성과 미래전망의 불확실성	53
4.3 다중모델앙상블 효율성 평가	54
5. 활용성 및 정책시사	54
5.1 지역-맞춤형 적응정책	54
5.2 기초정보	55
국문요약	57
REFERENCES	58

1. 서론

기후변화는 우리의 일상생활에서 이제 더 이상 생소 한 단어가 아닌 생활의 일부가 된 지 오래이다. 작년 유엔 산하 정부간 기후변화협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 제5차 평가보고서에서 지구온난화는 계속될 것이며 이로 인한 이상기상 현상도 계속 빈번해질 것 이라고 하였다(IPCC, 2013). 특히, 20세기 후반의 폭염, 집중호우 등 극한현상이 증가하였고 추위와 관련된 현상은 감소하고 더위와 관련된 현상은 증가하며, 겨울이 짧아지는 한편 식물의 생장기간은 길어지는 추세이다(권원태, 2012). 이상기후보고서(기상청, 2013)에 따르면 한반도에서도 온난화 현상과 이상기후의 발생이 증가하는 추세이며, 연간기온의 경우 최근 10년간의 평균보다 많게는 1℃까지 상승 추세를 보일 것으로 전망하였다.

기후변화에 따른 영향평가는 과거시점(historical) 및 현재와 미래시점(future, e.g., 2020–2049: referred to as 2030s, 2040–2069: referred to as 2050s, 2070–2099: referred to as 2080s)의 비교를 통해 기후요소(예, 기온, 강수, 일사 등)의 증가 또는 감소로 전망하게 되는데, 미래를 대상으로 하는 기후변화 연구의 특성을 고려할 때 미래기간에 대한 불확실성(uncertainty) 관련정보가 제공되어야 한다. 기후변화 시나리오의 불확실성을 고려할 때, 단일 기후모델 결과만을 이용한 기후변화 연구는 위험할 수 있다. 따라서 미래 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 고려하기 위해 다양한 전지구기후모델(Global Climate Models, GCMs)에서 출력된 기후정보를 활용한 다중모델 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 접근이 필요하다. MME 평균에 의한 증감을 제시와 더불어 다양한 모델에 의한 최소값과 최대값의 범위를 함께 제시하는 것이 필요하다. 예를 들면, MME 평균이 동일한 증감을 보이더라도 최소 및 최대값에 의한 불확실성의 범위가 넓은 경우 불확실성 범위가 좁은 경우보다 미래 전망 결과에 대한 신뢰성이 낮아 질 수밖에 없기 때문이다.

IPCC 제5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5)에 사용된 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 신시나리오의 공간해상도는 200km 내외 격자간격의 저해상도로서, 여기에서 생산된 기후자료들은 종관규모의 평균적 대기특성의 변화를 알고자 하는 데에는 적합하지만 농업생산 활동에 필요한 국지적인 공간규모의 기후정보를 제공하기에는 매우 부족한 공간규모이다. 이와 같이 GCMs가

가지고 있는 공간규모에 대한 제약을 극복하고 상세한 기후정보를 생산하기 위해 특정지역을 고분해능으로 표현하고 특성화된 물리과정을 고려할 수 있는 지역기후모형(Regional Climate Models, RCMs)을 이용한 역학적 규모축소법(dynamic downscaling)이 이용되고 있다(IPCC, 2007; Im et al., 2008a; Im et al., 2008b). 대부분의 기후변화 시나리오는 월별 자료로 제공되고 있는데, 작물의 생장발육 예측을 위한 농업연구에 활용하기에 또한 부족한 시간규모이다. 또한 기후모델에 의해 생산된 미래 기후변화 전망을 신뢰하기 위해서는 기후모델이 과거 및 현재 기후를 잘 모사해야 한다. 과거 및 현재기간에 대해 모의된 기후모델 결과를 동일 기간의 관측자료와 비교하여 GCMs의 계통오차(systematic bias)를 보정해 주는 편의보정(bias correction)이 필요하다. 손태석 등(2010)과 박민지 등(2010)은 기후변화 시나리오 자료를 유역규모에 적용할 때 통계적 방법에 의한 공간적 상세화뿐만 아니라 일단위 관측자료를 기반으로 한 시간적 상세화를 통해 생산된 일별 자료를 수자원분야의 기후변화 영향평가에 활용하는 등 수자원의 기후변화 영향평가에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다(강지윤 등, 2013; 배덕효 등, 2011; 장재호와 안중호, 2012; 조재필 등, 2013). 반면, 다양한 시공간 규모축소법을 활용하여 미래 기후예측정보의 불확실성을 고려한 농업분야의 기후변화 영향평가는 많지 않다.

농업생산은 지역 및 국지기후조건에 필연적인 영향을 받게 된다. 농업과 밀접한 관계를 가지는 기후조건을 농업기후라고 하며, 기온, 일사, 강수 등과 같은 기후자원은 작물의 유전학적 특징에서 생물학적 반응 및 작물생산에 이르기까지 깊이 관여한다. 따라서 다수의 기후요소를 지수화하여 특정지역의 기후 자원량을 분석하고, 종합 및 판단하여 특정지역의 농업기후자원의 특성을 한 눈에 알 수 있게 할 필요가 있다(Choi and Yun, 1989). 이와 같이 농업기후자원의 특징을 단순명료하게 표현한 것을 농업기후지수라고 한다. 농업기후지수는 ‘농업생산의 관점’에서 기후자원을 평가하기 위한 것이고, 이 지수는 기후자원(e.g., 기온, 일사, 강수)으로부터 작물의 생육과 수량을 추측하는 가능성과 여러 가지 농업기술(e.g., 모내기)의 실시에 필요한 기초자료를 제공함으로써 농업생산성의 주요 지표가 될 수 있다. 그러나 기후변화에 따라 농업기후자원의 분포가 변화하고 농업기후지수도 절대적인 것이 아니기 때문에 항상 변화할 수 있다. 따라서 최근 기후변화에 따른 농업기후지수의 평가가 필요하다. Shim et al.(2008)은 농업기후지수의 변동성을 과거와 현재로 나누어 비교분석하였으며 Ahn et al.(2010a & 2010b)은 GCMs의 규모축소기법과 이산화탄소 배출증가에 따른 미

래 기후변화 시나리오(IPCC Fourth Assessment Report, AR4)를 이용하여 한반도 농업기후지수의 변화를 평가하였다.

본 연구에서는 IPCC 제5차 평가보고서에 사용된 RCP 시나리오를 기반으로 상세화된 과거 및 미래 기후예측정보를 바탕으로 한반도의 농업기후지수의 시공간적인 변화와 불확실성을 평가하고자 하였다. 아울러 농촌진흥청에서 활용하고 있는 농업용 상세 전자기후도와의 활용을 고려하고, 신시나리오의 미래 기후예측정보에 따른 새로운 농업기후지대 작성에 불확실성 관련정보를 제공하며, 농업생산성 예측 및 사회경제효과뿐만 아니라 기후변화에 대한 농업분야의 적응/완화정책 등 농업분야의 의사결정 과정에 필요한 기초 및 추가적인 응용정보를 제공하고자 수행하였다.

2. 연구자료 및 방법

상세화된 개별 기후예측자료뿐만 아니라 다중모델앙상블을 이용하여 농업기후지수를 지역별로 계산하고, 농업기후지수의 확률분포(probability density function, PDF) 및 통계분석을 통해 농업기후지수의 시공간적인 변화와 불확실성을 평가한다. 전반적인 연구개요는 Figure 1과 같다.

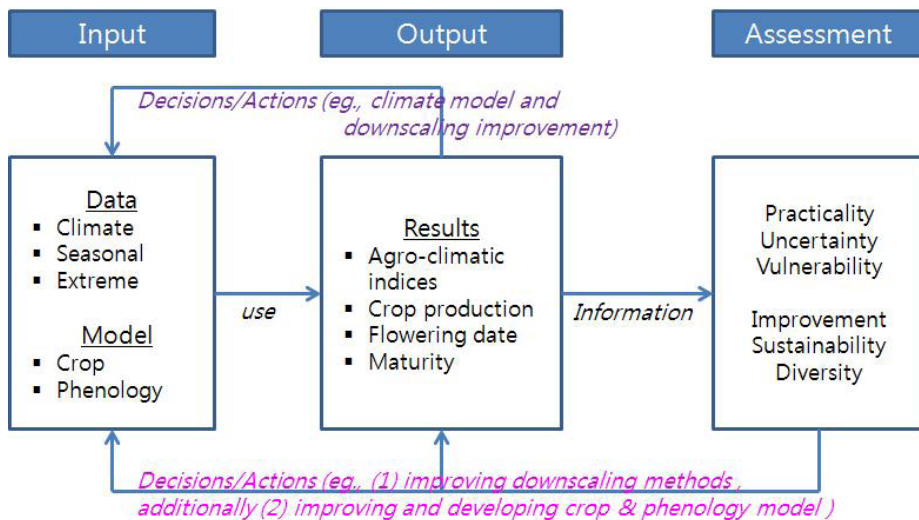


Figure 1. The idea flow chart of the study.

2.1 상세화된 기후예측정보

본 연구에서는 조재필 외(2013)에 이용된 상세화된 기후예측자료를 이용하였다. 자세한 상세화 과정은 ‘불확실성을 고려한 수자원 분야 CMIP5 자료분석’ 보고서(조재필 외, 2013)를 참고하면 된다. 본 연구 보고서에서는 편의보정 및 상세화에 대한 요약만을 언급하였다.

2.1.1 CMIP5 자료

IPCC 제5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5)에서 사용한 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 신시나리오 자료는 CMIP5(the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project)를 통해서 제공된다. ‘불확실성을 고려한 수자원 분야 CMIP5 자료분석’ 보고서에 의하면, 상세화에 사용된 전지구기후모델(Global Climate Models, GCMs)의 일단위 자료는 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량 등 5개 기상변수를 모두 포함하고 있는 8개 GCMs의 일별 자료와 기상청의 국립기상연구소에서 제공하고 있는 12.5km 지역규모모델(Regional Climate Models, RCMs) 결과를 사용하였다(Table 1). 12.5km 격자 해상도를 가진 이 기후전망자료는 영국 기상청 해들리 센터의 전지구 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO(coupled Atmosphere-Ocean model of Hadley Centre Global Environmental Model version 2)에 기초한 HadGEM3-RA(Atmospheric Regional climate model of HadGEM3)에 의해 생산된 자료이다(Lee et al., 2011; Lee et al., 2012). 또한 기후변화 시나리오 자체의 불확실성을 평가하기 위해 보편적으로 사용하고 있는 다중모델앙상블을 이용하였다.

2.1.2 편의보정 및 상세화

‘불확실성을 고려한 수자원 분야 CMIP5 자료분석’ 보고서(조재필 외, 2013)에 의하면, CMIP5의 자료의 편의보정 및 상세화는 먼저, 기상청 종관기상 관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 관측지점 76개 중에서 30년 자료가 존재하는 59개 관측지점의 자료를 사용하였다. 자료기간은 과거기간(historic periods)으로는 1976년부터 2005년까지 30년을 사용하였고, 미래기간(future periods)으로는 2011~2040년이다. 다만,

기상청의 KMA-12.5km 자료의 경우에는, 과거기간으로 1979-2005 기간이 사용되었다. 또한, 관측지점의 특성을 살리기 위해서 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있는 분위사상법(Quantile Mapping)을 사용하였다(조재필 외, 2013; Gudmundsson, 2012). 분위사상법의 경우 모수적 분위사상법(parametric) 및 비모수적(non-parametric) 분위사상법 중 선택하여 사용할 수 있다. 자세한 상세화 내용은 조재필 외(2013)의 ‘불확실성을 고려한 수자원 분야 CMIP5 자료분석’ 보고서를 참고하면 된다.

Table 1. The individual Global Climate Models in the study (source: Cho et al., 2013)

Model	Institute	Country	Resolution
KMA-12.5km	Korea Meteorological Administration	Korea	12.5km x 12.5km
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis	Canada	128 x 64
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory	USA	144 x 90
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamic Laboratory	USA	144 x 90
HadGEM2-CC	Met Office Hadle Centre	UK	192 x 144
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics	Russia	180 x 120
IPSL-CM5A-LR	nstitute Pierre Simon Laplace	France	96 x 96
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japan	128 x 64
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japan	128 x 64
MME			

2.2 농업기후지수

2.2.1 농업기후지수 정의와 종류

농업기후지수(agro-climatic index)는 농업생산의 관점에서 기후자원을 평가하기 위한

것으로, 기상요소의 변동특성에 따른 작물의 생육 및 생산과의 상호관계를 수치로 나타내어 지표화한 것이다. 생장도일, 식물기간, 작물기간, 무상기간, 난방도일, 냉방도일, 기온과 일사량을 이용한 기후생산력지수 등이 있다(Table 2).

Table 2. The variety of agroclimatic index used in the study

Agroclimatic Index		Description	Unit
English expression	Korean expression		
Growing Degree Day	생장도일	일 평균기온에서 생육최저온도를 뺀 값을 적산한 총온열량	°C
Effective accumulated temperature (EAT)	유효적산온도	일 평균기온에서 생육최저온도를 뺀 값을 적산한 후, 작물의 일정 발육단계 도달까지 필요한 총온열량	°C
Plant Period (PLP)	식물기간	일 평균기온 5°C 이상인 일수	day
Crop Period (CPP)	작물기간	일 평균기온 10°C 이상인 일수	day
Frost Free Days (FFD)	무상기간	서리가 내리지 않는 기간	day
Climatic Production Index: CPI	기후생산력지수	작물생산성을 나타내는 지수	-
Heating Degree Days (HDD)	난방도일	일 평균기온이 18°C 이하되는 날의 온도와 18°C와의 차이를 누적한 값	°C
Cooling Degree Days (CDD)	냉방도일	일 평균기온이 24°C 이상되는 날의 온도와 24°C와의 차이를 누적한 값	°C

2.2.1.1 생장도일 및 유효적산온도

생장도일(growing degree days; GDD)은 일 최고 및 최저온도 합을 2로 나눈 값에서 생육 최저온도(base temperature of crop)를 뺀 값의 총합으로 생장기간(growing season) 동안의 총열량을 나타낸다. 생육 최저온도는 작물별로 모두 다르다. 예를 들면, 옥수수와 벼와 같은 여름작물의 생육을 위한 최저기온은 10°C이고 겨자와 같은 봄작물의 경우는 5°C인데, 만약 벼의 생장도일을 계산할 때, 매일 평균기온에서 10°C를 뺀 값을 적산하면 된다. 이에 반해, 유효적산온도(effective accumulated temperature; EAT)는 작물재배기간 동안 작물이 일정한 발육단계를 완료하기까지 필요한 총온열량을 의미한다. 벼에 있어 수확단

계까지 필요한 총온열량은 3500~4500℃, 담배의 경우, 3200~3600℃, 가을/겨울맥류는 1700~2300℃, 메밀은 1000~1200℃으로 알려져 있다.

$$GDD = \sum \{[(T_{max} + T_{min}) / 2] - T_b\} \quad (1)$$

여기서, T_{max} 는 일 최고기온, T_{min} 은 일 최저기온, T_b 는 생육 최저온도를 의미한다.

$$EAT = (\sum \{[(T_{max} + T_{min}) / 2] - T_b\}), @ t \quad (2)$$

여기서, T_{max} 는 일 최고기온, T_{min} 은 일 최저기온, T_b 는 생육 최저온도, t 는 경과일수 (발육단계까지의 총열량)를 의미한다.

2.2.1.2 식물기간 및 작물기간

일 평균기온이 5℃ 이상인 일수를 나타내는 식물기간(plant period, PLP)은 식물온도 출현지속일이라고도 하는데, 봄에 일 평균기온이 5℃ 이상이 되는 월동작물이 생육을 다시 시작하고, 가을철에는 5℃ 이하로 기온이 내려가면 낙엽이 저서 겨울잠에 들어가게 되므로 과수와 같은 영년생 작물의 재배관리에 중요한 지표가 되는 기간이다. 특히, 과수의 생육은 5℃ 이상이 되는 때부터 시작되는데, 발아기와 개화기의 이르고 늦음은 그 지역의 식물기간이 시작된 이후부터의 일별 평균기온과 밀접한 관련이 있다(Shim et al., 2008). 작물기간(crop period, CPP) 또한 작물온도 출현일이라고 하는데, 일 평균기온이 10℃ 이상인 일수를 나타낸다. 일 평균기온이 10℃ 이상이 되면 여름작물은 생육을 시작하고, 과수는 발아, 개화 등 발육이 한층 빠르게 진행되는 환경조건이 되므로 여름작물 및 과수재배에 있어 작물기간은 중요한 지표이다. 한편, Shim et al.(2008)은 벼의 경우 자연조건 하에서 15℃ 이상이 되어야만 정상적인 육묘가 가능할 뿐 아니라 후기 생육을 위한 등숙한계온도가 15℃와 밀접한 관련이 있는 점을 고려하여 15℃ 이상이 되는 날과 15℃ 이하로 떨어지는 날간의 일수와 이 기간 중의 유효적산온도를 이용한 벼의 재배가능기간과 재배지대를 결정하는 지표로 사용하고 있다고 하였다.

$$PLP = \sum_{day} \{[(T_{max} + T_{min}) / 2] > 5^{\circ}C\} \quad (3)$$

$$CPP = \sum_{day} \{[(T_{max} + T_{min}) / 2] > 10^{\circ}C\} \quad (4)$$

여기서, T_{max} 는 일 최고기온, T_{min} 은 일 최저기온이다.

2.2.1.3 무상기간

무상기간(frost free day)은 농업생산 활동에서 중요한 인자로서 작물재배 가능기간의 한계 혹은 작물재배 적합지역 등을 검토하는데 이용할 수 있다. 무상기간은 쉽게 서리가 내리지 않는 기간으로, 늦은 봄의 마지막 서리 때(종상일)부터 초가을의 첫 서리 때(초상일)까지의 기간을 의미한다. 서리는 일정 온도 이하일 때 반드시 내리는 것이 아니라, 대기 중에 함유된 수증기의 양에 영향을 받기 때문에, 무상기간을 일 최저기온에서 직접 결정할 수는 없다. 그러나, 서리는 대개 식물 성장에 요구되는 최저기온인 5℃를 전후하여 내리므로 이것을 활용하여 무상기간을 계산할 수도 있다. 본 연구에서는 상대습도와 이슬점 온도(dew point temperature)와의 관계를 이용하여 계산하였다(Lawrence, 2005; 윤진일, 1999).

$$Td = T - ((100 - RH) / 5) \quad (5)$$

여기서, Td는 이슬점 온도이고, T는 일 평균온도인데, 여기서의 온도 단위는 Kelvin이며, RH는 일 상대습도이다.

$$\text{Frost free day} = \sum_{\text{day}} \{(T \leq 0^{\circ}\text{C}) \text{ and } (Td \geq T)\} \quad (6)$$

여기서, T는 일 평균온도이며, 여기서의 온도 단위는 Celsius degree이다.

2.2.1.4 난방도일 및 냉방도일

난방도일(heating degree day)과 냉방도일(cooling degree day)은 엄밀하게 말해서 농업기후지수는 아니다. 하지만 온실재배 농업인구가 많은 우리나라의 경우, 겨울철 온실 (혹은 하우스) 내부의 온도유지를 위한 난방도일 관련정보가 필요하다. 난방도일은 일 평균기온이 기준온도보다 ‘낮은’ 날들의 일 평균기온과 기준온도와의 차이를 계산하여 매일 매일 누적 합산한 것으로 적산온도를 계산하는 방법과 비슷하다. 여기에서 중요한 것은 실내기온의 기준인데, 사회 경제적 이유 등을 고려한 우리나라의 난방기준은 일 평균기온 18℃이다. 따라서 난방도일 = $\sum(18 - \text{일 평균기온})$ 의 식에 의해 난방도일을 계산할 수 있다(Lee, 1980; Choi, Y., 2005; 한국지구과학회, 2009). 냉방도일도 일 평균기온이 기준온도보다 ‘높은’ 날들의 일 평균기온과 기준온도와의 차이를 계산하여 매일 매일 누적 합산한 것으로 난방도일과 계산하는 방법이 같다. 난방도일과 마찬가지로, 사회 경제적 여건 등을 고려한 우리나라 냉방기준은 일 평균기온 24℃이다. 따라서 냉방도일 = $\sum(\text{일 평균기온} - 24)$ 로 표현할 수 있다(한국지구과학회, 2009).

$$HDD = \sum(18 - \text{일 평균기온}) \quad (7)$$

$$CDD = \sum(\text{일 평균기온} - 24) \quad (8)$$

2.3 분석방법

2.3.1 비교기간 및 공간규모

‘불확실성을 고려한 수자원 분야 CMIP5 자료분석’ 보고서에서 결과를 한강, 낙동강, 금강, 영산-섬진강 등 4대강 권역별로 제시하였는데(Figure 2), 농촌진흥청의 농업용 상세 전자기후도도 국가수자원관리 종합시스템(Water Mismanagement Information System, WAMIS, <http://www.wamis.go.kr/>)에서 정의된 우리나라 4대강을 중심으로 권역별 집수역 단위(hydro unit)로 제작되어있다. 따라서 향후 본 연구결과의 활용을 고려하여, 본 연구에서도 농업기후지수의 공간규모 분석결과를 한강, 낙동강, 금강, 영산-섬진강 유역으로 제시하였다(Table 3). 자료기간은 2.1.2절에서 언급한 바와 같이, 과거기간(historic periods)으로는 1976년부터 2005년까지 30년을 사용하였고, 미래기간(future periods)으로는 2011-2040년이다. 다만, 기상청의 KMA-12.5km 자료의 경우에는, 과거기간으로 1979년부터 2005년까지의 기간이 사용되었다.

계산된 농업기후지수의 과거기후에 대한 전체 비교기간은 1976-2005년(30년¹⁾)으로 하였다. Shim et al.(2008)에 의하면 따뜻한 겨울철 지속의 시작해가 1988년이라고 하였다. 그래서 1988년을 기준으로 전/후 12년과 18년(1976-1987년, 1988-2005년)으로 나누어 선 연구사례의 농업기후지수와 비교분석하였다.

2.3.2 통계적 분석방법

2.3.2.1 불확실성

Kim et al. (2013)과 조재필 외(2013)은 불확실성(uncertainty)을 관심 있는 특정 값에 대해 현재 기술수준에서 모르는 정도(degree)를 의미한다고 하였다. 전지구기후모델링 기술이 지속적인 발전으로 자연적인 기후현상을 보다 현실성 있게 모의하게 되었지만 미래 기후

1) 과거 30년 평년은 1971-2000년, 새 30년 평년은 1981-2010년(Kunkel et al., 1990; Angel et al., 1993; Arguez Anthony and Russell S. Vose, 2010)

를 전망하는 것은 여전히 많은 불확실성을 내포하고 있다(Kim et al., 2013). 따라서 기후전망의 시공간적 불확실성에 대한 정량적인 이해가 우선되어야 한다. CMIP5의 강수량 변화에는 많은 불확실성을 포함하고 있고, 기온전망에서도 모델간의 불확실성이 여전히 존재하지만, 기온전망의 불확실성은 강수전망의 불확실성에 비해서 상대적으로 작다고 하였다(조재필 외, 2013). 그럼에도 불구하고, CMIP5 기후모델이 보여주는 미래기후에 대한 전망은 현재 기술수준에서 최선이다(조재필 외, 2013). 본 연구에서는 저해상도 RCP 시나리오 기반의 일 기후전망자료인 CMIP5 자료를 유역규모에서 사용할 수 있도록 상세화 및 편의보정된 자료중에서 기온자료만을 활용하였다.

Boxplot은 상당히 많은 양의 자료를 5개의 통계적 요소로 쉽게, 예를 들면, median, upper quartile, lower quartile, minimum data value, and maximum data value로 자료의 범위와 분포를 효과적으로 요약해서 나타내준다는 장점이 있다. 또한, boxplot은 몇 안 되는 통계분석 중에서 outlier(혹은 multi outlier)를 보여준다는 장점을 가지고 있다. outlier는 특정 자료에서 발생할 수 있는 극치값의 가능성 차원에서 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 본 연구에서는 boxplot과 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 접근방법을 통해서 기후변화에 대한 불확실성 정보를 제공하고자 하였다.

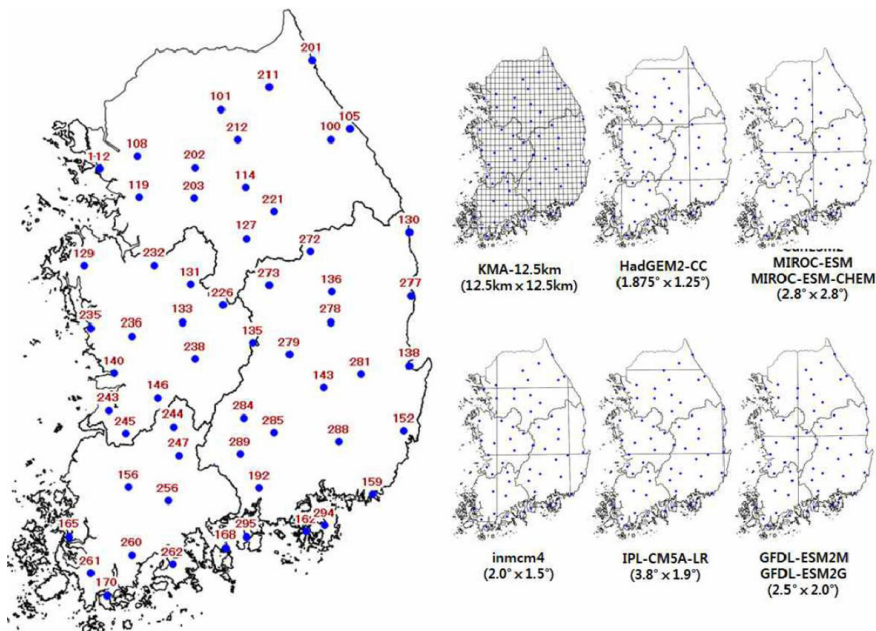


Figure 2. The weather stations of each basin (hydro-unit) used in the study and the resolution of each individual GCMs (source: Cho et al., 2013).

Table 3. The number of weather station in major four basins (hydro-unit)

Basin	number of weather station in Basin
Han	15
Nakdong	21
Geum	13
Seumjin-Youngsan	10
Total weather stations	59

2.3.2.1 확률분포

Boxplot이 많은 분량의 자료를 통계적으로 간단하게 보여주는 장점이 있지만, 상세한 통계적 정보를 추가적으로 획득하기 위해서는 다른 통계방법, 예를 들면, 히스토그램 혹은 확률분포와 같은 통계방법과 결합할 필요가 있다. 또한, 상세화된 기후예측자료를 이용하여 계산된 농업기후지수들의 변화를 전망하기 위해서는, 관측자료에 의해 계산된 농업기후지수와 기후모델의 예측자료에 의해 계산된 농업기후지수와의 비교를 통한 모델의 모의능력 분석이 필요하다. 확률분포(probability density function, PDF)는 자료의 형태와 분포를 동일 구간에 대한 빈도분포를 통해서 효과적으로 보여주는 통계방법 중에 하나이다. 그래서 본 연구에서는 확률분포를 통해 개별 기후모델로부터 계산된 농업기후지수의 분포형태와 범위를 비교하고자 하였다. 관측자료로부터 계산된 농업기후지수에 가까운 모의결과를 보이는 기후모델의 신뢰도가 높다고 판단할 수 있을 것이다.

2.3.3 공간내삽

계산된 농업기후지수는 거리역산가중(Inverse Distance Weighting, IDW) 방법을 통해 공간분포도로 작성되었다. IDW는 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중값을 주고 반대로 멀어질수록 가중값의 영향력이 줄어드는 공간내삽(spatial interpolation)방법으로 본 연구에서는 인접한 3지점의 값을 이용하였는데, ArcGIS 10(ESRI Inc., U.S.A)의 Spatial Analysis의 IDW 함수를 이용하여 자동적으로 공간내삽할 수 있는 script에 의해 농업기후지수의 공간분포도를 작성하였다.

3. 연구결과

3.1 농업기후지수의 변화

3.1.1 식물기간과 작물기간

3.1.1.1 식물온도 출현지속기간의 변화

Figure 3은 과거 1976-1987년 및 최근 1988-2005년까지의 식물기간(plant period, PLP)의 변화이다. 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 식물 온도 5℃의 평균 출현지속기간은 과거 12년(1976-1987년)간 보다 평균 6일 길어졌다. 이 결과는 Shim et al.(2008)의 약 9일 길어졌다는 결과에 비해 약 3일 짧게 계산되었는데, 이것은 농업기후지수 계산에 참여한 관측지점의 개수와 분석기간이 다른 데에서 발생한 차이라고 판단된다. 따라서, 두 연구결과의 비교에서 발생하는 절대적인 숫자의 차이보다는 식물기간 변화의 경향을 비교하는 것이 타당하다고 생각한다. 경향을 보면, 대관령 지역의 식물온도 5℃의 출현지속일은 210일로 Shim et al.(2008)의 결과와 같았으며, 중부 내륙지방은 250일 내외로 Shim et al.(2008) 결과와 비슷하였고, 부산을 중심으로 한 남부해안 지역은 290일로 선 연구(280일, Shim et al., 2008)와 비교하여 약 10일 차이가 발생하였다. 본 연구결과에서 안동이 과거에 비해 현재 식물기간이 25일 이상 길어졌고, 문경은 오히려 과거에 비해 3일 정도 짧아진 것으로 나타났다.

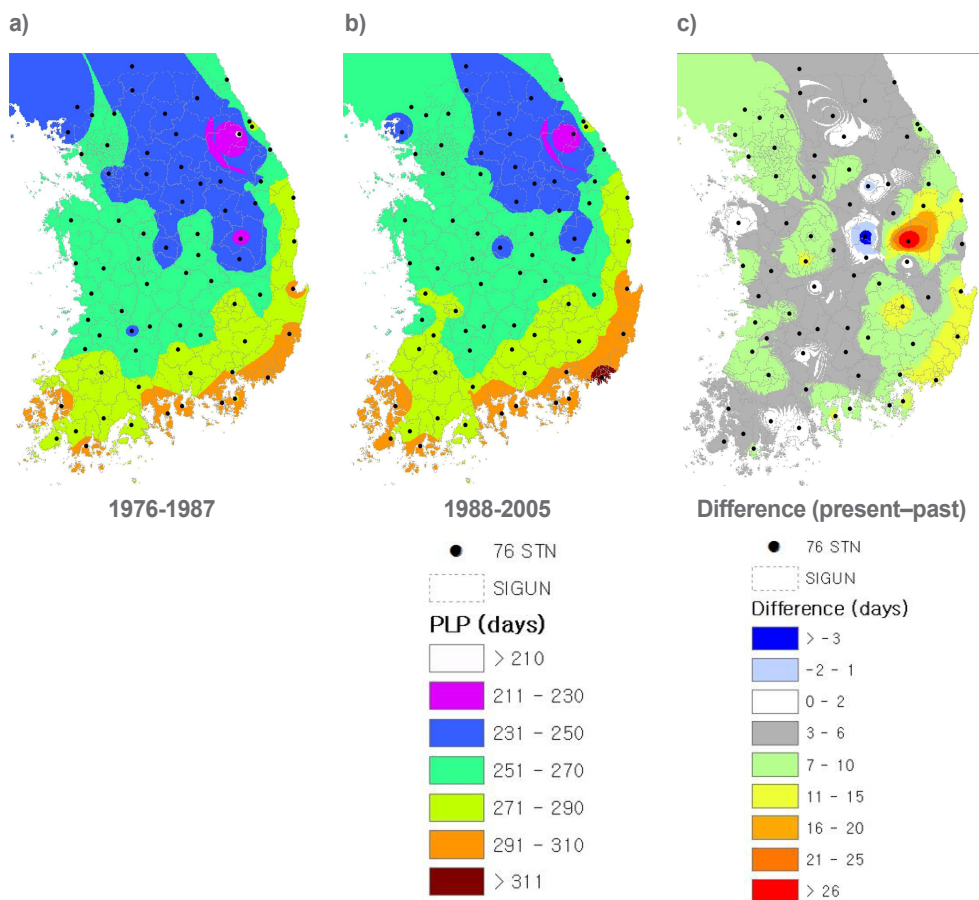


Figure 3. The change of observed plant period (PLP). The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.1.1.2 작물온도 출현지속기간의 변화

Figure 4는 과거 1976-1987년 및 최근 1988-2005년까지의 작물기간(crop period, CPP)의 변화이다. 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 작물 온도 10℃의 평균 출현지속기간은 과거 12년(1976-1987년)간 보다 평균 5일 길어졌다. 이 결과는 Shim et al.(2008)의 약 4일 길어졌다는 결과와 차이가 없는 것으로 판단된다. Shim et al.(2008)은 최근 작물온도 출현지속기간이 가장 크게 늘어난 지역이 수원, 청주, 대전 등으로 과거보다 10일 이상 길어졌다고 하였는데, 본 연구에서는 포항과 울산으로 주로 해안 지역에서 작물온도 출현지속기간이 12일 이상 길어졌다. 식물기간과 같이 안동과 문경에서 과거에 비해 현재 작물기간의 차이가 큰 것으로 나타났다.

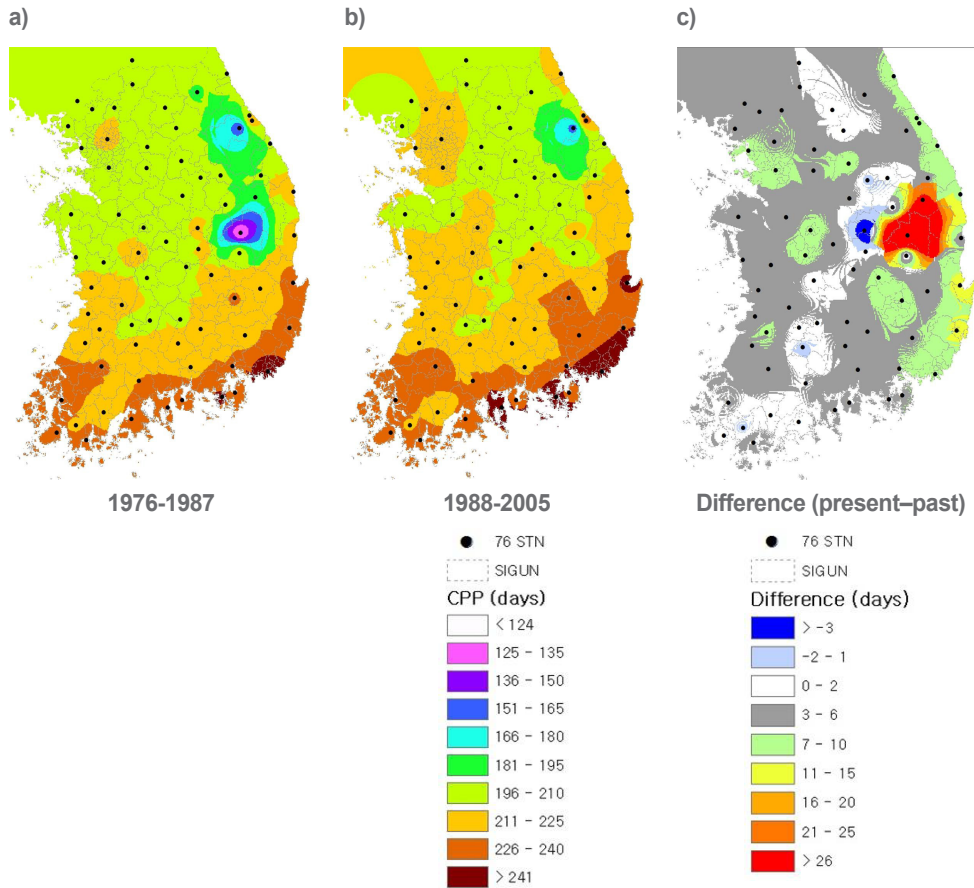


Figure 4. The change of observed crop period (CPP). The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.1.2 생장도일의 변화

3.1.2.1 생장도일의 변화

Figure 5는 과거 1976-1987년 및 최근 1988-2005년까지의 생장도일 (growing degree days; GDD)의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 식물온도의 출현지속기간과의 비교를 위해 생육 최저온도(base temperature of crop)를 5℃로 결정하여 생장도일을 계산하였다. 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 생장도일은 과거 12년(1976-1987년)간 보다 최대 46℃ 증가, 최소 145℃ 감소하였으며, 공간평균으로는 43℃ 감소한 것으로 나타났다.

3.1.1.1과 3.1.1.2(Figure 3 and 4)에서 최근 1988–2005년의 식물온도와 작물온도 출현지속기간은 과거 1976–1987년와 비교하여 확실하게 증가했지만 식물의 생장발육단계에 필요한 총열량은 최근 들어 감소한 지역이 증가하였다(Figure 5c). 감소한 지역은 주로 중부산간으로 나타났으며, 반대로 총열량이 증가한 지역은 울산으로 작물온도 출현지속기간이 과거보다 12일 이상 증가한 결과에서 비롯된 것으로 판단된다.

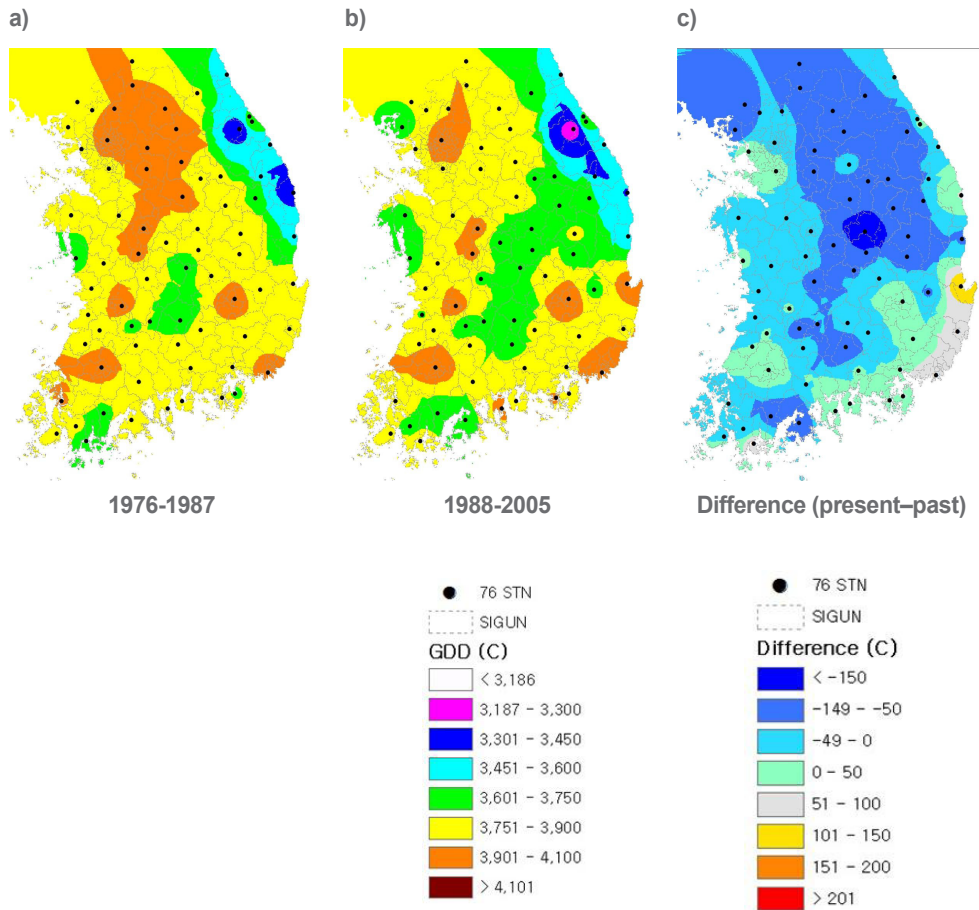


Figure 5. The change of observed growing degree day (GDD) based on the temperature 5°C.
The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.1.3 무상일수의 변화

3.1.3.1 서리가 내리지 않는 기간(무상일수)의 변화

무상기간(frost free day) 혹은 무상일수란 서리가 내리지 않는 기간으로 바꿔 말하면, 엄밀하지는 않지만 작물이 자랄 수 있는 기간, 즉 ‘작물재배 가능기간’이라고도 말할 수 있다. 일반적으로 개마고원 지대가 120일로 가장 짧으며, 제주도가 275일로 가장 길다. 남해안 지대는 250일이며, 동해안 지방이 서해안 지방보다 일반적으로 길고 내륙 지방은 180-200일이다. 무상일수는 일반적으로 남쪽에서 북쪽으로 갈수록, 해안에서 내륙으로 갈수록 짧아진다. 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 무상일수는 과거 12년(1976-1987년)간 보다 최대 12일 증가하였으며 공간평균으로는 3일 증가한 것으로 나타났다(Figure 6). 하지만 Figure 6c에서와 같이 안동을 중심으로 한 산간지역의 무상일수는 감소한 것으로 나타났다. 무상일수가 감소했다는 것은 작물재배 가능기간이 감소하여 작물 생산 등과 관련한 농업활동에는 부정적인 결과를 가져올 수 있을 것으로 예상할 수 있는데, 3.1.1.1과 3.1.1.2절에서 식물 및 작물온도 출현지속시간이 증가한 것과 상반된 반응이다. 하지만, 3.1.2.1절의 작물생장 발육단계에 필요한 총열량을 나타내는 생장도일의 경우, 중부내륙과 산간지역의 생장도일이 감소한 것은 무상일수가 이들 지역에서 감소한 것과 연관된 결과라고 할 수 있다. 또한, 표면온도가 0℃보다 낮아지는 일수를 계산한 것이 Figure 7인데, 무상일수와 비교해 보면, 표면온도가 0℃보다 낮아지는 일수가 경북내륙 산간지역에서는 증가한 것(Figure 7c)으로 나타나서 이 지역의 무상일수가 감소한 Figure 6c의 결과를 뒷받침해주고 있다.

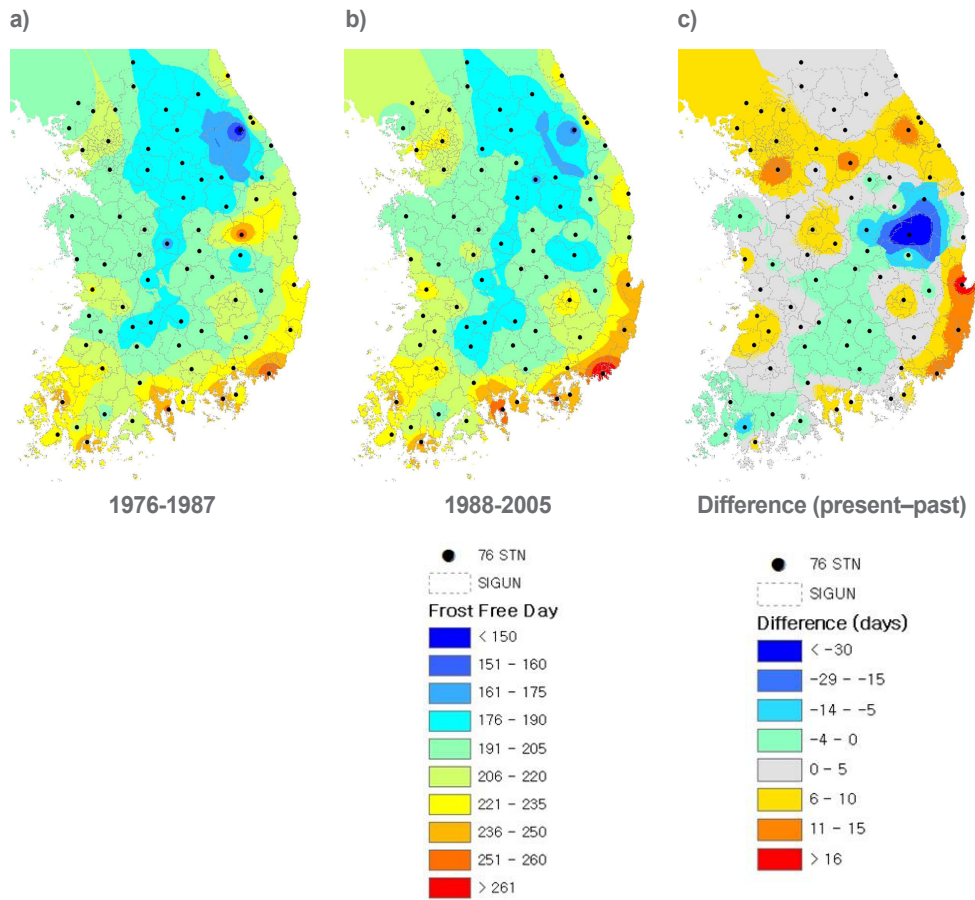


Figure 6. The change of observed frost free day. The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

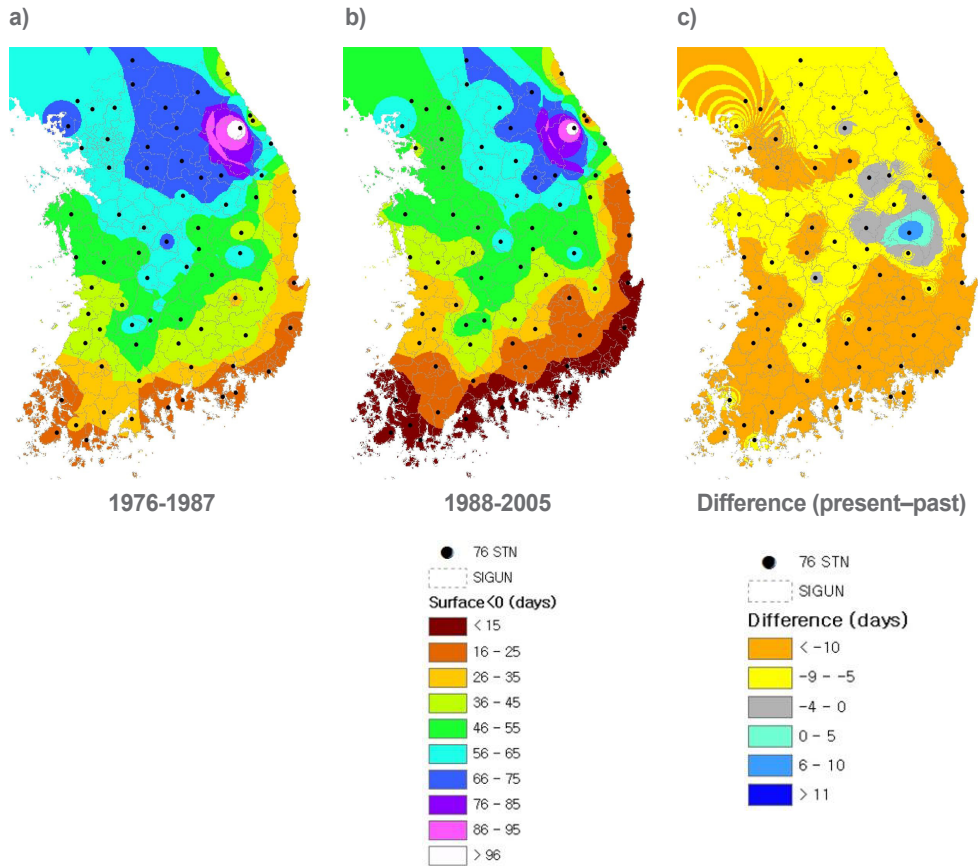


Figure 7. The change of observed surface temperature under 0°C. The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.1.4 난방도일과 냉방도일의 변화

3.1.4.1 난방도일의 변화

Figure 8은 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 난방도일(heating degree day, HDD)과 과거 12년(1976-1987년)의 난방도일을 나타낸 것으로 과거보다 공간평균적으로 51°C 감소한 것으로 나타났다. 난방도일은 9월부터 이듬해 5월까지의 가을부터 겨울기간 동안 계산되는 것으로 이 기간의 난방도일이 감소했다는 것은 난방에 필요한 에너지 비용이 줄어 들 수 있다고 예상할 수 있다.

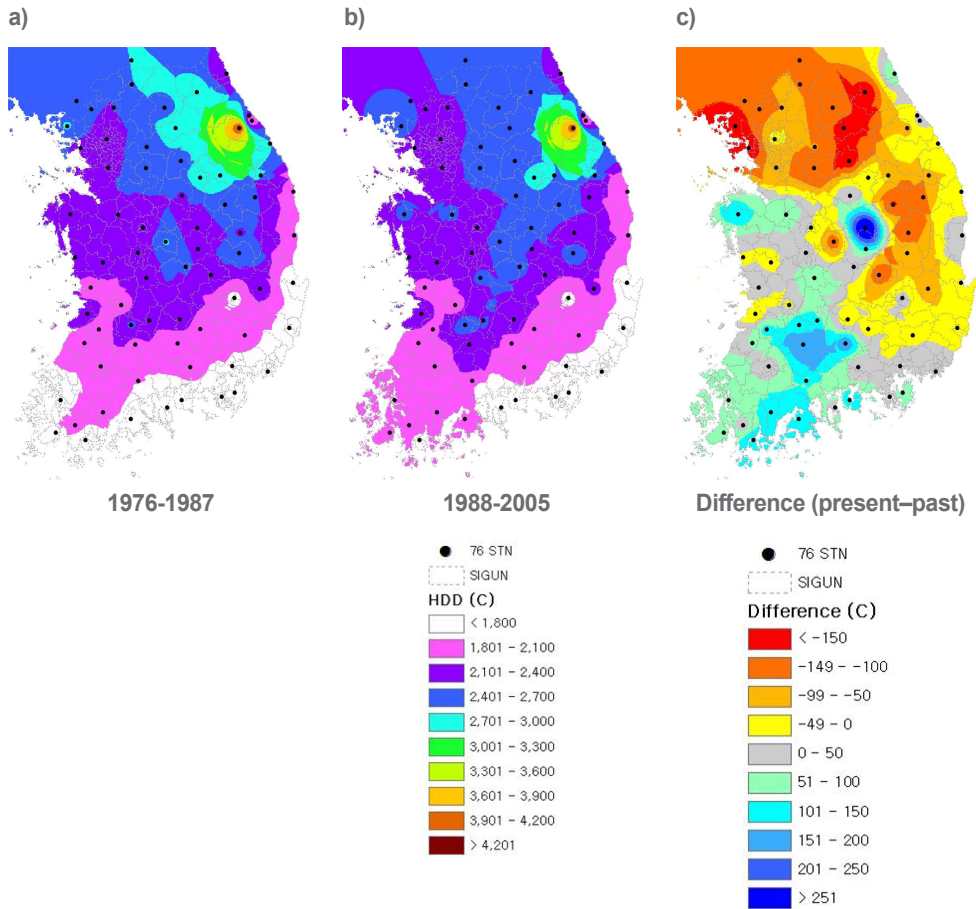


Figure 8. The change of observed heating degree day. The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.1.4.2 냉방도일의 변화

Figure 9는 최근 18년(1988-2005년)간 제주도를 제외한 수원 등 59개 지역의 냉방도일(cooling degree day, CDD)과 과거 12년(1987-1987년)의 냉방도일을 나타낸 것이다. 냉방도일은 7월부터 8월까지 여름동안 계산되었는데, 최근 냉방도일은 과거보다 공간평균적으로 7°C 정도 증가한 것으로 나타나서, 전반적으로는 난방도일이 감소한 것과 반대로 냉방에 필요한 에너지 비용이 증가할 수 있다고 예상할 수 있다. 하지만, 중부산간지역의 냉방도일은 감소하여 과거보다 최근의 냉방도일이 감소하였고, 서쪽 및 동쪽 해안지역과 중남부지역의 냉방도일은 과거보다 증가하여 냉방에 필요한 총열량이 증가한 것으로 나타났다(Figure 9c).

중부산간지역의 냉방도일이 감소한 것은 산간지역의 여름기온은 낮아질 수 있고, 해안지역의 여름기온은 높아질 수 있다고 가정할 수 있지만, 대부분의 관측소가 산간지역에는 많지 않고, 해안에 밀집한 대도시에는 관측소가 많으며, 대도시 관측소의 높은 온도가 자료에 반영되었을 가능성 등에 대한 확인이 선행되어야 한다.

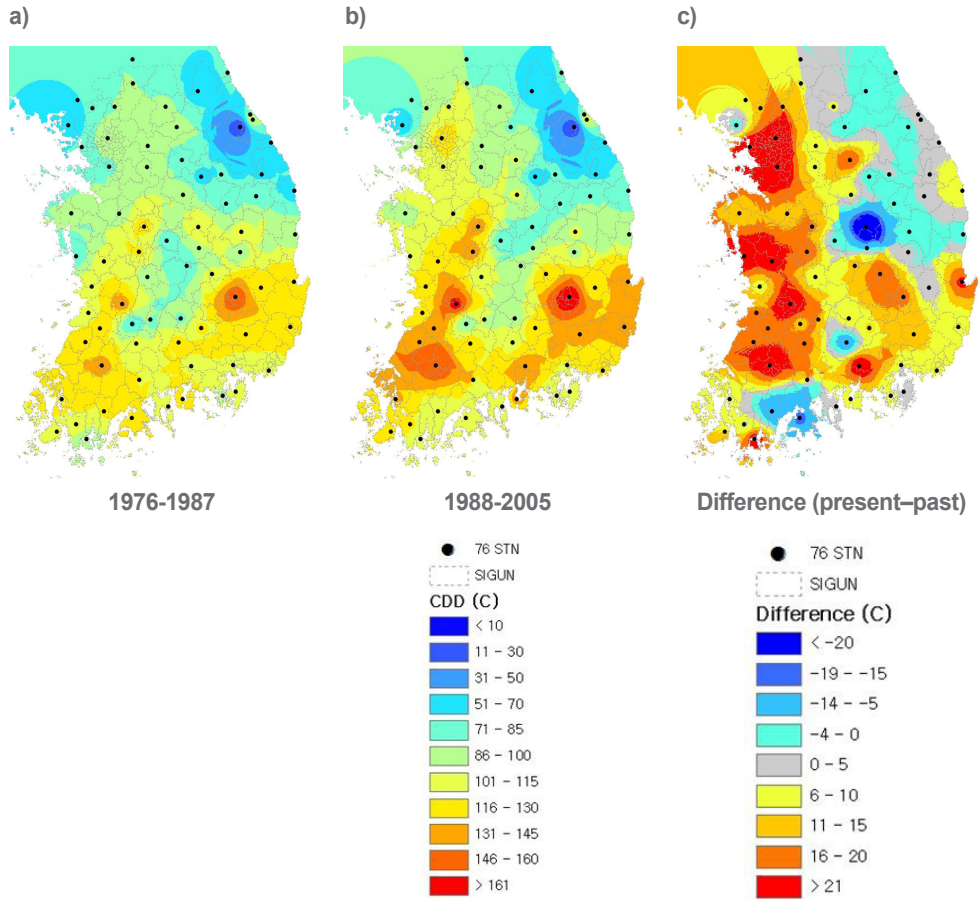


Figure 9. The change of observed cooling degree day. The difference of plant period between 1976-1987 and 1988-2005.

3.2 농업기후지수의 공간분포 변화와 불확실성 전망

3.2.1 기후모델의 재현성

3.2.1.1 식물온도와 작물온도의 출현지속기간 재현성

Figure 10은 식물온도와 작물온도의 개별 기후모델의 확률분포를 나타낸 것이다. 1976-2005년 30년 동안, KMA-12.5km를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균 식물온도 출현지속기간은 268일이며, 가장 빈도가 높은 식물온도 출현지속기간은 258일로 평균보다 지속기간이 10일 짧은 것이 확률적인 특징으로 나타났다. KMA-12.5km에서만 가장 빈도가 높은 식물온도 출현지속기간이 273일로 나타나서 다른 8개 개별 기후모델과 관측자료의 가장 빈도가 높은 식물온도 출현지속기간보다 14일(약 2주) 정도 지연되는 것으로 계산되었다(Figure 10a). 그러나 Figure 10b의 boxplot을 보면, KMA-12.5km(273일)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 식물온도 출현지속기간의 중앙값은 266일, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(262일)를 제외하고 평균 254일, 75퍼센타일은 KMA-12.5km(291일)를 제외하고 평균 281일로 나타났다. 과거 30년 기간 동안, 식물온도 출현지속기간에 대한 9개 개별 기후모델의 불확실성은 23%로 계산되었다(Figure 10b). 관측자료의 식물온도 출현지속기간에서 나타난 불확실성뿐만 아니라 개별 기후모델에서 예측된 과거기간 동안의 자료의 식물온도 출현지속기간의 불확실성이 거의 같기 때문에 개별 기후모델과 MME 평균의 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

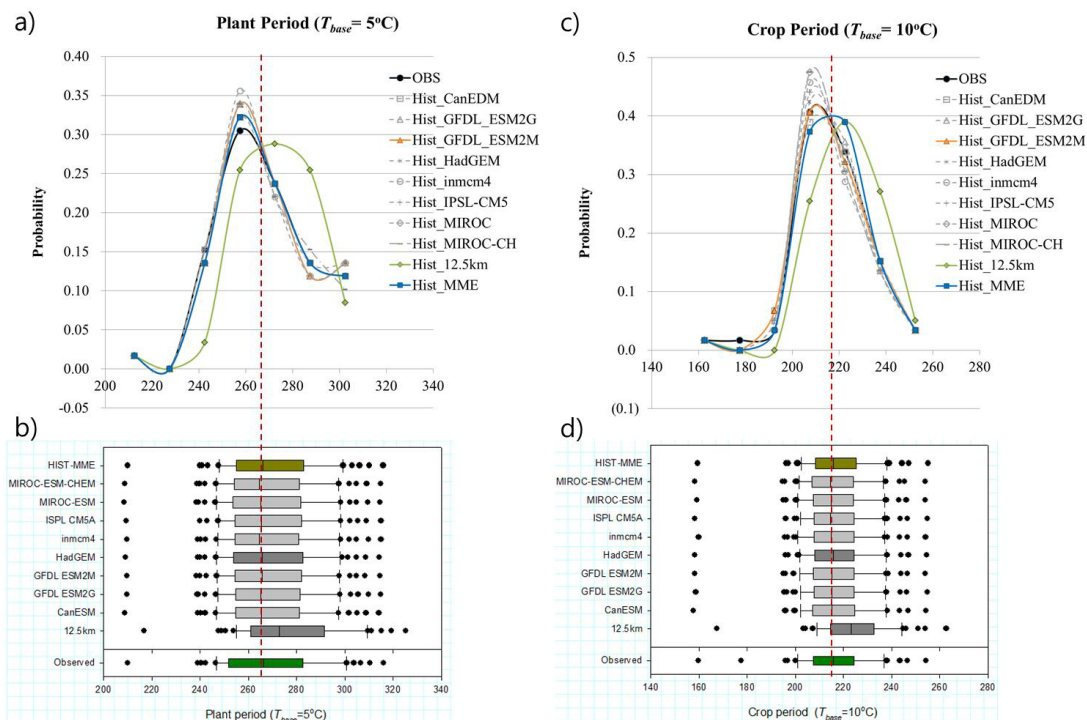


Figure 10. Plant period (5°C) and crop period (10°C) on each GCMs during 1976-2005. Black solid lines represent observed PLP and CPP on the top PDF (probability density function) plots. Red dash lines are the extended line of median of observed index on boxplots.

작물온도 출현지속기간의 경우, 8개 개별 기후모델의 평균은 218일, 가장 빈도가 높은 작물 온도 출현지속기간은 208일로 나타났다. MME 평균에서 가장 빈도가 높은 작물온도 출현 지속기간은 217일, KMA-12.5km 기후모델에서 가장 빈도가 높은 작물온도 출현지속기간이 225일로 나타났다(Figure 10c). Figure 10d를 보면, KMA-12.5km(223일)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 식물온도 출현지속기간의 중앙값은 217일, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(215일)를 제외하고 평균 202일, 75퍼센타일은 KMA-12.5km(233일)를 제외하고 평균 224일로 나타났다. 과거 30년 기간에 대한 작물온도 출현지속기간에 대한 9개 개별 기후모델의 불확실성은 평균 18%로 계산되어, 식물온도 출현지속기간의 불확실성보다는 작게 나타났으며, 식물기간과 마찬가지로 관측자료의 불확실성과 개별 기후 모델 및 MME 평균의 불확실성은 같은 것으로 나타났다.

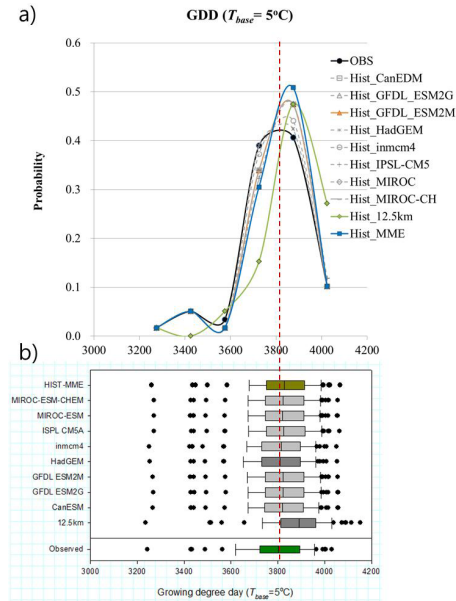


Figure 11. Growing degree day (GDD) under 5°C each GCMs during 1976-2005. Black solid lines represent observed growing degree day on the top pdf (probability density function) plots. Red dash lines are the extended line of median of observed index on boxplots.

3.2.1.2 생장도일의 재현성

Figure 11은 관측자료와 9개 개별 기후모델에서 생육 최저온도 5°C에서 재배기간 동안 필요한 총열량의 확률분포와 boxplot을 나타낸 것이다. 관측자료에 의한 생장도일의 평균은 3807°C이고 가장 빈도가 높은 구간은 3800°C에서 3950°C이다. 개별 기후모델뿐만 아니라 MME 평균의 자료 분포와 형태는 관측자료의 분포 및 형태와 다르게 평균값에서 오른쪽으로 약간 이동된 형태를 보였다. 관측자료에 의한 생장도일을 제외하고 KMA-12.5km를 포함한 9개 개별 기후모델과 MME 평균에서 가장 빈도가 높은 총열량은 3900°C로 관측자료에 의한 생장도일의 가장 높은 빈도가 높은 구간보다 50-100°C shift되었기 때문인 것으로 판단된다. Figure 11b를 보면, KMA-12.5km(3890°C)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 생장도일의 중앙값은 3818°C, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(3815°C)를 제외하고 평균 3743°C, 75퍼센타일은 KMA-12.5km(3961°C)를 제외하고 평균 3906°C로 나타났다. 과거 30년 기간에 대한 작물온도 출현지속기간에 대한 개별 기후모델의 불확실성은 평균 13%로 계산되었다. 관측자료와 개별 기후모델 및 MME 평균의 중앙값의 차이는 약 20°C 정도의 차이를 보였지만, 관측자료의 불확실성과 개별 기후모델 및 MME 평균의 불확실성은 거의 같게 나타났다.

3.2.1.3 무상기간의 재현성

Figure 12는 관측자료와 9개 개별 기후모델에서 서리가 내리지 않은 기간의 확률분포를 나타낸 것으로 관측자료와 9개 개별 기후모델 및 MME 평균의 평균 무상일수는 208일이고, 과거 무상기일뿐 아니라, 9개 개별 기후모델 및 MME 평균에서 가장 빈도가 높은 무상일수는 202일로 나타났다. 또한 9개 개별 기후모델과 MME 평균은 관측자료의 무상일수의 분포와 형태를 잘 모사하는 것으로 나타났다(Figure 12a). Figure 12b를 보면, KMA-12.5km (211일)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 무상기일의 중앙값은 204일, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(197일)를 제외하고 평균 191일, 75퍼센타일은 KMA-12.5km (231일)를 제외하고 평균 224일로 나타났다. 과거 30년 기간 동안의 무상기일에 대한 9개 개별 기후모델의 불확실성은 평균 36%으로 나타났다.

3.2.1.4 난방도일과 냉방도일의 재현성

Figure 13은 관측자료와 9개 개별 기후모델에서 계산된 난방도일과 냉방도일의 확률분포와 boxplot이다. 관측자료의 평균 난방도일은 2176°C이며, 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 가장 빈도가 높은 난방도일 값은 2100°C와 2300°C였다(Figure 13a and Figure 13b). 냉방도일의 경우, 관측자료의 냉방도일과 9개 개별 기후모델 및 MME 평균의 평균 냉방도일은 106°C로 계산되었다(Figure 13c and Figure 13d). 난방도일과 냉방도일의 분포와 형태는 앞서 설명된 다른 농업기후지수의 분포와 형태와 크게 다르게 나타났다. KMA-12.5km의 평균 냉방도일이 116°C로 가장 높게 나타났는데(Figure 13d), 냉방도일이 7월부터 8월 여름동안에 계산된 것을 고려해 볼 때, KMA-12.5km의 일 최고기온 자료를 다른 8개 개별 기후모델과 비교해 볼 필요가 있다.

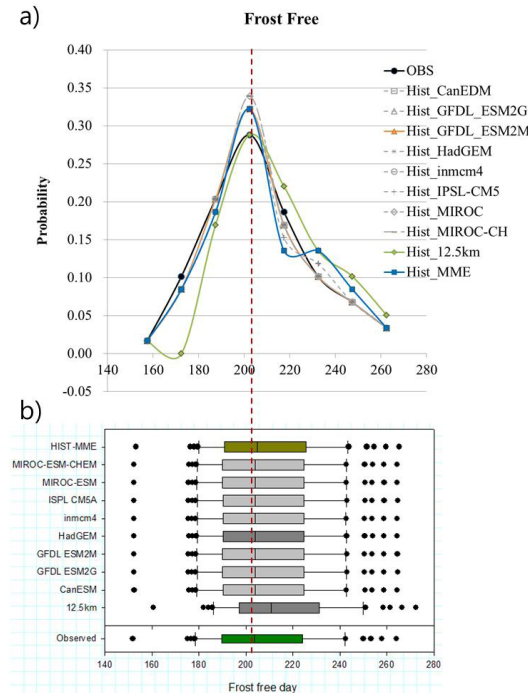


Figure 12. Frost free day on each GCMs during 1976-2005. Black solid lines represent observed frost free day on the top pdf (probability density function) plots. Red dash lines are the extended line of median of observed index on boxplots.

Lee et al. (2012)에 의하면 12.5km 고해상도 지역기후모델(Regional Climate Model, HadGEM3-RA)에 의해 생산된 JJA(June, July, and August) 기간 동안의 일 최고기온이 관측자료보다 높게 예측되었다고 하였는데, KMA-12.5km는 지역기후모델임을 고려할 경우, 본 연구에서 bias correction을 적용하였다 하더라도 지역기후모델의 특성이 그대로 유지되었을 것으로 생각한다. 따라서, KMA-12.5km의 냉방도일이 다른 8개 개별 전지구기후모델보다 높게 계산되었을 뿐만 아니라 난방도일도 다른 8개 개별 전지구기후모델보다 낮게 계산된 이유로 판단된다. Figure 13b를 보면, KMA-12.5km(2032℃)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 난방도일의 중앙값은 2157℃, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(1830℃)를 제외하고 평균 1939℃, 75퍼센타일은 KMA-12.5km(2234℃)를 제외하고 평균 2395℃로 나타났다.

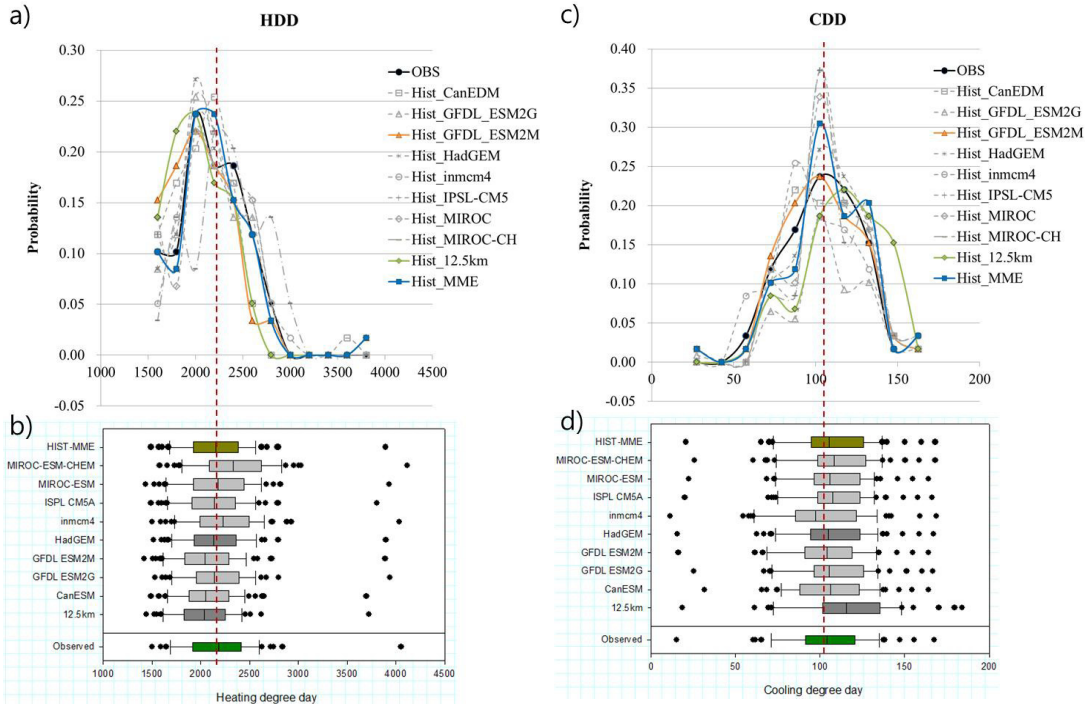


Figure 13. Heating degree day and cooling degree day on each GCMs. Black solid lines represent observed heating and cooling degree days on the top pdf (probability density function) plots. Red dash lines are the extended line of median of observed index on boxplots.

과거 30년 기간 동안의 난방도일에 대한 9개 개별 기후모델의 불확실성은 평균 21%으로 나타났다. Figure 13d의 냉방도일에서, KMA-12.5km(115℃)를 제외하고 8개 개별 기후모델과 MME 평균, 과거 냉방도일의 중앙값은 105℃, 25퍼센타일은 KMA-12.5km(102℃)를 제외하고 평균 94℃, 75퍼센타일은 KMA-12.5km(134℃)를 제외하고 평균 122℃로 나타났다. 과거 30년 기간 동안의 냉방도일에 대한 9개 개별 기후모델의 불확실성은 평균 28%으로 나타났다. 앞서 언급한 다른 4개의 농업기후지수의 9개 개별 기후모델의 자료 분포 및 형태, 불확실성 폭이 일관적으로 나타난 것과는 다르게 매우 다양하게 양상을 보였으며, 난방도일에서는 MIROC-ESM-CHEM과 inmcm4가 다른 7개 개별 기후모델과 MME 평균보다 높게 전망하였고, 냉방도일에서는 inmcm4만 다른 8개 개별 기후모델과 MME 평균보다 낮게 전망하였다.

3.2.2 공간변화와 불확실성

3.2.2.1 식물온도와 작물온도의 공간변화와 불확실성

Figure 14와 15는 식물온도의 출현지속기간을 앞서 2.3.1절에서 언급한 두 개의 분석 기간, 즉 따뜻한 기온이 지속되기 시작한 해 1988년(Shim et al., 2008)을 기준으로 1976-1987년과 1988-2005년에 대한 식물온도 출현지속기간의 한반도 공간내삽분포를 재현해 본 것이다. 또한 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 식물기간 공간내삽분포를 추가적으로 나타냈다. Figure 14와 15에서 보는 바와 같이 MME 평균이 관측자료에 의해 계산된 식물온도 출현지속기간을 공간적으로도 가장 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 지역적 불확실성을 평가할 때, 참여한 관측지점이 21개(Table 3)로 가장 많은 낙동강 유역의 불확실성(평균 31%)이 참여한 관측지점이 가장 적은 금강 유역의 불확실성(평균 10%)보다 큰 이유는 중부내륙의 영동산간 지역의 공간특성 때문인 것으로 판단된다. Figure 16과 17은 작물온도의 출현지속기간의 공간분포를 나타낸 것으로, 두 기간에 대해 MME의 작물온도 출현지속기간의 공간분포가 관측자료의 공간분포와 가장 흡사하게 나타났다. 1988-2005년 기간의 경우, 서부 해안지역의 작물온도 출현지속기간이 관측자료에서보다 기후모델과 MME에서 최소 1일에서 최대 8일까지 길어지는 것으로 평가되었다. 낙동강 유역의 작물온도 출현지속기간의 불확실성(평균 19%)도 금강 유역(평균 8%)보다 큰 것으로 나타났다. 작물온도 출현지속기간의 증가는 이 지역의 농업생산성지수 평가의 증감에 어떤 영향을 미쳤는가에 대한 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

PLP ($T_{base} = 5^{\circ}\text{C}$), 1976-1987

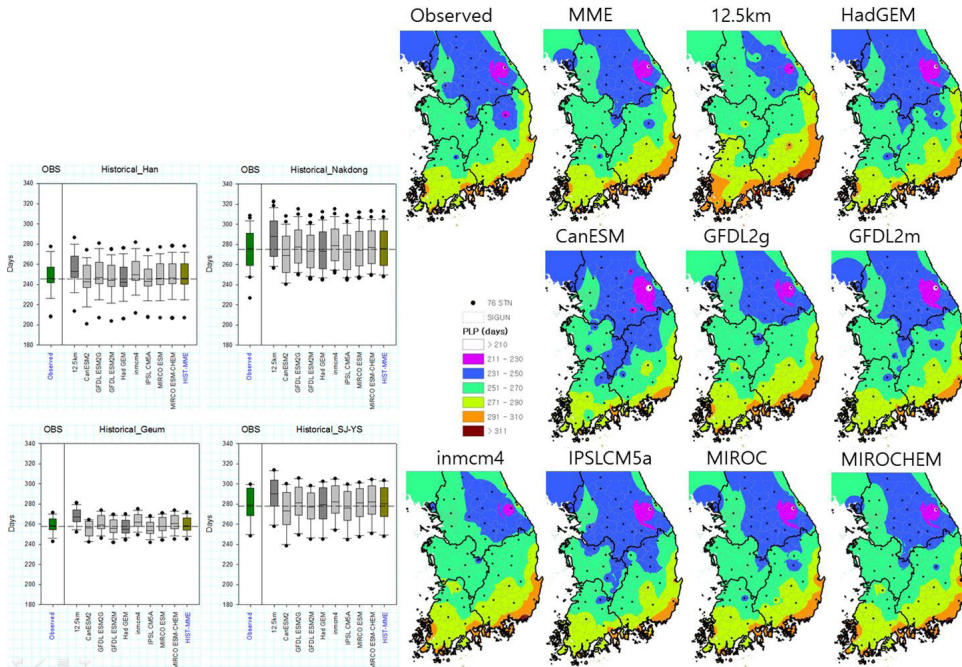


Figure 14. Plant period based on 5°C during 1976-1987.

PLP ($T_{base} = 5^{\circ}\text{C}$), 1988-2005

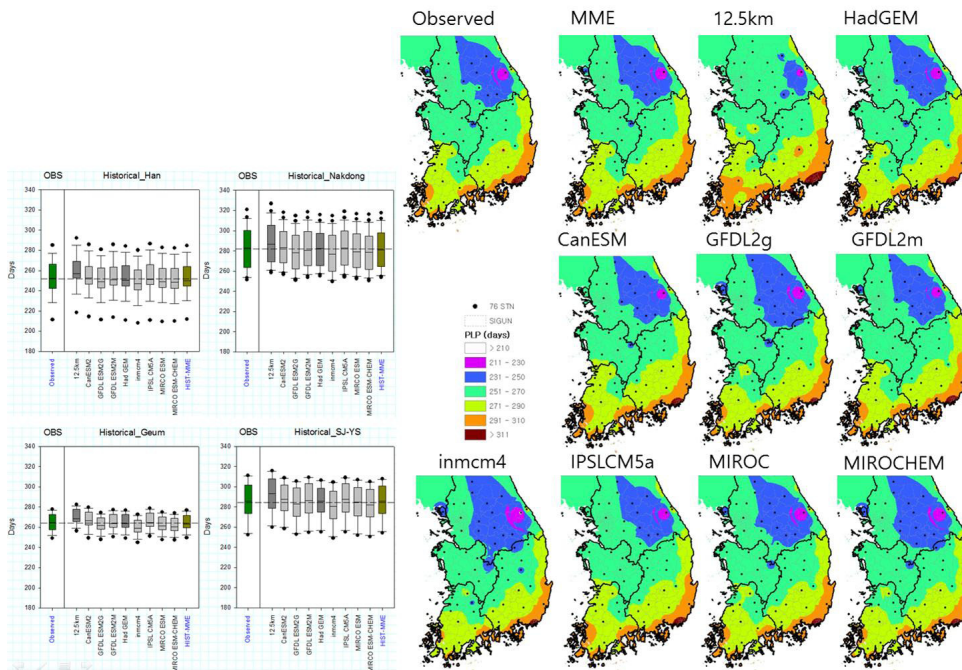


Figure 15. Plant period based on 5°C during 1988-2005.

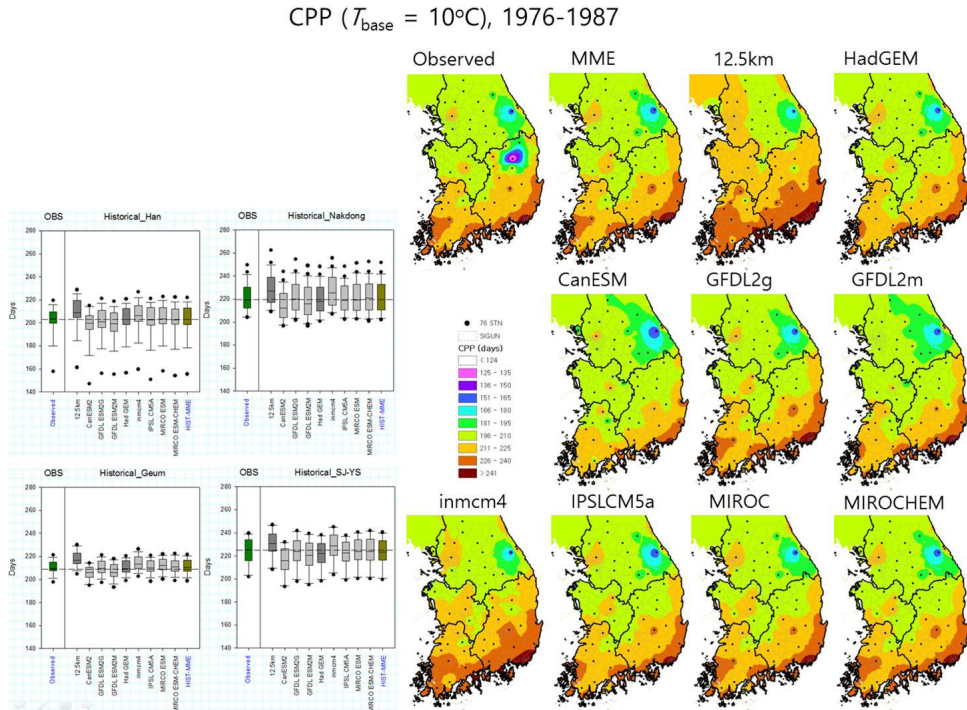


Figure 16. Crop period based on 10°C during 1976-1987.

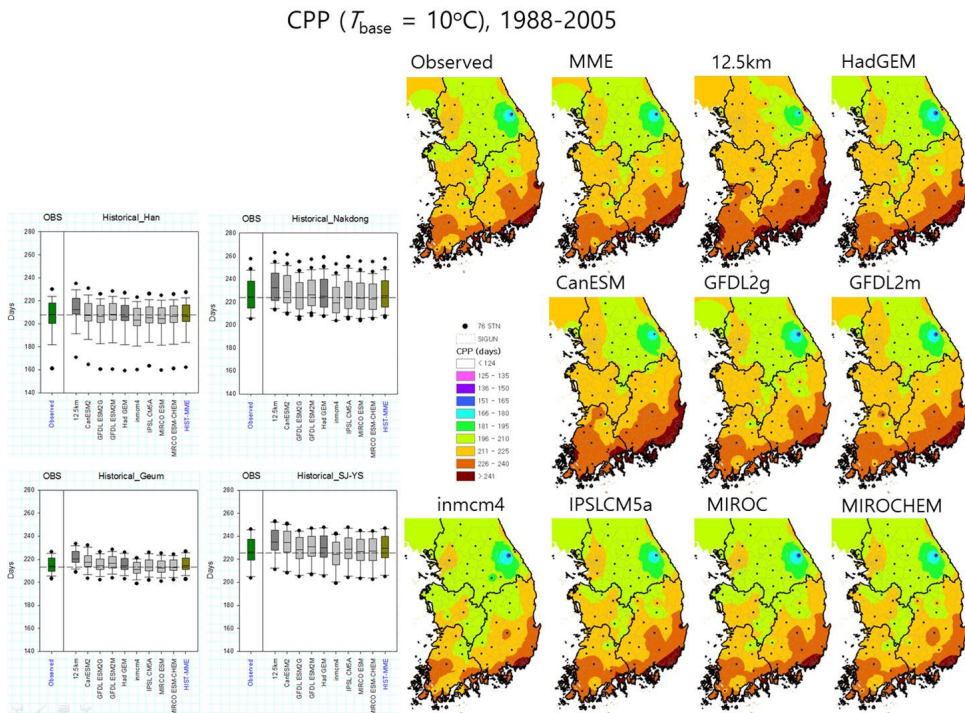


Figure 17. Crop period based on 10°C during 1988-2005.

3.2.2.2 생장도일의 공간변화와 불확실성

Figure 18과 19는 두 기간에 대하여 생육 최저온도 5°C에서 재배기간 동안 필요한 총열량을 나타낸 생장도일의 공간내삽분포이다. 앞서 비교한 식물온도 및 작물온도 출현지속기간 결과에 비해 대부분의 개별 기후모델과 MME 평균의 생장도일의 공간내삽분포는 관측자료의 생장도일 분포와 비슷하지 않았다. 게다가, 금강과 영산-섬진강 유역의 최고 및 최저값, outlier와 불확실성(금강 유역: 평균 14%, 영산-섬진강 유역:12%)의 변화는 비교적 안정적으로 작은 변화를 보였지만 한강과 낙동강 유역의 최저값과 outlier의 변화는 매우 다양한 경향을 보였다. 특히, 과거 12년(1976-1987년) 동안 한강 유역의 불확실성은 17%였고, 9개 개별 기후모델뿐만 아니라 MME 평균의 생장도일은 나머지 3개 유역과 다르게 평균보다 낮게 평가되었지만, 최근 18년(1988-2005년) 동안 한강 유역의 생장도일은 나머지 3개 유역의 생장도일과 같이 증가한 것으로 평가하였다.

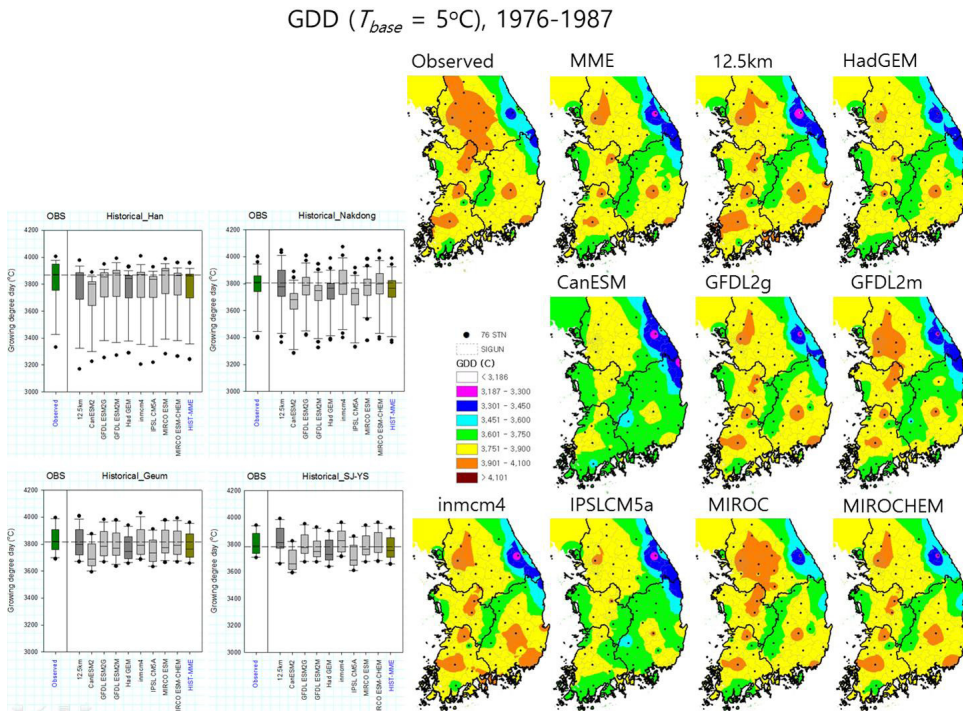


Figure 18. Growing degree day based on 5°C during 1976-1987.

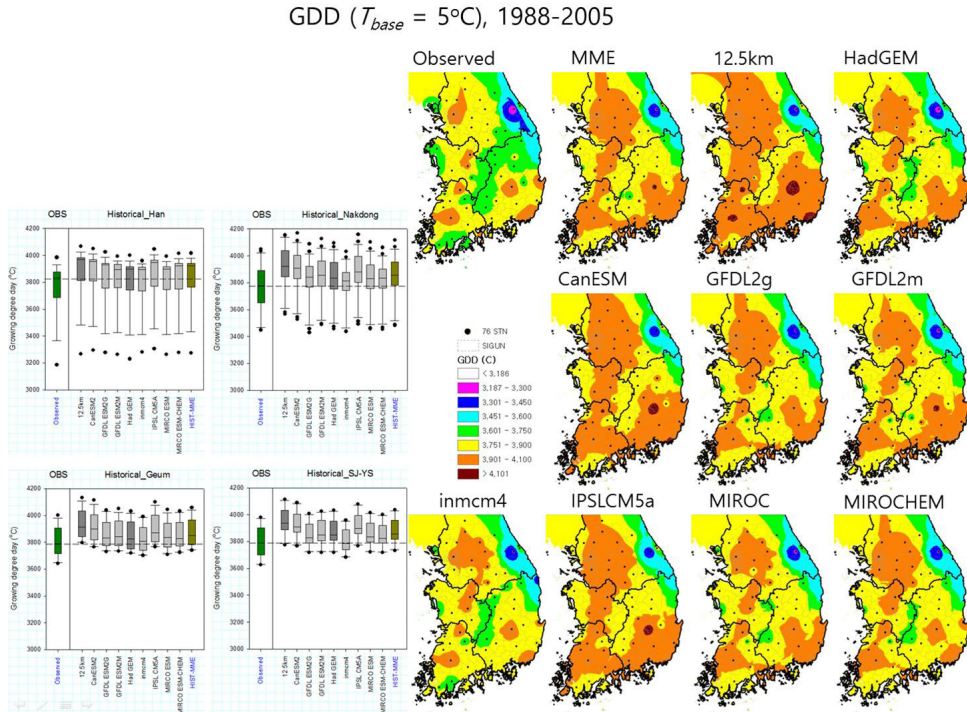


Figure 19. Growing degree day based on 5°C during 1988-2005.

3.2.2.3 무상일수의 공간변화와 불확실성

Figure 20과 21은 무상일수의 공간내삽분포를 나타낸 것이다. 1976-1987년의 경우, 안동을 제외하고, MME 평균의 무상일수 공간내삽분포는 관측자료의 무상일수의 공간내삽 분포와 흡사하게 모의되었다. 1988-2005년의 경우, MME 평균에서 차령산맥을 중심으로 한 중부내륙의 무상일수가 관측자료보다 증가한 것으로 평가되었다. 이것 또한 앞서 비교된 생육에 필요한 총열량이 증가된 것과 연관된 결과인데, 관측자료보다 총열량이 높고 작물온 도 출현지속기간이 길게 평가된 것이 추후 농업생산성지수 평가에 긍정적 영향(e.g., 생산량 증가)을 줄 것으로 예상된다. 금강 유역의 불확실성은 평균 13%로 한강(평균 27%), 낙동강 (평균 37%), 영산-섬진강(평균 34%) 유역에 비해 안정적인 변화를 보였다. 또한, 낙동강과 영산-섬진강 유역의 무상일수의 중앙값은 모두 관측값의 평균보다 낮을 것으로 평가했다.

Frost Free day, 1976-1987

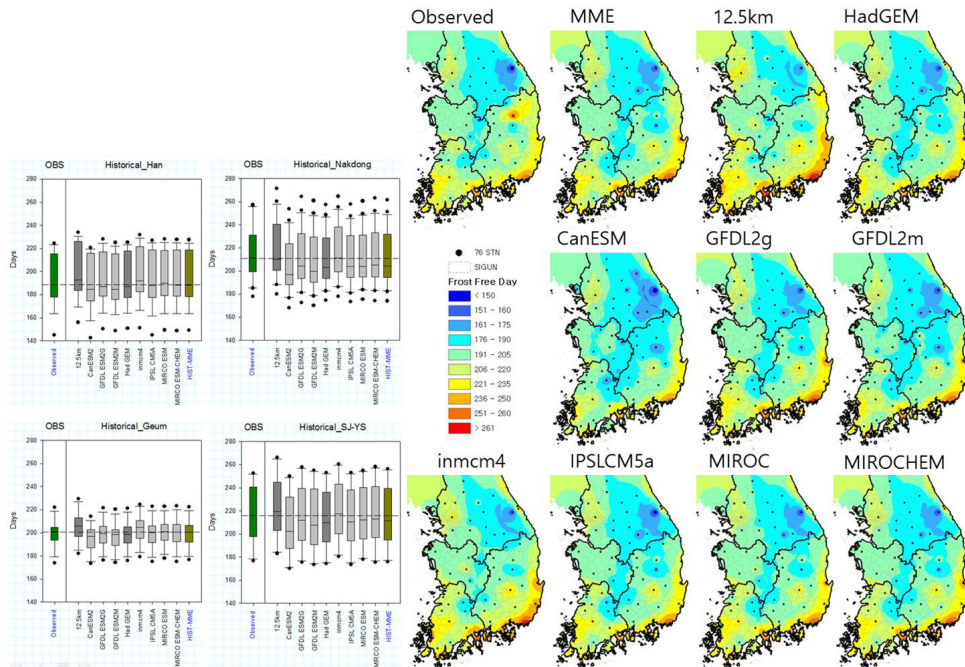


Figure 20. Frost free days during 1976-1987.

Frost Free day, 1988-2005

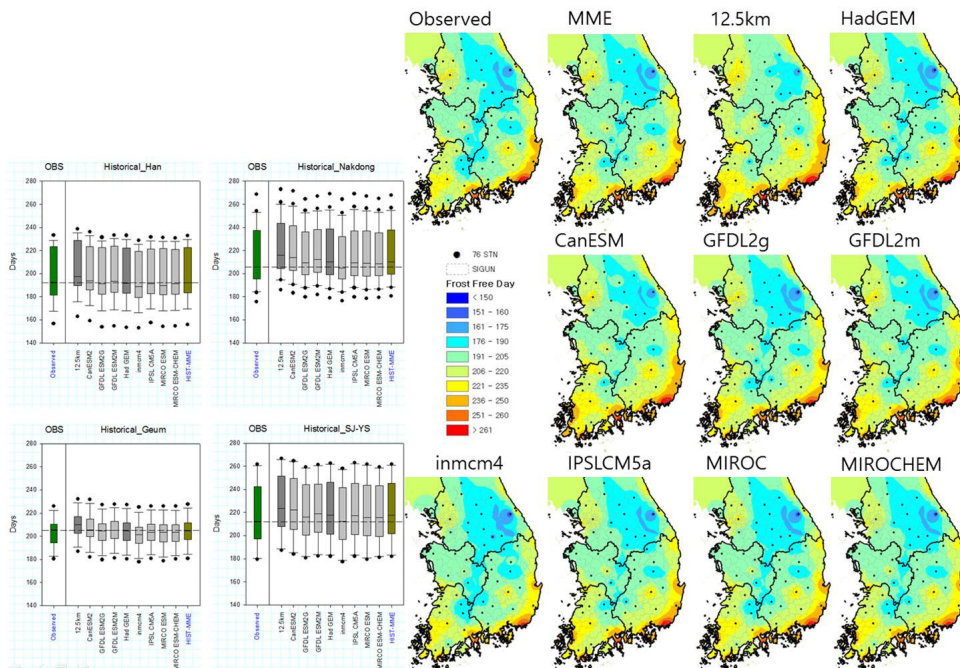


Figure 21. Frost free days during 1988-2005.

3.2.2.4 난방도일과 냉방도일의 공간변화와 불확실성

Figure 22와 23은 난방도일의 공간내삽분포를 나타낸 것이다. boxplot을 보면 9개 개별 기후모델 중 HadGEM만 4대강 유역에서 난방도일이 높게 평가되었고, 반대로 RCMs인 KMA-12.5km의 난방도일이 낮게 평가되었다. 이것은 RCMs이 GCMs과 다른 특성을 가진 이유도 있겠지만, 본 연구에서 이용된 KMA-12.5km가 bias correction이 된 자료라고 하더라도 RCMs의 특성이 그대로 유지된 이유 때문이라고 판단된다. 공간내삽분포를 보면, MME 평균의 난방도일이 관측자료의 난방도일을 잘 모사하는 것으로 판단된다. 평균 난방도일의 불확실성은 한강 유역에서 45%, 낙동강 유역에서 37%, 금강 유역이 22%, 영산-섬진강 유역이 26%로 평가되었다.

Figure 24와 25는 냉방도일의 공간내삽분포를 나타낸 것이다. 과거기간(1976-1987년)동안 냉방도일의 불확실성(한강 유역:31%, 낙동강 유역:34%, 금강 유역:31%, 영산-섬진강 유역:21%)은 최근기간(1988-2005년)동안의 냉방도일의 불확실성(한강 유역:23%, 낙동강 유역:29%, 금강 유역:28%, 영산-섬진강 유역:17%) 보다 높게 평가되었다. 또한, 1988-2005년 KMA-12.5km의 냉방도일 공간내삽분포를 보면, 상당히 높게 평가되었는데, 이것은 앞서 언급한 것과 같이 bias correction되었다 하더라도 KMA-12.5km 기후모델의 일 최고기온이 높게 평가되었기 때문이다. MME 평균의 냉방도일의 공간내삽분포가 관측자료 냉방도일의 공간내삽분포를 잘 모사하였다.

HDD2, 1976-1987

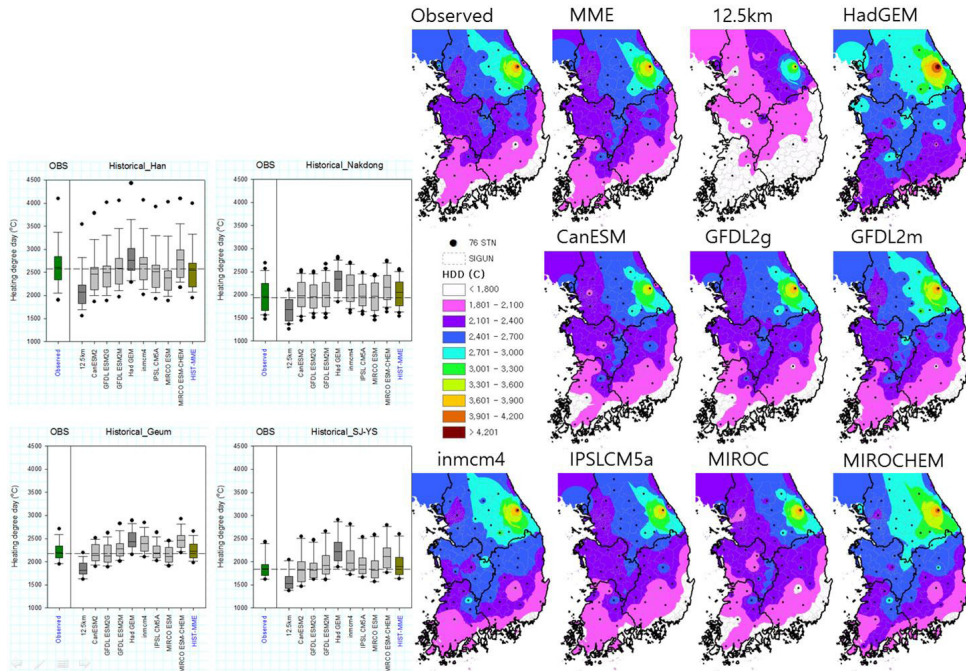


Figure 22. Heating degree days from September to May during 1976-1987.

HDD2, 1988-2005

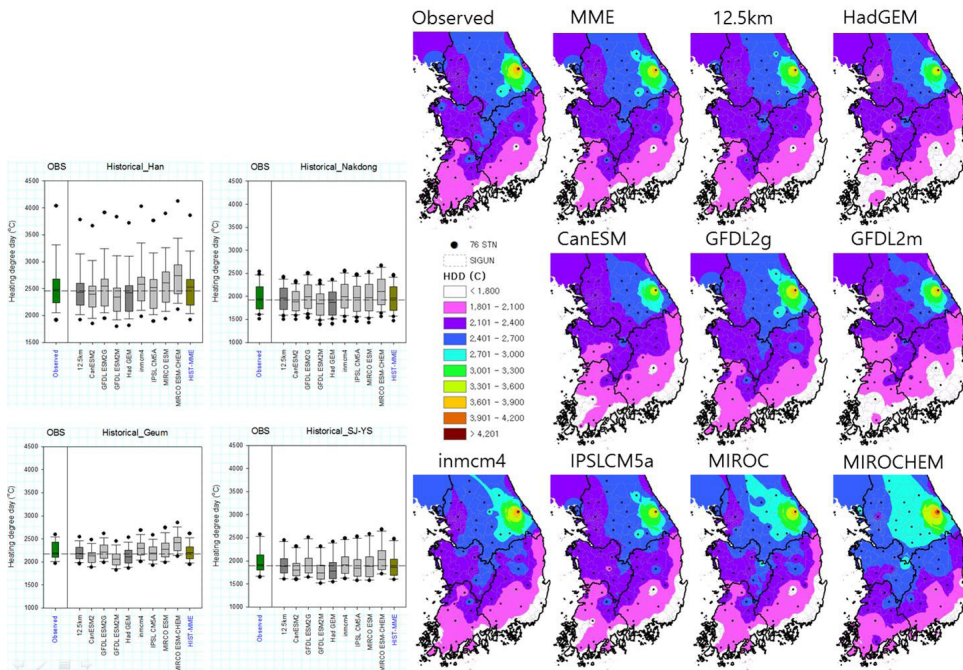


Figure 23. Heating degree days from September to May during 1988-2005.

CDD, 1976-1987

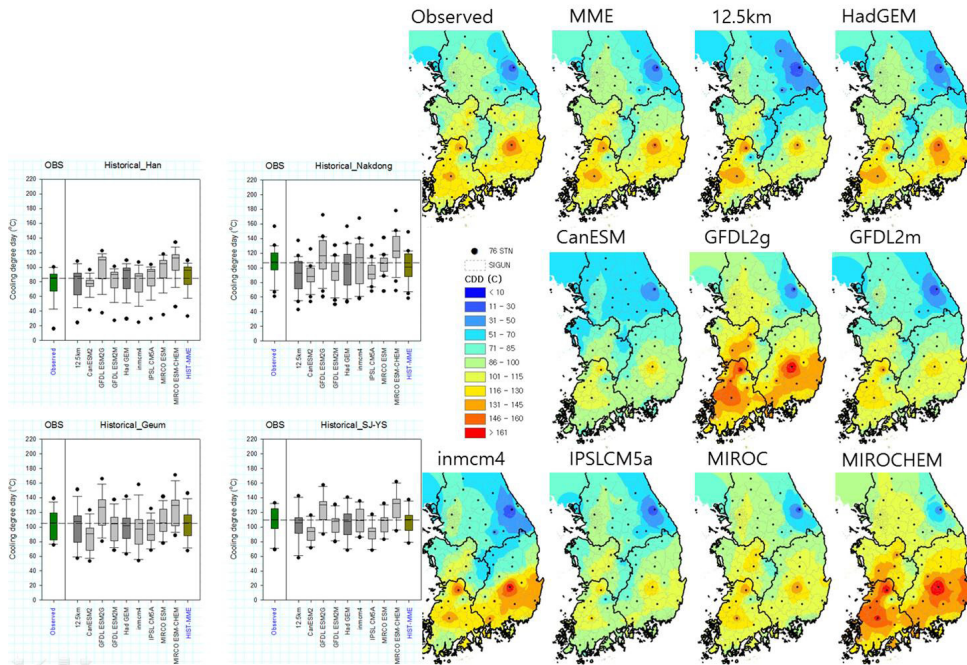


Figure 24. Cooling degree days from July to August during 1976-1987.

CDD, 1988-2005

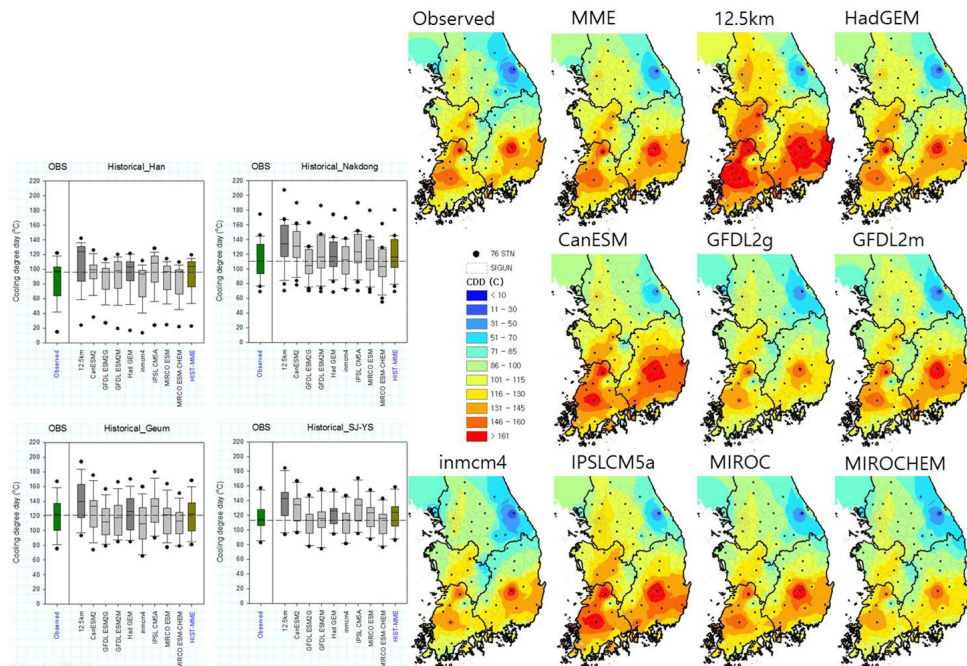


Figure 25. Cooling degree days from July to August during 1988-2005.

3.2.3 농업기후지수의 미래전망과 불확실성

3.2.3.1 식물온도와 작물온도 출현지속기간의 미래전망과 불확실성

Figure 26과 27은 식물온도와 작물온도 출현지속기간에 대하여 모델별 유역평균의 과거기간(historical)과 신시나리오 RCP4.5와 8.5의 가까운 미래기간(2011-2040년)에 대한 결과를 boxplot으로 나타낸 것이다. 과거기후로부터 계산된 식물온도 출현지속기간과 관측 자료에 의해 계산된 식물온도 출현지속기간을 비교해 보면, 4대강 유역 모두에서 사용된 9개 개별 기후모델의 식물온도 출현지속기간이 관측자료에 의해 계산된 식물온도 출현지속기간의 평균과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 미래전망 결과에서, 정도의 차이는 있지만 9개 개별 기후모델 모두에서 증가한 것으로 나타났다. 특히, KMA-12.5km의 경우, 우리나라 표준시나리오라고 공식적으로 언급된 바는 없지만, 4대강 유역 모두에서 RCMs에 의해 상세화된 KMA-12.5km의 식물온도 출현지속기간이 관측자료에 의해 계산된 식물온도 출현지속기간보다 증가할 것으로 평가되었다. 하지만, boxplot에서 알 수 있듯이 상위 75%와 하위 25%의 범위가 3.2.1.1의 결과에서 언급한 식물온도 출현지속기간의 분포 및 형태와 비슷하고, 미래에 대해서도 일관성 있게 평가되고 있기 때문에 KMA-12.5km의 기온자료의 재현능력에는 문제가 없다고 판단한다. 다만, bias correction 되었다 하더라도 다른 개별 기후모델과 다르게 KMA-12.5km는 RCMs이고, 이로부터 기온값이 높게 전망되었기 때문에 다른 GCMs 개별 기후모델과 비교할 때 주의가 필요할 것으로 사료된다. 이산화탄소 배출 농도 차이(RCP4.5 and RCP8.5)에 대한 미래전망의 불확실성은, RCP8.5(> 850ppm)에서 더 증가하는 것으로 나타났다. 작물온도 출현지속기간의 경우(Figure 27), 4대강 유역에서 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 과거기간으로부터 계산된 작물온도 출현지속기간이 관측 자료에 의해 계산된 작물온도 출현지속기간의 평균과 비교적 잘 일치하고 있다. CanESM2의 작물기간의 불확실성은 4대강 유역 모두에서 다른 8개 개별 기후모델보다 컸다(한강 유역:15%, 낙동강 유역:29%, 금강 유역:12%, 영산-섬진강 유역:21%).

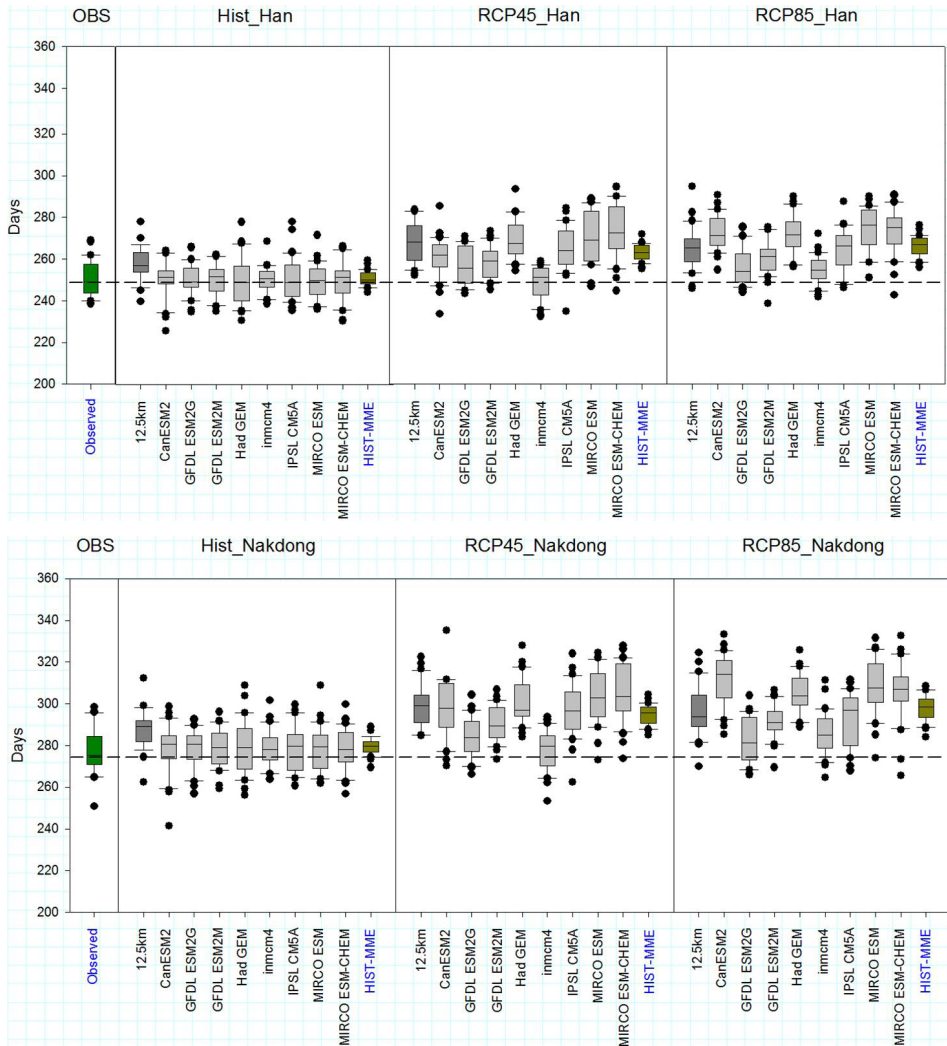


Figure 26. Plant period based on 5°C during historical (1976-2005) and near future (2011-2040) in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula.

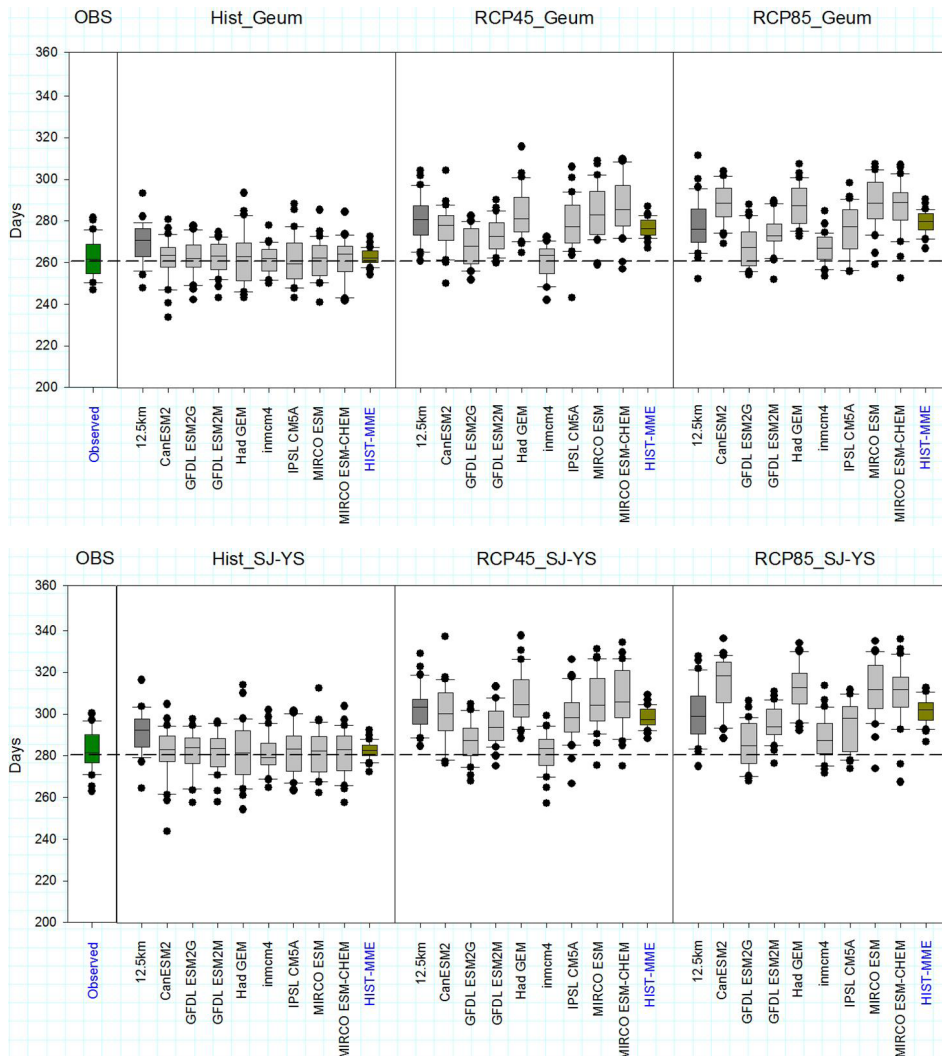


Figure 26. Plant period based on 5°C during historical (1976-2005) and near future (2011-2040) in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula (continued).

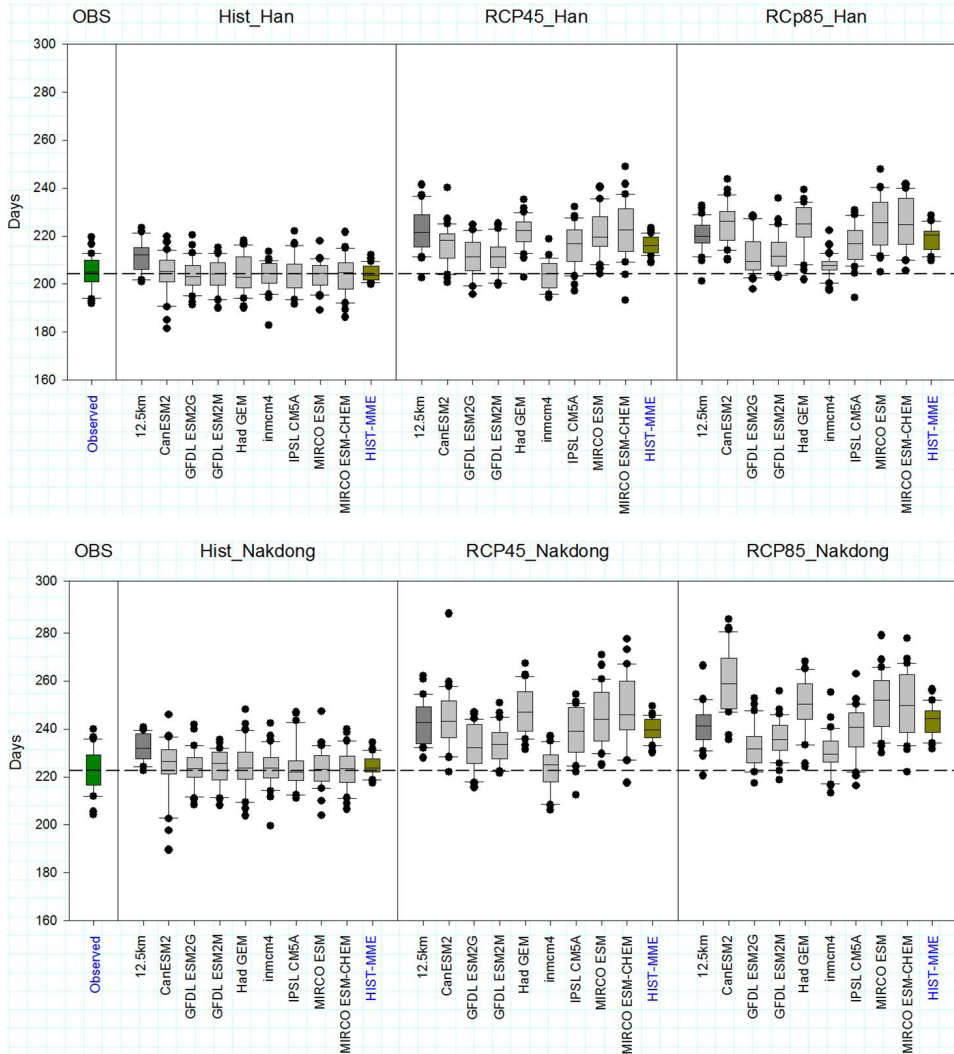


Figure 27. Crop period based on 10°C in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula.

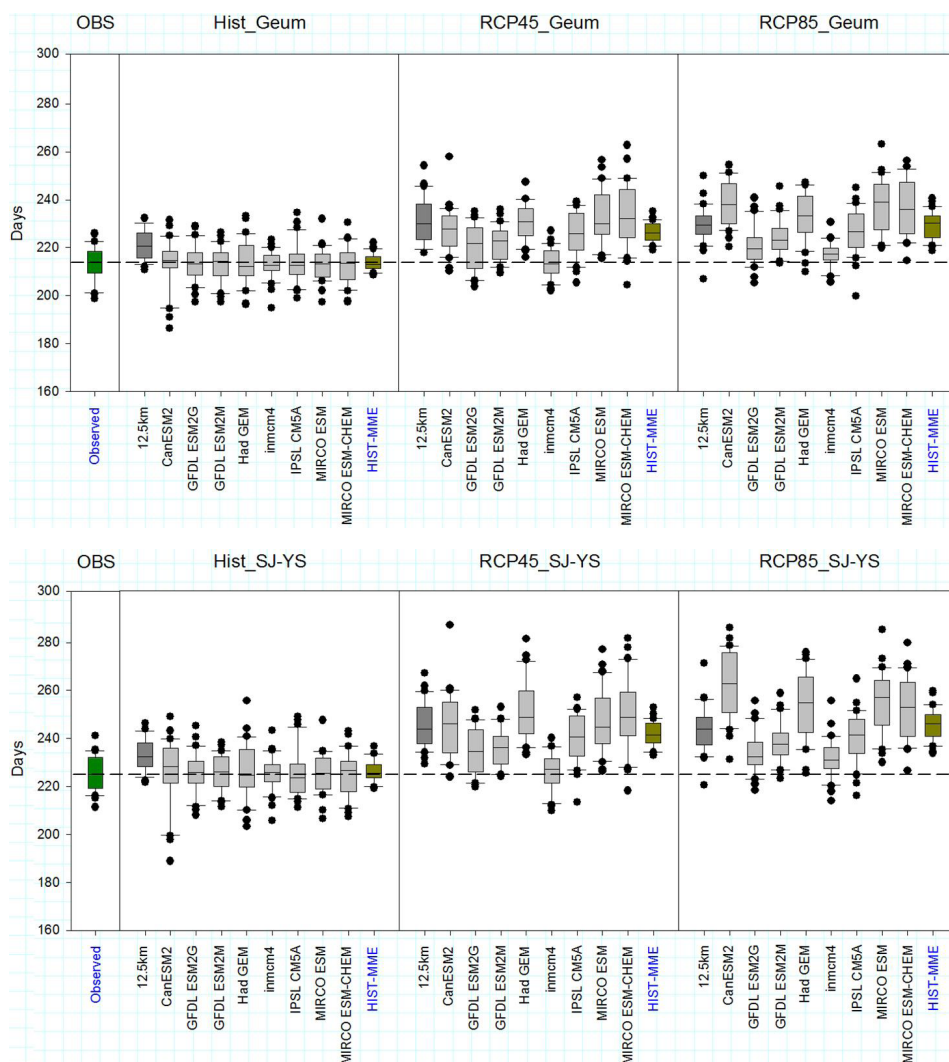


Figure 27. Crop period based on 10°C in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula (continued).

3.2.3.2 생장도일의 미래전망과 불확실성

Figure 28은 생육 최저온도 5℃를 기준으로 계산된 생장도일으로써 과거기간과 신시나리오 RCP4.5와 8.5의 가까운 미래(2011–2040년)기간에 대한 개별 기후모델별 유역평균 boxplot 결과이다. 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 과거기간으로부터 계산된 생장도일과 관측자료에 의해 계산된 생장도일의 평균이 비교적 잘 일치하고 있다. 미래전망 결과에서, 정도의 차이는 있지만 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 생장도일이 모두에서 증가할 것으로 평가되었으며, 낙동강 유역에서 CanESM2의 불확실성은 RCP4.5에서 35%, RCP8.5에서 49%로 RCP8.5에서의 불확실성이 더 높은 것으로 나타났다.

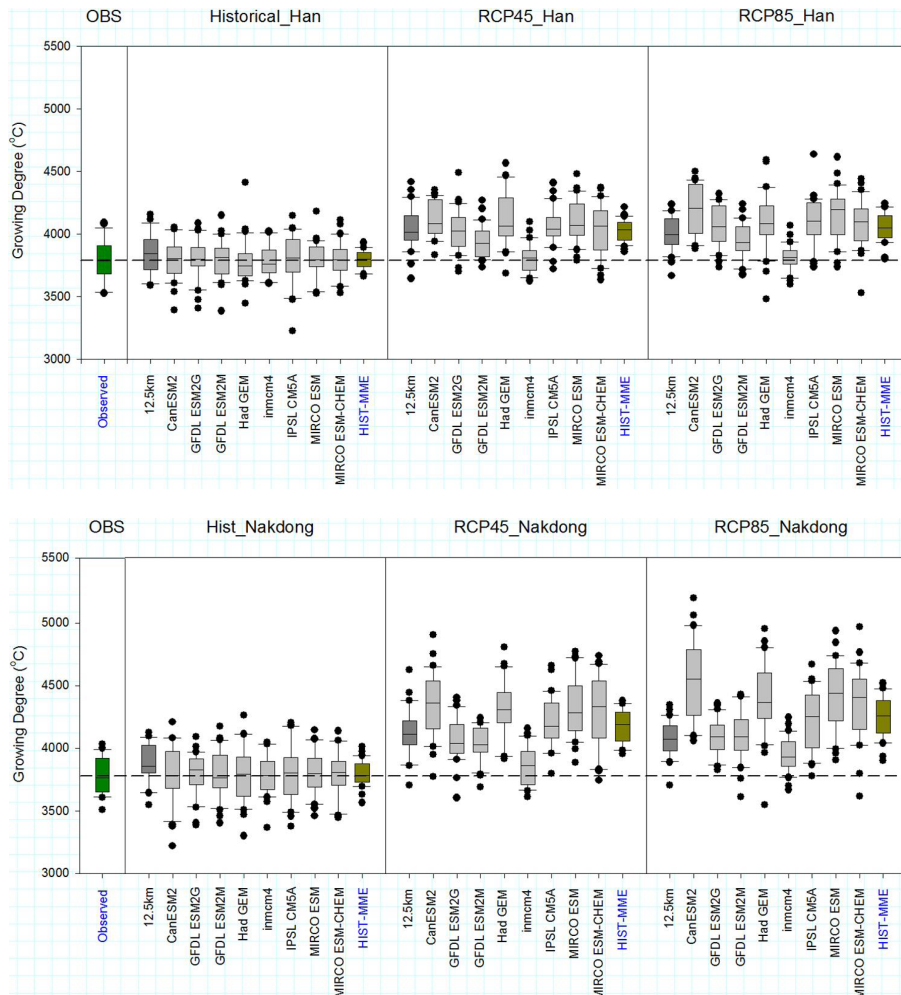


Figure 28. Growing degree day based on 5°C in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula.

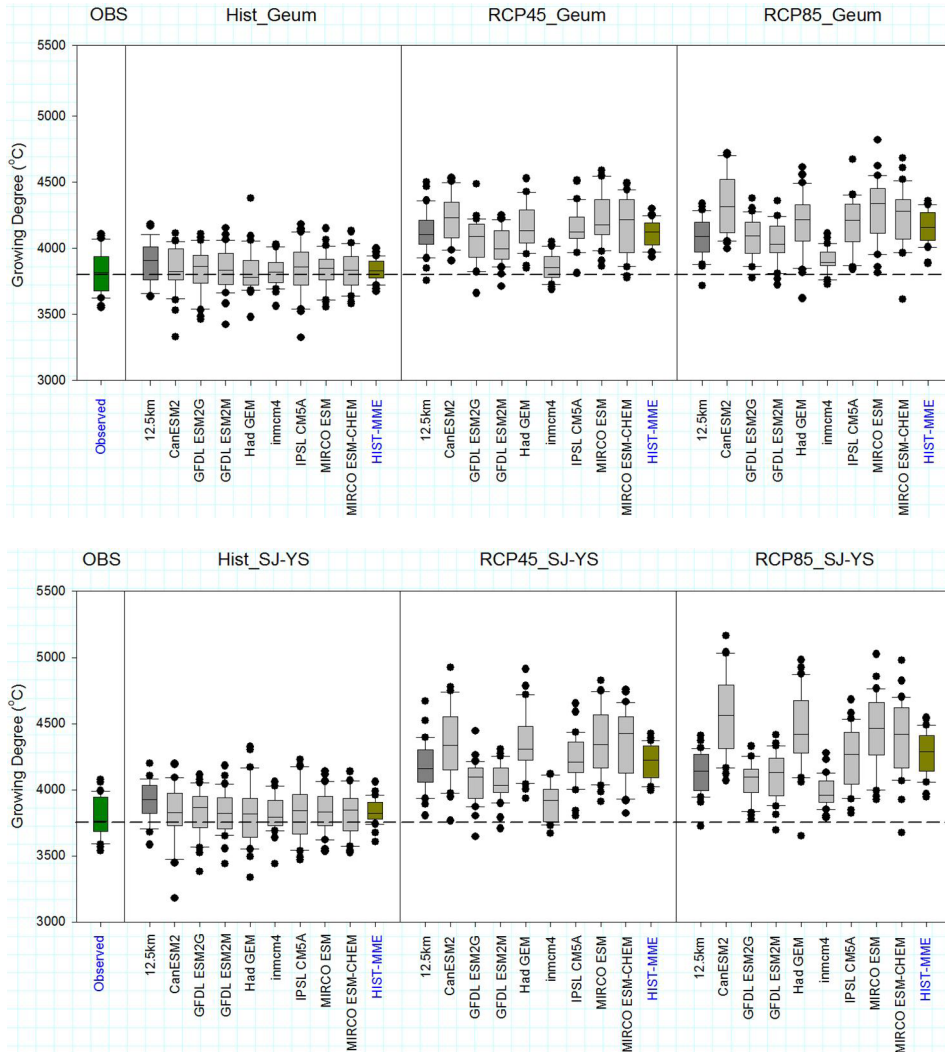


Figure 28. Growing degree day based on 5°C in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula (continued).

3.2.3.3 무상일수의 미래전망과 불확실성

Figure 29는 무상일수에 대하여 과거기간과 RCP4.5와 8.5의 가까운 미래(2011-2040년)기간에 대한 개별 기후모델별 유역평균의 boxplot이다. 앞서 살펴본 다른 농업기후지수의 결과 마찬가지로, 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 과거기간으로부터 계산된 무상일수가 관측자료에 의해 계산된 무상일수의 평균을 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다. 미래전망 결과에 대해서도, 정도의 차이는 있지만 9개 개별 기후모델과 MME 평균 무상일수가 증가할 것으로 평가되었다. 생장도일에서와 같이 CanESM2의 불확실성과 오차도 다른 8개 개별 기후모델보다 컸다. 특히, 영산-섬진강 유역에서 CanESM2의 무상일수 불확실성은 RCP4.5에서 21%, RCP8.5에서 24%로 나타났다.

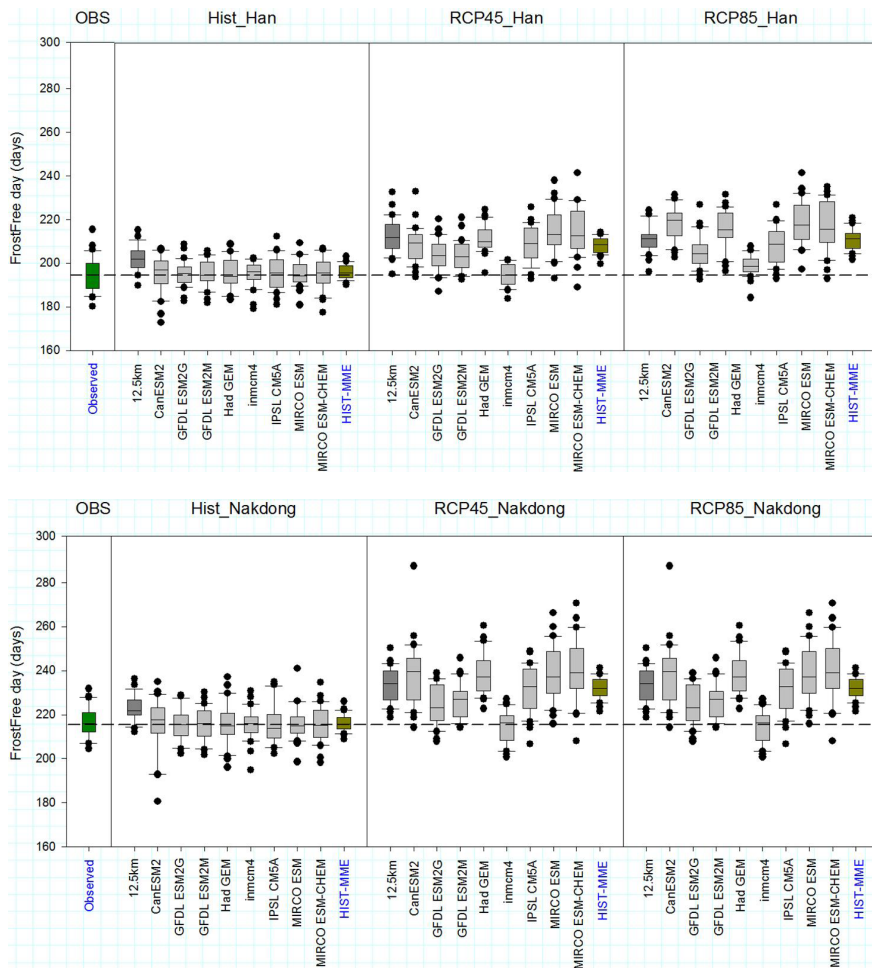


Figure 29. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula.

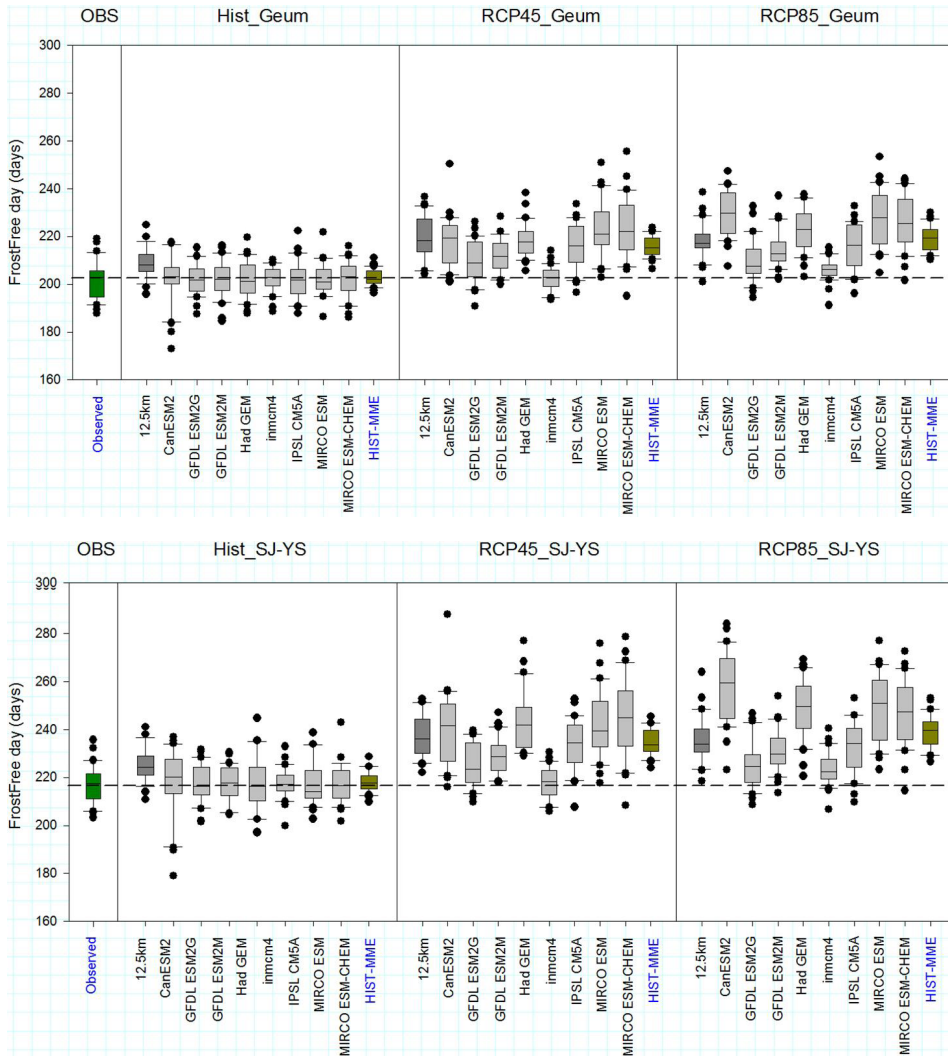


Figure 29. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korea Peninsula (continued).

3.2.1.4 난방도일과 냉방도일의 불확실성

Figure 30과 31은 과거기간과 RCP4.5와 8.5의 가까운 미래기간(2011-2040년)에 대한 난방도일과 냉방도일의 개별 기후모델별 유역평균 boxplot이다. KMA-12.5km를 제외하고, 8개 개별 기후모델의 과거기간으로부터 계산된 난방도일은 관측자료에 의해 계산된 난방도일의 평균과 비교적 잘 일치하고 있다. KMA-12.5km의 난방도일은 관측자료에 의해 계산된 난방도일보다 낮게 나타났는데, 이것은 RCMs에 의해 상세화된 KMA-12.5km의 일 최고기온과 최저기온이 높게 평가되었기 때문에 KMA-12.5km의 난방도일에서 난방에 필요한 총열량이 낮게 계산된 것이다. 또한, 미래전망 결과에서, 기온상승에 의해 난방도일이 감소하는 것을 알 수 있는데, MME 평균이 일관성 있게 관측자료에 의한 계산된 난방도일과 과거기간의 난방도일의 자료범위를 비교적 잘 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 RCP4.5의 가까운 미래기간(2011-2040년)의 난방도일을 보면, inmcm4의 난방도일은 4대강 유역 모두에서 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 낙동강 유역 inmcm4의 난방도일은 다른 3개 유역에서보다 13%이상 증가하여 겨울기온 감소를 전망하였다. 또한, 최근 IPCC 제5차 종합평가보고서(IPCC, 2014)에 의하면 가까운 우리의 미래기후에 대한 기후적응 및 완화 정책은 RCP4.5(< 450ppm)를 기준할 것이라고 하였다. 9개 개별 기후모델 중에서 단 한 개의 모델, 즉 inmcm4에서 가까운 미래에 우리나라의 난방도일이 증가할 것이라고 전망한 것은 약 11%의 발생가능성을 의미한 것인데 작은 확률이지만 이 숫자를 간과할 수 없다. 왜냐하면, 가까운 미래에 겨울기온이 갑자기 감소하여 난방에 필요한 총열량이 증가할 수 있는 확률이 100번 중에 11번이기는 하지만, 이것이 바로 다음해가 될 수도 있기 때문이다. 또한, inmcm4 모델이 동아시아 및 한반도 기후전망에 있어 다른 GCMs과 어떤 점이 다른지에 대한 문헌조사, 예를 들면, 'inmcm4 모델이 다른 GCMs보다 대체로 기온을 낮게 전망한다' 등에 대한 각각의 기후모델에 대한 정보 등을 추가적으로 확인할 필요가 있을 것이다. 또한, 다양한 규모축소방법이 개발되어 다른 개별 기후모델로부터 농업기후지수 계산에 필요한 입력 기후변수를 추가적으로 준비할 수 있다면 inmcm4 기후모델 외 어떤 개별 기후모델에서 한반도의 난방도일이 증가할 것이라고 평가하는지에 대하여 추가적인 비교를 통해 불확실성을 감소해나갈 수 있을 것이다.

Figure 31은 과거기간과 RCP4.5와 8.5의 가까운 미래기간(2011-2040)에 대하여 개별 기후모델별 유역 냉방도일의 평균을 boxplot으로 보여준 것이다. 한강, 낙동강, 금강 유역에서 9개 개별 기후모델과 MME 평균의 과거기간으로부터 계산된 냉방도일이 관측자료에 의해 계산된 냉방도일의 평균과 비교적 잘 일치하였다. 단, 영산-섬진강 유역에서 9개 개별

기후모델과 MME의 과거기간 냉방도일의 평균이 관측자료보다 높게 평가되었다. 냉방도일이 7월에서 8월 동안에 계산되는 것을 고려할 때, 7월부터 8월은 우리나라 ‘벼’ 및 주요 여름작물의 중요 등숙기간인데, 이 기간에 대한 기온 및 농업기후지수가 높게 평가된다면 농업생산성지수에도 부정적 영향(e.g., 생산량 감소)을 줄 것으로 판단된다. KMA-12.5km의 냉방도일이 높게 계산된 것은 앞서 언급한 바와 같이 KMA-12.5km가 다른 기후모델과 달리 RCM이며 일 최고 및 최저기온이 높게 예측되었기 때문인 것으로 판단된다.

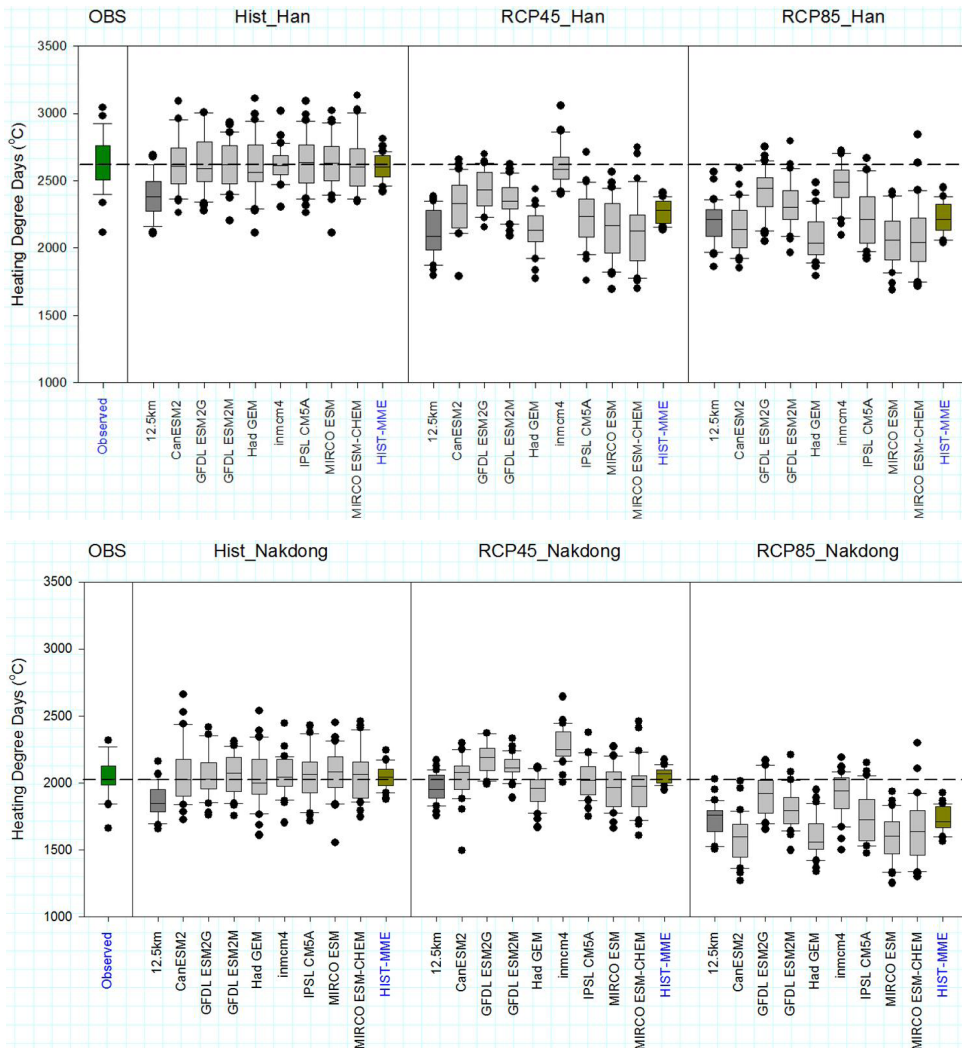


Figure 30. Heating degree day from September to May in Han river and Nakdong river basins. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsanriver in Korean Peninsula.

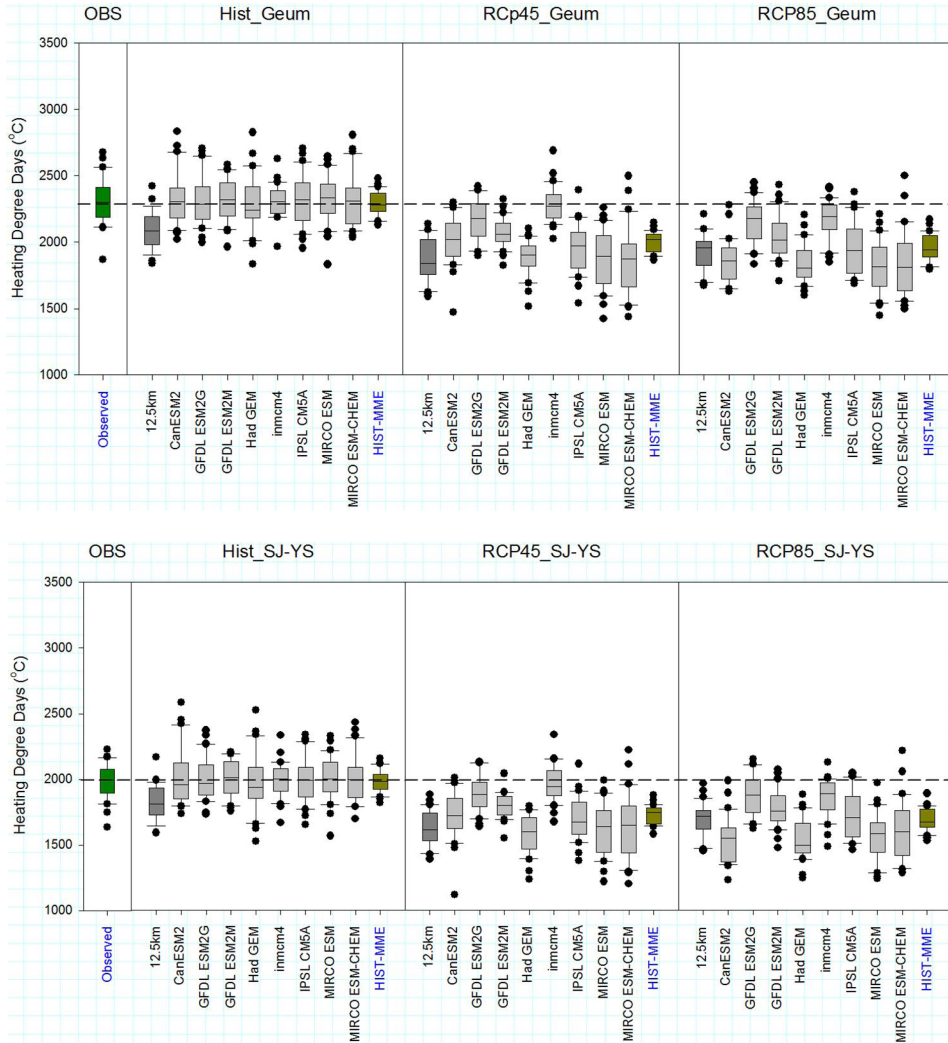


Figure 30. Heating degree day from September to May in Han river and Nakdong river basins. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsanriver in Korean Peninsula (continued).

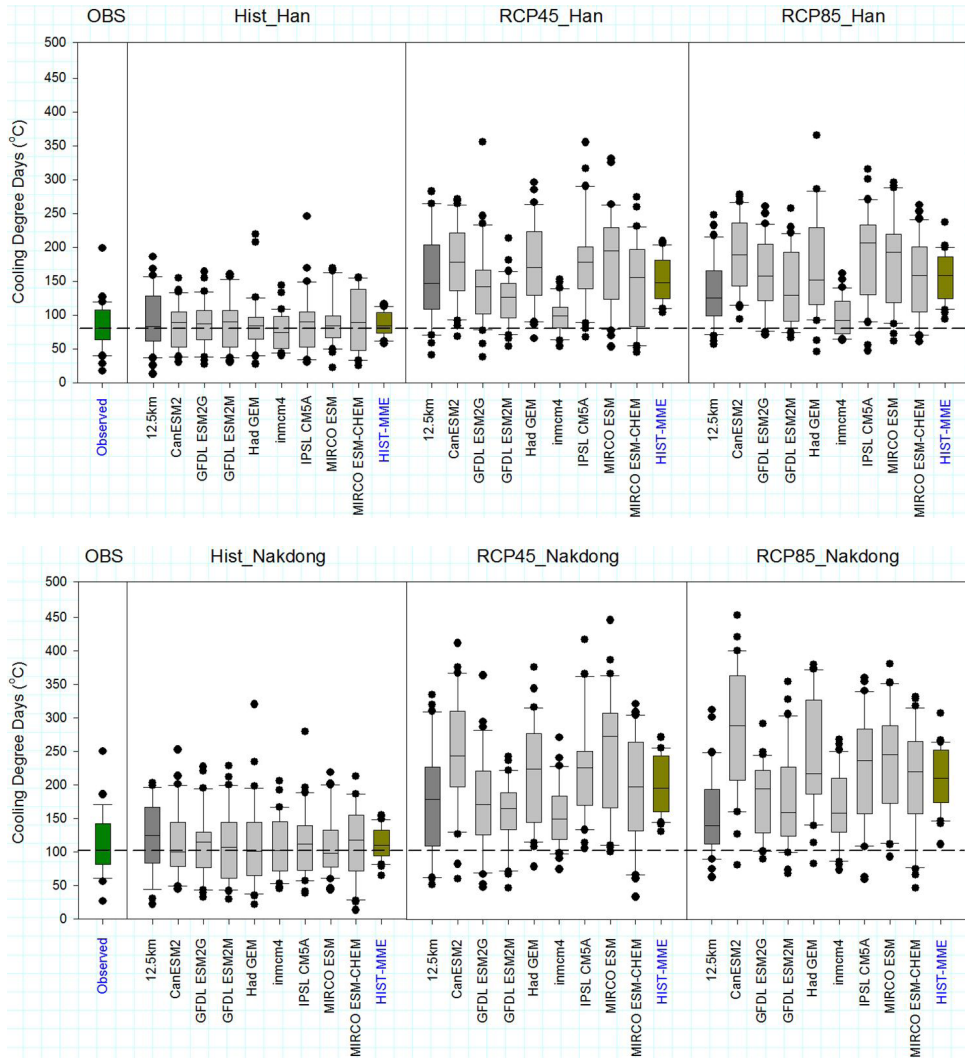


Figure 31. Cooling degree day during summer (July to August) in Geum river, and Seumjin and Youngsan river basins. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula.

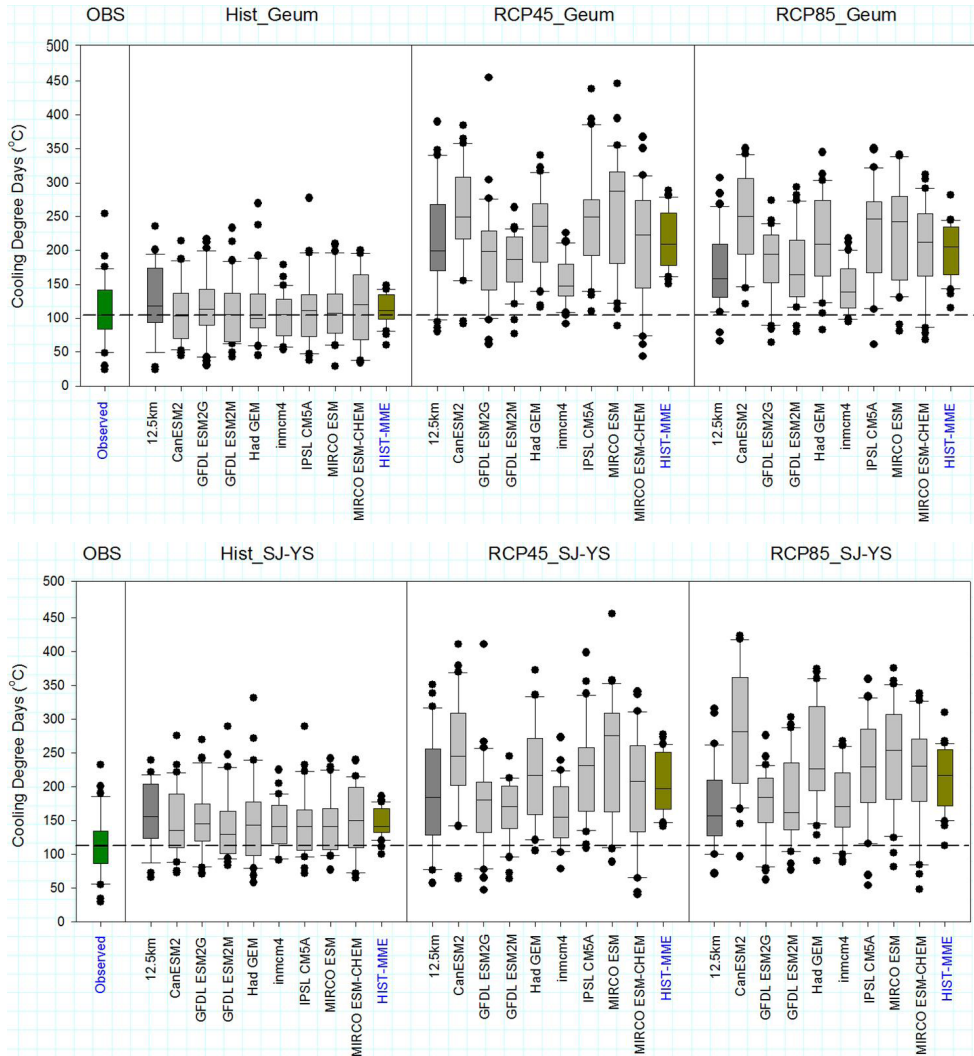


Figure 31. Cooling degree day during summer (July to August) in Geum river, and Seumjin and Youngsan river basins. Frost free day in four main basins, which are Han, Nakdong, Geum, and Seumjin and Yeongsan river in Korean Peninsula (continued).

3.3 다중모델앙상블 효율성

3.1.1 Multimodel ensemble estimators

Figure 32에서 Figure 34까지 9개 개별 기후모델에 대해 자신을 비롯하여 다양한 조합

(9C2!)에 따른 다중모델앙상블 접근방법에서 결합개수에 대한 효율성 평가를 하고자 분석한 결과이다. 통계적 오차 계산을 위해서는 RMSE를 선택하였다. Figure 32부터 34까지, 개별 기후모델의 결합수가 증가할수록 RMSE가 감소하는 것을 알 수 있다. 그런데 조합의 순서에 상관없이 계산된 RMSE를 나열하였는데 boxplot의 whisker가 비정상적으로 큰 것은 KMA-12.5km 때문이다. 9개 개별 기후모델 중에서 KMA-12.5km만 RCMs으로 GCMs만 비교할 경우에는 boxplot의 whisker가 줄어들 것이다. 또한, 모델의 결합수가 무한 증가한다고 해서 RMSE를 줄일 수 있는 것이 아니라 더 이상 줄어들지 않고 일정하게 유지되는 모델 결합수를 찾을 수 있음을 암시한다. 본 연구에서 RMSE가 줄어들어 일정하게 유지되는 부분이 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 식물온도와 작물온도 출현지속기간과 무상일수에서는 boxplot과 평균 RMSE(red dot)에서처럼, 대체로 개별 기후모델의 7-8개 결합에서 RMSE가 줄어들기 시작하였다. 개별 기후모델의 예측자료에 의한 식물 및 작물기간과 관측 식물 및 작물기간과의 RMSE는 최대 1-2일 미만으로 줄일 수 있음을 암시하였다. 하지만, 생장도일이나 난방도일, 냉방도일에서 평균 RMSE에서는 개별 기후모델의 7-8개 결합에서 RMSE가 줄어들기 시작하였지만, boxplot의 IQR²⁾이 여전히 큼을 알 수 있다. 더 많은 개별 기후모델과 개선된 규모축소방법을 통해 농업기후지수 평가에 필요한 입력 기상자료를 준비하여 테스트할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

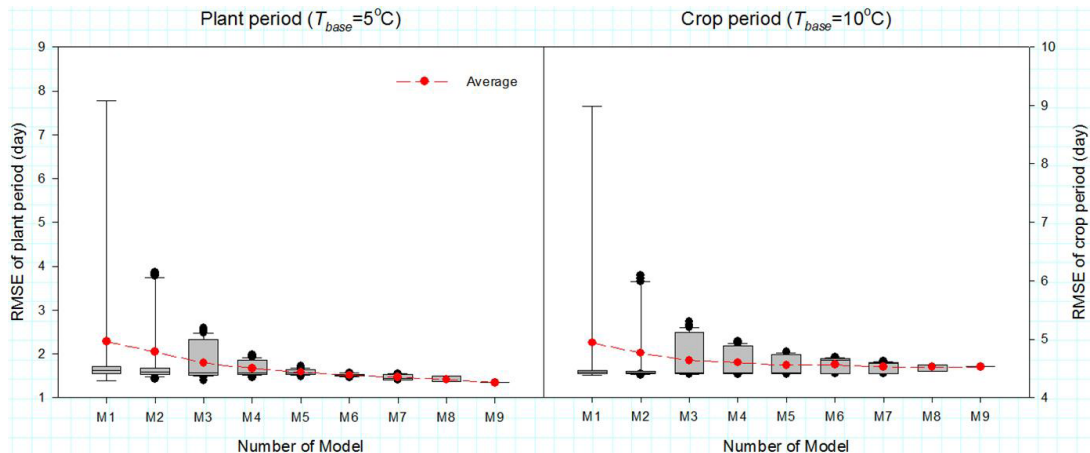


Figure 32. The number of models in multimodel ensemble affects error estimates on plant and crop periods based on temperature 5°C (left), and 10°C (right), respectively. Average root mean squared error (RMSE). The red dot shows the average of RMSE.

2) $\text{IQR} = \text{Q3 (the third quartile)} - \text{Q1 (the first quartile)}$

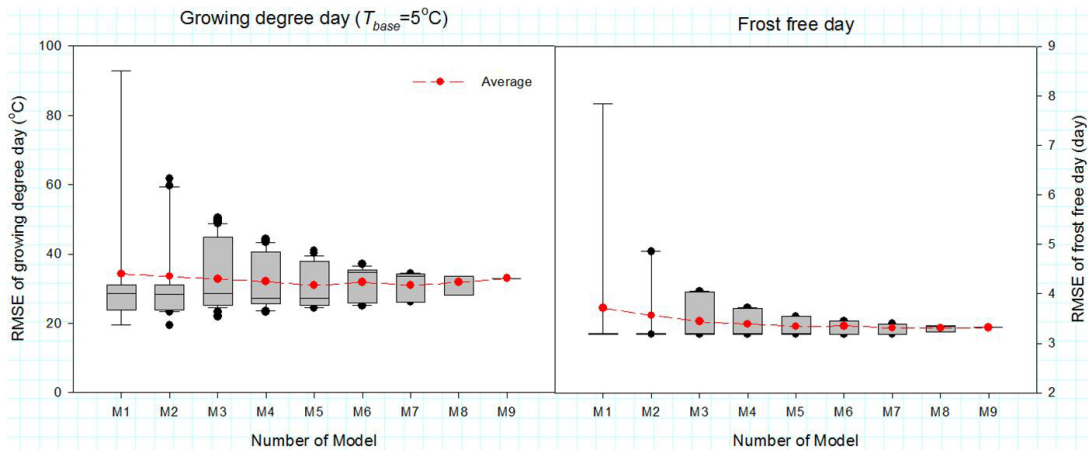


Figure 33. The number of models in multimodel ensemble affects error estimates on growing degree days based on temperature 5°C (left), and frost free day (right). Average root mean squared error (RMSE). The red dot shows the average of RMSE.

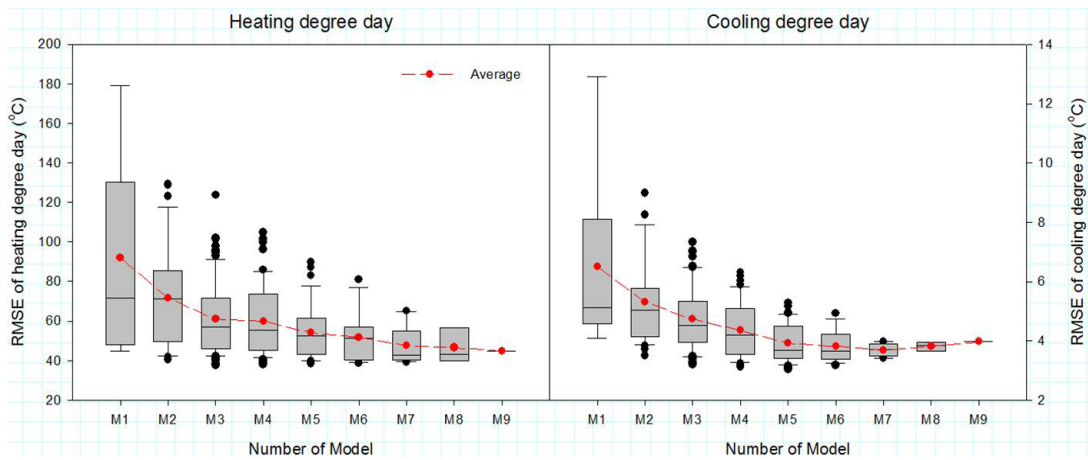


Figure 34. The number of models in multimodel ensemble affects error estimates on heating (left) and cooling degree day (right). Average root mean squared error (RMSE). The red dot shows the average of RMSE.

4. 결론 및 고찰

4.1 농업기후지수의 변화

식물온도와 작물온도 출현지속기간은 과거(1976-1987년)와 비교하여 확실하게 증가했지만 식물의 성장발육단계에 필요한 총열량($T_{base}=5^{\circ}\text{C}$)은 최근(1988-2005년) 들어 감소한 지역이 증가하였다. 감소한 지역은 주로 중부산간과 해안지역인데, 이것을 바탕으로 작물의 실제 생산량의 변화 및 그에 따른 추가적인 효과(ramifications)를 분석할 수 있는 기후생산력지수를 계산하는데 기초자료가 될 수 있을 것이다.

최근 1988-2005년 동안 중부내륙과 남서부내륙 및 해안지역의 생장도일이 높게 평가되었고 MME 평균의 무상일수가 이들 지역에서 증가한 것이 후속 연구에서 증가한 생장도일과 작물재배기간이 기후생산력지수와 같은 농업생산성지수에 긍정적 영향을 줄 것인가에 대한 평가를 위한 기초정보가 될 것이다.

중부산간지역의 냉방도일이 감소했는데 산간지역의 여름기온이 낮고, 해안지역의 여름기온은 대부분 높은 이유가 반영되었을 수 있다고 가정할 수 있지만, 대부분의 관측소가 산간지역에는 많지 않고, 해안지역에 밀집한 대도시에는 관측소가 많으며, 대도시 관측소의 높은 온도가 자료에 반영되었을 가능성 등에 대한 확인이 선행되어야 한다. 본 연구에서 사용된 기후자료들이 bias correction이 되었다 하여도 우리나라의 최근 기온상승이 지구온난화보다는 급격한 산업화와 도시화에 의한 것이기 때문에 농업분야에 적용할 때에는 선 연구사례의 정보들을 고려해야 한다(권원태 2004; Choi et al., 2003; Chung et al., 2004).

한강 유역의 식물온도 출현지속기간의 경우는 과거기간 동안, 다른 3개 유역에서보다 짧게 나타났고, 냉방도일의 경우는 영산-섬진강 유역에서 다른 지역보다 높게 나타났는데, 냉방도일이 7월에서 8월 동안에 계산되는 것을 고려할 때, 7월부터 8월은 우리나라 ‘벼’ 및 주요 여름작물의 중요 등숙기간이다. 이 지역들은 우리나라의 대표적인 농업지대가 포함된 곳이다. 따라서 이들 지역의 등숙기간에 대한 기온 및 농업기후지수가 높게 평가된다면 이 지역의 기후생산력지수와 같은 농업생산성지수에도 영향을 줄 것으로 판단된다. 예를 들면, 영산-섬진강 유역에서는 벼를 비롯하여 과수에 이르기까지 대부분 중만생종 혹은 만생종이 재배되며, 이들 품종의 유효한 등숙기간이 8월에 집중되어 있다. 따라서 8월의 기온상승이

중만생종과 만생종의 등숙기간에 영향을 끼친다면 이것은 생산성 증가보다는 감소라는 부정적 영향이 더 많을 것이다. 그러나, 여름기온뿐만이 아니라 겨울기온도 안정적으로 상승한다면 영산-섬진강 유역에서는 이모작이 가능한 긍정적 영향도 있을 것이다. 하지만, 겨울기온이 상승했어도 이상저온이 발생하는 빈도가 증가하면 안정적으로 재배시스템을 변경하는 것은 어렵기 때문이다. 따라서, 다음 연구에서는 저온발생 빈도에 따른 농업이상기후지수 및 생산성지수 평가가 필요하다.

4.2 농업기후지수의 재현성과 미래전망의 불확실성

MME 평균에서 평가된 과거기간 동안의 농업기후지수의 평균 및 불확실성은 관측자료를 거의 흡사하게 모사하고 있기 때문에 MME 평균의 재현성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

과거기후로부터 계산된 작물온도 출현지속기간, 생장도일, 무상기간, 그리고 난방도일과 관측자료에 의해 계산된 이들 농업기후지수를 비교해 보면, 4대강 유역 모두에서 9개 개별 기후모델의 작물온도 출현지속기간, 생장도일, 무상기간, 그리고 난방도일의 평균이 관측자료에 의해 계산된 값의 평균을 비교적 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 미래전망 결과에서, 정도의 차이는 있지만 9개 개별 기후모델 모두에서 증가하는 것으로 평가되었다. 그러나 4대강의 공간내삽분포의 변화에서 다양한 폭의 불확실성을 보임으로써 우리나라와 같이 복잡한 산악구조를 가진 나라에 적용하기 위해서는 우리나라의 지형에 맞고 적용이 용이한 공간규모축소의 개발이 요구되어진다.

난방도일의 경우, RCP4.5의 가까운 미래기간(2011-2040년)에서 inmcm4의 난방도일은 4대강 유역 모두에서 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 낙동강 유역의 난방도일은 다른 3개 유역에서보다 13%이상 증가할 것으로 나타났다. 또한, 최근 IPCC 제5차 종합 평가보고서(IPCC, 2014)에 의하면 우리의 가까운 미래기후에 대한 정책은 RCP4.5(< 450ppm)를 기준할 것이라고 하였다. 그렇다면, 9개 개별 기후모델 중에서 한 개의 모델에서 가까운 미래에 우리나라에서 난방도일이 증가할 것이라고 전망한 것은 약 11%의 가능성인데, 이 숫자가 작아도 무시할 수 없다. 왜냐면, 가까운 미래에 겨울기온이 갑자기 감소하여 난방에 필요한 총열량이 증가할 수 있는 확률이 100번 중에 11번이기는 하지만, 이것이 바로 다음해가 될 수도 있기 때문이다. 가까운 미래에 다른 개별 기후모델과 다르게 inmcm4의 난방도일 13% 증

가가 경제에 미치는 영향은 추후 경제 및 에너지 분야와의 공동협력연구를 통해서 해결해야 할 것으로 판단된다.

4.3 다중모델앙상블 효율성 평가

다중모델앙상블 접근방법에서, 모델의 결합개수를 무한으로 증가시킨다고 해서 오차 및 불확실성이 무한 감소되지는 않을 것이다. 즉, 모델의 결합개수에서 더 이상 오차 혹은 불확실성이 감소하지 않고 일정해지는 포화지점이 나타날 것이다. 본 연구의 가설대로, 모델의 결합개수에서 오차가 일정하게 더 이상 개선되지 않는 것을 알 수 있었다. 이것은 다음 연구에 중요한 정보가 된다. 예를 들면, 후속연구인 농업생산성지수 평가에서 과정기반의 작물모형 혹은 통계기반의 작물모형 등 작물의 성장발육을 다양하게 시뮬레이션 할 수 있도록 다중모델앙상블 접근방법을 적용할 계획인데, 결합수를 무한적으로 증가할 필요가 없다는 정보를 바탕으로 시작할 수 있기 때문이다. 또한 작물모형의 경우 탄소기반의 작물모형이나 혹은 광이용효율성에 기반한 작물모형이나, 혹은 작물의 일반적인 특성만을 모의하는 작물모형이나에 따라 다양한 작물모형들이 있는데, 각각의 기반에 대한 대표 작물모형을 선택한 다중모델앙상블 접근방법을 취하는데에도 도움이 될 것이다.

또한, 다양한 규모축소방법이 개발되면 보다 많은 개별 기후모델로부터 농업기후지수 계산에 필요한 입력 기상변수들을 준비하여 개별 기후모델 앙상블의 개수를 9개에서 추가적으로 증가하여 본 연구에서 오차 및 불확실성이 정확하게 감소하지 않았던 농업기후지수들에 대한 추가적인 평가를 수행할 수 있을 것이다. 또한, 우리나라의 경우, 기후모델부분에서 몇 개의 다중모델앙상블 결합에서 오차 및 불확실성이 감소하는지에 대한 평가도 수행할 수 있을 것으로 생각한다. 마찬가지로, 작물모형부분에서도 몇 개의 다중모델앙상블 결합이 우리나라 농업생산성지수 평가에 필요한지에 대해 고려해 볼 수 있을 것이다.

5. 활용성 및 정책시사

5.1 지역-맞춤형 적응정책

본 연구는 농촌진흥청의 농업용 상세 전자기후도와의 활용을 고려하여 4대강 유역을 중

심으로 수행되었는데, 다음 연구에서도 농업용 상세 전자기후도 기반의 농업기후지대별(농촌진흥청 2013년 농업연구개발사업, 2013) 농업이상기후지수 및 생산성지수 평가로 어떻게 확장/활용할 것인가에 대한 계획이 필요하다.

생장도일을 예로 들면, 4대강 유역 모두 과거기간 동안의 생장도일은 현재 3,800℃로써 4,000℃을 넘지 않는다. 그러나 가까운 미래에는 4대강 유역에서 모두 4,000℃가 넘을 것으로 전망하였고, 특히, 낙동강과 영산-섬진강 유역은 한강과 금강 유역보다 훨씬 높을 것으로 전망하였다. 생장도일 4,000℃에서 적응(adaptation) 및 재배될 수 있는 작물은 주로 열대작물이며, 재배기간이 2-3개월로 짧은 hybrid corn(maize base temperature, 10℃) 혹은 열대지역(e.g., Latin America)에서 재배되는 yam과 같은 jicama³⁾, 혹은 sorghum 등도 재배가능하다. 생장도일을 활용하여 적어도 우리나라 4대강 유역에서 가까운 미래에 적응/재배가능한 작물들을 전망하는데 까지 설명할 수 있다. 그러나 다음 연구에서 hybrid corn과 sorghum, jicama 등의 미래작물(future crop)에 대한 생산성지수에 대한 평가뿐만 아니라 불확실성을 포함한 건실한 지역-맞춤형 적응정책에 대한 의사결정으로 확장하기 위해서는 더 많은 문헌조사 및 생육자료 실험 및 수집과 더불어 농업관련 기관과의 확고한 공동협력연구가 요구된다. 예를 들면, 본 연구의 생장도일은 생장 최저온도가 5℃를 기준한 것이다. 따라서, 먼저 여름작물($T_{base}=10^{\circ}\text{C}$, 15°C) 등 대표 농작물의 생장 최저온도를 기준으로 다중모델앙상블 접근방법에 따라 각각의 생장도일이 추가적으로 준비되어야 한다. 또한, 앞서 언급한 대로 jicama 등과 같은 이미 도입된 가까운 미래작물부터 앞으로 소개될 미래작물을 위한 적응정책으로 확대하기 위해서는 생물다양성 연구소 등과 같은 기관과의 연구협력도 필요할 것이다. 마찬가지로, 미래작물에 대한 농가수, 재배면적, 생산량 판로나 농가소득 등에 대한 사회경제분석에 대한 공동협력연구도 필요할 것이다.

5.2 기초정보

낙동강과 영산-섬진강 유역에서 가까운 미래에 난방도일의 증가는 겨울기온이 감소할 수 있다고 해석할 수 있기 때문에, 다음 연구에서 겨울저온 발생빈도를 분석하여 이 지역에서 주요 겨울작물의 안전재배가능성 및 생산성지수 평가에 활용할 수 있다. 또한, 선 연구

3) 히카마(jicama): 안동 및 삼척에서 이미 시험재배가 완료되었고 경북지역의 농가에 보급되었음
(<http://bio.gba.go.kr/page.htm?mcode=1294821108>)

에서 이 지역들이 우리나라의 기후변화의 경우 이모작이 가능할 것이라고 평가되어 있는데 (농촌진흥청, 2013), 겨울기후가 안정적으로 상승하지 못하고 저온발생 빈도가 크다면 안정적인 재배시스템의 변화는 어렵다고 판단할 수 있다 등 다음 연구인 농업이상기후지수의 평가를 위한 기초정보로 활용할 수 있다.

한반도의 농업기후지수를 과거 관측자료와 미래 기후자료에 대하여 평가한 선 연구들은 그동안 많았는데, 이들 선 연구에서 사용된 미래 기후시나리오는 한 개의 기후모델에 의해 전망된 한반도 미래 시나리오이거나 AR4의 2가지 타입(e.g., A2 or A1B)의 온실가스 배출 시나리오로 미래 기후에 대한 평가는 제한적이였다. 그러나 본 연구사례는 다중모델앙상블 접근방법을 통해 한반도 농업기후지수의 불확실성 폭(4대강 유역별 불확실성 포함)을 제시 함으로써 미래 농업 및 연구의 정책 혹은 방향 등의 개선을 위한 의사결정에 필요한 정보로 활용할 수 있다. 앞서 5.1절에서 설명한 것에 덧붙여서, 예를 들면, 낙동강과 영산-섬진강 유역의 작물기간은 현재(낙동강: 223일, 영산-섬진강: 226일)보다 가까운 미래에 평균 240일로 약 23일 증가할 것으로 전망하였다. 또한, 낙동강 유역에서는 9개 개별 기후모델 중 5개의 기후모델에서 240일 이상 증가할 것으로 전망했고, 영산-섬진강 유역에서는 무려 6개의 기후모델에서 240일 이상 증가할 것으로 전망했다. 낙동강과 영산-섬진강 유역의 9개 개별 기후모델의 평균 불확실성이 15%이지만, 9개 중 5-6개가 240일이 넘을 것으로 전망했기 때문에 낙동강과 영산-섬진강 유역의 작물기간은 가까운 미래에 확실하게 240일(8개월)이 넘을 것이다(MME 포함하여 낙동강 유역이 67%, 영산-섬진강 유역이 78%의 확률). 따라서, 현재보다 재배기간이 1-2개월 증가할 것에 대한 적응대책 수립을 굳힐 수 있는 근거를 제시할 수 있다. 그러나 작물재배기간은 일반적으로 봄, 여름, 가을에 해당한다. 이들 지역의 난방도일 전망을 자세히 살펴보면, 앞서 언급한바와 같이, 낙동강과 영산-섬진강 유역의 가까운 미래의 난방도일은 감소가 아닌 증가할 것으로 전망하였다. 영산-섬진강 유역에서는 9개 개별 기후모델 중 1개의 기후모델에서만 난방도일이 증가할 것이라고 전망하였지만, 특히 낙동강 유역에서는 9개 중 4개의 기후모델에서 난방도일이 증가할 것으로 평가하여 낙동강 유역이 다른 3개 유역보다 겨울기후 변화에 취약할 수 있음을 예측할 수 있다. 이러한 정보가 미래 농업의 적응수립의 의사결정에 기초정보를 제공할 수 있는 역할을 충분히 담당할 수 있을 것으로 판단한다.

국문요약

다수의 기후요소를 지수화하고 특정지역의 기후 자원량을 분석하여, 종합 및 판단하는 과정은 특정지역의 농업기후자원의 특성을 한 눈에 알 수 있게 한다. 농업기후자원의 특징을 단순명료하게 표현한 것을 농업기후지수라고 하는데, 농업기후지수는 ‘농업생산의 관점’에서 기후자원을 평가하기 위한 것이다. 이 지수는 기후자원(e.g., 기온, 일사, 강수)으로부터 작물의 생육과 수량을 추측하는 가능성과 여러 가지 농업기술의 실시에 필요한 기초자료를 제공함으로써 농업생산성의 주요 지표가 될 수 있다. 그러나 기후변화에 따라 농업기후자원의 분포가 변화하고 농업기후지수도 절대적인 것이 아니기 때문에 항상 변화할 수 있다. 최근 IPCC 제5차 평가보고서에서 온실가스 대표경로에 따른 신시나리오가 많은 연구에 이용됨과 동시에 기후정보의 역학적 규모축소 뿐만 아니라 통계적 상세화가 발달하면서 미래 기후 예측정보의 불확실성을 고려한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 IPCC 제5차 평가보고서에 사용된 RCP 신시나리오를 기반으로 상세화된 과거 및 미래기후 정보를 바탕으로 한반도의 농업기후지수(e.g., 식물온도 및 작물온도 출현지속기간, 생장도일, 무상기간, 난방도일 및 냉방도일)의 시공간적인 변화와 불확실성을 평가하고자 하였으며, 농촌진흥청에서 활용하고 있는 농업용 상세 전자기후도와의 활용을 고려하였다. 과거기후로부터 계산된 농업기후지수와 관측자료에 의해 계산된 농업기후지수를 비교한 결과, 4대강 유역 모두에서 사용된 9개 개별 기후모델의 6개 농업기후지수의 각각의 평균은 관측자료에 의해 계산된 값의 평균과 비교적 잘 일치하여 개별 기후모델뿐만 아니라 다중앙상블의 과거기후 재현성에는 문제가 없는 것으로 확인하였다. 미래전망 결과에서, 정도의 차이는 있었지만 9개 개별 기후모델과 다중앙상블에서 한반도의 농업기후지수가 모두 증가하는 것으로 평가되었다. 그러나 4대강의 각각의 공간분포의 변화에서 관측자료와 다른 경향을 보이는 개별 기후모델도 있어서 여전히 공간규모축소 방법의 개선이 필요하다. 또한 개별 기후모델을 무한적으로 결합한다고 해서 오차 및 불확실성이 줄어들지 않았다. 추가연구가 계속 필요하지만, 본 연구에서 3-4개의 개별 기후모델결합에서 확실하게 오차가 개선되기 시작하였으며, 대체로 7-8개 결합에서부터는 더 이상 오차가 개선되지 않았다. 도출 및 평가된 본 연구의 농업기후지수는 후속 연구를 위한 농업이상기후지수 및 생산성지수의 평가의 기초자료가 될 것이다. 예를 들면, 낙동강 유역과 영산-섬진강 유역의 난방도일의 증가가 ‘겨울기온이 감소할 수 있다’라고 가정할 수 있을 경우, 농업이상기후지수(e.g., 저온발생빈도) 분석을 통해 겨울작물의 생산성지수의 불확실성 증가 혹은 재배시스템(e.g., double cropping system)의 변화에 대한 불확실성 증가에 대한 평가에 활용될 수 있다.

REFERENCES

- Shim, K. M., G. Y. Kim, K. A. Roh, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2008: Evaluation of agro-climatic indices under climate change, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 10(4), 113-120.
- Choi, D. H. and S. H. Yun, 1989: Agro climatic zone and characters of the area subject to climatic disaster in Korea. *Korean Journal of Crop Science* 34 (s02), 13-33(in Korean with English abstract).
- Kim, D. J., J. H. Kim, J. H. Roh, J. I. Yun, 2012: Geographical migration of winter barley in the Korean Peninsula under the RCP8.5 projected climate condition, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(4), 161-169.
- IPCC, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller(eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014 Synthesis report, available web-site (<http://www.ipcc.ch>).
- Im, E. S., J. B. Ahn, W. T. Kwon, and F. Giorgi, 2008a: Multi-decadal scenario simulation over Korea using a one-way double-nested regional climate model system. Part 2: future climate projection (2021-2050). *Climate Dynamics* 30(2/3), 239-254.
- Im, E. S., J. B. Ahn, A. R. Remedio, and W. T. Kwon, 2008b: Sensitivity of the regional climate of East/Southeast Asia to convective parameterizations in the RegCM3 modelling system. Part 1: Focus on the Korean peninsula. *International Journal of Climatology* 28(14), 1861-1877.
- Lee, H., 1980: Heating degree-day in major cities of Korea, *Geography*, 22, 10-22.
- Gudmundsson, L., J.B. Bremnes, J.E. Haugen, and T. Engen Skaugen, 2012: Technical

- Note: Downscaling RCM Precipitation to the Station Scale Using Quantile Mapping—a Comparison of Methods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 9, 6185–6201.
- Ahn, J. B., J. Y. Hong, and K. M. Shim, 2010a: Agro-Climatic Indices Changes over the Korean Peninsula in CO₂ Doubled Climate Induced by Atmosphere-Ocean-Land-Ice Coupled General Circulation Model, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 12(1), 11-22.
- Ahn, J. B., J. Hur, and K. M. Shim, 2010b: A Simulation of Agro-Climate Index over the Korean Peninsula Using Dynamical Downscaling with a Numerical Weather Prediction Model, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 12(1), 1-10.
- Lee, I. H., S. Park, H. S. Kang, and C. H. Cho, 2011: Evaluation of current climate over Korean peninsula using HadGEM3-RA, *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS*, 26-27.
- Lee, K., H. J. Beak, S. Park, H. S. Kang, and C. H. Cho, 2012: Future projection of changes in extreme temperatures using high resolution regional climate change scenario in the Republic of Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 47(2), 208-225.
- Kim, O. Y., B. Wang, and S. H. Sin, 2013: How do weather characteristics change in a warming climate?, *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-013-1795-8.
- Arguez, Anthony and Russell S. Vose, 2010: The Definition of the standard WMO Climate Normal: The key to deriving alternative climate normals. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 201, 699–704. doi: 10.1175/2010BAMS2955.1
- Kunkel, K. E., and A. Court, 1990: Climatic means and normals—A statement of the American Association of State Climatologists(AASC). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 201–204.
- Angel, J. R., W. R. Easterling, and S. W. Kirtsch, 1993: Towards defining appropriate averaging periods for climate normals. *Clim. Bulletin*, 27, 29–44.
- Lawrence, Mark G., 2005: The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 225-233. doi: 10.1175/BAMS-86-2-225.

- Lee H., 1980: Heating degree-day in major cities of Korea. *Geography, Korean Geographical Society*, 22, 10-22.
- Choi, Y., 2005: Temporal and spatial variability of heating and cooling degree-days in South Korea, 1973-2002, *Journal of the Korean Geographical Society*, 40, 584-593.
- Choi, J., U. Chung, and J. I. Yun 2003: Urban effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* 42(12), 1711-1719. doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1711:UCTIAO>2.0.CO;2
- Chung, U., J. Choi, and J. I. Yun 2004: Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change* 66, 127-136. doi: 10.1023/B:CLIM.0000043136.58100.ce
- 권원태, 2004: 기후변화의 과학적 현황과 전망. 환경부-기상청-한국기상학회 공동주관 제2차 기후변화학술대회 초록집 1-4(2004년 11월 18-19일, 대구).
- 조재필, 정일원, 이진영, 김종필, 윤선권, 2013: 불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가. *APEC Climate Center Annual Report*.
- 장재호, 안중호, 2012: “미래 기후변화에 따른 낙동강 유역의 수문 · 수질 변화.” *한국수자원학회논문집*, 45(11), 1121-1130.
- 손태석, 이상도, 김상단, 신현석, 2010: “유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천유량 영향 분석.” *한국수자원학회논문집*, Vol. 43, 865-881.
- 배덕효, 정일원, 이병주, 이문환, 2011: “GCM과 수문모형의 불확실성을 고려한 기후변화에 따른 한반도 미래 수자원 전망.” *한국수자원학회논문집*, Vol. 44, 389-406.
- 강지윤, 김영도, 강부식, 2013: “기후변화에 따른 남강유역의 수문환경의 변화가 하천수질에 미치는 영향.” *한국수자원학회논문집*, Vol. 46, 873-884.
- 권원태, 2012: 기후변화 시나리오와 농업적 활용. *농업전망* 2012 제 31장.
- 한국지구과학회, 2009: 지구과학사전.

윤진일, 1999: 농업기상학, 아르케. p.119.

기상청, 2013: 2013년 이상기후 보고서.

농촌진흥청, 2013: 농업연구개발사업 대표성과 보고서.

연구보고서 2015-19

상세화 기후전망정보를 활용한 농업분야의 기후변화영향 평가방법 개선 및 개발- 농업기후지수의 변화 분석 -
Improvement of Agricultural Assessment of Impact on Climate Change Using Downscaled Climate Prediction
- Case study of Agro-Climatic Index -

정유란 기후변화연구팀



APEC 기후센터

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21