

상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의 기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발 - 농업이상기후/생산성지수 -

Improvement of Agricultural Assessment of Impact on Climate
Change Using Downscaled Climate Prediction

정유란

상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의 기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발 - 농업이상기후/생산성지수 -

Improvement of Agricultural Assessment of Impact on Climate
Change Using Downscaled Climate Prediction

정유란

발간사

이상기후 현상과 농업생산량 변동의 가변성이 최근 증가하고 있고, 이와 같은 현상이 미래에는 더욱 심화될 것으로 전망되고 있는 가운데, 이상기후에 따른 작물영향과 이에 대한 불확실성을 해소하기 위한 관련 연구가 활발히 진행되고 있습니다. 이에 본 연구는 이상기후 및 기상 이벤트에 대하여 작물 특히, 겨울작물의 반응을 정량화하고, 그 결과와 작물모형의 활용을 통해 기후 변화에 대한 작물영향을 전망하며 기후모형과 작물모형에 의한 불확실성을 최소화하기 위한 첫 단계로 수행되었습니다.

따라서 본 연구에서 선정한 대상작물 이외의 다른 작물의 작물영향을 체계적으로 정량화할 뿐만 아니라 다양한 기후모형과 작물모형을 통해 불확실성을 최소화할 수 있는 방법을 개발하고 미래 기후변화에 대한 영향평가를 향상시키는 연구가 추가적으로 필요할 것입니다. 본 연구결과가 향후 이상기후에 대비한 농업분야의 기후변화 적응대책 수립 및 정책과 관련 연구분야에서 실용적으로 활용될 수 있기를 기대해 봅니다.

끝으로 본 연구를 수행한 정유란 선임연구원의 노고에 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 가운데도 본 연구결과의 향상을 위해 자문과 조언을 해주신 이정택 박사와 서울대학교 김준 교수에게도 진심으로 감사의 말씀을 전합니다.

2016년 1월
APEC 기후센터
소장 정진승

ABSTRACT

There are three steps to conduct an impact assessment on agricultural productivity and vulnerability to climate change. First, the analysis of climate resources in the region should be prioritized in order to understand the plant responses to extreme weather events. Second, the response of crops to climate resources and climate change should be reflected in the crop simulation model. Third, the impact crop responses to future climate change should be evaluated by combining future climate scenarios and crop models, which simulate response results such as genetic parameters or soil parameters during extreme climate events. In this study, we analyzed the changes in heading times and yield components for previous winter barley growing seasons; calculated the duration and frequency of barley's growth limit temperature during overwintering events within the observed period; and calculated the historical and future periods of future climate scenarios for individual GCMs (Global Climate Models). The resulting frequency and duration information was coupled with a map presenting the areas that are able to safely cultivate barley. Then, we evaluated the changes of heading time and yield potential of barley simulated by multi-model ensemble approach of future climate scenarios. Changes in flowering time and uncertainty of climate change were evaluated in major fruit crop growing areas by simulating fruit crop flowering days through the prediction model.

The research results showed that in Daegu, the daily minimum temperatures had a higher impact than the daily maximum temperature on the heading time during the first half period of barley's growing season. High temperature during

overwintering had larger impacts on the development of growth than minimum temperature. We anticipated that this would be the case because the daily maximum temperature influenced a change in heading time during the early growing season in Jinju and Naju. In the case of changes in yield, the daily minimum temperature had a larger effect than the daily maximum temperature during the second half of growing season in Daegu, Jinju, and Naju. On the other hand, in Suwon, the daily maximum temperature affected changed on the winter barley yield during the second half of the growing season. Iksan presented different results. In four regions, with the exception of Iksan, yield decreased when daily temperature increased. In Iksan, yield increased when daily temperature increased during the second half of growing season. Overall, the range of responses of the heading time to the daily maximum and minimum temperature during the first half of the growing season was changed in 4°C range. During the second half of the growing season, there was a 2°C temperature range of response to change in yield during the second half of the growing season. It is worthy to note that the cold exposure duration decreased due to the effects of climate change in the areas that grow the most barley.

Crop Environment Resource Synthesis-Barley (CERES—Barley) was simulated under the observed climate, and the historical and future periods of GCM's future climate scenarios. In the crop model's simulation results, the anthesis date has been shortened under future climate scenarios of Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and RCP8.5 on CO₂ emissions, despite the condition of an unchanged sowing date. Increasing effects of winter barley yield in the RCP8.5 scenario were more present than in the RCP4.5 scenario in the areas that grow the most winter barley. However, in Jangheung and Haenam, there was a projected decrease in winter barley yields in both the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

The assessment results indicated that the chill-dormancy clock model produced

more reliable flowering day forecasts than the growth development model. Under the RCP4.5 CO₂ scenario, the results of the ratio of change on flowering time were as follows: grape > peach > pear > apple, in that order. The grape's ratio of change on flowering time was expected to be the highest amongst the four fruit crops whiel apple's ratio of change was expected to be low. Under the RCP8.5 CO₂ scenario, the results of the ratio of change on flowering time were as follows: apple > pear > grape > peach, in that order. The apple's ratio of change on flowering time increased sharplywhile the peach's ratio of change was expected to be low. This was the opposite of RCP4.5's results. In conclusion, the apple is expected to have the greatest change in flowering time between the four fruit crops, due to climate change impacts.

목 차

1. 서론-----	1
2. 연구 자료 및 방법-----	7
2.1 대상작물 선정 개요-----	7
2.1.1 보리의 주요 재배지역 및 재배면적-----	7
2.1.2 보리의 작부형태-----	9
2.1.3 보리의 안전재배지대-----	11
2.1.4 보리의 생장한계온도-----	12
2.1.5 안전재배지대의 잠재적 위험정보-----	15
2.1.6 저온노출기간-----	16
2.1.7 관측 생육자료-----	17
2.1.8 생육기간 동안 기후변화와 출수 및 수량-----	18
2.2 작물모형-----	19
2.2.1 모형 선정 및 개요-----	19
2.2.2 CERES-Barley-----	19
2.2.3 모형 구동을 위한 입력자료 생산-----	23
2.2.4 과거 관측기간에 대한 모형 구동-----	27

2.2.5 기후변화 시나리오 전망-----	28
2.2.6 모형 출력 정보-----	31
2.3 다년생 과수작물의 개화일 예측-----	31
2.3.1 다년생 과수작물의 개화일 추정을 위한 생물계절모형-----	31
2.3.2 주요 과수의 개화일 예측-----	34
2.3.3 기후변화에 대한 주요 과수의 개화일 변화-----	35
3. 연구 결과-----	37
3.1 기후변화에 따른 출수시기와 수량구성요소의 변화-----	37
3.1.1 과거 관측생육기간 동안 출수시기와 수량구성요소의 변화 -----	37
3.2 생육단계와 수량구성요소-----	50
3.2.1 파종에서 출수까지 기간과 수량성-----	50
3.2.2 등숙기간과 수량성-----	50
3.3 생장한계온도의 변화-----	52
3.3.1 과거 관측기간 동안 생장한계온도의 변화 -----	52
3.3.2 기후변화 시나리오 전망에 따른 생장한계온도의 변화 -----	55
3.3.3 안전재배지대와 생장한계온도 지속출현빈도의 변화---	61
3.4 저온노출기간의 변화-----	63
3.5 기후변화에 따른 출수시기와 잠재 생산성 변화 -----	66
3.6 주요 과수의 개화시기 변화-----	71

3.6.1 주요 과수 재배지역의 과거 관측기간 동안 생물계절모형 검증-----	71
3.6.2 미래 기후변화 시나리오 전망에 따른 주요 과수 개화일 변화-----	76
3.6.3 기후변화에 따른 주요 과수의 개화일 변화속도 -----	85
 4. 결론 및 향후계획-----	86
4.1 기후변화에 따른 보리의 작물반응/작물영향-----	86
4.2 기후변화에 따른 주요 과수의 작물반응/작물영향 : 개화시기 변화-----	87
 5. 국문적요-----	88
 Ⅱ 참고 문헌-----	90

1. 서론

농업이상기후에 대한 정의가 확실하게 정해져 있지 않은데, 농업이상기후는 작물의 생리적 특성을 고려하여 각 작물별 이상기후로 인해 피해를 받는 조건에서 그 범위를 벗어날 경우 이상기후가 발생했다고 정의되어 있다 (농림축산식품부, 2014). 이상기후 및 기상변화에 따른 농업의 피해는 시기와 지역에 따라 매우 다양하게 나타날 뿐만 아니라 작물들이 가지고 있는 생리적 특성이 다르기 때문에 이러한 대상작물의 생물리적 상황까지 고려되어야 한다. 최근 기상재해에 따른 농업 생산성을 예측하여 기후변화에 따른 농업의 사회·경제적 영향평가에 관련한 다양한 연구들이 수행 중이다. 임상준 등 (1997)은 이상기후에 따른 농작물의 재해발생 확률을 계량화하기 위하여 기상발생 모형을 개발하고 이로부터 일최고 및 최저기온, 일사량 및 상대습도 등의 기상자료를 출력한 후, 수정된 EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator)의 작물생장 및 병해충 모형 (Sharpley와 Williams, 1989)의 입력값으로 사용하여 논벼와 콩 수확량을 추정하여 이상기상 발생에 따른 논벼와 콩 수확량 변화를 모의하였다. Lee et al. (2014)은 기온 및 강수량, 강수일수, 일조시간 등의 기상요소에서 이상기후 존재 유무에 따라 쌀 생산량의 감소가 통계적으로 유의한 결과가 나타났다고 하였다.

기후변화와 농업생산량 변동의 가변성이 최근 증가하고 있고, 이와 같은 현상이 미래에는 더욱 심해질 것으로 예상하고 있다 (Shim et al., 2014). 이상기온에 대한 연구사례들이 있는데, (Heo et al., 2006; Choi et al., 2008)은 기온에 대한 스트레스가 심한 여름철과 겨울철에 대한 지역별 이상기온 출현 특성을 분석하고 강수량에 대한 평균과 극우현상에 대한 시공간적 변화를 통해서 최근 35년 동안 우리나라의 평균 겨울철 일 최고 및 최저기온이 각각 $+0.6/10$ 년, $+0.54/10$ 년 비율로 상승한 반면, 여름철 극한 기온 평균은 통계적으로 유의미한 변화를 보이지 않았다고 하였다. 또한, 30년 동안 이상저온 및 이상고온 출현일수를 계산하고 지역별 이상기온 분포 특징을 분석한 결과, 동해안 지역이 다른 지역보다 기후학적으로 기온 변동 폭이 상대적으로 큰 지역으로 평가되었다고 하였다 (Lee et al., 2010). 그러나 Shim et al. (2013)과 Lee et al. (2010)은 우리나라 농업기후지대에서 최근 온난화로 인해 이상고온 현상은 증가하고 이상저온 현상은 줄어들어드는 경향을 보였다고 보고한 바 있

다. Shim et al. (2014)은 온난화에 의해 따뜻해진 겨울날씨는 기온상승으로 포근하지만 다수의 구름낀 흐린 날을 유발할 수 있기 때문에 오히려 겨울철 비닐하우스 안의 기온을 감소시킬 수 있다고 하였다.

이러한 이상기후 존재 유무에 의한 작물영향은 과수 작물에서도 나타난다. 쌀이나 보리, 콩처럼 일년생 식량작물과는 다르게 다년생 주요 과수작물의 경우 봄철 개화 후 벌에 의한 수분이나 인공수정은 영농활동 중 중요한 활동이다. 최근 복숭아 개화에 이상저온, 이상고온, 건조 등 불량한 환경조건이 발생하면서 방화곤충의 활동을 위축시키고, 화분의 발아 및 개화율에 영향을 주어 안정된 결실을 맺을 수 없게 되었다. 또한 2014년 봄꽃과 함께 3월 복숭아 개화가 전국적으로 동시에 개화함으로써 봄꽃 교란이 발생하기도 하였다 (Lee et al., 2014). 이상기상에 대응한 복숭아 수분수 선발에 관한 연구도 수행되었는데, ‘천홍’, ‘이즈미백도’, ‘유명’, ‘진미’, ‘수미’, ‘장택백봉’, ‘장호원황도’ 등 7품종의 개화특성, 화분발아율 및 결과지 전분함량 등을 조사하여 수분수 적합도를 측정하고, 이 중 화분발아율이 좋고 내동성이 강한 품종으로는 ‘진미’와 ‘천홍’이었으며, ‘천홍’은 개화시기가 빠르고, ‘진미’는 만개기가 늦어 두 품종을 혼합하여 수분수로 활용하는 것이 좋을 것으로 분석되었다 (권의석 등, 2012). 이상기상에 의한 기상재해는 위에서 언급한 것과 같이 식량작물과 주요 과수작물에 서뿐만 아니라 최근에는 채소와 같은 원예작물에서도 이상기상에 의한 피해가 자주 발생한다. 많은 농작물 중에서 채소작물의 피해가 더 크다고 볼 수 있다. 이상규 등 (2013)은 이상기상 조건이 배추의 생육 및 세포조직에 미치는 영향을 분석하였는데, 특히 노지에서 많이 재배되고 있는 고추, 배추 및 무는 온난화로 인하여 정식시기가 점점 앞당겨지고 있는 추세이지만, 정식 후 갑작스런 저온이 오면 이들 작물의 피해가 크게 나타난다고 하였다. 특히, 저온에 따른 배추의 생육특성과 엽세포 조직에 미치는 영향을 구명하고자 실시하였는데, 각 기온 조건마다 배추 잎의 엽육 세포의 형태가 어떻게 변하는지 나타내었다. 배추 정식 후 초기 생육 단계에서 영하 3°C까지는 비닐이나 부직포로 보온, 토양수분 조절, ABA 처리를 하여 동해를 예방할 수 있지만 영하 7°C의 저온이 발생하면 세포가 파괴되어 회복하기 어렵기 때문에 다시 심거나 또는 다른 작물로 대체하는 것이 좋을 것으로 분석하였다.

농업은 기후·기상에 따라 크게 영향을 받는 산업이기 때문에 기온, 강수량, 일조시간 등 작물에 영향을 미치는 기후요소를 분석하고 영농활동을 위한 의사지원에 활용

하는 일이 중요하다. 기후자원 (예, 기온, 강수량, 일조시간 등)으로부터 농업활동 (예, 모내기 등)에 필요한 의사지원 방법으로 농업기후지수를 예로부터 많이 활용해 왔다. 국내에서 농업기후자원의 분석 및 농업기후지수 관련 최근 연구로는 Shim et al. (2004)의 농업이상기후지수에서 Ahn et al. (2010a)은 수치예보모형을 이용한 역학적 규모축소 기법을 통한 농업기후지수 변화 분석 등이 있다. Ahn et al. (2010b)은 지역모델 WRF (Weather Research and Forecasting Model)에 NCEP/NCAR 재분석 자료를 초기자료로 2002년부터 2008년까지 입력하여 식물온도 출현초일, 작물온도 출현초일, 벼 이앙기의 저온 출현율 등에 대한 상세한 분포를 생산하였다. 생산된 자료는 통계적 보정을 거쳐 계통적 오차를 제거함으로써 그 기간의 기후를 재현하였으며 이를 이용하여 최근 한반도 기후변화에 대한 농업기후지수의 변화를 분석하였다. 가뭄에 대한 정보 또한 농업활동의 의사지원에 큰 영향을 미친다. 양정석 등 (2012)은 가뭄 취약성 지수를 산정하고 경향성 검정에 따른 지수를 산정하였는데, 지수 산정에 이용된 지표는 수자원, 강우, 인문분야 등 3개 분야에 대하여 연최저 및 평균 하천수위와 지하수위, 무강수일수, 강우집중률, 1인당 가용수자원량, 물재정 건전성, 물이용 공평성 등으로 10개 이다. 구미보, 상주보, 합천보 등 낙동강 유역에 위치한 연구 지점들이 대체적으로 취약한 것을 알 수 있었고, 금강유역은 낙동강에 비해 비교적 취약성이 낮은 것으로 나타났다고 하였다. 이와 같이 가뭄에 대한 하나의 대리 변수로 기후지수를 개발하여 가뭄 피해 정보를 분석할 수도 있지만, 작물은 강수뿐 만 아니라 기온, 풍속, 일조시간 등의 영향을 받기 때문에 농업관련 가뭄 지수의 개발을 위해서는 적절한 대리 변수의 선정이 중요하다. 김성재 등 (2012)은 기후변화에 따른 농업생산기반 재해 취약성 평가를 위한 대리 변수로 가뭄 지수를 선정하기도 하였다. 또한 Kim et al. (2014) 농업에서 이용할 수 있는 농업 가뭄지수를 개발하여 영농활동을 위한 의사지원 향상을 도모하기도 하였다.

작물의 개화일 혹은 성숙 (등숙)일 등에 대한 생물계절반응의 인지는 영농활동의 사결정에 있어 중요한 일이다. Jang et al. (2002)은 최근 지구온난화에 의한 겨울기온의 상승은 온대낙엽과수의 개화기를 앞당기거나 개화기간의 연장으로 이어져 결실불량을 유발할 수 있다고 하였다. Jacobs et al. (2002)은 겨울 기간의 단축으로 인하여 사과와 배의 전엽기가 지연되고 눈의 발아가 비동시적으로 일어나 수확량 감소에 영향을 미친다고 하였다. 이는 휴면해제를 위한 저온요구도의 부족에서 기인한 것

으로 일본 남큐슈 지방에서는 휴면병에 의한 배 품종 행수의 발아 불량률이 보고된 바 있다 (National Institute of Fruit Tree Science, 2003). 따라서 지구온난화로 인한 과수작물의 꽃눈의 발아와 개화기의 변동을 전망하여 기후변화에 대한 과수산업의 전략에 적용하는 일이 필요하다. 또한 우리나라에서 식량작물은 대체로 봄에 심어 가을에 수확하는 여름작물인 반면 보리는 가을에 심어 이듬해 봄에 수확하는 겨울작물이다. 지구온난화가 여름작물에는 부정적인 영향을 끼치는 것에 반하여 겨울작물에는 긍정적인 효과를 끼친다는 연구결과가 발표되고 있다 (Shim et al., 2002; Holdedn et al., 2003; Shim et al., 2011). 여름작물은 생육기간 중 고온이 지속되어 등숙기간이 단축되어 종실수량이 감소하는데 반하여, 겨울작물의 경우 월동기간과 그 이후 생육단계에서 기온상승이 단위면적당 수수를 증가시켜 수량이 증가할 수 있다는 것이다 (Lee et al., 1991; Shim et al., 2002). 우리나라에서 기후변화와 겨울작물과 관련한 연구는 많지 않다. Shim et al. (2002, 2004)은 기후변화를 고려한 가을보리 안전재배지대를 구분하였으며, Kim et al. (2013)은 신 기후변화 시나리오 전망에 따른 겨울보리의 재배적지 이동을 분석한 바 있다. 특히, Shim et al. (2002, 2004)은 우리나라가 ‘춥지 않은 겨울’ 날씨가 지속됨에 따라 가을보리 안전재배지역이 북상할 수 있다고 하였다. 이에 Kim et al. (2013)은 신 기후변화 시나리오 RCP8.5에서 2020년에 강원도와 북한 남부 대부분 지역에서 겉보리 재배가 가능해지면 남한 전역에서는 쌀보리 재배가 가능해질 것이고, 2040년에는 북한 평야지대에서 거의 모든 벼논에서 쌀보리 이모작이 가능해질 것으로 예상하였다. Kim et al. (2013)도 기후변화 전망에 따른 파종일 변경이 곡물생산량에 미치는 영향을 평가하기도 하였다.

작물재배에 미치는 기후변화의 생물리학적 영향은 지역에 따라 그 특징이 다르게 나타날 뿐만 아니라 특정지역에서 재배하는 작물은 그 지역의 기후에 적응되는 과정을 거쳐 그 지역의 풍토에 알맞게 진화된다. 이러한 복잡한 작물의 생물리학적인 반응과 생산성에 대한 기후변화 영향평가를 위해서는 모형작업이 필수적일 뿐만 아니라, 기후모형에 의해 생산된 미래의 기후변화 전망자료와 결합하기 위해서는 작물생산 모형이 함께 결합되어야 한다. 그래서 농업과 관련한 다양한 기후변화 연구에는 농업모형 (예, 작물모형)의 개발 및 적용 연구들이 수행 중이다. 토지이용과 관리, 기술수용, 환경프로그램 분야에 작물모형과 사회·경제모형을 결합한 경제학적 분석을 통해 완화

와 적응분야의 연구를 수행 중이다 (US Department of Agriculture, Economic Research Service, USDA ERS, 2014). 농업은 온실가스 배출원이기도하면서 또한 그로 인해 발생하는 온난화로 인해 직접적인 영향을 받는 부분이기 때문에 이 연구사업을 통해 탄소상쇄와 관련하여 대상작목의 재배농민을 통제하고 모니터링하고 있다. 일본의 쌀 수량성은 2050년대까지는 증가하다가 그 이후는 CO₂시비효과가 온도상승에 따른 생육기간 단축 효과를 상회하여 수량이 감소할 것으로 분석되었다 (Ministry of the Environment, Japan, 2000). 기후변화에 따른 쌀 수량성의 변화는 일본 전역 어느 지역에서 초기에는 증가하여 일정 시기가 되면 최대에 이르렀다가 그 이후 감소하기 시작하지만 최대에 이르는 시기가 지역에 따라 다르며, 저온 지대인 홋카이도와 도호쿠 지방은 그 외의 지역보다 빠르게 감소할 것으로 예측하였다. 특히, 어느 지역에서나 3°C 이상으로 상승하면 고온에 의한 불임이 증가하여 쌀 수량의 변동성이 커질 것으로 예측하였다. Tao et al. (2008)은 20가지의 기후변화 시나리오를 이용하여 CO₂시비효과를 고려하지 않은 경우 벼 수량변화 모의실험을 하였는데, 중국 전역에서 90%의 확률로 벼 수량성이 감소할 것이라고 하였으며, 다른 연구들도 (Jin et al., 1995; Yao et al., 2007; Xiong et al., 2008) 유사한 결과가 보고되었다. Lin et al. (2005)은 온난화에 동반된 CO₂시비효과를 고려하면 고온에 의한 수량 감소는 상당 부분 상쇄되며 평균적으로는 벼는 13%, 옥수수는 18%, 밀은 28% 증가할 것이라고 하였으며 Xiong et al. (2008)도 유사한 결과를 보고하였다. Xiong et al. (2008)은 기후변화가 벼, 옥수수, 밀 등 작물 생산성에 미치는 직접적인 영향뿐만 아니라 인구증가와 경제 발전에 따른 물수요와 가경지 면적변화에 따른 수자원 가용성의 변화 등 간접적인 영향을 고려하여 중국의 작물 생산량 변화를 예측하였다.

이와 같이 미래 기후변화에 대한 농업 생산성 및 취약성에 대한 영향평가를 위해서는 첫 번째 그 지역의 기후자원을 분석·이해하고 분석된 기후 및 이상기후·기상 이벤트에 따른 작물의 반응을 이해하는 일이 우선되어야 할 것이다. 두 번째는 이러한 기후자원 및 기후변화에 대한 작물의 반응을 작물모형에 반영하여 모의하는 일이 필요할 것이다. 세 번째는 이렇게 작물의 반응이 반영된 작물모형과 기후모형에서 생산된 미래 기후변화 시나리오 전망과 결합하여 기후변화에 대한 작물반응을 전망하고 평가하는 것이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 (1) 농업생산에 있어서 기후변화가 긍정적 영향을 미치는 것으로 평가되는 작물 (예, 겨울작물)을 먼저 선정하고

6 | 상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의 기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발

(2) 대상작물의 이상기후·기상 변동이 대상작물에 미치는 영향을 평가하고자 한다.
아울러 (3) 미래 기후변화 시나리오 전망이 대상작물에게 미치는 영향도 평가하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 대상작물 선정 개요

2.1.1 보리의 주요 재배지역 및 재배면적

기후변화에 의한 겨울기온 상승에 대하여 긍정적 영향으로 평가되는 겨울작물 중 본 연구에서는 최근 재배면적이 증가하고 있는 겨울보리를 선정하였다. 과거 쌀 생산이 부족한 시절에 보리는 쌀을 대신하는 중요한 식량으로써의 역할을 해 왔다. 그러나 쌀의 자급이 이루어짐에 따라 보리의 생산과 소비가 크게 줄어들면서 보리, 밀 등의 맥류 재배면적도 계속 감소해 왔다. 특히, 1990년대 이후 경남과 제주에서 재배면적이 급격히 감소했다 (그림 1과 <http://www.kosis.kr>). 쌀보리의 재배면적은 1971년에 365,155ha에서 2007년 24,374ha로 감소하였고, 생산량도 899,567톤에서 76,856톤으로 1/10 수준으로 줄어들었으며, 2012년에는 정부의 보리 수매제도가 전면 폐지되어 국내 생산기반의 붕괴로 이어졌다 (RDA, 2012; Kim et al., 2012). 그러나 최근 보리의 영양학적 가치와 질병치유 등의 효과가 알려지면서 수요가 증가하였을 뿐만 아니라 국내 맥주 소비 증가에 따른 하우스 맥주 제조에 대한 관심 증가로 국내 보리 생산이 다시 증가하게 되었다. 또한, 청보리를 이용한 옥수수 등 수입사료 대체, 각종 기능성 제품의 원료 등 그 용도가 확장되고 있다. 게다가 보리밭은 겨울철 농촌 어메니티 (amenity)의 기반으로서 생태 관광이라는 새로운 기능면에서 보리의 효용이 재조명 받고 있어 다시 보리의 재배면적이 증가하고 있다. 그림 2는 최근 18년 동안의 수량 변화를 나타내고 있다. 실제로 겉보리의 경우 2011년까지 지속적으로 감소하던 재배면적이 2012년에 들어 160ha 이상 증가하였다. 표 1은 2005년과 2010년 통계청에서 조사된 겉보리 주요 재배면적 변화이다.

8 | 상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의 기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발

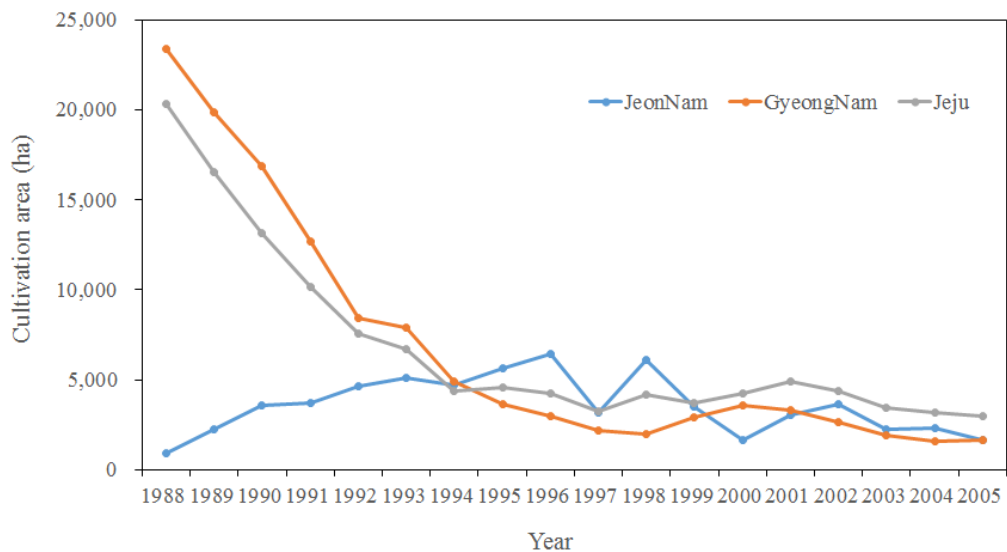


그림 1 겉보리 주요 재배지역 (전남, 경남, 제주)에서 겉보리의 연도별 재배면적 변화

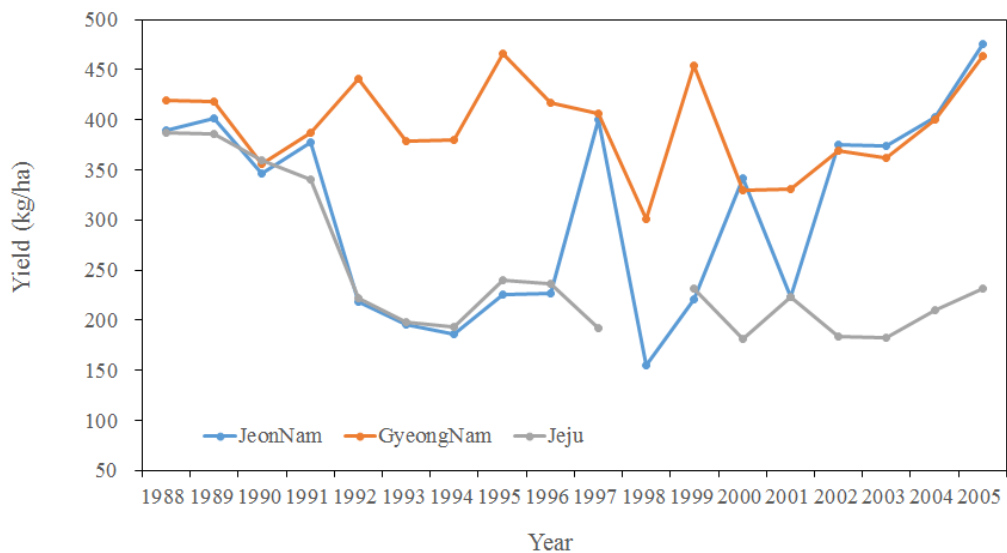


그림 2 겉보리 주요 재배지역 (전남, 경남, 제주)에서 겉보리의 연도별 수량 변화

2.1.2 보리의 작부형태

우리나라에서 보리와 같은 겨울작물은 답리작 형태로 재배한다. 답리작은 일정한 논에 재배한 다음 이어서 다른 겨울 작물을 재배하여 논의 토지이용율을 향상시키는 논 2모작 형태의 작부양식이다. 답리작 재배에 쓰이는 작물로는 보리·밀·맥주보리·호밀과 같은 맥류, 유채와 같은 유료작물(油料作物), 마늘·양파와 같은 채소, 왕골·골풀 등의 섬유류 작물 등 여러 가지가 있다. 이때, 논의 관수와 배수조건에 따른 습답과 건답 등에 의해 답리작 재배작물의 종류가 달라진다. 한국의 답리작 지대는 여름작물 재배기간이 긴 남부지역이 된다. 배수가 불량한 습답에서는 벼를 재배한 후 왕골이나 골풀 등의 재배를 추천하고 있다. 이와 같은 작부양식에서는 될 수 있는 대로 뒷그루로 심는 왕골이나 골풀은 일찍 수확되는 조생품종을 심어야 하며, 벼 품종은 만기재배에 적응성이 높은 품종을 선택하도록 권고하고 있다. 배수가 잘 되는 건답에서는 벼를 수확한 후 보리·밀 또는 유채를 재배하는데, 보리나 유채는 6월 상·중순에 수확하게 되어 벼 재배 적기에 지장을 주지 않으므로 우리나라에서 가장 전형적인 답리작 재배작물로 정착되어 있다.

표 1 2005년과 2010년의 겔보리 재배면적 증감에 따른 겔보리 재배면적 지역 순위와 인근 기상관측소

City	2010		2005			ASOS
Si-Gun	Rank	Cultivation area (ha)	Rank	Cultivation area (ha)	Change (ha)	Station number
National	-	25,086	-	40,365	15,279	-
Gimje	1	3,821	1	3,728	-93	ID243
Gunsan	2	2,985	5	2,444	-541	ID140
Buan	3	2,514	6	2,179	-335	ID243
Iksan	4	1,575	16	763	-812	ID140
Yeonggwang	5	1,475	3	2,899	1,424	ID165
Boseong	6	1,234	4	2,477	1,243	ID260
Miryang	7	1,048	8	1,748	700	ID288
Haenam	8	85	9	1,464	607	ID261
Jangheung	9	813	2	2,974	2,161	ID260
Jeju	10	742	19	660	-82	-
Jeongeup	11	690	14	817	127	ID254
Naju	12	620	7	1,763	1,143	ID156
Gangjin	13	601	12	1,046	445	ID261
Dalseong	14	362	18	673	311	ID143
Hampyeong	15	336	11	1,073	737	ID156
Gochang	16	316	23	434	118	ID245
Shinan	17	290	14	876	586	ID165
Goseong	18	279	17	693	414	ID192
Jeonju	19	268	31	260	-8	ID146
Gyeongju	20	226	32	256	30	ID281
Yeongam	21	223	10	1,142	919	ID165
Jinju	22	219	20	559	380	ID192
Changyeong	23	212	24	372	380	ID288
Yeongdeok	24	206	36	174	160	ID277

2.1.3 보리의 안전재배지대

작물에게는 그 작물이 안전하게 재배될 수 있는 재배한계 혹은 생육환경 조건 등이 존재한다. 작물의 안전재배지대를 구분하는 데에는 기상, 토양 및 작물의 특성, 사회 경제적 조건 등이 관여하겠지만, 작물재배 자체만으로 한정한다면 기상조건만으로도 어느 정도 재배한계를 결정할 수 있다 (최, 2001; Shim et al., 2012). Shim et al. (2004)은 가을보리의 재배한계선을 구분하였는데, 이 때 1월 평균기온을 이용하였다. 이 등치선이 1월 평균기온 -6°C 의 등온선과 일치하였고, 벼와 이모작을 위한 가을보리의 재배재한계선은 1월 평균기온에서 -4°C 의 등온선 부근이고, 봄보리의 재배한계지역은 1월 평균기온에서 -8°C 의 등온선 부근이라고 하였다. 1989년 농촌진흥청에서 발간된 농업지대구분도는 1월 최저기온의 지역적 분포에 따라 겉보리 재배지역을 3개로 구분하였는데, 1월 최저기온에서 각각 -5 , -7 , -9°C 인 등치선을 겉보리 재배한계로 구분하였다. 쌀보리의 경우는 1월 최저기온에서 각각 -4 , -3 , -2°C , 맥주보리는 1지역으로 구분하였는데, 1월 최저기온이 -3°C 인 등치선을 맥주보리의 재배한계로 구분하였다 (농촌진흥청, 1989). 박 등 (1999)은 보리 재배의 한계지대는 내한성이 강한 겉보리가 1월 평균기온이 -5°C 이상에서 1월 최저기온이 -10°C 이상인 지역까지 볼 수 있기 때문에 황해도의 서남해안 지방을 제외한 북한지역은 대부분 춘파재배 지역으로 볼 수 있다고 하였다. 하용운 (2000)은 1월 평균기온과 최저기온으로 맥종별 (겉보리, 쌀보리, 맥주보리) 안전재배지역 및 재배한계지역을 설정하였고, 품종을 내한성 정도에 따라 5등급으로 구분하여 품종별 안전재배지역을 설정하였다. Kim et al. (2013)도 신 기후변화 시나리오 전망에 따른 우리나라의 겨울보리 재배적지 이동을 10년 단위 (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010)로 분석하였다. 그림 3은 하용운 (2000)이 제시한 보리 품종군별 안전재배 및 한계온도 기준으로 1월 상세 기온분포도 (평균, 최저기온)로부터 제작된 보리 (겉보리, 쌀보리, 맥주보리) 안전재배가능 구분도이다 (Kim et al., 2013). 이 보리 안전재배가능 구분도의 공간해상도는 30m이다. 파란색 사각형은 보리 재배지역에 포함된 기상청 표준기상청을 나타내고, 진분홍 원형은 인근 표준기상관측소를 나타낸다. 또한 Kim et al. (2013)은 이산화탄소 배출증감 정책에 따른 미래 기후변화 시나리오 중에서 RCP8.5 기반으로 보리 3품종의 미래 안전재배 가능 구분도를 제작하였다 (그림 4).

2.1.4 보리의 생장한계온도

가을보리를 비롯한 월동작물의 월동위험지역 및 안전재배한계 지대의 구분에는 작물 자체의 내한성이 중요하다 (Shim et al., 2004). 보리 품종에 따라 한계온도는 다를 뿐만 아니라, 가을에 파종하여 혹한기를 지내는 경우와 봄에 파종하여 수확하는 경우 (예, 춘파재배)에 따라서도 다를 것이다 (Shim et al., 2004). 따라서 한계온도 만으로는 불충분하며 위험온도가 어느 정도의 비율 혹은 빈도로 발생하느냐가 중요할 것이다. Ando (1986)은 위험온도가 일반적으로 10년에 1회 이내의 비율로 발생하는 지구를 안전지역, 10년에 5회까지는 요주의지역, 10년에 5회 이상 발생하는 지역은 부적지로 판단하였으며, 각 관측지점에 대해서 10년, 5년의 재현기간을 구하여 분포도를 작성하여 작물의 안전재배지대 구분에 활용할 수 있다고 하였다 (Ando, 1969). 월동작물에 대한 안전재배지대 구분에는 월동기간의 온도 조건이 매우 중요하다. 작물의 안전한 월동은 가장 추운 때의 최저온도에 의해 지배되기 때문이다. 따

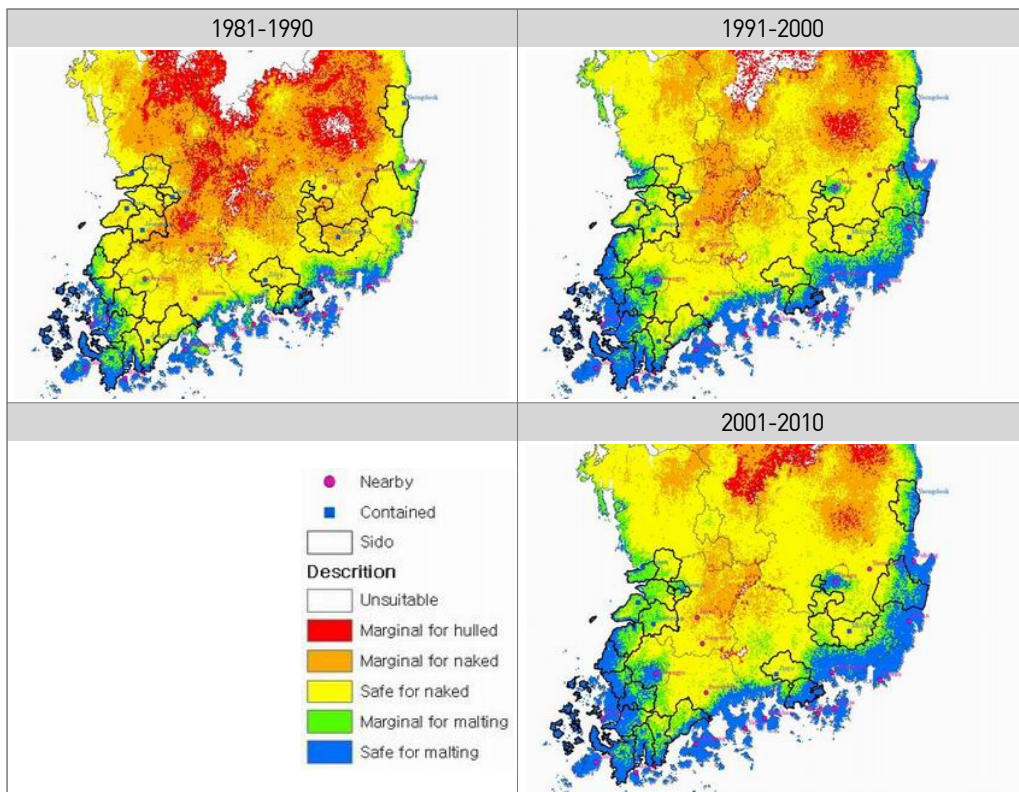


그림 3 과거 10년 단위의 겉보리, 쌀보리, 맥주보리의 안전재배지역 (자료출처: Kim et al., 2012)

라서 기후변화에 따른 가을보리의 맥종과 품종별 안전재배지대의 변화를 살펴보기 위해, 최한월인 1월의 평균기온과 최저기온을 기준으로 농촌진흥청 작물시험장에서 구분한 자료를 이용하였다.

2.1.4.1 주요 재배지역의 생장한계온도 변화

보리 주요 재배지역의 생장한계온도 변화를 계산하기 위해서 먼저 주요 재배지역에 포함된 기상관측소의 기후자료를 수집이 필요하다. 보리 주요 재배지역 시군 24개 중에서 기상청 표준기상관측소가 포함된 시군은 총 6개뿐이었다 (표 10). 9개 표준기상관측소로부터 과거기간 1976-2005년 동안의 일 최고 및 최저기온, 강수량, 일사량을 수집하였다. 생장한계온도의 지속출현 기간을 계산하기 위해서 먼저 지속출현 기간에 대한 설정이 필요하다. 본 연구에서는 지속출현 기간을 겉보리의 파종 후 출수 전까지 (12월에서 2월) 겉보리의 생장한계온도 -9°C 가 3일 이상 지속출현 할 때를 지속출현 기간으로 설정하였다. 또한 지속출현 기간이 과거기간 동안 얼마나 발생했는가에 대한 발생빈도를 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$F = \frac{n_i}{N} \quad (\text{식 1})$$

여기서 n_i 는 I년의 12월에서 2월 동안 -9°C 이하 4일 이상 지속출현 회수이며, N 은 총 기간이다. 예를 들어, 1991년 12월에서 이듬해 2000년 2월 월동기간 동안 -9°C 이하 4일 이상 지속출현일 회수가 7번이고, 총 기기간이 30년이라면 F 는 23.3이 될 것이다.

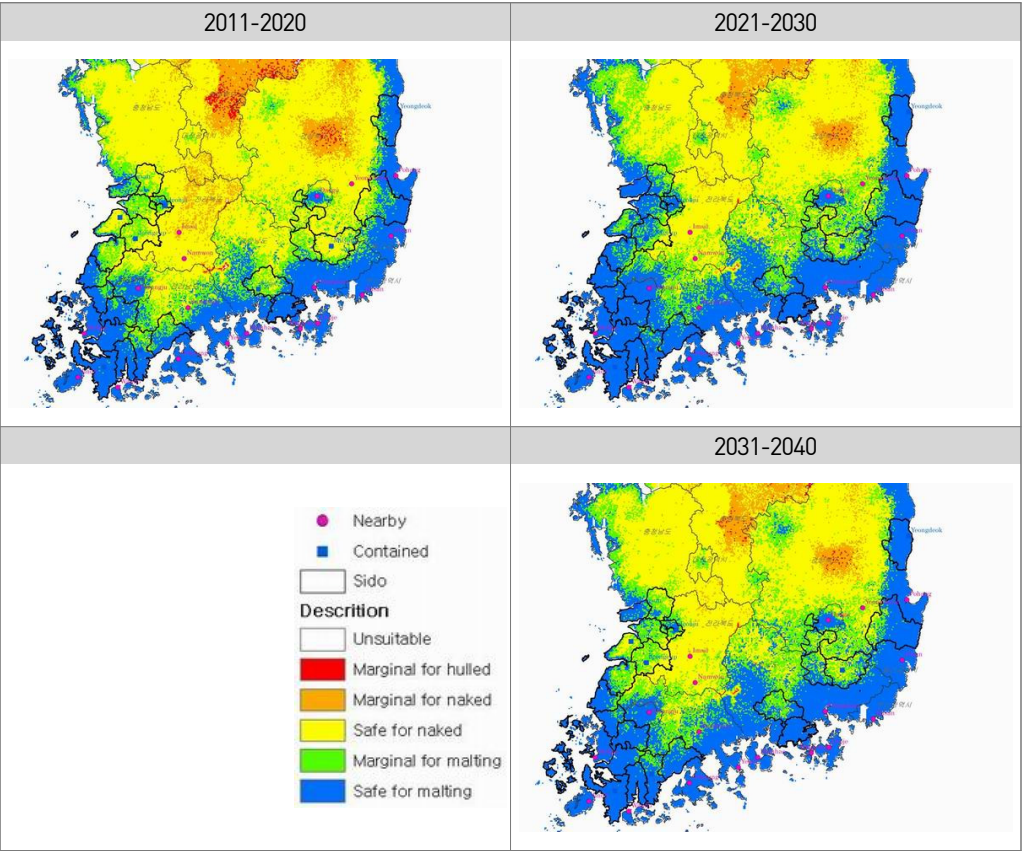


그림 4 RCP8.5 미래 기후변화 시나리오 기반의 10년 단위 겉보리, 쌀보리, 맥주보리의 안전재배지역 (자료출처: Kim et al., 2012)

표 2 겉보리, 쌀보리, 맥주보리의 안전재배가 가능한 1월 일 평균기온과 일 최저기온 (자료출처: Shim et al., 2004)

Group	Average temperature (°C)	Minimum temperature (°C)
Hulled barley	-4	-10
Naked barley	-3	-8
Malting barley	0	-4

표 3 국내 39개 겨울보리의 안전재배가 가능한 1월 일 평균기온과 일 최저기온 (자료출처: Shim et al. 2004)

Type	Group	Cultivar	Average temperature (°C)	Minimum temperature (°C)
I	Hulled barley	Olbori, Kangbori, Tapgolbori, Chalbori, Saeganbori, Seodunchalbori	-5	-12
II	Hulled barley	Saeolbori	-4	-10
	Naked barley	Chalssalbori, Saechalssalbori		
III	Hulled barley	Keunalbori, Milyanggkebori, Saealbori, Miragbori, Alchanbori, Daebaegbori, Albori	-3	-8
	Naked barley	Naehanssalbori		
IV	Hulled barley	Oweolbori, Daejinhori, Nagyeongbori	-2	-6
	Naked barley	Songhagbori, Olssalbori, Neulssalbori, Kinssalbori, Hinssalbori, Hinchalssalbori, Mudeungssalbori, Chunchussalbori, Kwanghawalssalbori, Kanghossalbori		
V	Naked barley	Duwonchapssalbori	0	-4
	Malting barley	Sacheon6, Doosan8, Doosan22, Jinkwangbori, Jejubori, Jinyangbori, Samdobori, Namhyangbori		

2.1.5 안전재배지대의 잠재적 위험정보

농업용 보리 안전재배한계 구분도에 본 연구에서 계산된 생장한계온도 지속출현빈도를 결합하였다. 농업용 보리 안전재배한계 구분도는 결과값을 디지털 숫자로 제공한다 (그림 3과 그림 4). 예를 들면, 농업용 보리 안전재배한계 구분도에서 ‘위험’을 의미하는 격자는 디지털 숫자로 “5”를 가진다. 본 연구에서는 이 구분도의 정보 (디지털 숫자)를 추출하여 생장한계온도 지속출현빈도를 결합하여 겉보리 주요 재배지역의 잠재적 위험정보를 맵으로 표출하였다. 위험정보 계산을 위한 식 (3)은 아래와 같다.

$$P_r = Z \times F \quad (\text{식 3})$$

여기서 Z 는 농업용 보리 안전재배한계 구분도의 디지털 값, F 는 생장한계온도 지속출현빈도이다. 예를 들어, 1991~2000년의 보리 안전재배한계 구분도에서 저온피해 없이 안전하게 재배할 수 있는 지역으로 디지털 숫자 “2” 이고, 이 지역의 생장한계온도 지속출현빈도가 23.3이라면 P_r 은 46.6이 된다.

2.1.6 저온노출기간

2.1.6.1 파성소거기간 (exposure duration for vernalization)

겨울작물에게 파성소거기간은 파종 후 월동기간을 거친 후 작물의 생육특성에 영향을 미친다. 특히, 파종 후 월동 전·후의 기온은 파성소거에 미치는 중요한 기상요소이다. 품종마다 파성소거에 필요한 기간이 다른데 춘파성 품종 (Group I and II) 중에서 Group I이 45일로 가장 짧고, 추파성 품종 (Group III and Group IV) 중에는 Group IV가 100일 이상의 저온노출이 필요하다. 따라서 일정기간 동안 충분한 저온기간을 거치기 위해서는 적절한 시기에 파종이 필요하다 (표 4).

표 4 보리 품종의 파성 특성에 따른 저온노출일수

Type	Vernalization property
Group I	needs 45 days to develop 9 leaves
Group II	70 days for 13 leaves
Group III	100 days for 15 leaves
Group IV	over 100 days

2.1.7 관측 생육자료

농촌진흥청 국립식량과학원에서는 매년 지역적응 및 작황시험을 작물과 품종별 대표 재배지역에서 수행하고 있다. 조사항목은 모든 품종에서 동일하게 파종기, 파종량, 파종시 시비정보 및 재배정보, 예를 들면, 재식거리 및 파종 깊이 등의 재배환경 정보들이다. 또한 출수일, 성숙일, 간장, 수수, 1수립수 (1개 수수에 달린 영화수), 수량, 생체수량, 천립중, 조곡 및 정곡 상태에서의 단백질 및 전분함량 등의 화학적 항목 등도 포함되어 있다. 그러나 생체수량이나 단백질과 같은 화학적 함량 자료들에 대해서는 품종이나 시험연도가 일정하지 않아 자료를 이용할 수 없었다. 표 5은 수집된 작황조사 자료에서 본 연구에서 사용된 항목들이다. 국립식량과학원에서 육성한 ‘올해의 보급품종’에 해당되는 품종 중 3년에서 5년 이상 연속 시험된 자료를 이용하였다.

표 5 수집된 국립식량과학원 작황조사 자료 중 분석에 이용된 항목

Descriptions
Cropping system information (example: double or single cropping system)
Sowing day (day)
Plant population at seeding (kg/ha)
Row spacing, plot spacing (rows per plot)
Fertilizer information (example: N-P-K, kg/ha)
Anthesis day (day)
Phenological maturity (day)
Plant height
Number of tiller (at maturity)
Number of panicle or number of pod if crop is soybean (no.)
Number of spikelet (no.)
Mass of 1,000 (100) grains (g)
Grain yield (kg/ha)

2.1.8 생육기간 동안 기후변화와 출수 및 수량

벼와 같은 식량작물에 대하여 생육기간 동안의 기후변화가 출수와 성숙 및 수량구성요소에 미치는 영향에 대한 연구사례들은 많다. 또한 생장한계온도 변화를 분석한 결과를 언급하기 전에 보리 주요 재배지역의 관측 생육자료로부터 보리 재배기간 (생육기간) 동안의 기후변화가 보리의 수량구성요소 및 생육단계지표 (예, 출수일)에 어떤 영향을 주었는지 확인이 필요하였다. 본 연구에서 보리 생육기간 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온이 출수시기와 수량에 어떤 영향을 미치는지를 비교하였다. 이때, 생육기간 전반을 12월에서 이듬해 2월까지로 설정하였고, 생육기간 후반을 그해의 3월에서 5월까지로 분리하여 분석하였다.

분석 대상지역 및 대상품종의 경우, 각 대표지역에서 지역적응 및 작황시험 대상 품종들이 해마다 변경되는 경우들이 있었다. 그 중에서 최소 4년 이상 되는 품종을 대상으로 분석하였다 (표 6). 보리 주요 재배지역과 대표 지역적응 및 작황시험장이 일치하는 지역 중에서 생육자료가 4년에서 7년 이상 비교적 균일하게 있는 지역을 선정하였다. 또한, 품종의 경우도 선정된 지역에서 4년에서 7년 이상 균일하게 있는 품종으로 분석하였다.

표 6 보리 주요 재배지역과 국립식량과학원의 대표 지역적응 및 작황시험장이 일치하는 지역 중 생육자료를 4-7년 이상 보유하고 있는 지역

	Hulled barley	Naked barley	Malting barley	Period
Daegu	Olbori			1981~2012
Jinju	Olbori	Saessalbori	Jinyangbori	
Iksan	Olbori			
Naju	Olbori		Samdobori	
Suwon	Olbori			

2.2 작물모형

2.2.1 모형 선정 및 개요

작물모형 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)은 미국에서 개발되어 IBSNAT (International Benchmark Site Network for Agrotechnology Transfer) 사업에 의해 국제적으로 널리 보급된 것이다. DSSAT에는 콩, 옥수수 등의 식량작물에서 유류 (oil crop: canola, sunflower etc.), 구근작물 (root crop: peanut, potato etc.) 등의 생육을 모의할 수 있는 패키지로 구성되어 있다. 작물의 성장과 발육에 영향을 미치는 기상, 토양, 수분, 탄소, 질소 등 농업 생태계 구성요소간의 상호작용을 종합적으로 고려한 것으로 실험실 수준을 벗어나 실용화 단계에 있는 것으로 평가된다 (Singh, 1985; Godwin et al., 1992).

2.2.2 CERES-Barley

본 연구에서 겨울보리의 생육모의를 위해 사용한 작물모형은 CERES-Barley (Crop Environment Resource Synthesis)로서 DSSAT version 4.5 패키지에 포함되어 있다 (Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010). 2016년 DSSAT version 4.6이 발표되었지만 아직 요청하지 못해 본 연구에서는 version 4.5를 이용하였다. CERES-Barley를 어떤 지역에 적용하기 위해서는 그 지역에 실제 재배되고 있는 품종의 성장 및 발육 관련 유전적 특성을 모형에 반영시켜야 한다. 즉 작물의 발육 및 성장의 주요특성을 몇 개의 모수 (parameters 혹은 coefficients)로 표현하고 각 품종별로 서로 다른 값을 부여하는 것이다. 즉, 작물의 생육을 모의하기 위해서는 각 품종의 모수값을 정확하게 추정하는 일이 전제되어야 한다.

2.2.2.1 생육단계 (Growth stage)

CERES-Barley에서는 발아 이후 보리의 일생을 일장감응개시 (end of Juvenile), 유수분화기 (panicle initiation), 엽생장정지기 (end of vegetation), 이삭생장정지기 (end of ear growth and anthesis) 및 양분저장완료기 (phonological maturity)

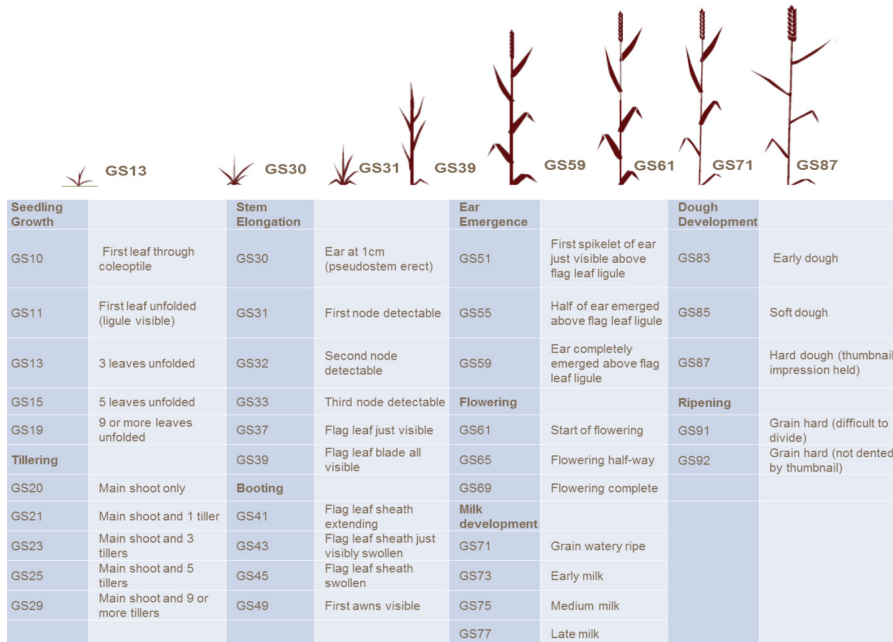


그림 5 보리의 생장발육단계. 이 생육단계는 Zadoks scale, Feekes와 Haun scale에 의해 정의된 발육단계 기준표를 이용하였음. 이 중에서 Zadoks scale이 가장 많이 이용되고 있음
(자료출처: <http://yara.co.uk/crop-nutrition/crops/barley/key-facts/growth-and-development/>)

등 5개의 주요 생육단계로 구분되어 있다. 그림 5는 보리의 일반적인 생육단계에 작물모형에서의 발육단계를 결합시켜 표현한 것이다. 발육단계 3과 4 사이에 출수일 (anthesis)가 있다. 표 7는 CERES-Barley에서 표현한 보리의 생육단계 구분이다. 각각의 단계에 도달하는데 필요한 thermal time (누적 GDD)를 P1부터 G3까지의 생육모수로 나타나게 된다 (표 7).

표 7 CERES-Barley에서 정의된 보리의 생장발육단계

Stage number of CERES-barley	Growth stages
7	Sowing
8	Germination
9	Emergence
1, 2	Maximum Primordia, End of Vegetation
3	End ear growth
4	Beginning grain fill
5	End grain fill = Maturity
6	Harvest

2.2.2.2 유전정보

표 8는 CERES-Barley의 모형을 구동하기 위해 필요한 보리 유전정보이다. P1V는 발아 (emergence) 후 일정하게 저온기간을 경과해야만 다음 단계로 생육이 진행되는 것을 나타낸다. 반면, P1D 전체 생육기간을 통해 일장 (photoperiod 혹은 day length)의 영향을 받는 유일한 시기이다. P5는 전 단계에 미리 준비된 비어있는 영화 (곡립) 속으로 광합성 산물이 들어와 저장 양분으로 채워주는 소위 등숙기간으로서 400에서 600도일 정도의 비교적 균일한 값을 갖는다. 모형에서는 종자의 생장발육과 잠재 생산력 (yield potential)의 관계를 3개의 모수로 표현하고 있는데, 출수기 때 초장(whole canopy)에 대한 최대 영화수를 G1으로, 한 개의 영화 (spikelet 혹은 panicle, kernel)가 하루에 양분을 저장하여 자란 무게로 G2, 스트레스가 없는 상태의 최대분열 능력을 G3로 나타냈다. 마지막으로 PHINT는 하루 동안 잎의 출현 속도를 온도시간 (GDD)으로 나타낸 것으로 한 개의 잎 (leaf tip)이 나오는데 걸리는 시간을 온도로 표현한 것이다.

모형에서 품종의 유전정보에 의한 작물의 생장과정을 간단하게 설명하면, 매일 매일의 식물 생장량은 광 이용과 관련된 유전모수를 이용하여 매일의 광합성량을 건물중으로 변환하여 계산되는데, 이 때 군락 내 광이용은 군락 밀도와 엽면적지수의 함수로 표현된다. 따라서 광 이용과 관련한 유전모수는 식물 생장량 예측에 중요한 영향을 미친다. 또한 모형에서 잠재 영화수 (potential kernel number)는 보정된 품종의 유전정보에 의해서 결정되는데, 특히 출수 후 생리적 성숙까지 광합성율과 수분, 질소 및 고온 스트레스 정보에 의해 결정된다. 즉, 모형에서 등숙기간이 시작되면 잠재 영화수는 입력된 품종의 유전모수에 의해 매일 매일의 생장량 (growth rate)을 계산하고 또한 영화 생장율 (potential kernel growth rate, $\text{mg/kernel} \cdot \text{day}^{-1}$)을 계산하게 된다. 이 때, 영화의 생장율이 어느 특정일 동안 임계값보다 낮으면 영화의 생장이 멈추게 된다 (Jones and Kiniry, 1986; Ritchie and Otter, 1985; Ritchie et al., 1998).

표 8 CERES-Barley의 구동을 위해 필요한 보리 품종의 유전정보

Parameters	Descriptions
P1D	Photoperiod sensitivity coefficient (% reduction/h near threshold): Photoperiod response (% reduction in rate/10h drop in pp)
P1V	Vernalization sensitivity coefficient (%/d of unfulfilled vernalization): Days, optimum vernalizing temperature, required for vernalization
P5	Thermal time from the onset of linear fill to maturity (°C/day): Grain filling (excluding lag) phase duration (°C/day)
G1	Kernel number per unit stem + spike weight at anthesis (#/g): Kernel number per unit canopy weight at anthesis (#/g)
G2	Potential kernel growth rate (mg/kernel·day ⁻¹): Standard kernel size under optimum conditions (mg)
G3	Tiller death coefficient. Standard stem + spike weight when elongation ceases (g): Standard, non-stressed mature tiller wt (incl grain) (g dwt)
PHINT	Thermal time between the appearance of leaf tips (°C/day): Interval between successive leaf tip appearances (°C/day)

2.2.2.3 국내 보리 품종의 유전정보

DSSAT에는 국제적으로 알려진 품종들에 대해서는 유전모수가 이미 내장되어 있지만, 국내에서 육성되어 널리 재배되는 품종들에 대해서는 정보가 거의 없으므로 사용자가 자체적으로 유전모수를 추정해야 한다.

현재 공시품종은 올보리, 알보리, 새쌀보리 및 삼도보리인데, 본 연구에서는 2012년에 수행된 겉보리의 품종모수의 결과 (Kim et al., 2012)를 적용하였다. 이 연구에서 품종모수는 농촌진흥청에서 매년 실시하고 있는 ‘작황조사시험’ 자료를 토대로 DSSAT 패키지의 내장 프로그램인 GenCalc를 이용하여 추정되었다. 수집된 작황조사 및 지역적응시험 자료 가운데 1997년 이전 자료 (품종별 최단 10년 이상)는 모수 추정에 사용하고, 모수 추정에 사용하지 않은 1997-2002년 자료는 검증에 활용하였다고 하였다. 모수추정 과정은 두 개의 단계로 설명될 수 있다. 먼저 생물계절과 관련된 Phenology 부분을 추정하여 P1, P1D, P1V를 결정한 다음, 생장과 수량구성요소 관련 정보를 담고 있는 Grain filling 부분 (G1, G2, G3 등)를 조정한다 (표 9). 도출된 품종별 유전모수에 의해 해당 모형을 구동하고 모의결과를 실측자료와 비교한

표 9 CERES-Barely 구동을 위해 본 연구에서 이용한 보리 품종 유전정보 (자료출처: Kim et al., 2012)

Cultivar	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PHINT
Albori	17	15	468	27	34	1.3	75
Saesalbori	16	23	492	45	54	1.3	75
Samdobori	14	34	528	56	20	1.3	75

결과, 수량은 6년간 실측자료의 경년변동을 잘 표현하였고 발육단계 추정오차 (root mean square error)는 평균적으로 출수기 3.8일, 성숙기 2.3일로 나타나 미래 기후변화 시나리오 전망에 따른 보리 생육 및 수량 변화 추정에 큰 무리가 없다고 판단하였다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 Kim et al. (2012)에서 추정한 모수를 사용하였다 (표 9).

2.2.3 모형 구동을 위한 입력자료 생산

2.2.3.1 주요 재배지역의 과거 관측 기후자료

앞 절 (2.1.7)에 언급한 바와 같이 보리 주요 재배지역 시군 중에서 기상청 표준기상관측소 (ASOS, Automatic Synoptic Observation Station)가 포함된 시군은 24개 시군 중에서 12개였고, 여기에 농촌진흥청 국립식량과학원의 작황 및 지역적응시험장과 일치하는 시군은 12개 중에서도 6개 시군뿐이었다 (표 10). 6개 기상청 표준기상관측소로부터 과거기간 1976-2005년 동안의 일 최고 및 최저기온, 강수량, 일사량을 수집하였다. 수집된 기상자료는 CERES-Barely 모형구동을 위한 기상 파일 포맷 (.WTH)으로 변경하였다 (그림 6).

표 10 6개 기상관측소와 수집된 기상요소 및 기간

Weather station		Weather variables	Period
Name	Number		
Jinju	ID192	Daily maximum temperature, daily minimum temperature, daily solar radiation, daily total precipitation	1976-2011
Miryang	ID288		
Jeonju	ID146		
Jeongeup	ID245		
Jangheung	ID260		
Yeongdeok	ID277		

*WEATHER DATA : JINJ												
@ INSI	LAT	LONG	ELEV	TAV	AMP	REFHT	WINDHT					
JINJ	35.164	128.040	29	13.4	13.1	-99.0	-99.0					
@DATE	SRAD	TMAX	TMIN	RAIN	DEWP	WIND	PAR	EVAP	RHUM			
73001	1.1	3.0	-2.3	0.7								
73002	7.6	2.8	-5.1	0.0								
73003	8.8	1.6	-6.7	0.0								
73004	6.9	6.4	-6.4	0.0								
73005	4.6	5.8	-2.5	0.0								
73006	3.2	6.6	-3.4	6.0								
73007	2.4	8.0	0.2	20.6								
73008	6.5	7.8	-1.2	0.0								
73009	7.8	8.5	-3.7	0.0								
73010	8.6	6.8	-2.4	0.0								
73011	9.9	5.1	-3.7	0.0								
73012	9.0	6.5	-5.8	0.0								

그림 6 CERES-Barley의 입력 기상파일 (.WTH)

2.2.3.2 주요 재배지역의 토양 입력자료

CERES-Barley 구동을 위한 토양 정보 (약 35개 변수)와 파종 전 토양의 초기상태, 예를 들면 토층별 토양수분과 질산 (NO_3) 및 암모니움 (NH_4) 함량 상태를 입력해야 한다 (그림 7과 그림 8). 그러나 이렇게 많은 토양정보를 모두 수집할 수는 없는 것이 현실이다. 그러나 본 연구에서는 최대한 많은 자료를 수집하려고 노력하였다. 한국수자원공사에서 제공하는 수치 토양분류도 (digital soil map)와 국립농업과학원에서 구축한 정밀토양도 (<http://soil.rda.go.kr>)를 수집하였다. 토양 분류도에서 6개 시군을 중첩하여 6개 시군의 대표 토성 (soil texture) 정보를 추출하였으며 (그림 9), 모형 구동을 위한 세부적인 토양 정보, 예를 들면, 수리전도도 (hydraulic conductivity), 토양의 건조중량 (bulk density), 모래 및 점토 함량 (clay or silt content) 등은 정밀토양도에서 입수하여 모형구동에 맞는 토양 파일 포맷 (.SOL)으로 전환하였다 (그림 7). 표 11은 정밀토양도에서 추출한 각 대표 토성에 따른 토층별 (작토층) 세부적인 토양 정보이다.

표 11 CERES-Barley의 토양정보를 생성하기 위해 정밀토양도의 토양속성에서 추출한 대표 토성 및 토층(작토층)별 세부적인 토양정보

Soil variables name	Description	Unit
Soil Texture		-
SLB	Depth, base of layer	cm
SALB	Albedo	-
SBDM	Bulk density	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
SSKS	Sat. hydraulic conductivity	$\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$
SLOC	Organic carbon	%
SLSI	Silt (0.05 to 0.002mm)	%

*SOIL

*CUPD392300 NASTI SICLL 120 SILTY CLAY LOAM

@SITE COUNTRY LAT LONG SCS FAMILY

MIRYANG KOREA 35.49 128.74 RS

@SCOM SALB SLU1 SLDR SLRO SLNF SLPF SMHB SMPX SMKE

-99 0.01 2.0 0.65 70.0 1.00 1.00 SA009 -99 -99

@SLB SLMH SLLL SDUL SSAT SRGF SSKS SBDM SLOC SLCL SLSI SLCF SLNI SLHW SLHB SCEC

12 -99 .15 .33 .38 1.000 70.00 1.4 0.88 5.7 17.6 0.0 0.13 6.1 -99 10.5

120 -99 .07 .33 .38 1.000 21.00 1.8 0.35 4.2 10.6 0.0 0.13 6.1 -99 10.5

*CUPD492310 NASTI SALO 120 SANDY LOAM

@SITE COUNTRY LAT LONG SCS FAMILY

JINJU KOREA 35.16 128.04 NAGDONG

@SCOM SALB SLU1 SLDR SLRO SLNF SLPF SMHB SMPX SMKE

-99 0.20 2.0 0.65 70.0 1.00 1.00 SA009 -99 -99

@SLB SLMH SLLL SDUL SSAT SRGF SSKS SBDM SLOC SLCL SLSI SLCF SLNI SLHW SLHB SCEC

12 -99 .07 .33 .38 1.000 6.50 1.6 0.51 5.7 17.6 0.0 0.13 6.1 -99 10.5

120 -99 .06 .33 .38 1.000 5.70 1.7 0.02 4.2 10.6 0.0 0.13 6.1 -99 10.5

그림 7 CERES-Barley의 입력 토양파일 (.SOL)

*INITIAL CONDITIONS

@C PCR IC DAT ICRT ICND ICN ICRE ICWD ICRES ICREN ICREP ICRIPI ICRIID ICNAME

1 SB 03136 -99 -99 1 1 -99 0 0 0 100 15 -99

@C ICBL SH20 SNH4 SN03

1 12 .18 3 10

1 20 .18 2.8 8

1 35 .19 2.6 4

1 48 24 2.4 2

그림 8 CERES-Barley 구동에 필요한 실험설계파일 (.BAX)에서 토양의 초기상태와 관련된 정보

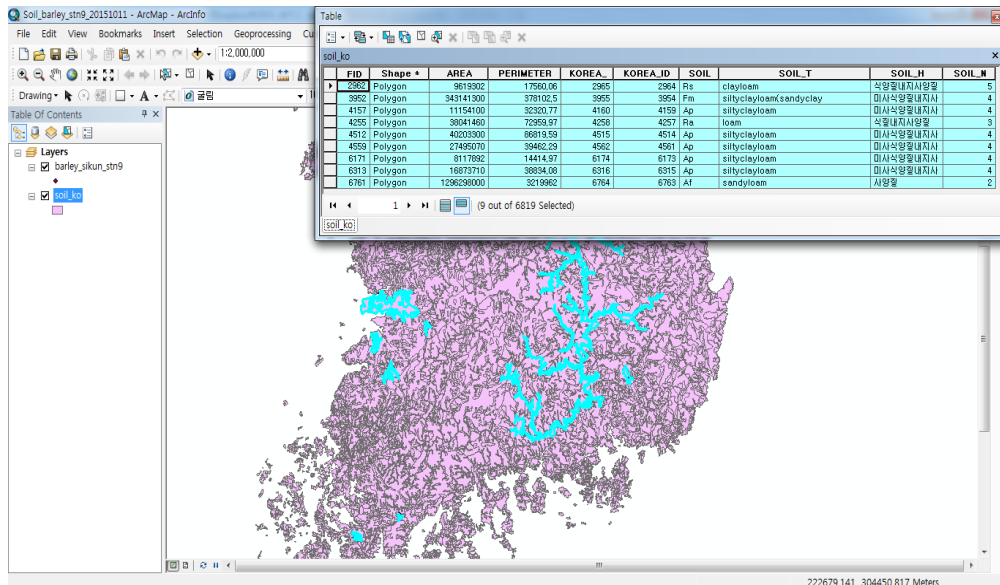


그림 9 정밀토양도와 그 속성파일에서 6지점의 속성정보 (국립농업환경과학원의 Soil Atlas)

2.2.3.3 기타 입력자료

모형 구동을 위해서 앞서 언급한 기상, 토양자료 이외에 파종일, 파종 깊이, 파종량, 휴폭, 시비정보 혹은 관개정보 등과 같은 재배방식에 대한 정보들이 입력된다. 이 중 중요한 정보는 파종일, 파종 깊이, 파종량, 휴폭 등이다 (그림 10). 엄밀하게 보면 재배방식은 지역뿐만 아니라 작물이 재배되는 개개의 농가포장 별로 각기 다를 수 있지만 이들 모두를 생육모의에 반영하기는 사실상 불가능하다. 그래서 각 도별 농업기술원에서 제시한 표준재배법을 바탕으로 파종, 이앙, 시비, 물관리 양식을 실험설계에 반영하였다. 파종일의 경우, 작황 및 지역적응 시험장의 맥류 파종일은 10월 25일로 관행상 고정되어 있다 (국립식량과학원). 그래서 본 연구에서 6개 지역에서의 파종일을 10월 25일로 고정하여 CERES-Barley 구동파일 중 하나인 실험설계 파일 (File X: .BAX)에 입력하여 구동하였다.

*PLANTING DETAILS														
@P	PD	ED	PP	PPO	PL	PLD	PLR	PLRD	PLDP	PLWT	PAGE	PENV	PLPH	SPRL
1	03141	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
2	04145	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
3	05145	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
4	06145	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
5	07143	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
6	08147	-99	22	22	S	R	15	0	4	-99	-99	-99	-99	-99
*FERTILIZERS (INORGANIC)														
@F	FD	FM	FACD	FDEP	FAMN	FAMP	FAMK	FAMC	FAMO	FOCD	FERNAME			
1	03141	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			
2	04146	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			
3	05145	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			
4	06145	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			
5	07143	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			
6	08148	FE003	AP001	5	30	30	30	-99	-99	-99	-99			

그림 10 CERES-Barley의 구동을 위한 실험설계파일 (.BAX)

2.2.4 과거 관측기간에 대한 모형 구동

보리 유전정보는 Kim et al. (2012)의 값을 수정 없이 입력하였다 (표 9). CERES-Barley 입력자료를 생성하기 위해서는 입력파일 이름 및 포맷 등에 대한 일련의 파일 규칙이 있다. 그래서 본 연구에서도 파일 포맷 및 규칙에 따라 나름대로 프로토콜 및 규칙을 설정하고 앞 절 (2.2.1.1과 2.2.1.2)에서 설명한 바와 같이 6개 지역의 기상 (.WTH), 토양 (.SOL) 및 실험설계파일 (.BAX)을 생성하였다 (표 12). 준비된 파일을 CERES-Barley 모형에 입력하여 과거 기상 관측기간과 겉보리의 생육자료 관측기간이 일치하는 기간이 1979년 10월 25일부터 2010년 12월 31일까지 모의하였다. 겉보리의 수확은 이듬해인 1980년이기 때문에 모의된 결과는 1980년부터 출력된다.

표 12 CERES-Barley 구동을 위해 필요한 최소한의 입력파일 (실험설계파일, 기상파일, 토양파일)

Experiment file name	Weather file name (ASOS station name)	Soil file name
CUAB.BAX	MIRY7311.WTH (Miryang)	AU.SOL
	JEON8611.WTH (Jeonju)	
	GSAN7311.WTH (Gunsan)	
	JINJ7311.WTH (Jinju)	
	JEUP7311.WTH (Jeongeup)	
	BUAN7311.WTH (Buan)	
	YDEK7311.WTH (Yeongdeok)	
	HAEN7311.WTH (Haenam)	
	JHUG7311.WTH (Jangheung)	

2.2.5 기후변화 시나리오 전망

본 연구에서는 선 연구 (Chung et al., 2015)에서 이용한 기후변화 시나리오 전망 자료와 동일한 자료를 이용하였다. 이 자료는 IPCC 제5차 평가보고서 (Fifth Assessment Report, AR5)에서 사용한 온실가스 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)에 따른 신 시나리오 자료로써 CMIP5 (the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project)를 통해서 제공받았으며, 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있는 분위사상법 (Quantile Mapping)에 의해 상세화 되었다 (Gudmundsson, 2012; Park et al., 2012). 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 (표 13). 12.5km 격자 해상도를 가진 이 기후변화 시나리오 전망자료는 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 HedGEM3)에 의해 생산된 자료이다 (Lee et al., 2012). GCMs 및 RCMs의 자료기간은 과거기간 (historic periods)의 경우 1976년부터 2010년까지이고, 미래기간 (future periods)은 2011~2040년이다. 다만, 12.5km 지역규모기후모델의 자료기간은 1979년부터 2010년까지이다.

표 13 본 연구에서 사용한 9개 개별 전지구기후모델 (자료출처: Chung et al., 2015)

Model	Institute	Country	Resolutions (pixels)
12.5km	Korea Meteorological Administration	Korea	184 x 164
CansESM2	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	Institute 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

2.2.5.1 기후모형의 과거기간에 대한 모형 구동

과거 관측기간에 대한 모형 구동과 동일한 방법으로 9개 지역에 대하여 8개 GCMs 과 1개 RCMs의 과거기간 동안의 기상파일 81개 ($9 \times 9 = 81$)를 준비하였다. 9개 기후모형의 고유이름을 바탕으로 기후 입력자료의 파일을 생성하였다 (표 14). 준비과정은 간단하게 엑셀 매크로 (VBA macro)를 활용하여 생성함으로써 입력자료 생산에 드는 시간을 절약하였다. 모형 구동 기간은 과거 관측기간에 대한 결과와 비교하기 위하여 과거 관측기간의 모형 구동 기간 (1979년 10월 25일부터 2010년 12월 31일)과 동일하게 설정하였으며 재배환경과 관련된 실험설계 정보도 과거 관측기간에 대한 모형 구동 (2.2.4 절)과 동일하게 입력하였다. 모의된 결과도 과거 관측기간에 대한 모형 구동과 마찬가지로 1980년부터 출력된다. 토양 환경은 변하지 않는다는 가정하에서 구동하였다.

표 14 CERES-Barley 입력 기상파일 생성을 위한 미래 기후변화 시나리오 전망자료의 기상파일 이름의 규칙

	Name	Initial code for weather file name
Scenario	Historical	H
	RCP4.5	R
	RCP8.5	P
Model	CanESM2	C
	GFDL-ESM2G	G
	GFDL-ESM2M	M
	HadGEM2-CC	H
	INM-CM4	I
	IPSL-CM5A-LR	L
	MIROC-ESM	O
	MIROC-ESM-CHEM	E
	12.5km	K

2.2.5.2 기후모형의 미래 기후변화 시나리오 전망에 대한 모형 구동

미래 기후변화 시나리오 전망에 대한 모형 구동의 경우, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 이산화탄소 농도 변화 정보를 모형에 입력해야 한다. 이 정보는 실험설계 파일의 재배환경정보 혹은 DSSAT 4.6 package의 CO2045.WDA 파일에 적용하여 구동할 수 있다. 본 연구에서는 실험설계 파일의 재배환경 정보에 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 이산화탄소 농도 변화를 입력하여 모형을 구동하였다. GCMs와 RCMs의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오의 미래 기간 2011~2040년까지 6개 지역에 대하여 162개 ($9 \times 9 \times 2 = 162$)의 기후 입력 자료를 생성하였다. 모형 구동 기간은 2011년 10월 25일부터 2040년 12월 31일까지 모의하였으므로 모의된 결과는 2012년부터 출력된다. 재배환경정보 (예, 파종일, 시비)도 과거 관측기간에 대한 모형 구동과 동일하게 입력하였으며, 토양 조건도 변하지 않는다는 가정하에서 AU.SOL 파일을 그대로 이용하였다.

2.2.6 모형 출력 정보

CERES-Barley 모형을 구동 후 출력되는 정보, 예를 들어 모형의 작물재배 상태에서 일별 증발산량 변화 (예, ET.OUT), 일별 토양 유기물의 변화 (예, SoilOrg.OUT), 온도 혹은 일장 변화에 따른 작물 생육단계별 생장량 (예, PlantGro.OUT) 등 대략 60 여개 정도의 대표 정보가 출력되며, 해당 대표 정보들에 해당되는 변수 (예, 출수일, 성숙일, 잠재 수량, 일별 증발산량 등) 만 대략 500여개에 이른다. 물론 모형 구동 전에 원하는 대표 정보만을 출력할 수 있게 조절이 가능하다. 이렇게 많은 모든 출력 정보를 관측자료와 비교하는 것은 현실적으로 어렵다. 출력된 정보 중에서 수량 구성요소에 영향을 미치며 중요한 생물계절지표가 되는 출수일 (anthesis day), 생리적 성숙일 (physiological maturity day), 수량 (yield at maturity), 수수 (number at maturity) 등을 출력하고 모형에서 출력된 생육단계별 값들을 관측 생육자료와 비교하였다.

2.3 다년생 과수작물의 개화일 예측

2.3.1 다년생 과수작물의 개화일 추정을 위한 생물계절모형

2.3.1.1 발육속도모형

과수 개화기를 예측하는 방법으로는 봄철 적산온도를 독립변수로 둔 회귀모형이 가장 널리 쓰이는데 배 품종 신고 (Pyrus pirifolia Nakai)의 경우 2월 하순부터 5°C 이상의 일 평균기온을 이용한 개화기와 만개기 예측식이 제시된 바 있다 (Jang et al., 2002). 국립농업환경과학원 (1990)에서는 매일의 발육속도 (DVR; development rate)를 기온에 대한 함수로써 개화일까지의 기온반응식으로 수치화하고 미리 설정된 발육단계 (DVS; development stage)에 도달하면 개화에 이른다는 개념이다. 이와 같은 기온반응식을 사과, 배, 복숭아, 포도 등 우리나라 주요 과수에 대하여 개발하여 개화기 예측에 이용해 왔다. 자세한 설명은 Kwon et al. (2012)과 Yun et al. (2011)을 참고하면 된다. 표 15는 주요 과수에 대한 발육속도모형 기반의 기온반응식과 그 반응식의 계산에 필요한 모수 (parameters)이다.

2.3.1.2 휴면시계모형

앞 절 (2.3.1.1)에서 언급한 것과 같이 경험적인 방법으로 획득한 발육속도에 대한 반응이 임계값에 도달하면 개화에 이른다는 개화기 예측방법은 봄철 기온의 영향만을 적용한 것으로서 겨울기온 경과에 따른 꽃눈의 휴면상태와 발아기 변동이 개화시기에 미치는 영향을 반영할 수 없다. 온대낙엽과수는 늦여름에서 가을에 걸쳐 생장을 멈추고 휴면단계에 진입하여 겨울철 불리한 환경조건하에서 생존할 수 있는 휴면상태로 변화하는데 대체로 여름철 가지의 생장이 멈추고 끝 눈이 형성되는 시기에 시작된다. 휴면은 기온과 수분, 일장 등의 환경요인과 식물 호르몬과 관계되고 일장보다는 온도, 즉 기준온도(7°C 이하)와 밀접한 관련이 있으며 식물의 단기 내동성과도 연관되어 있다 (Faust, 1989; Kwon et al., 2006; 오 등, 2004). 또한 오 등 (2004)는 꽃눈의 휴면을 세 단계로 구분할 수 있다고 하였다. 첫 번째는 생육기간 중 식물체의 다른 부위와의 상관적 억제작용으로 인해 발아하지 못하는 상태인 외재휴면 또는 상관휴면이 있다. 늦여름부터 가을에 걸쳐 시작되는 내생휴면 또는 자발휴면, 내재휴면이라고 불리는 두 번째 시기에서는 저온요구도 (chilling requirement)가 충족되는 과정이며 내생휴면이 완료된 이후 적절한 외부 환경에 노출되어야 발아가 일어날 수 있다. 세 번째 단계에서는 내생휴면이 타파된 눈이 부적합한 외부환경에 의해 발아가 억제되어 휴면이 지속되는 것으로 환경휴면 또는 타발휴면, 강제휴면기라고 하였다. Kwon et al. (2005)은 포도 품종 Campbell Early와 Kyoho의 내생휴면타파를 위한 저온요구도를 정량화한 바 있으며 Kim et al. (2012)과 Kwon et al. (2012)은 각각 배 품종 신고 (*Pyrus pirifolia* Nakai)와 키위 품종 헤이워드 (Hayward)에 대하여 내생휴면타파를 위한 저온요구도뿐만 아니라 개화를 위한 고온요구도를 정량화한 바 있다. 또한, Jung et al. (2005)은 1955년부터 2004년까지 남한 전역 기상관서의 생물계절 관측자료 (예, 벚꽃 개화일)로부터 휴면시계모형에 근거한 벚꽃 개화모형의 신뢰성을 검증한 바 있다. 이 모형에 대한 자세한 설명은 Kim et al. (2009), Kim J. H. (2012)과 Kim S. O. (2012)를 참고하면 된다. 표 16은 주요 과수의 개화일 예측을 위해 개발된 휴면시계모형의 모수이다.

표 15 주요 과수의 개화시기 예측을 위해 개발된 발육속도모형의 기온 반응식과 그 반응식의 계산에 필요한 모수 (자료출처: 국립농업환경과학원, 1990)

Fruit crop	Cultivar	Growth development ratio	Growth development stage
Apple	Fuji	$\left\{ \frac{1}{95.6 - 4.5t} \right\} \times 100$	$DVS = \sum_{i=1}^n DVR_i$
Pear	Niitaka	$\left\{ \frac{1}{131.1 - 4.1t} \right\} \times 100$	
Grape	Campbell-early	$\left\{ \frac{1}{73.6 - 3.8t} \right\} \times 100$	
Peach	Kwatta	$\left\{ \frac{1}{107.94 - 0.9t} \right\} \times 100$	

t : base temperature ($t \rightarrow 5^{\circ}\text{C}$)

i : day

표 16 주요 과수의 개화시기 예측을 위해 개발된 휴면시계모형의 모수

Fruit crop	Cultivar	Parameters			References
		T_c	C_r	H_r	
Apple	Fuji	6.1	-100.5	275.1	Jung et al. (2004)
Pear	Nikitta	8.0	-155.0	577.0	Kim, Soo-ok (2009)
Grape	Campbell-early	5.7	-108.0	234.5	Kwon, Eun-young (2006)
Peach	Kwatta	5.4	-86.4	231.3	Kim, Jin-hee (2010)

T_c : base temperature

C_r : Chill requirement: chill-unit

H_r : Heat requirement: heat-unit

2.3.2 주요 과수의 개화일 예측

2.3.2.1 주요 과수 재배지역의 개화일 관측자료와 기상자료

식량작물에 대한 지역적응 및 작황시험과 같이 국립특작원예과학원과 각 도 농업기술원에서는 주요 과수에 대하여 품종 육종 및 지역적응 시험이 수행되고 있다. 또한 개화일에서부터 과수의 품질 (예, 당도, 과형 등) 및 생산성에 관련한 항목들을 조사하고 있다. 본 연구에서는 국립특작원예과학원의 시험포장에서 수집된 주요 과수의 관측 개화일을 1990년에서 2010년까지 획득하였다. 개화일 예측을 위해 기상자료 수집이 필요한데, 국립특작원예과학원 시험포장의 인근 기상청 표준기상관측소의 기상자료를 수집하였다. 수집된 기상요소는 일 최고 및 최저기온이다. 그림 11에서 그림 13은 본 연구에서 개화일 예측 연구에 적용된 사과, 배, 포도의 주요 재배지역들로서, 본 연구에서 수집된 기상자료의 기상관측지점과 사과, 배, 포도의 개화일이 수집된 시험포장이 일치하는 시군이기도 하다. 복숭아의 경우는 수원 국립특작원예과학원 시험포장의 복숭아 개화일만 수집되었기 때문에 전국의 주요 복숭아 재배지역에 적용할 수가 없었다.

2.3.2.2 개화시기 예측 모형 기반 주요 과수의 과거 관측기간에 대한 개화일 예측 및 모형 예측성 검증

발육속도모형과 휴면시계모형을 R studio (<https://www.rstudio.com>)을 이용하여 개화일을 용이하게 계산할 수 있는 계산기를 작성하였다. 선 연구사례에서 이미 두 모형의 예측성에 대한 검증이 확인되었지만, 이들 지역에서의 검증 사례는 없기 때문에 미래 기후변화에 대한 대상 과수들의 개화일을 예측하기 전에 이들 지역에서의 모형 검증이 필요하였다. 따라서 본 연구에서 선정된 주요 재배지역의 과거 관측기간 동안 개화일을 계산하고 각 시험장에서 수집된 관측 개화일과 비교하고 RMSE (root mean square error)을 계산하여 모형의 예측성을 검증하였다.

2.3.3 기후변화에 대한 주요 과수의 개화일 변화

2.3.3.1 미래 기후변화에 따른 주요 과수의 개화일 변화속도

미래 기후변화에 대한 주요 과수의 개화일 예측을 위한 미래 기후변화 시나리오 전망 자료는 앞서 보리 연구에 사용된 기후변화 시나리오 전망자료와 동일한 것이다. 이 자료에 대한 자세한 설명은 조재필 (2013)과 Chung et al. (2015)를 참고하면 된다. 미래 기후변화 시나리오 전망의 미래 개화일 예측 기간은 2011년부터 2040년까지 가까운 미래에 대해서만 개화기 모형을 구동하였다. 예측 지점은 56개 기상관측소에 대해서 주요 과수의 미래 개화일을 예측하였다. 또한, 과거와 비교하여 미래 기후변화 시나리오 전망의 미래 기간 동안 주요 과수의 개화일이 얼마나 늦어졌는지 혹은 얼마나 빨라졌는지를 평가하기 위해 상대적인 변화속도 식 (2)로 계산하였다.

$$Relative\ change(\%) = \frac{Range_{rcp4.5\ or\ rcp8.5}}{Range_{historical}} \quad (\text{식 } 2)$$

여기서 $Range_{rcp4.5\ or\ rcp8.5}$ 는 8개 개별 GCMs와 1개 RCMs의 RCP4.5 혹은 RCP8.5의 미래기간 동안의 기후변화 시나리오 전망자료에 의해 각각 예측된 개화일에서 가장 늦은 개화일에서 가장 빠른 개화일을 뺀 범위를 나타낸다. $Range_{historical}$ 은 8개 개별 GCMs와 1개 개별 RCMs의 과거기간 동안의 기후변화 시나리오 전망자료에 의해 예측된 개화일에서 가장 늦은 개화일에서 가장 빠른 개화일을 뺀 범위이다.

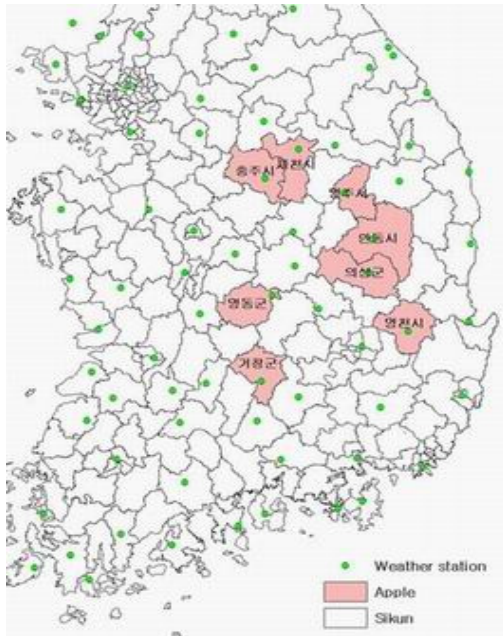


그림 11 사과 주요 재배지역 중 국립원예특작과학원 개화시기 수집 자료와 일치하는 시군

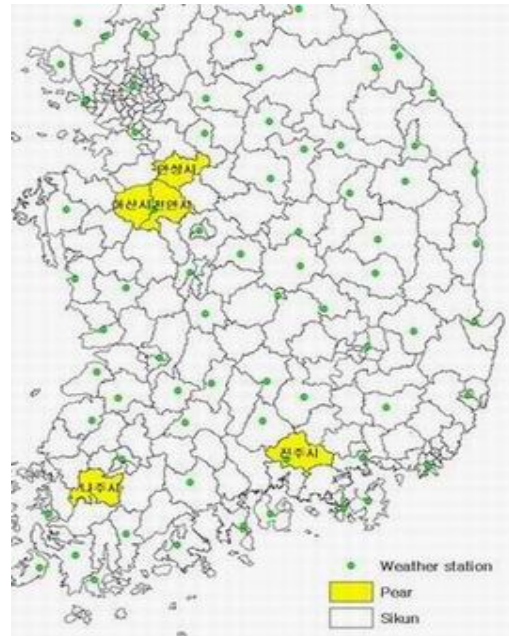


그림 12 배 주요 재배지역 중 국립원예특작과 학원 개화시기 수집 자료와 일치하는 시군

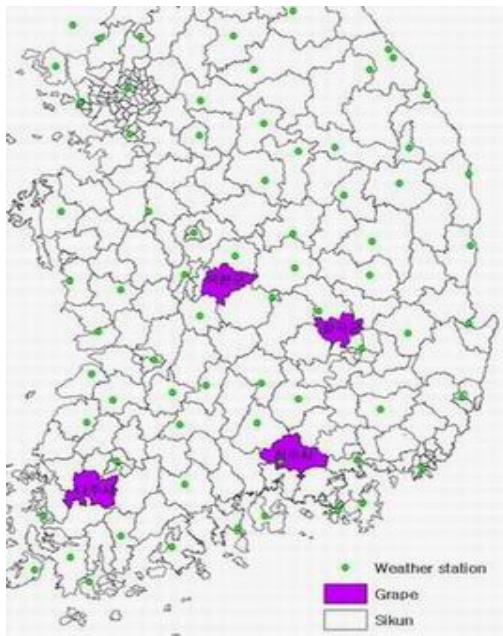


그림 13 포도 주요 재배지역 중 국립원예특작
과학원 개화시기 수집 자료와 일치하는 시군

3. 연구 결과

3.1 기후변화에 따른 출수시기와 수량구성요소의 변화

3.1.1 과거 관측생육기간 동안 출수시기와 수량구성요소의 변화

분석 대상지역 중에서 수원은 보리 주산지역이 아니지만, 수집된 국립식량과학원의 지역적응 및 작황시험장 중에서 수원은 대표적인 지역으로 작물반응 관련 자료가 풍부하다. 따라서 수원의 분석 결과를 보고서에 추가하였다.

3.1.1.1 대구 지역에서 과거 관측 기후변화에 따른 출수시기와 수량

그림 14에서 그림 16은 대구 지역에서 겉보리 품종 큰알보리의 생육기간의 전·후반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온 변화에 따른 수량 (kg/ha)과 출수시기의 상관관계를 나타낸 것이다. 생육기간 전반 동안의 일별 최고기온과 일별 최저기온 변화에 따른 출수시기의 단축 혹은 지연을 분석한 결과이다. 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.28), 일별 최저기온의 경우는 0.6 (R^2 : 0.36)으로 생육기간 전반 동안 기온이 높으면 출수시기가 단축되고 있었다 (그림 14). 또한 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온에 따른 출수시기를 분석하였는데, 일 최고기온이 상관계수 0.5 (R^2 : 0.25), 일 최저기온이 0.4 (R^2 : 0.17)로 생육기간 후반에 출수시기는 일 최저기온보다 일 최고기온에 영향을 받는 것으로 나타났다 (그림 15). 수량의 경우는 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.21), 일별 최저기온의 경우는 0.6 (R^2 : 0.36)으로 생육기간 후반 동안 일별 최저기온이 일별 최고기온보다 수량에 영향을 주는 것으로 나타났다 (그림 16). 생육기간 후반에 일별 최고기온이 출수시기에 미치는 영향 정도는 일별 최저기온보다 큰 반면, 수량에서는 일별 최저기온이 수량 변화에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예를 들면, 일별 최저기온의 범위는 8°C에서 10°C로 2°C 내외이면서 수량 변화에 미치는 범위는 1000~2000kg/ha으로 일별 최고기온이 수량 변화 (18.5°C~21.0°C, 500kg/ha)에 미치는 크기보다 큰 것으로 나타났다.

3.1.1.2 진주 지역에서 과거 관측 기후변화에 따른 출수시기와 수량

진주 지역에서는 겉보리 품종 올보리 이외에 쌀보리 품종 새쌀보리와 맥주보리 품종 진양보리를 추가적으로 분석하였다. 그림 17에서 그림 25는 진주 지역에서 이들 3개 품종의 생육기간 전·후반 동안의 일별 최고 및 최저기온변화에 따른 수량(kg/ha)과 출수시기의 상관관계를 나타낸 것이다. 올보리의 경우, 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.8 (R^2 : 0.65), 일별 최저기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.28), 생육기간 후반에는 일별 최고기온이 0.6 (R^2 : 0.35), 일별 최저기온이 0.4 (R^2 : 0.13)로 대구 지역에서 나타난 결과와 같이 일별 최고기온의 영향이 출수시기에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 17과 그림 18). 올보리의 수량의 경우는 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.25), 일별 최저기온의 경우는 0.7 (R^2 : 0.56)으로 생육

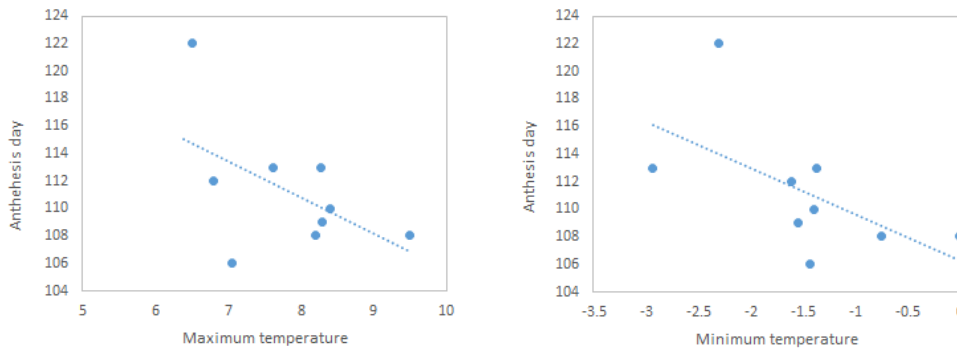


그림 14 대구 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 큰알보리 출수시기의 상관

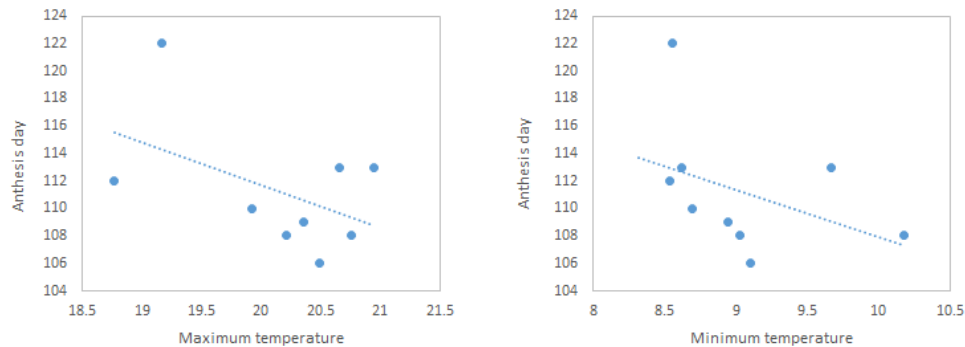


그림 15 대구 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 큰알보리 출수시기의 상관

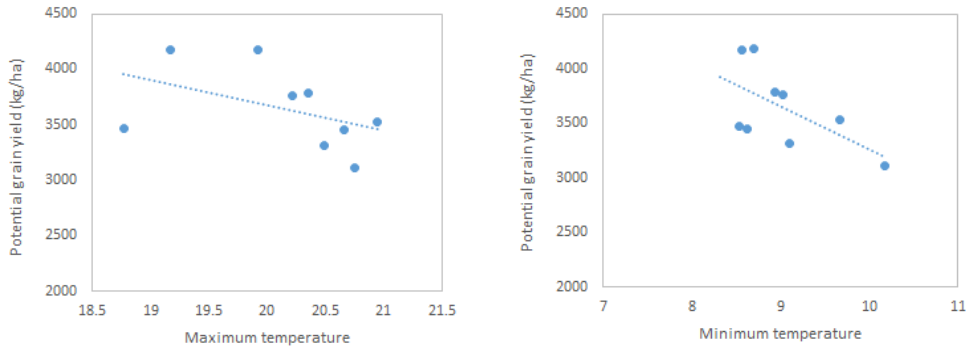


그림 16 대구 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 큰알보리 수량의 상관

기간 후반 동안에는 일별 최저기온 기온의 변화가 수량 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다 (그림 19). 새쌀보리의 출수시기의 경우, 일별 최고기온의 상관계수는 0.7 (R^2 : 0.54), 일별 최저기온의 상관계수는 0.6 (R^2 : 0.37)로 올보리와 같이 생육기간 전반 동안 일별 최고기온이 출수시기에 영향을 주는 것으로 나타났다 (그림 20). 생육기간 후반에도 새쌀보리의 출수시기에 일별 최고기온 (R^2 : 0.38)이 더 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 21). 새쌀보리의 수량의 경우, 상관계수가 각각 0.3 (R^2 : 0.10), 0.6 (R^2 : 0.31)으로 올보리와 같이 생육기간 후반의 일별 최저기온이 수량에 영향을 더 미치는 것으로 나타났다 (그림 22). 맥주보리의 출수시기의 경우, 상관계수가 0.7 (R^2 : 0.54), 0.2 (R^2 : 0.04)로 위에서 언급한 다른 두 품종의 경우와 같이 생육기간 전반 동안의 일별 최저기온보다 일별 최고기온의 변화가 출수시기 변화에 영향을 미쳤는데, 생육기간 후반에도 같은 결과를 보였다 (그림 23과 그림 24). 맥주보리의 수량의 경우는 0.5 (R^2 : 0.25), 0.7 (R^2 : 0.56)로 역시 생육기간 후반의 일별 최저기온 변화가 수량에 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 25). 진주 지역에서 3품종 모두 출수시기에 영향을 미치는 것은 생육기간 전·후반의 일별 최고기온으로 나타난 반면, 수량의 경우는 일별 최저기온이 생육기간 후반에 수량과 더 상관관계가 큰 것으로 나타났다.

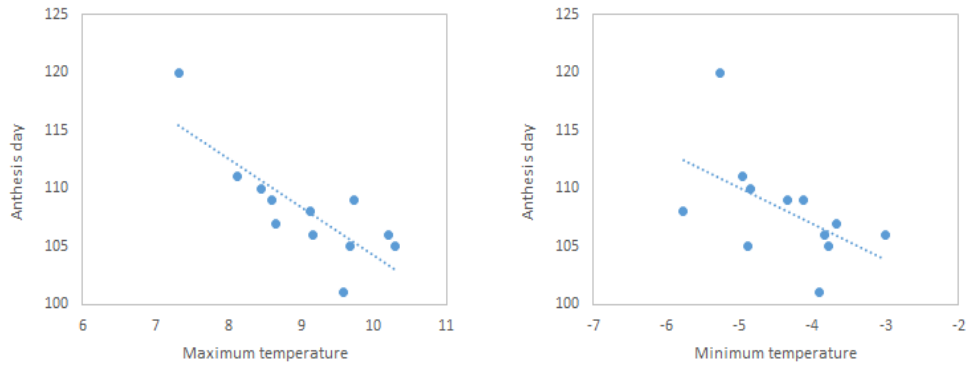


그림 17 진주 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

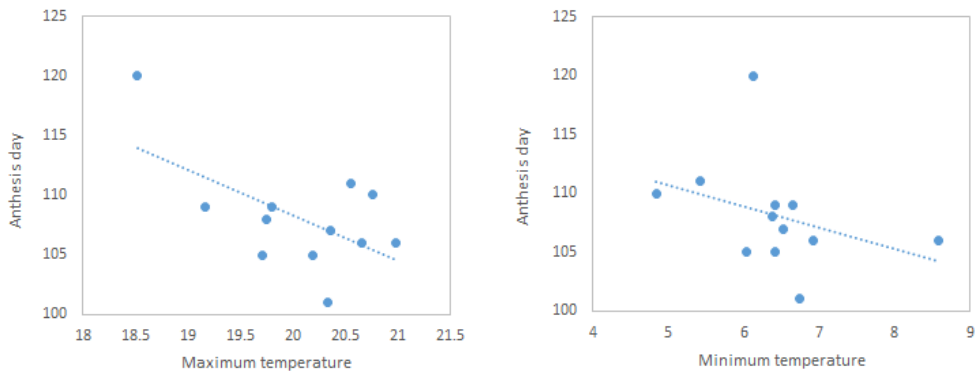


그림 18 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

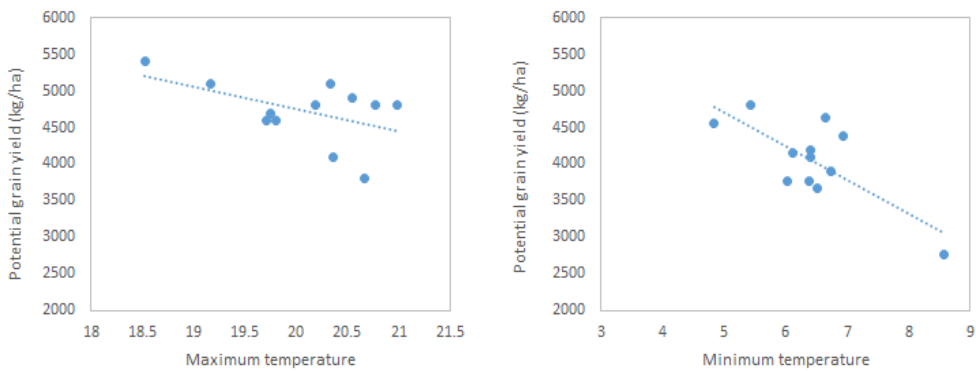


그림 19 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 수량의 상관

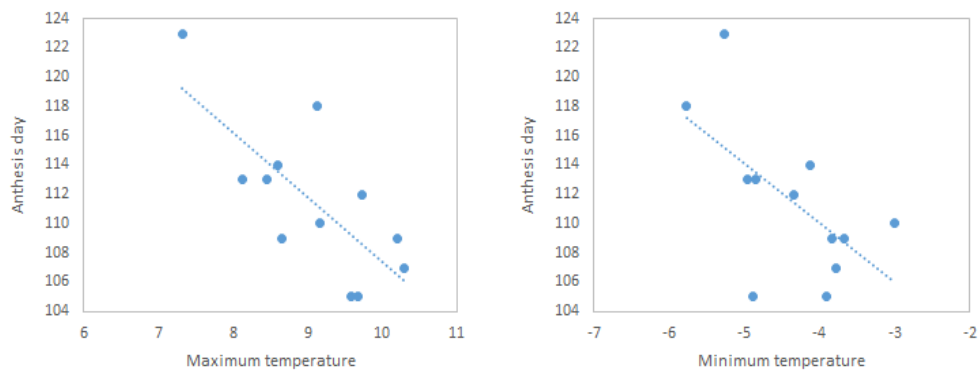


그림 20 진주 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 새싹보리 출수시기의 상관

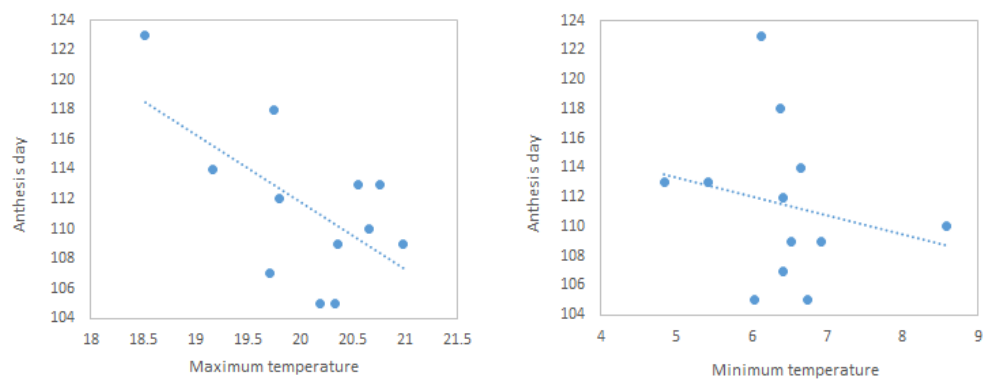


그림 21 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 새싹보리 출수시기의 상관

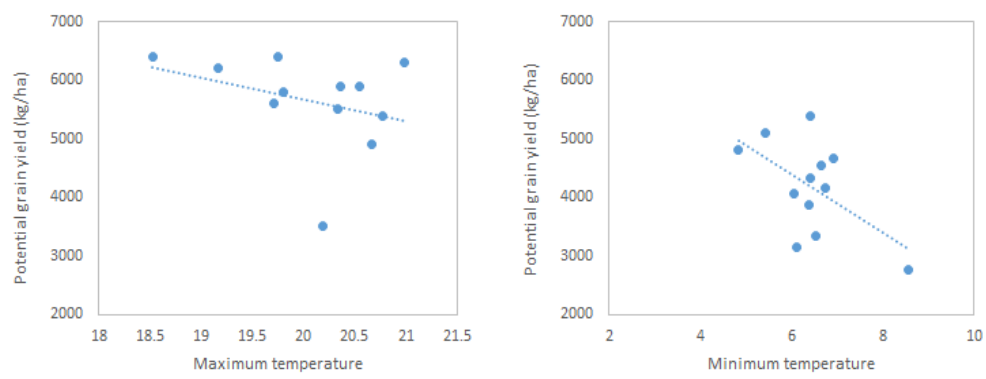


그림 22 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 새싹보리 수량의 상관

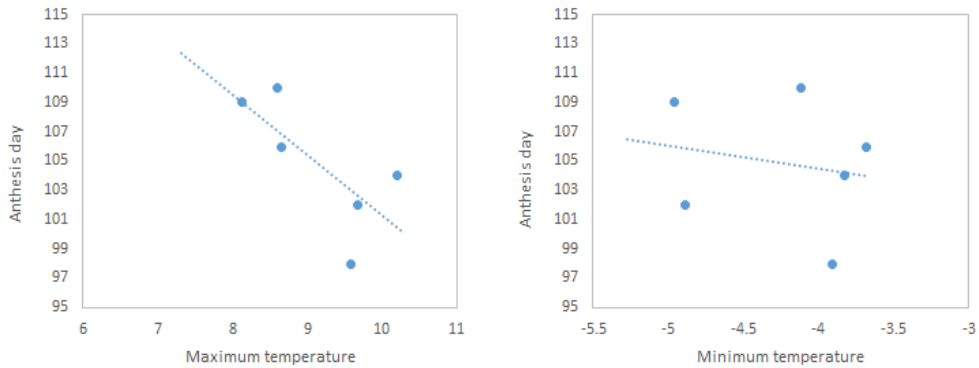


그림 23 진주 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 진양보리 출수시기의 상관

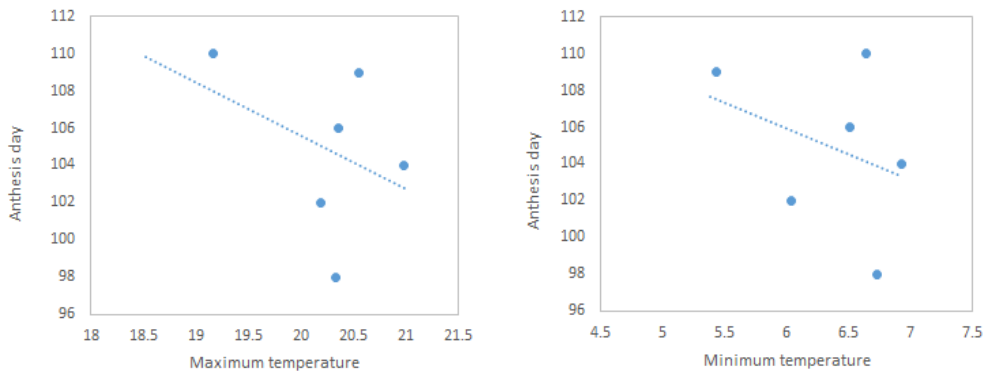


그림 24 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 진양보리 출수시기의 상관

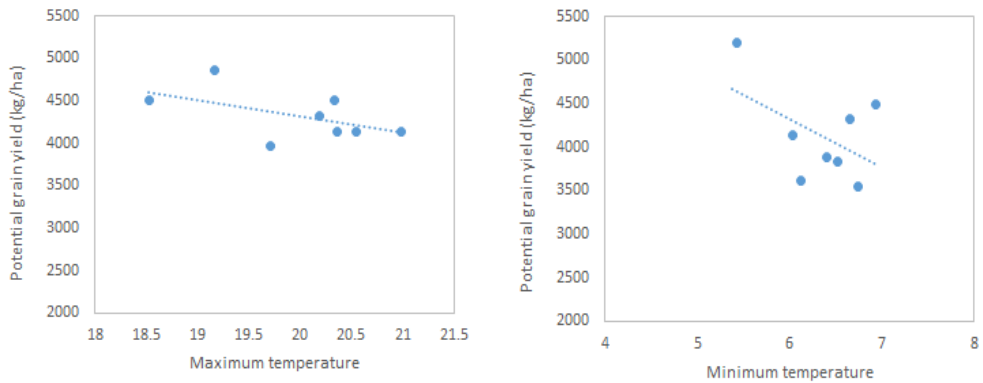


그림 25 진주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 진양보리 수량의 상관

3.1.1.3 익산 지역에서 과거 관측 기후변화에 따른 출수시기와 수량

그림 26에서 그림 31는 익산 지역에서 겉보리 품종 올보리의 생육기간의 전·후반 동안 일별 최고 및 최저기온변화에 따른 수량 (kg/ha)과 출수시기의 상관관계를 나타낸 것이다. 익산의 경우 익산시에 기상관측소가 없는 이유로 전주 기상관측소의 기후자료를 이용하여 분석하였다. 올보리의 출수시기의 경우, 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.29), 일별 최저기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.29)로 출수시기의 변화에 일별 최고기온 및 일별 최저기온의 영향이 비교적 비슷한 것으로 나타났다 (그림 26). 그러나 생육기간 후반에 일별 최고기온 (R^2 : 0.72)이 출수시기에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 27). 수량의 경우는 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.26), 일별 최저기온의 경우는 0.3 (R^2 : 0.09)이며 생육기간 후반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온의 영향이 수량에 미치는 것이 대구와 진주 지역의 경우와 다른 양상을 보였다 (그림 28). 대구와 진주 지역에서는 생육기간 후반의 일별 최고기온과 일별 최저기온이 상승할수록 수량이 감소하는 것으로 나타났는데, 익산에서는 생육기간 후반 동안 일별 최고기온이 높을수록 수량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 대구, 진주와 같이 생육기간 전·후반 동안 일별 최고기온이 출수시기와 상관성이 높은 것으로 나타났다. 전주 기상관측소의 기후자료 대신 익산이 해안지역으로부터 멀지 않은 지역에 있기 때문에 해안기후에 영향을 받고 있을 수 있다고 생각하여 기후자료를 변경해서 다시 분석하였다. 익산과 비슷하게 해안지역에 위치하면서 거리면에서도 전주와 비슷한 군산 기상관측소의 기후자료를 이용하여 분석하였다. 출수시기의 경우, 생육기간 전반 동안, 일별 최고기온의 상관계수가 0.5 (R^2 : 0.25), 일별 최저기온의 상관계수는 0.4 (R^2 : 0.17), 생육기간 후반 동안, 일별 최고기온의 상관계수는 0.8 (R^2 : 0.65), 일별 최저기온은 0.6 (R^2 : 0.33)으로 영향 크기의 차이만 있을 뿐 전주 기후자료를 이용한 결과와 비슷하였다 (그림 29와 그림 30). 수량의 경우, 일별 최고기온의 상관계수는 0.6 (R^2 : 0.33), 일별 최저기온의 상관계수는 0.6 (R^2 : 0.34)으로 앞에서 언급한 바와 같이 생육기간 후반의 일별 최고기온과 일별 최저기온이 상승할수록 수량이 감소하지 않고 증가하여 전주 기후자료를 이용하여 분석결과와 같은 결과를 보였다 (그림 31).

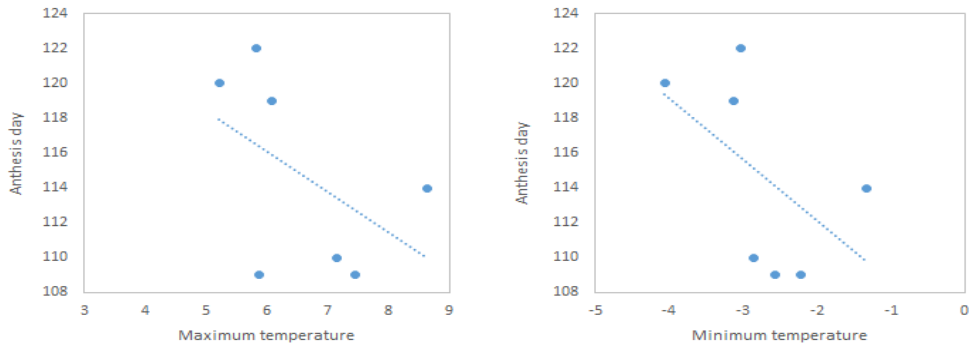


그림 26 익산 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관. 기상자료는 전주 기상관측소 자료

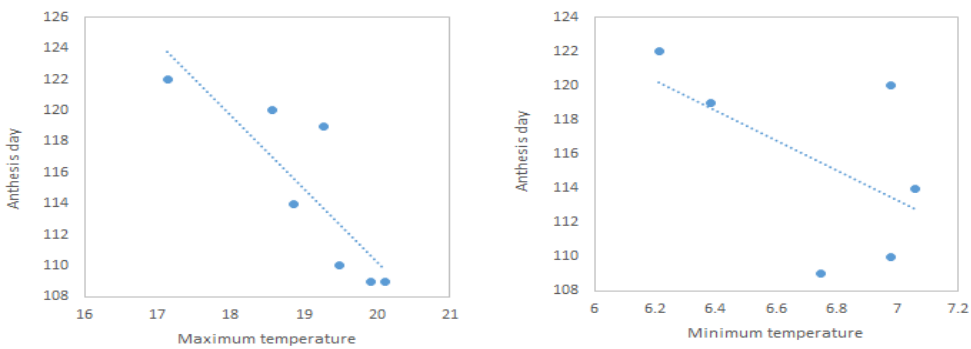


그림 27 익산 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관. 기상자료는 전주 기상관측소 자료

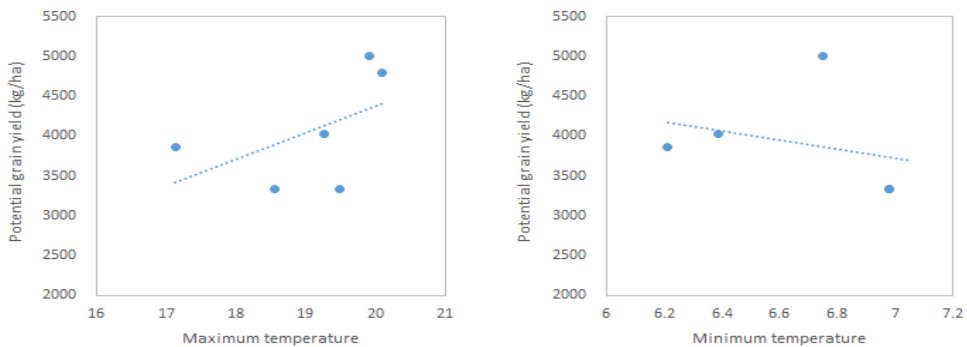


그림 28 익산 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 수량의 상관. 기상자료는 전주 기상관측소 자료

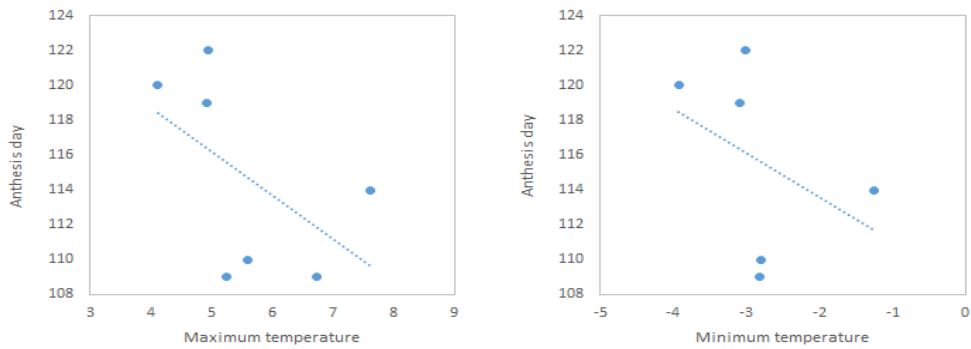


그림 29 익산 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관. 기상자료는 군산 기상관측소 자료

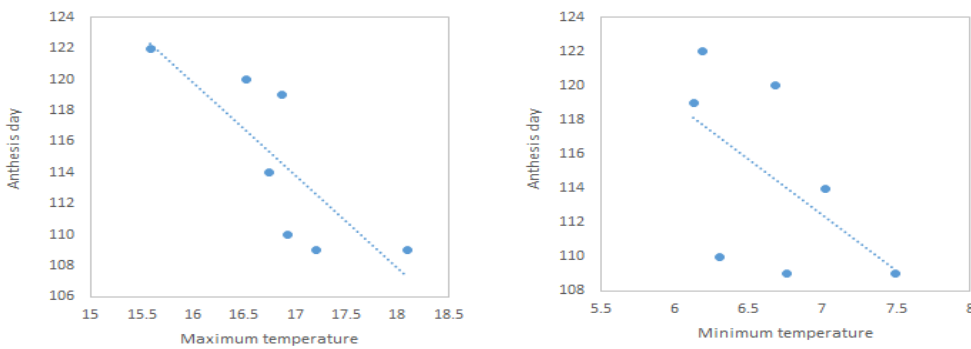


그림 30 익산 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관. 기상자료는 군산 기상관측소 자료

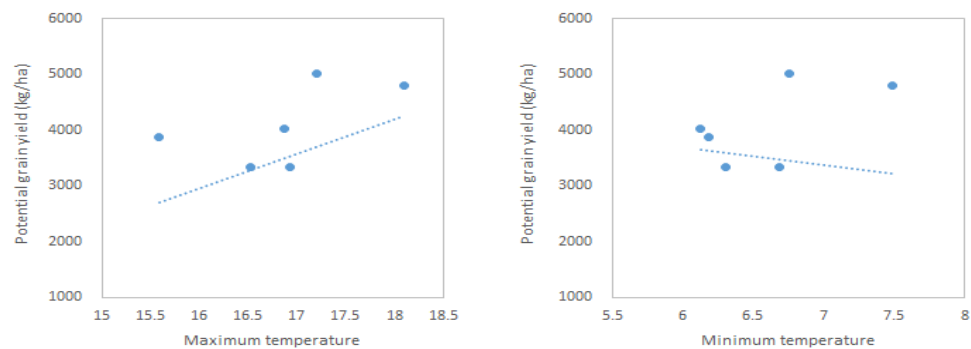


그림 31 익산 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 수량의 상관. 기상자료는 군산 기상관측소 자료

3.1.1.4 나주 지역에서 과거 관측 기후변화에 따른 출수시기와 수량

그림 32에서 그림 37은 나주 지역에서 2개의 다른 품종 즉, 겉보리 품종 올보리, 맥주보리 품종 삼도보리의 생육기간의 전·후반 동안 일별 최고 및 최저기온변화에 따른 수량 (kg/ha)과 출수시기의 상관관계를 나타낸 것이다. 나주의 경우도 익산과 같이 나주시에 기상관측소가 없는 이유로 광주 기상관측소의 기후자료를 이용하여 분석하였다. 올보리의 경우, 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.5 (R^2 : 0.21), 일별 최저기온의 경우는 0.2 (R^2 : 0.06)로 생육기간 전반 동안의 일별 최고기온이 높을수록 출수시기가 단축되는 현상이 뚜렷한데 반하여 일별 최저기온의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다 (그림 32). 그러나 생육기간 후반 동안에는 전혀 다른 반응을 보였다. 일별 최고기온과의 상관이 0.3 (R^2 : 0.07)으로 작았고, 일별 최저기온은 0.6 (R^2 : 0.33)으로 높았다 (그림 33). 수량에서도 일별 최고기온의 상관계수는 0.8 (R^2 : 0.65), 일별 최저기온의 상관계수는 0.3 (R^2 : 0.10)으로 생육기간 후반 동안 일별 최고기온이 높을수록 수량 감소 영향이 뚜렷한데 반하여 일별 최저기온의 영향은 크게 나타나지 않았다 (그림 34). 맥주보리 품종 삼도보리의 경우, 일별 최고기온의 상관계수가 0.7 (R^2 : 0.55), 일별 최저기온의 상관계수가 0.9 (R^2 : 0.84)로 생육기간 전반 동안 일별 최저기온이 출수시기 단축에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 35). 그러나 생육기간 후반에는 일별 최고기온 (R^2 : 0.99)이 일별 최저기온보다 출수시기와 상관이 높은 것으로 나타났다 (그림 36). 수량의 경우, 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.9 (R^2 : 0.89), 일별 최저기온의 경우는 0.8 (R^2 : 0.67)로 생육기간 후반 동안 일별 최고기온의 상승이 수량 감소에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다 (그림 37). 생육기간 후반의 일별 최고기온이 19.2°C에서 20.2°C로 1°C 상승함에 따라 수량은 5000kg/ha에서 3000kg/ha로 약 2000kg/ha의 감소를 보였고, 일별 최저기온의 경우 일별 최저기온이 6°C에서 10°C로 4°C 상승함에 따라 수량은 5000kg/ha에서 3000kg/ha로 약 2000kg/ha의 감소를 보여 맥주보리 품종 삼도보리의 경우 수량에서 일별 최고기온의 영향이 더 컸다.

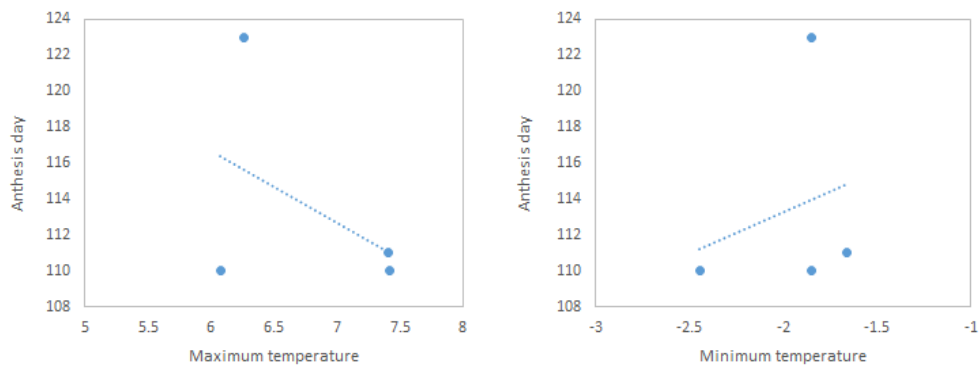


그림 32 나주 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

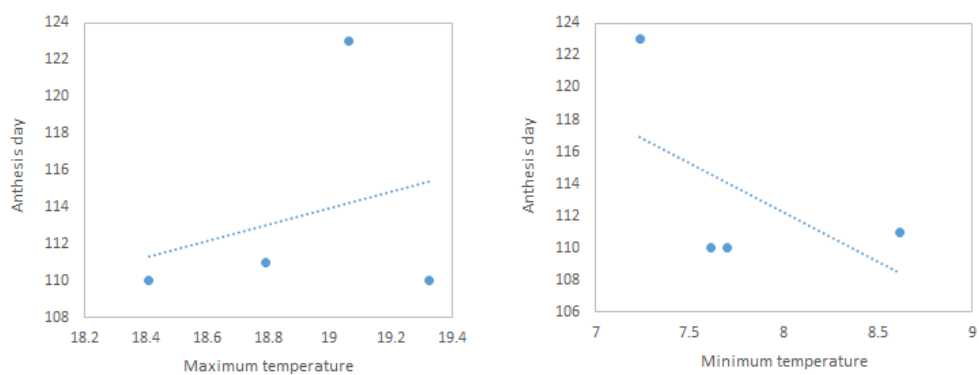


그림 33 나주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

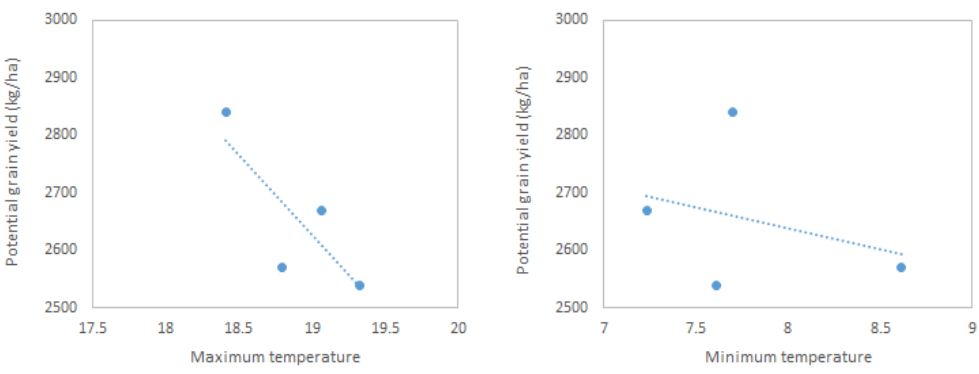


그림 34 나주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 수량의 상관

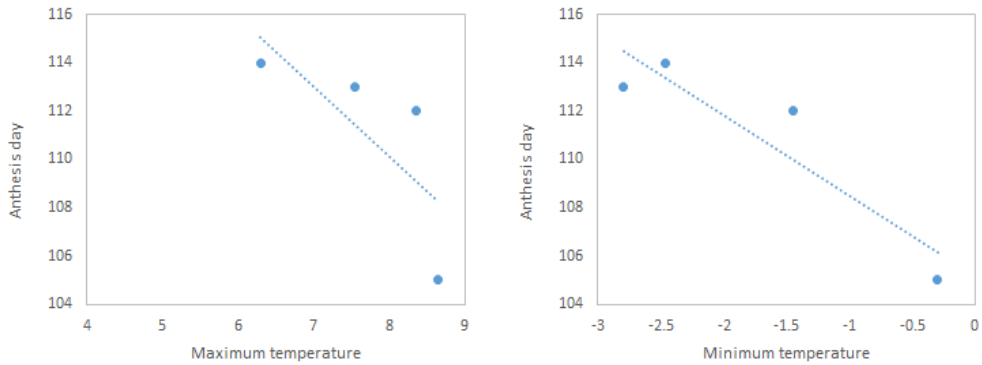


그림 35 나주 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 삼도보리 출수시기의 상관

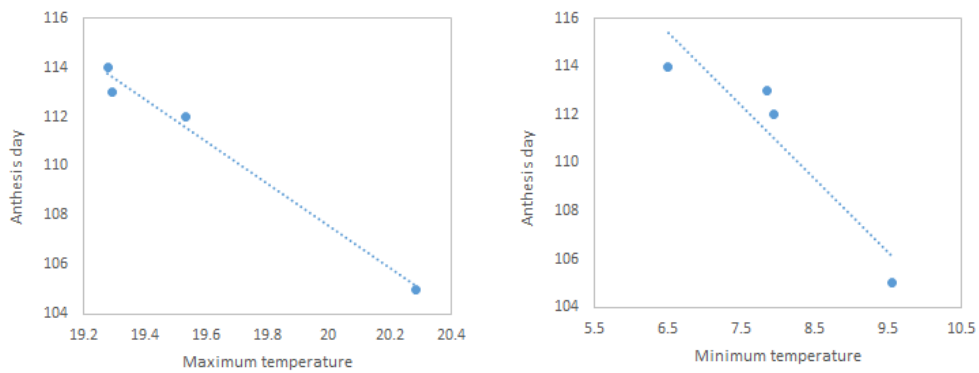


그림 36 나주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 삼도보리 출수시기의 상관

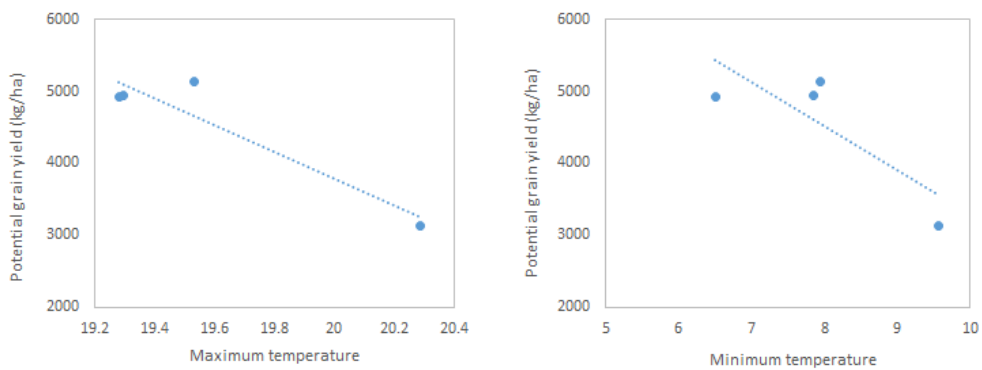


그림 37 나주 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 삼도보리 수량의 상관

3.1.1.5 수원 지역에서 과거 관측 기후변화에 따른 출수시기와 수량

그림 38과 그림 40은 수원 지역에서 겉보리 품종 올보리의 생육기간의 전·후반 동안 기온변화에 따른 수량 (kg/ha)과 출수시기 변화를 나타낸 것이다. 올보리의 경우, 상관계수가 일별 최고기온의 경우는 0.6 (R^2 : 0.35), 일별 최저기온의 경우는 0.8 (R^2 : 0.67)로 생육기간 전반 동안의 일별 최저기온이 높을수록 출수시기가 단축되는 현상이 뚜렷하게 나타났다 (그림 38). 생육기간 후반에도 일별 최고기온이 출수시기의 단축과 상관이 높은 것으로 나타났다 (그림 39). 수량의 경우, 일별 최고기온의 상관계수는 0.5 (R^2 : 0.25), 일별 최저기온의 상관계수는 0.4 (R^2 : 0.17)로 생육기간 후반 동안의 일별 최고기온이 수량 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다 (그림 40).

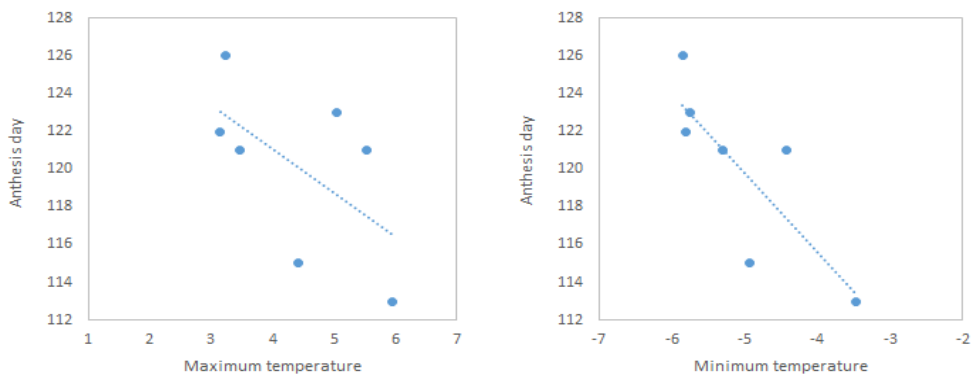


그림 38 수원 지역에서 생육기간 전반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

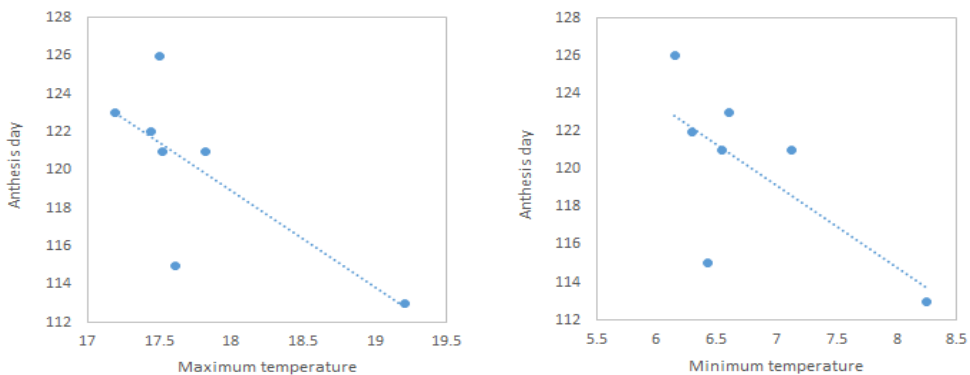


그림 39 수원 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 출수시기의 상관

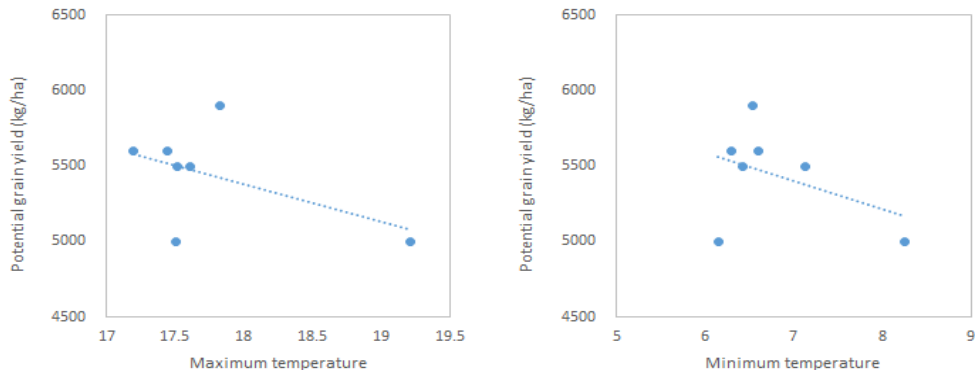


그림 40 수원 지역에서 생육기간 후반 동안 일별 최고 및 최저기온 변화와 올보리 수량의 상관

3.2 생육단계와 수량구성요소

3.2.1 파종에서 출수까지 기간과 수량성

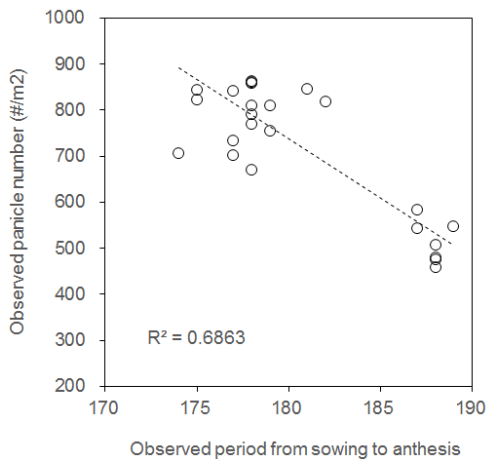
앞 절 (3.1)에서 생육기간 전·후반 동안의 기온변화와 출수시기 및 수량과의 관계를 분석한 결과를 언급했다면, 이번 절은 동일한 대상지역에 대하여 겉보리 품종 올보리의 생육단계까지 걸린 기간과 수량과의 관계를 분석한 결과이다. 그림 41은 파종 후 출수까지 걸린 기간과 이삭수를 비교한 결과이다. 대구에서 상관계수는 0.83 (R^2 : 0.69)으로 출수까지 걸린 기간이 길어질수록 이삭수 감소 영향이 큰 것으로 나타났다. 진주, 익산, 나주에서도 대구와 같이 출수까지 걸린 기간이 길어질수록 이삭수 감소 경향이 커졌다. 상관계수는 진주의 경우 0.72 (R^2 : 0.51), 익산의 경우는 0.85 (R^2 : 0.72), 나주는 0.82 (R^2 : 0.68)로 나타났다.

3.2.2 등숙기간과 수량성

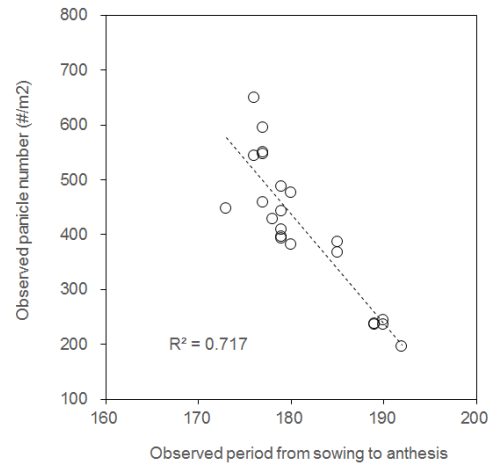
그림 42는 등숙기간과 수량을 비교한 결과이다. 앞 절 (3.2.1)에서와 같이 등숙기간이 길면 영화수가 감소하는 것으로 나타났다. 대구 지역에서 등숙기간과 영화수의 상관계수는 0.40 (R^2 : 0.16), 진주 지역에서는 0.42 (R^2 : 0.18), 익산 지역에서는 0.36 (R^2 : 0.13), 나주 지역은 0.43 (R^2 : 0.18)로 나타났다. 파종에서 출수까지 걸린

기간이 길면 이삭수가 감소하는 영향이 큰 것에 반하여 등숙기간이 길어질수록 영화수가 감소하는 영향은 크게 높지 않았다. 하지만, 이와 같은 결과는 벼의 연구 결과와는 다소 다른 결과이다. 대체로 등숙기간이 길면 영화수가 증가한다고 하였다. 그러나 보리의 경우, 등숙기간이 길면 영화수가 감소하는 것으로 나타났는데, 이것은 등숙기간 동안의 기온과 관련이 있었을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 등숙기간 동안의 기온을 비교하지 못했다.

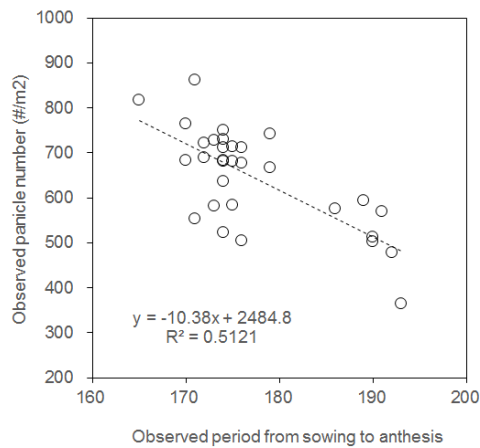
대구



익산



진주



나주

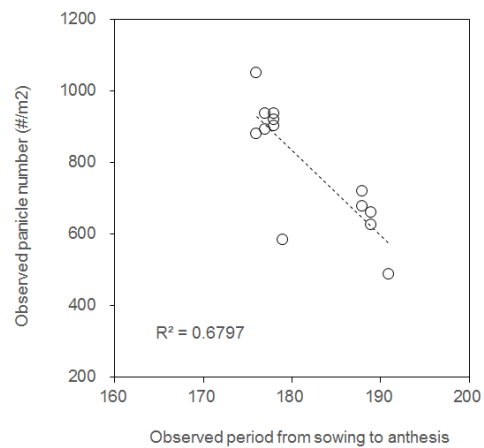
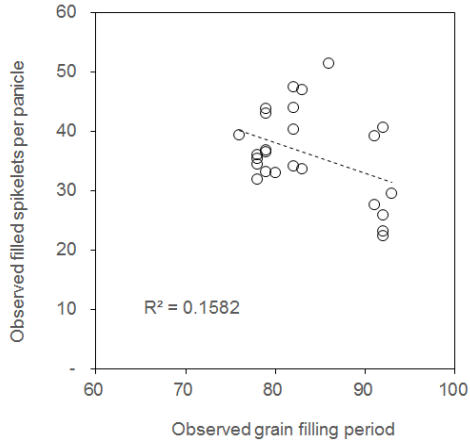
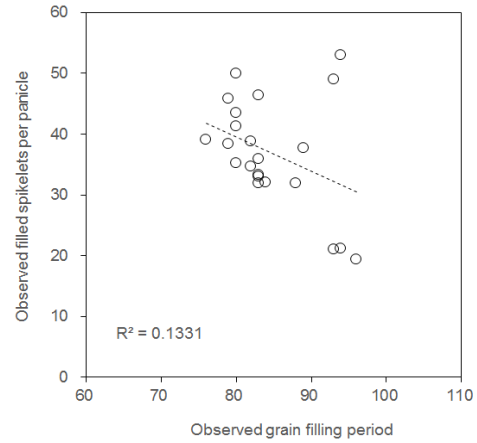


그림 41 대구, 진주, 익산, 나주 지역에서 파종에서 출수시기까지 걸린 기간과 이삭수의 상관

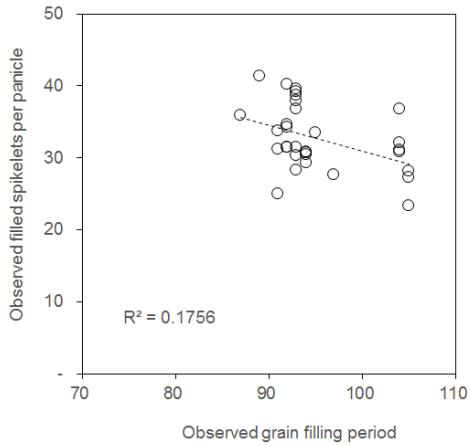
대구



익산



진주



나주

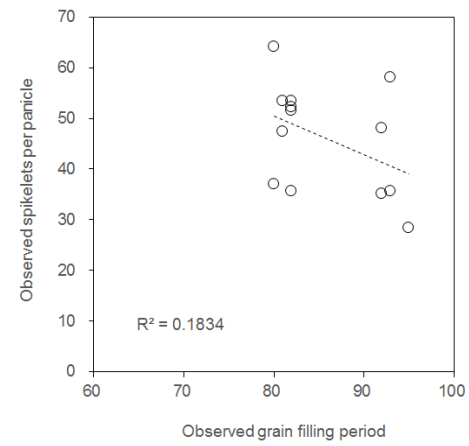


그림 42 대구, 진주, 익산, 나주 지역에서 등숙기간과 영화수의 상관

3.3 생장한계온도의 변화

3.3.1 과거 관측기간 동안 생장한계온도의 변화

대상지역 9개 지역에 대하여 과거 관측기간 동안 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일을 계산하였다. 이때 보리 파종 후 월동기간을 12월에서 이듬해 2월까지

지로 설정하고 이 기간 동안 생장한계온도가 3일 이상 지속되는 빈도와 최대 지속출현일을 계산한 것이다. 그림 43은 군산, 전주, 부안, 정읍 지역에서 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일 분석 결과이다. 그림 44와 그림 45는 각각 진주, 영덕, 밀양, 장흥과 해남 지역의 지속출현빈도와 최대 지속출현일을 나타낸 것이다. 1975년에서 1985년대까지 군산, 전주, 부안, 정읍 지역에서 최대 지속출현빈도가 4회이고 그 이후에서 최근까지는 1회 이상을 넘지 않았다. 또한 최대 지속출현일도 1975년에서 1985년대에는 10일에서 14일 이상으로 지속출현일이 길었지만 최근으로 올수록 지속출현일이 2일 미만으로 급격히 감소하였다. 이것은 많은 연구 사례의 결과와 같이 1990년 이후 따뜻해진 겨울 때문인 것으로 판단된다. 본 연구의 대상지역에서 가장 남쪽에 위치한 장흥과 해남 지역에서는 지속출현빈도도 거의 나타나지 않았을 뿐더러 최대 지속출현일도 6일 (일주일) 이내로 짧았던 해가 1975년 이후로는 전혀 나타나지 않았다. 또한 1995년 이후로는 겉보리 생장한계온도 이하로 내려간 날이 3일 이상 지속되는 날이 전혀 나타나지 않았다. 이것은 장흥과 해남은 내한성이 가장 약한 맥주보리의 안전재배한계에 포함되는 지역으로 보리 전 품종이 안전하게 재배되는 지역이기 때문이다. 진주, 영덕, 밀양 지역에서도 전북 및 전남 지역에서의 비슷한 결과를 보였다. 다만, 2005년의 지속출현빈도는 다른 지역처럼 1회 이내로 감소하였지만 최대 지속출현일은 6일 정도로 나타났다.

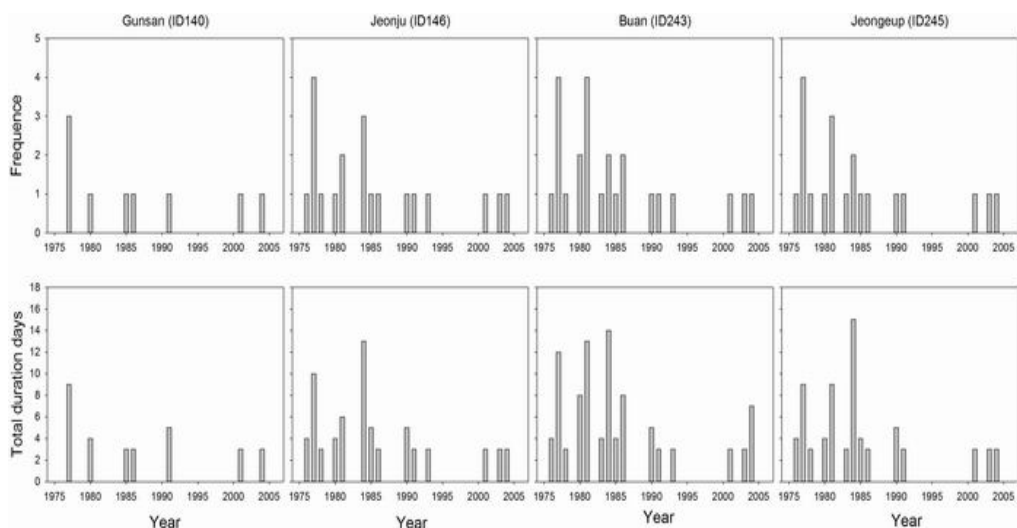


그림 43 과거 관측기간 동안 군산, 전주, 부안, 정읍의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

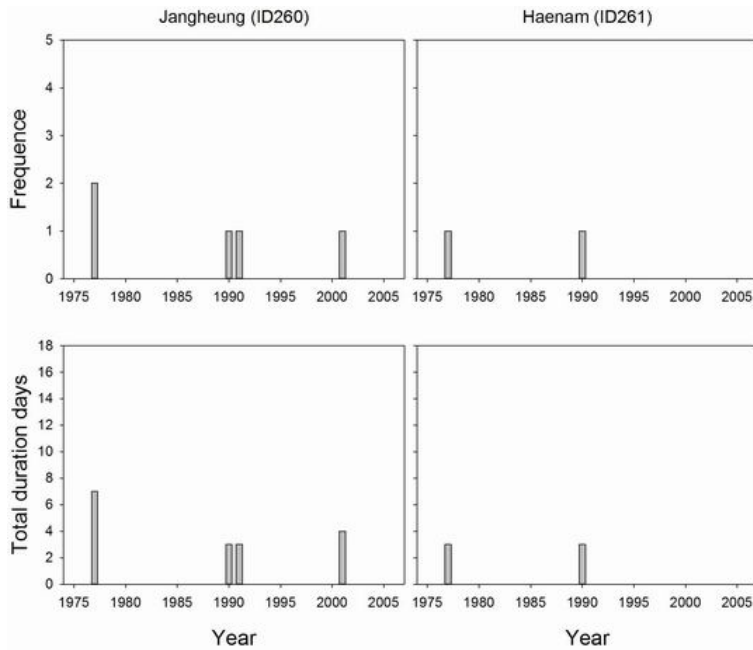


그림 44 과거 관측기간 동안 장흥, 해남의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

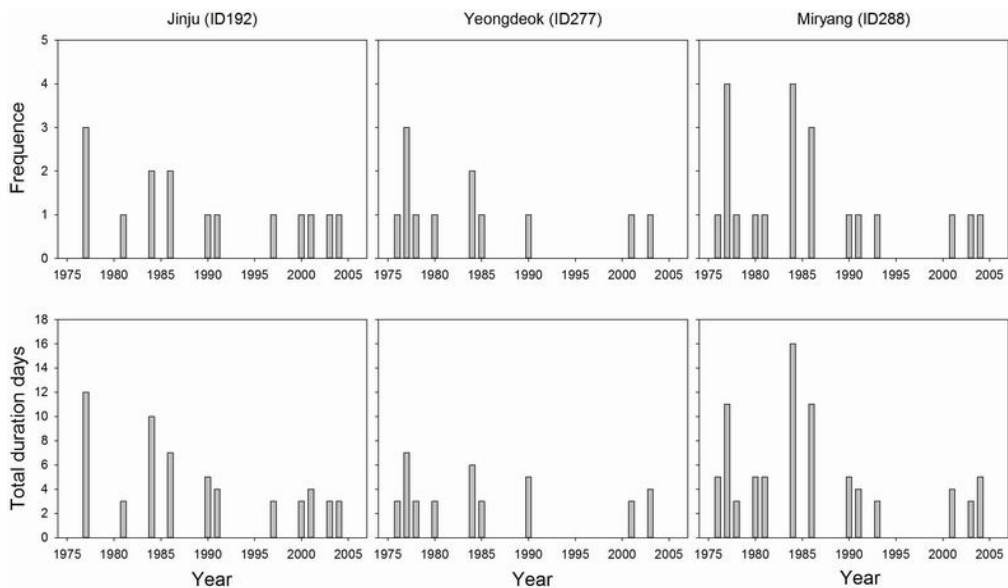


그림 45 과거 관측기간 동안 진주, 영덕, 밀양의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

3.3.2 기후변화 시나리오 전망에 따른 성장한계온도의 변화

3.3.2.1 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 성장한계온도의 변화

대상지역 9개 지역의 8개 GCMs과 1개 RCMs의 과거기간 (1976~2005) 동안 기후변화 시나리오 전망 자료에서 겹보리 성장한계온도인 이하로 내려가는 날이 3일 이상 지속되는 날을 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이 9개 개별기후모형에서 분석되었기 때문에 9개 개별기후모형의 결과를 모두 보여주는 것은 어려웠다. 그래서 9개 개별기후모형의 평균값인 MME (Multi-Model Ensemble)의 결과에 대해서만 언급하였다. 기간은 관측기간과 동일한 1976년에서 2005년까지 동일한 기간이다. 그림 46은 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일에 대한 MME 값으로 나타낸 것이다. MME의 성장한계온도 지속출현빈도의 경우, 관측 결과와 다소 달랐는데, 관측 결과에서는 최대 지속출현빈도가 5회까지 나타나면서 1990년 이후에는 1회 미만으로 거의 나타나지 않은 것에 비하면 9개 개별기후모형의 과거기간의 MME에서는 매해 최근까지 평균 1회에서 2회로 나타났고 최대 지속출현일도 10일 미만으로 나타났다. 그림 47은 장흥, 해남 지역의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 MME의 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일 계산 결과이다. 특이사항은 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 9개 개별기후모형의 과거기간 동안의 MME에서는 최근까지 나타났지만 장흥과 해남 지역은 관측 결과와 같이 최근에 성장한계온도 지속출현빈도가 전혀 나타나지 않았다. 그림 48은 진주, 영덕, 밀양 지역의 9개 개별기후모형의 과거기간 동안의 MME의 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일을 계산한 결과이다. 군산, 전주, 부안, 정읍 지역과 같이 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일이 매해 최근까지 나타나는 것으로 분석되었지만 빈도는 전북 지역이나 전남 지역보다 1회 이상 자주 있는 것으로 계산되었다.

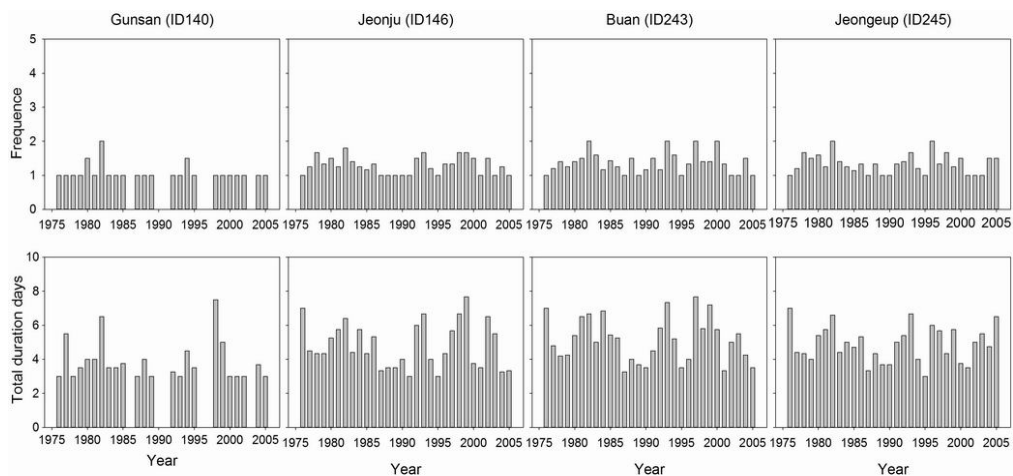


그림 46 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 군산, 전주, 부안, 정읍의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

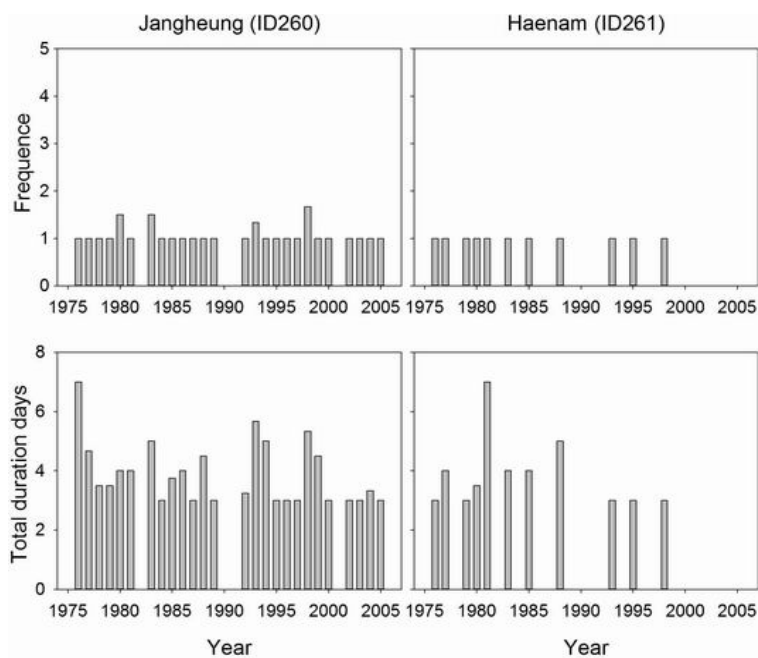


그림 47 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 장흥, 해남의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

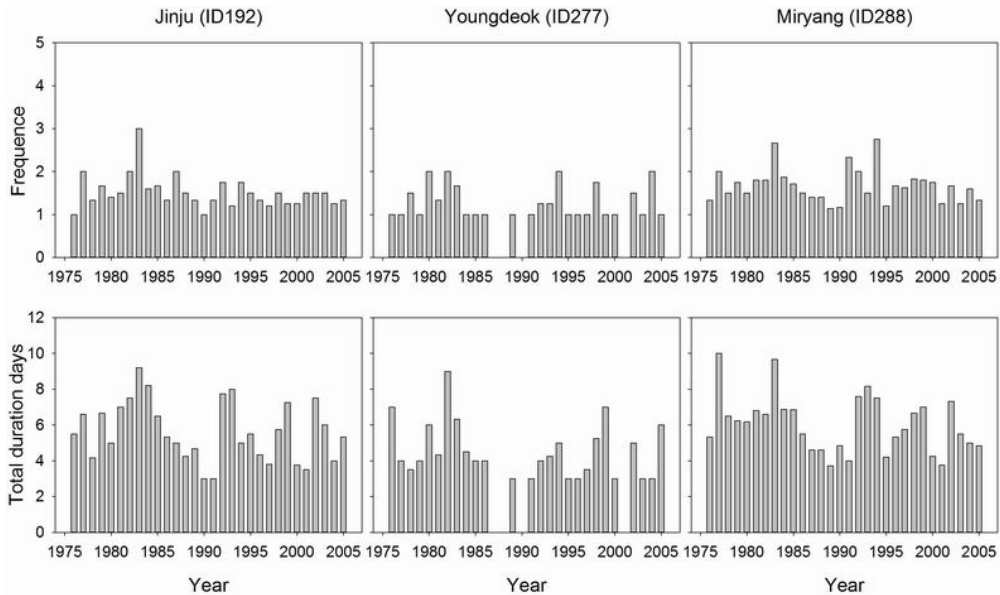


그림 48 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안 진주, 영덕, 밀양의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

3.3.2.2 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 생장한계온도의 변화

대상지역 9개 지역의 9개 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 (2011~2040) 동안 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일을 계산하였다. 앞 절 (3.2.2.1)에서와 마찬가지로 9개 개별기후모형 전체에서 계산되었지만 본 장에서의 MME에 대해서만 언급하였다. 또한 기후변화 시나리오 전망의 미래기간은 이산화탄소 증가 시나리오 RCP4.5와 RCP8.5 두 가지 결과에 대해서만 언급하였다. 그림 49와 그림 50은 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 기후변화 시나리오 전망의 미래 기간 동안 RCP4.5와 RCP8.5의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일의 MME 결과이다. 생장한계온도 지속출현빈도의 경우, RCP4.5에서는 1회 이상 증가하는 경향이 없지만, RCP8.5에서는 2~3회까지 나타나는 경우도 발생하였다. 최대 지속출현일은 평균 6일을 넘지 않았다. 그림 51과 그림 52는 장흥과 해남 지역의 미래기간 동안 RCP4.5와 RCP8.5의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일의 MME 결과이다. 최대 지속출현일은 평균 6일이지만 군산, 전주, 부안, 정읍 지역에서 나타난 결과와 같이 RCP8.5에서 2회 이상 발생하는 해가 나타났다. 그림 53과 그림 54는 진

주, 영덕, 밀양 지역의 미래기간 동안 RCP4.5와 RCP8.5의 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일의 MME 결과이다. 이 지역의 특이 사항은 진주와 밀양 지역에서는 RCP4.5에서 성장한계온도 지속출현빈도가 RCP8.5보다 더 자주 발생하는 것으로 나타난 반면 해안지역에 위치한 영덕 지역의 경우, RCP8.5에서 지속출현빈도와 최대 지속출현일이 증가할 것으로 나타내는데, RCP8.5 시나리오에서 해안지역의 온도 변화폭이 클 뿐만 아니라 불확실성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

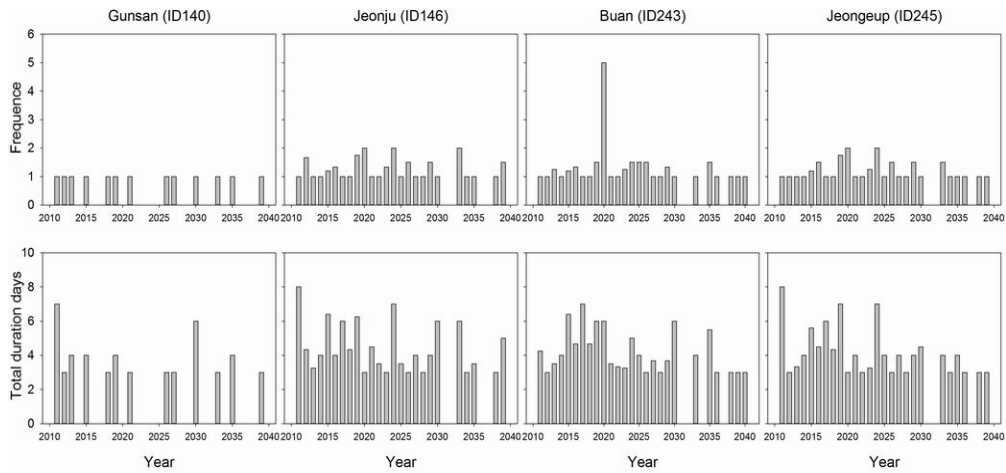


그림 49 개별기후모형의 RCP4.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 군산, 전주, 부안, 정읍의 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

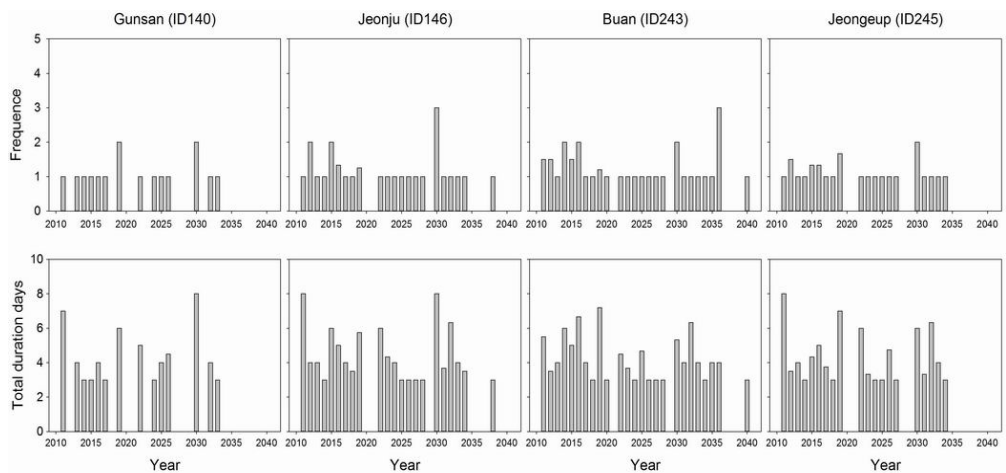


그림 50 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 군산, 전주, 부안, 정읍의 성장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

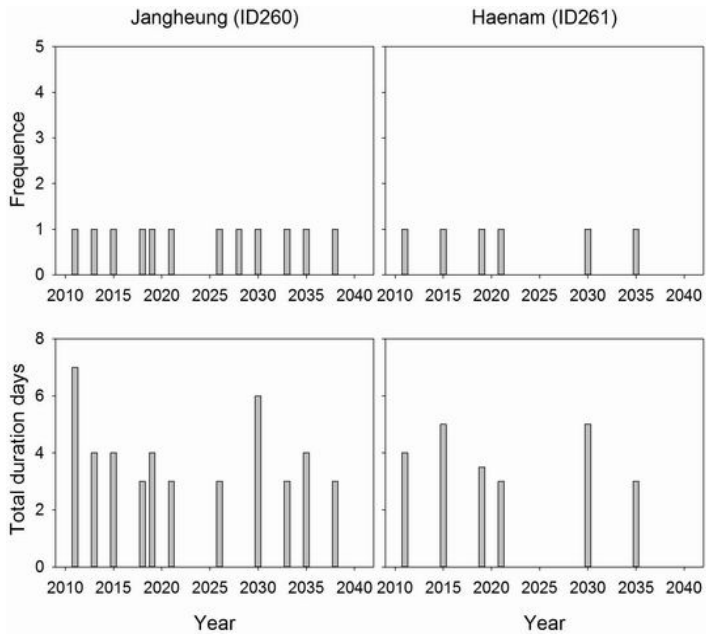


그림 51 개별기후모형의 RCP4.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 장흥, 해남의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

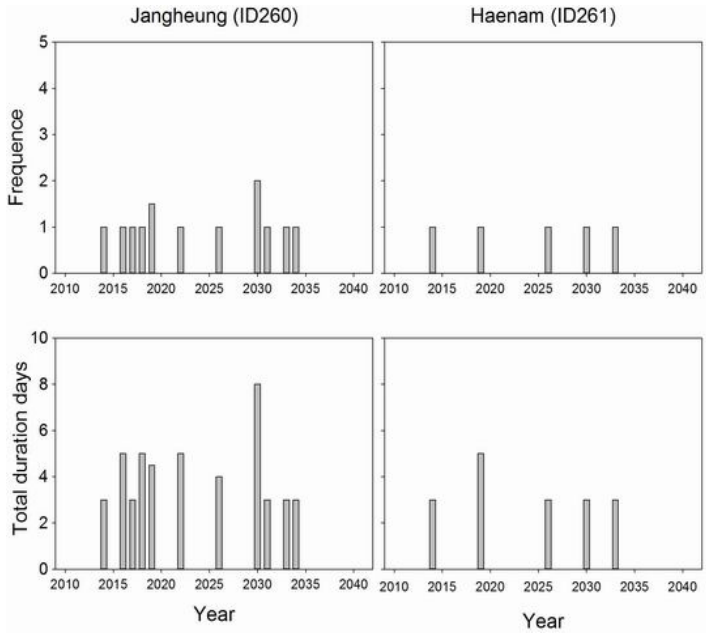


그림 52 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 장흥, 해남의 생장한계온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

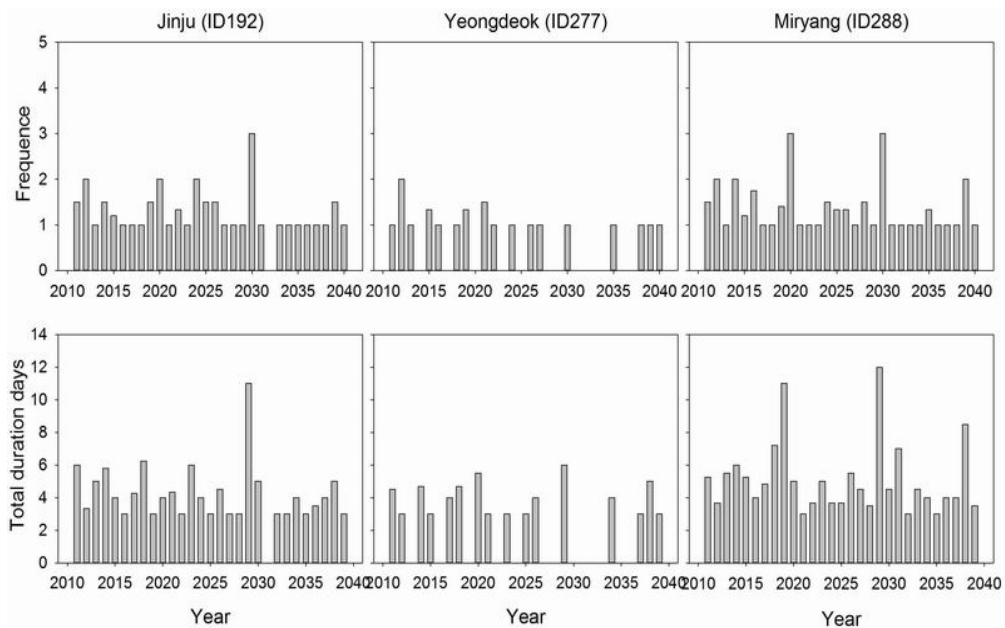


그림 53 개별기후모형의 RCP4.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 진주, 영덕, 밀양의 생장한계 온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

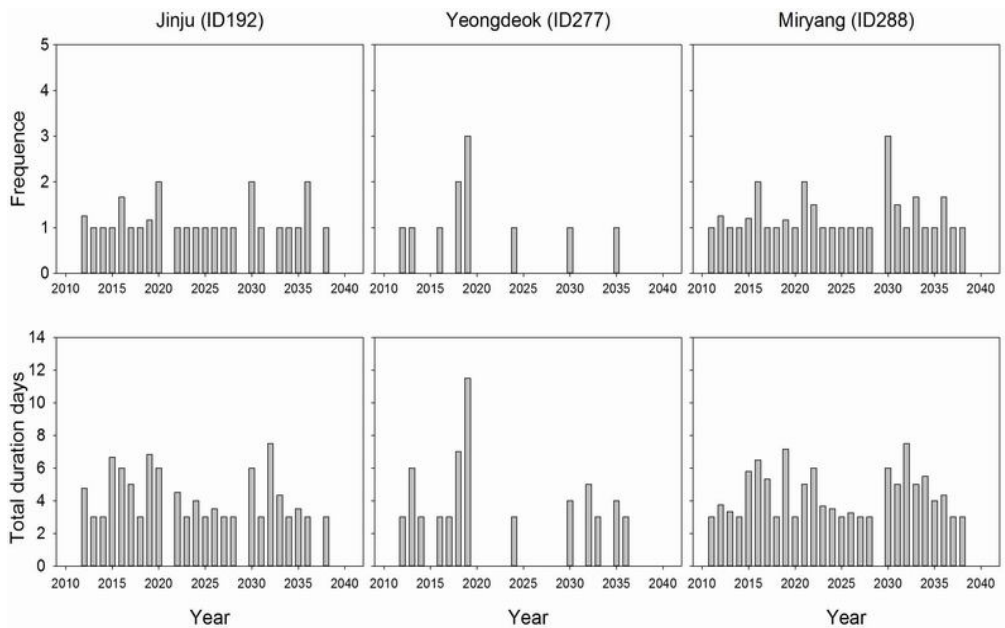


그림 54 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 진주, 영덕, 밀양의 생장한계 온도 지속출현빈도와 최대 지속출현일

3.3.3 안전재배지대와 생장한계온도 지속출현빈도의 변화

농업용 보리 안전재배한계 구분도와 생장한계온도 지속출현빈도를 입력하여 식 3을 계산하기 위해서는 매년 계산된 생장한계온도 지속출현빈도의 시간 스케일, 즉 10년 단위 혹은 30년 단위로 동일한 기간 설정이 필요하였다. 그림 55는 농업용 보리 안전재배한계 구분도의 시간 스케일과 동일하게 설정된 과거 관측기간으로, 10년 단위(1981~1990, 1991~2000, 2001~2010)로 계산된 지속출현빈도이다. 마찬가지로 기후변화 시나리오 전망의 과거기간과 미래기간의 30년도 10년 단위로 분리가 필요하다. 그림 56은 9개 개별기후모형의 과거기간 동안의 MME 생장한계온도 지속출현빈도를 10년 단위로 분리한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 장흥이나 해남 이외 영광군, 신안군, 영암군 등 전남의 해안 지역에서는 1981~1990년에만 지속출현빈도가 나타났을 뿐 1990년 이후에는 전혀 나타나지 않았음을 알 수 있다. 특이사항은 전북 지역과 영남 및 전남 일부 내륙 지역에서는 2000년 이후에 지속출현빈도가 다른 두 시기에 비해 상대적으로 10년 사이에 증가했음을 알 수 있다. 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안에서 영광군, 신안군, 영암군, 광주 등에서는 생장온도한계 지속출현빈도가 전혀 나타나지 않았기 때문에 맵에 표출할 수 있는 정보가 없었다. 과거 관측기간 동안 대구에서 1990년 이후로는 생장온도한계 지속출현빈도가 나타나지 않은 반면, 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 최근기간(2001~2005) 뿐만 아니라 과거 1981~1990년대와 1991~2000년, 3시기 모두에서 나타났다.

그런데 Kim et al. (2012)에 의해 제작된 미래기간에 대한 농업용 보리 안전재배한계 구분도(그림 4)는 RCP8.5의 기후변화 시나리오 전망 중에서도 RCMs에서 생산된 KMA-12.5Km를 기반으로 제작된 것이다. 따라서 본 연구에서도 RCP8.5의 미래기간 기후변화 시나리오 전망 중에서 KMA-12.5Km에서 계산된 지속출현빈도를 10년 단위로 도출하였다(그림 57).

농업용 보리 안전재배한계 구분도의 정보와 과거 관측기간 동안의 생장한계온도 지속출현빈도를 결합하여 잠재 위험정보를 표출한 것이 그림 58의 a이다. 그림 58의 b는 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안에 대하여 계산된 잠재 위험정보 결과이다. 관측기간의 잠재 위험정보와 기후모형의 과거기간의 잠재 위험정보가 비교적 비슷한 결과를 보였다. 군산과 부안, 밀양 인근 지역의 잠재 위험정보가 다소 높게 계산되었다. 그림 58의 c는 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간에 대한 결과이다. 대부분 지역의 잠재 위험정보는 10 미만으로 계산되었다.

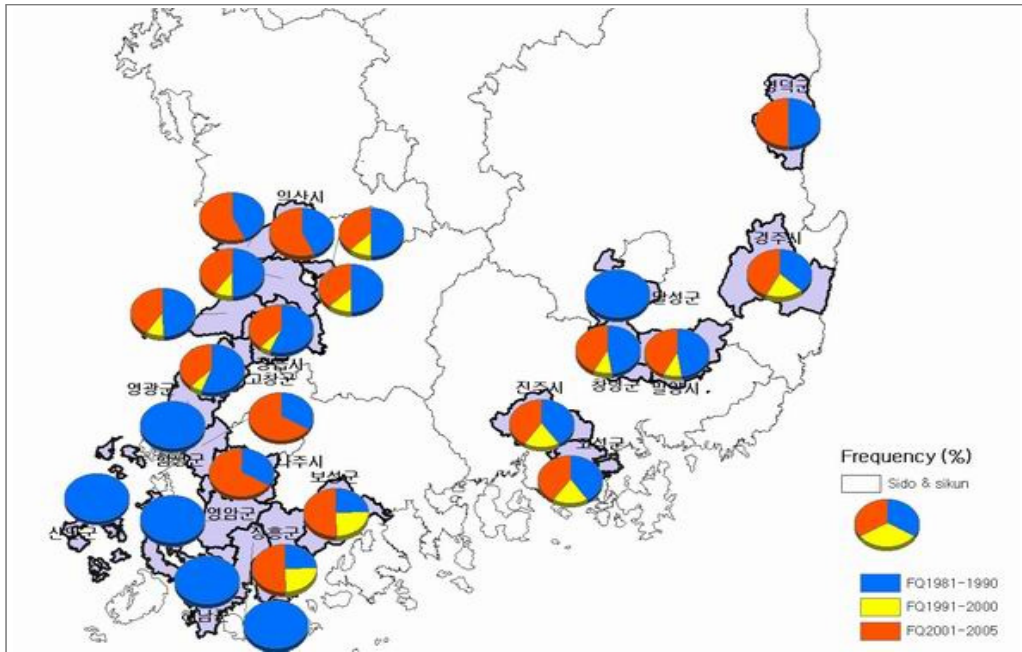


그림 55 농업용 보리 안전재배한계 구분도의 시간 스케일과 동일하게 설정된 과거 관측기간 10년 단위 (1981~1990, 1991~2000, 2001~2010)로 계산된 지속출현빈도

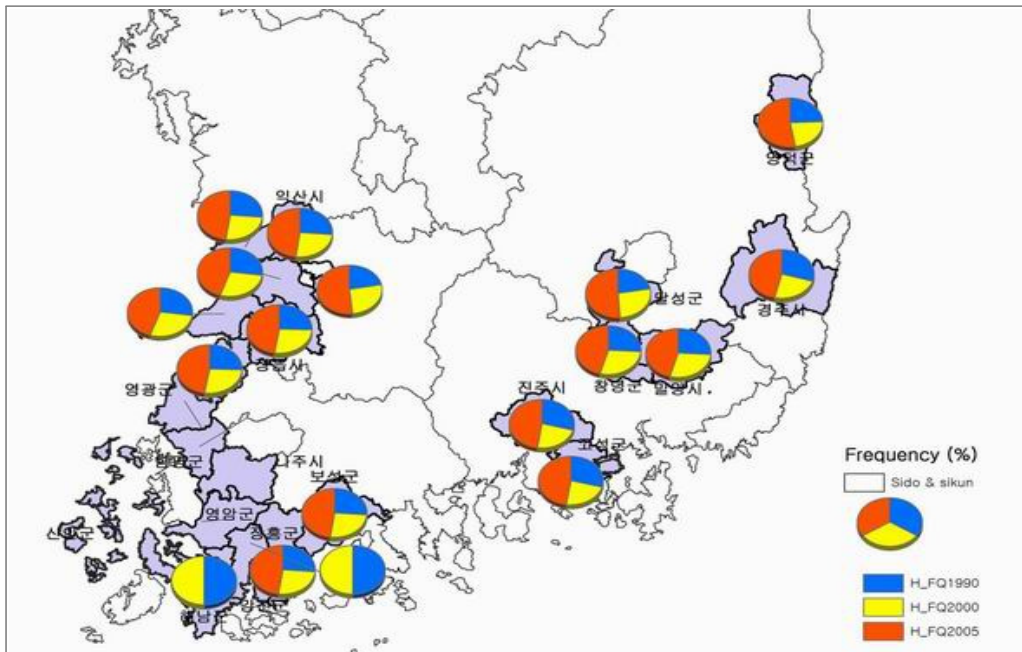


그림 56 9개 개별기후모형의 과거기간 동안 (10년 단위별)의 MME 성장한계온도 지속출현빈도

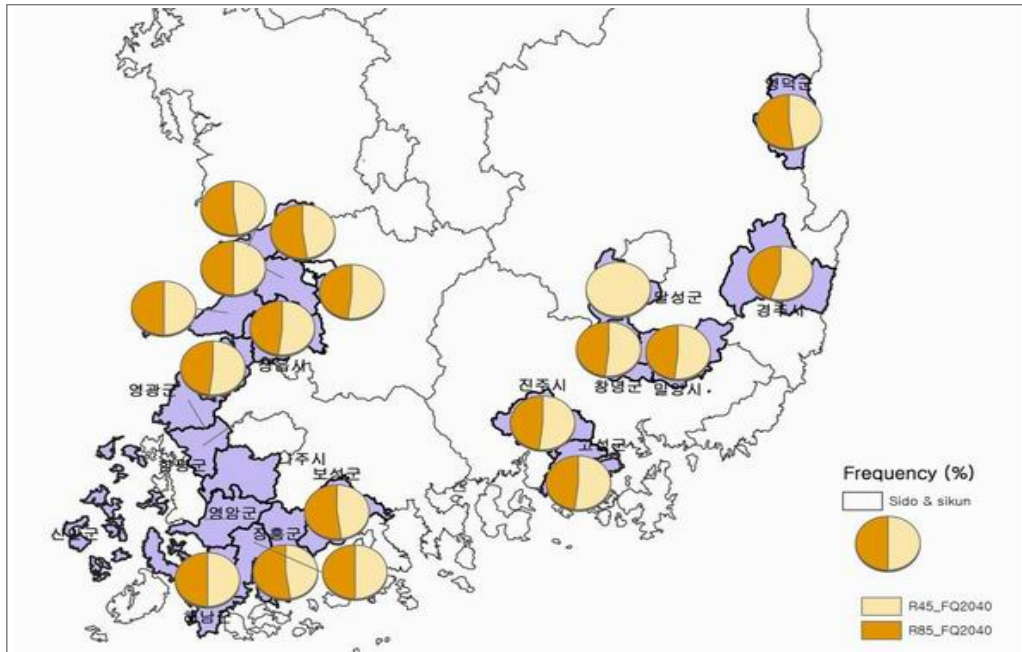


그림 57 KMA-12.5km RCMs의 미래기간 동안 (10년 단위별)의 MME 성장한계온도 지속출현빈도

3.4 저온노출기간의 변화

그림 59는 보리 품종의 파성특성에 따른 저온노출기간 즉 파성소거에 필요한 기간을 분석한 결과이다. 과거 관측기간 동안 즉 1990년대의 기후에서는 파성소거에 필요한 저온노출기간이 120일 이상으로 내한성이 가장 큰 Group III (Group IV 포함, 추파품종)의 파성을 소거할 수 있을 정도로 저온노출기간이 충분하였다. 그러나 1990년 후반부터는 파성소거에 필요한 저온노출기간이 감소하기 시작하여 최근 2001~2010년에는 내한성이 가장 약한 Group I (춘파품종)의 파성소거에 필요한 일수 (days) 조차도 충족할 수 없을 정도로 저온노출기간이 크게 감소하였다. 그러나 2011~2015년 5년 사이에 다소 증가하였으나 Group III의 파성소거에 필요한 저온노출기간은 여전히 부족한 것으로 계산되었다.

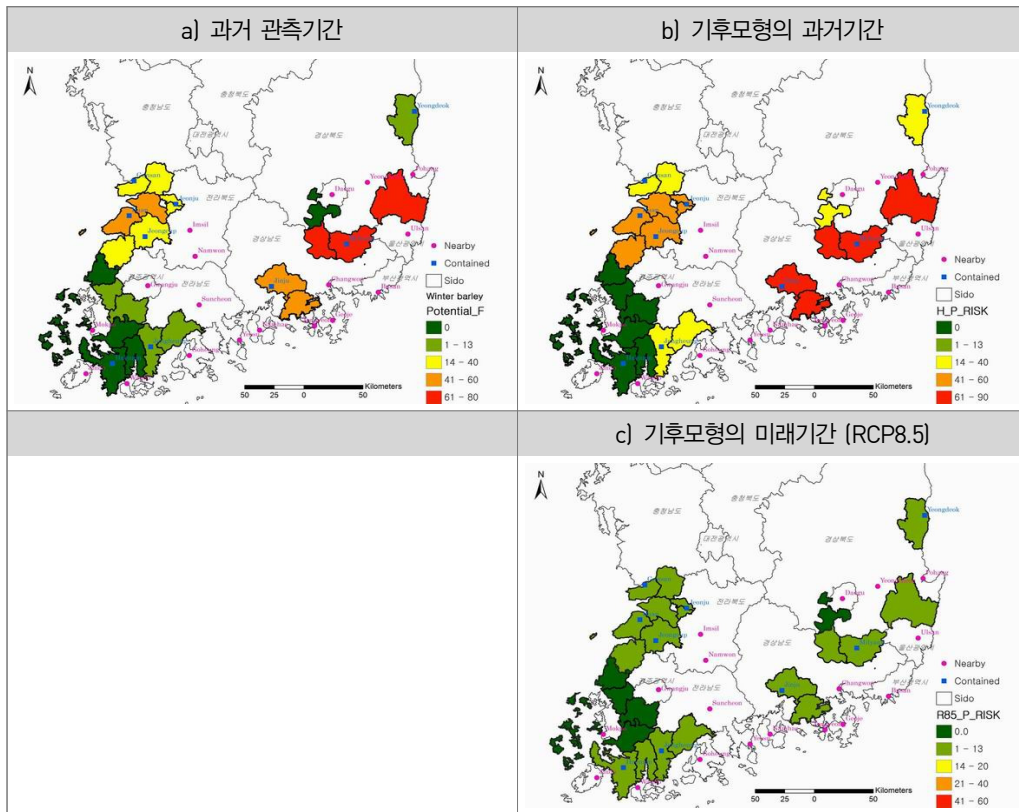


그림 58 미래기간 겉보리 안전재배지대의 잠재적 위험정보

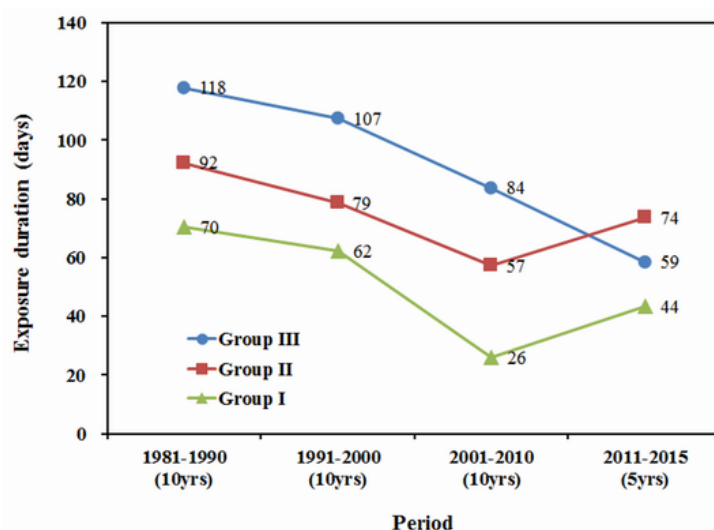


그림 59 과거 관측기간 동안 기후변화에 따른 저온노출기간의 변화

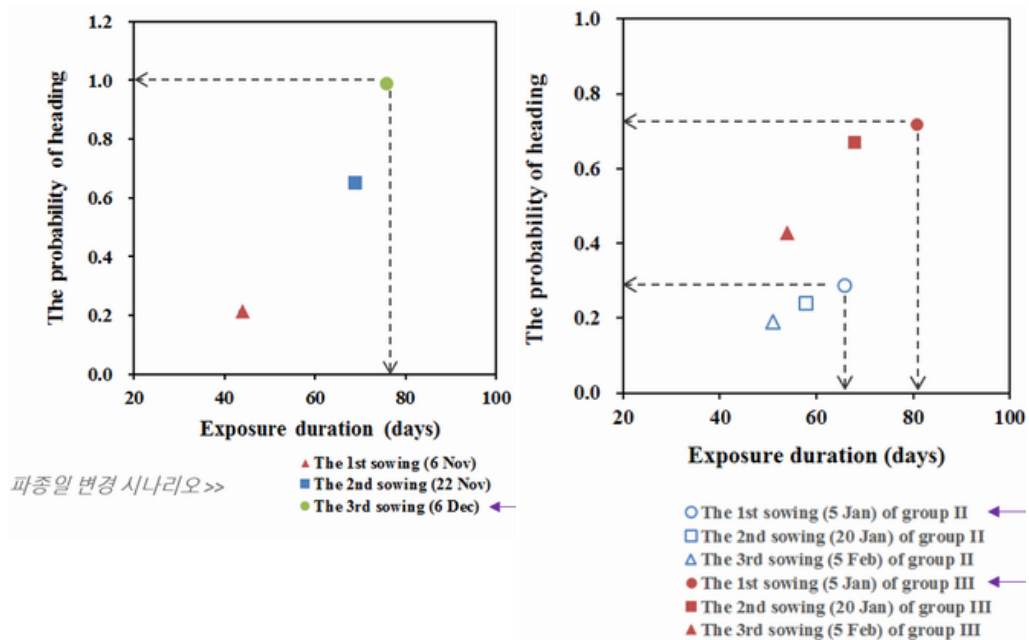


그림 60 파종일 변경에 따른 저온노출기간과 출수율 변화

그림 60은 2012~2013년 추파품종 Group II의 파종일 변경에 따른 저온노출기간과 출수율을 비교한 결과이다. 그림 60의 왼쪽 그림에서 12월 6일 파종의 경우, 파성소거에 필요한 저온노출기간 약 80일 이상을 충족하고 출수율도 100%였다. 11월 22일 파종한 경우, 저온노출기간이 70일 이상이었는데, 출수율은 70%였다. 그러나 11월 6일 파종한 경우, 파성소거에 필요한 저온노출기간도 충족하지 못했을 뿐만 아니라 출수율도 20% 미만이었다. 그림 60의 오른쪽에서 2013~2014년 추파품종 Group II과 Group III의 파종일 변경에 따른 저온노출기간과 출수율을 비교한 결과이다. 1월 5일 Group II와 III를 파종한 경우, Group III는 저온노출기간을 80일 충족하고 출수율도 80%이었다. 그러나 Group II는 70일을 채우지 못했을 뿐만 아니라 출수율이 30% 미만이었다. 1월 20일 파종의 경우, 저온노출기간과 출수율은 1월 5일 파종과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 2월 5일 파종의 경우, 저온충족일은 50일, 출수율은 50% 미만으로 감소하여 12월 말과 1월 초에 파종하는 것이 파성소거에 필요한 저온노출기간을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 기후변화에 따른 출수시기와 잠재 생산성 변화

그림 61에서 그림 63은 CERES-Barley 모형에서 겉보리 품종 올보리를 구동한 결과이다. 과거 관측기간 (1979~2010) 동안의 기후자료를 입력하여 CERES-Barley 모형을 구동한 결과를 ‘OBS’라고 명명하였고, 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 (1979~2010) 동안의 기후자료를 입력하여 모형을 구동한 결과에서 MME 값만을 ‘Hist’라고 명명하였다. 또한, 개별기후모형의 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 (2011~2040) 동안의 기후자료를 CERES-Barley 모형에 각각 입력하여 구동한 결과에서 역시 MME 값을 뽑아 각각 ‘RCP4.5’와 ‘RCP8.5’라고 명명하였다.

그림 61의 위 패널은 모형에서 출력된 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 관측기간, 기후변화 시나리오 전망의 과거기간과 미래기간 동안의 출수시기 변화이다. 미래기간 동안의 겉보리 출수시기는 과거기간보다 빨라졌다. Kim et al. (2012)은 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에서 두 시나리오 간의 출수시기의 단축 혹은 지연에는 차이가 크지 않았다고 하였지만 본 연구에서는 다소 다른 결과를 보였다. 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 따른 출수시기가 RCP4.5의 출수시기보다 빠른 것으로 나타났다. 그림 61의 아래 패널은 모형에서 출력된 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 관측기간, 기후변화 시나리오 전망의 과거기간과 미래기간 동안의 겉보리 품종 올보리의 잠재 수량 변화이다. 군산과 전주 지역에서 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안의 잠재 수량은 관측기간 동안의 잠재 수량과 비슷하게 모의되었다. 그러나 부안과 정읍 지역의 결과는 다소 달랐는데, 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안의 잠재 수량이 관측기간 동안의 잠재 수량보다 감소하는 것으로 모의되었다. 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 군산, 전주, 부안, 정읍 지역의 올보리의 잠재 수량은 모두 증가하는 것으로 나타났다.

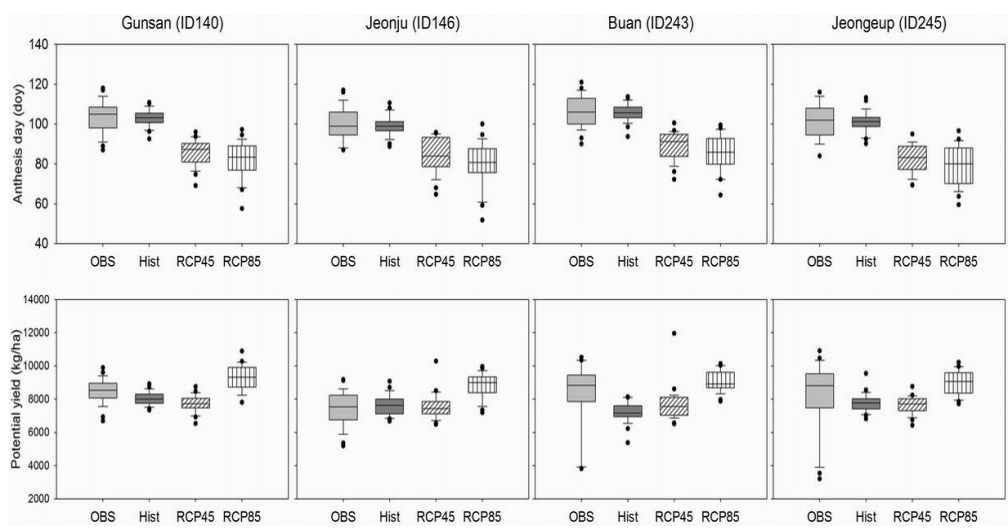


그림 61 군산, 전주, 부안, 정읍 지역에서 올보리의 모형 시뮬레이션 결과. 위-출수시기 변화. 아래-잠재 수량 변화

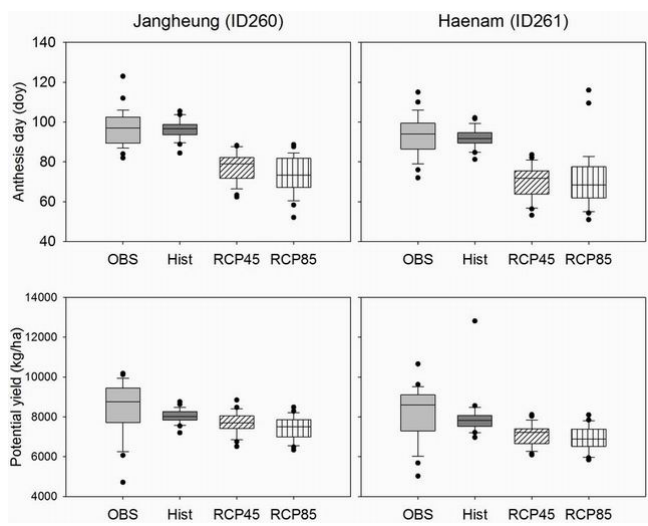


그림 62 장흥, 해남 지역에서 올보리의 모형 시뮬레이션 결과. 위-출수시기 변화. 아래-잠재 수량 변화

그림 62의 위 패널은 장흥과 해남 지역에서 관측기간, 개별기후모형의 과거기간과 미래기간 동안의 출수시기 변화를 모의한 결과이다. 미래기간 동안의 출수시기는 과거기간보다 빨라졌고 역시 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 따른 출수시기가 RCP4.5의 출수시기보다 빠른 것으로 나타났다. 그림 62의 아래 패널은 모형에서 출력된 장흥과 해남 지역의 관측기간, 기후변화 시나리오 전망의 과거기간과 미래기간 동안 올보리의 잠재 수량 변화이다. 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안의 잠재 수량은 관측기간 동안의 잠재 수량보다 감소하는 것으로 모의되어 부안과 정읍 지역에서의 결과와 같았다. 특이사항은 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안에서 겉보리의 잠재 수량은 증가하지 않았다. Kim et al. (2012)에 의하면 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 보리의 잠재 수량은 우리나라 대부분의 지역에서 증가할 것이라고 한 것과는 상반된 결과였다. Kim et al. (2012)의 연구 결과는 파종일 변경 시나리오를 적용한 것인 반면 본 연구에서는 파종일 변경 시나리오를 적용하지 않은 이유에서 비롯된 결과이다.

그림 63의 위 패널은 모형에서 진주, 영덕, 밀양 지역의 관측기간, 개별기후모형의 과거기간과 미래기간 동안의 출수시기 변화를 모의한 결과이다. 앞선 모든 결과와 마찬가지로 미래기간 동안의 출수시기는 과거기간보다 빨라졌지만 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 따른 출수시기의 단축 혹은 지연 등의 변화는 나타나지 않

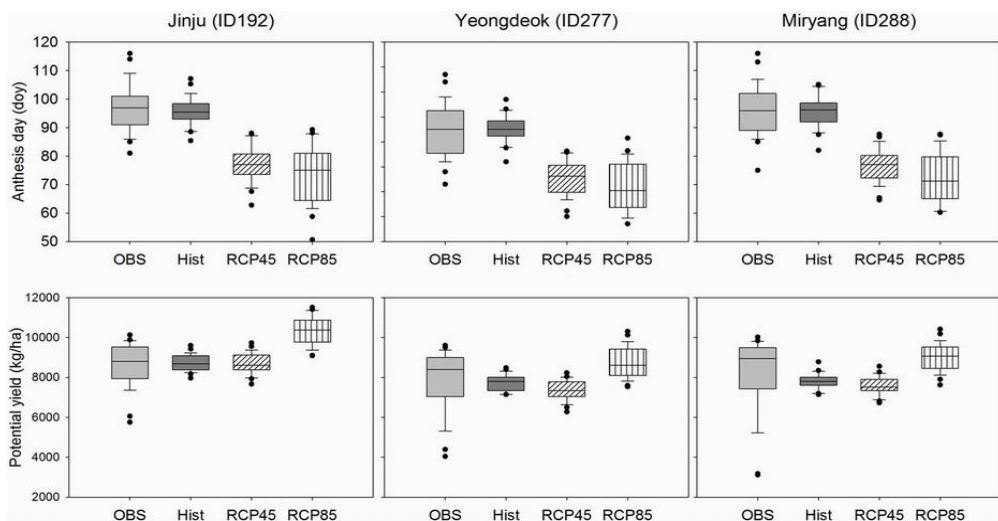


그림 63 진주, 영덕, 밀양 지역에서 올보리의 모형 시뮬레이션 결과. 위-출수시기 변화. 아래-잠재 수량 변화

았다. 그림 63의 아래 패널은 진주, 영덕, 밀양 지역의 관측기간, 기후변화 시나리오 전망의 과거기간과 미래기간 동안 올보리의 잠재 수량 변화이다. 개별기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 동안의 잠재 수량은 관측기간 동안의 잠재 수량과 비슷하게 모의되었고, 개별기후모형의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 미래기간 동안 진주, 영덕, 밀양 지역의 올보리 잠재 수량은 모두 증가하는 것으로 모의되었다.

Kim et al. (2012)은 파종일 변경에 대한 RCP4.5와 RCP8.5의 출수시기 변화에는 큰 차이가 없다고 하였는데, 본 연구에서는 다소 다른 결과를 보였다. 그 이유는 Kim et al. (2012)은 RCMs에서 생산된 기후변화 시나리오 전망 자료 중에서 KMA-12.5km의 기후변화 시나리오 전망 자료만을 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. 그림 64에서 그림 66은 MME 결과가 아닌 9개 개별기후모형 중에서 RCMs에 의해 생산된 KMA-12.5km 기후변화 시나리오 전망 자료를 CERES-Barley 모형에 입력하여 출력된 결과로써 출수시기 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 파종일 변경 시나리오를 적용하지 않았음에도 불구하고 대상지역 9개 모두에서 KMA-12.5km의 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망의 출수시기가 RCP4.5의 출수시기보다 빠른 것으로 모의되었다.

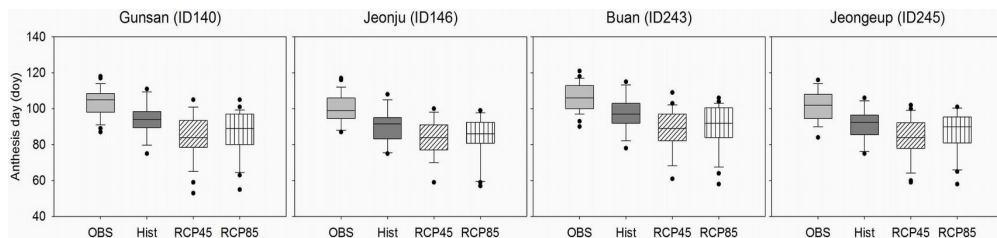


그림 64 군산, 전주, 부안, 정읍 지역에서 KMA-12.5km 기후변화 시나리오 전망의 출수시기 변화

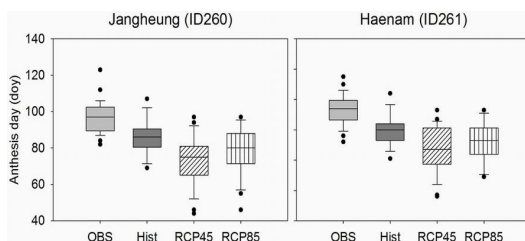


그림 65 장흥, 해남 지역에서 KMA-12.5km 기후변화 시나리오 전망의 출수시기 변화

그림 67은 과거 관측기후와 미래 기후에 대하여 CERES-Barley에서 모의된 등숙의 평균 일별 변화를 나타낸 것이다. 그림 67에서 밝은 회색 영역은 RCP8.5 조건에서 등숙의 평균 일별 변화의 범위를 나타낸 것이고, 짙은 회색 영역은 RCP4.5 조건에서의 결과를 나타낸 것이다. 과거 관측기후에서의 생육단계를 기준으로 표시하였다. 과거 관측기후에서 파종 후 200일 (평균적으로 5월 6일) 이후가 되면 보리 알갱이가 단단해지면서 성숙해지는 생육단계 83 (dough development, early dough)에서 92 (Ripening, grain hard)에 도달하는데, 미래 기후변화에서는 파종 후 160일 (4월 5일)에서 180일 (4월 25일) 이후에 벌써 생육단계 83에 도달하였다.

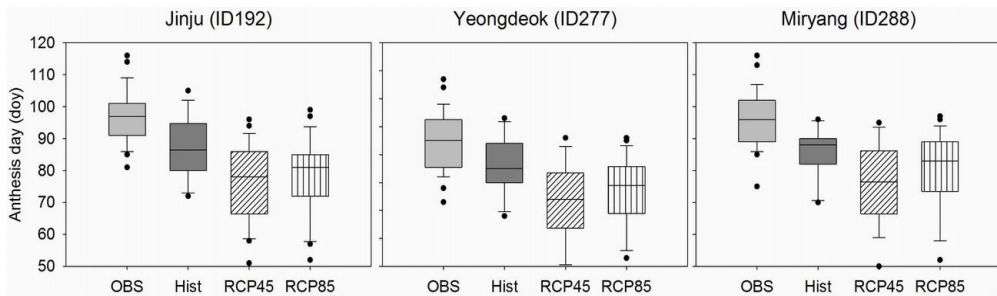


그림 66 진주, 영덕, 밀양 지역에서 KMA-12.5km 기후변화 시나리오 전망의 출수시기 변화

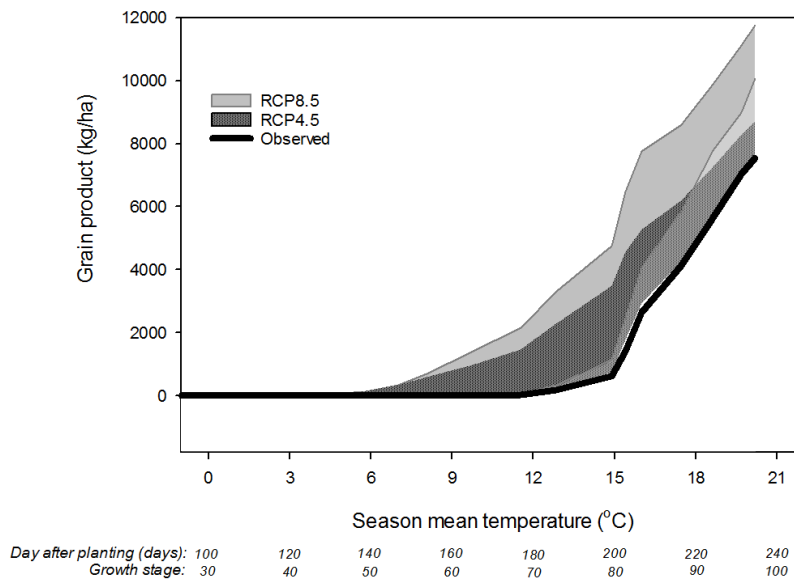


그림 67 CERES-Barley 모의 결과: 관측 과거기후 변화에 대한 일별 등숙 과정과 8개 전지구기후모형의 미래 기후변화 시나리오에 대한 평균 일별 등숙 과정

3.6 주요 과수의 개화시기 변화

3.6.1 주요 과수 재배지역의 과거 관측기간 동안 생물계절모형 검증

국내 주요 과수의 개화시기를 예측하는 모형 중 발아속도모형과 휴면시계모형으로부터 주요 과수의 재배지역에 대하여 개화시기를 예측하고 두 모형의 예측 성능을 비교하였다. 또한 검증된 두 모형으로부터 미래 기후변화 시나리오 전망에 따른 우리나라의 지역별 개화시기 변화와 불확실성을 평가하였다.

3.6.1.1 사과 주요 재배지역의 개화일 변화와 모형의 예측성

그림 68은 휴면시계모형과 발육속도모형으로부터 사과 품종 후지의 주요 재배지역에서 1995년부터 2003년까지의 개화시기를 예측한 결과이다. X축은 사과 품종 후지의 관측 개화일이고 Y축은 과거 관측기간 동안의 기후자료에 의해 예측된 개화일이다. 대부분의 지점에서 두 모형의 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 다소 과소 평가되고 있었다. 표 17은 두 모형의 결정계수 (R^2)로부터 두 모형의 예측성능을 비교하였다. 대부분의 지역에서 휴면시계모형의 결정계수가 발육속도모형의 결정계수보다 높아 휴면시계모형이 발육속도모형보다 예측 성능이 높은 것으로 나타났다. 특히 충주 지역에서 두 모형의 예측 성능이 높게 나타났다. 휴면시계모형은 수원 지역에 위치한 국립원예특작과학원의 포장에서 재배된 사과 품종 후지의 장기간의 개화일 자료에 의해 구축되었는데 충주 지역과 인근 지역에 적용하여도 예측 성능이 의성 (0.47)과 영주 (0.69)를 제외하고 평균 0.75 이상으로 나쁘지 않았다. 선 연구 사례에서도 휴면시계모형이 발육속도모형보다 우수하다고 한 것과 비슷한 결과이다. (Kim et al., 2012; Kwon et al., 2012; Kim et al., 2012).

3.6.1.2 배 주요 재배지역의 개화일 변화와 모형의 예측성

그림 69는 휴면시계모형과 발육속도모형으로부터 배 품종 신고의 주요 재배지역에서 1995년부터 2003년까지의 개화시기를 예측한 결과이다. X축은 주요 재배지역의 배 품종 신고의 관측 개화일이고 Y축은 과거 관측기간 동안의 기후자료에 의해 예

측된 신고의 개화일이다. 휴면시계모형의 경우, 대부분의 지점에서 모형의 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 다소 과소평가되고 있는 반면, 발육속도모형에서는 예측 개화일이 과대평가되었다. 표 18은 두 모형의 결정계수 (R^2)로부터 두 모형의 예측 성능을 비교한 것이다. 사과 개화시기 예측 결과와 마찬가지로, 휴면시계모형의 경우, 대부분의 지역에서 휴면시계모형의 결정계수가 발육속도모형의 결정계수보다 높아 휴면시계모형이 발육속도모형보다 예측 성능이 높은 것으로 나타났다. 특히 나주 지역에서 두 모형의 예측 성능이 높게 나타났는데, 배 품종 신고의 휴면시계모형의 모수도 수원 지역의 국립원예특작과학원에서 장기간 관측된 신고의 개화일로부터 추정된 것을 이용하였다. 나주 등 신고 배 주요 재배지역의 개화시기 예측 능력이 나쁘지 않았다. 특히 사향은 진주 지역에서 모형의 예측 성능이 높지 않았다. 진주 지역의 경우, 나주 지역과 같이 국내 배 품종 신고의 대표 주산지 중의 하나이며 본 연구에서는 만지 지역에 위치한 시험 포장의 관측 개화일을 사용하였다. 수원 지역의 기후자료와 관측 개화일을 기반으로 추정된 모수가 나주 지역 등의 개화시기 예측에서는 좋은 결과를 보였지만 진주 지역의 개화시기 예측에서는 좋은 결과를 보이지 못한 것은 나주와 진주 지역의 지리적 위치 차이에서 비롯된 기후 차이 때문인 것으로 판단된다. 발육속도모형의 결정계수는 0.5 이상을 넘지 않아 대부분의 지역에서 배 품종 신고에 대하여 예측 성능이 높지 않았다.

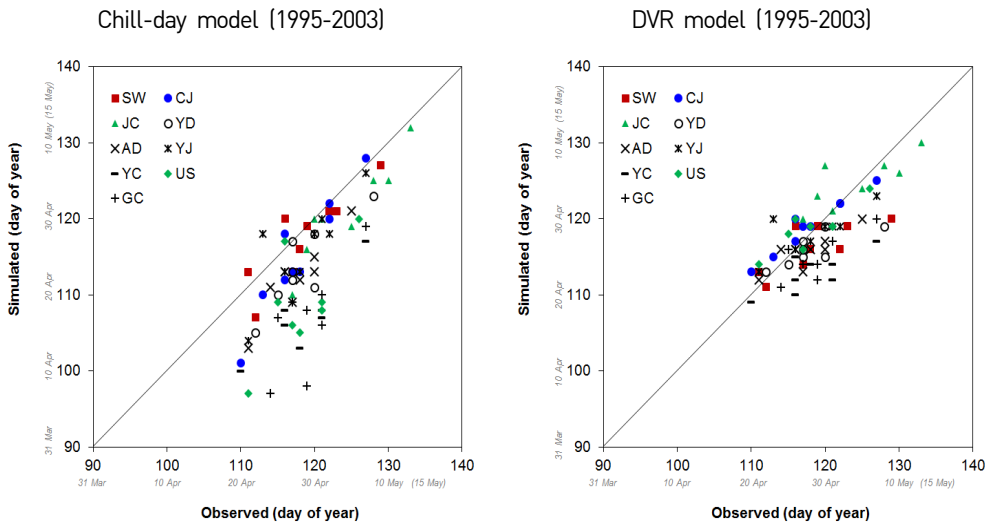


그림 68 관측 개화일과 개화시기 예측 모형에서 추정된 사과 주요 재배지역 (수원, 충주, 제천, 영동, 안동, 영주, 의성, 고창)의 예측 개화시기

표 17 사과 개화시기 예측모형 (휴면시계모형과 발육속도모형)의 성능 비교

Chill-day model		DVR model	
Growing area	R ²	Growing area	R ²
Suwon	0.78	Suwon	0.58
Chungju*	0.9	Chungju	0.94
Jecheon	0.85	Jecheon	0.62
Yeongdong	0.75	Yeongdong	0.64
Andong	0.84	Andong	0.69
Yeongju	0.69	Yeongju	0.59
Yeongcheon	0.77	Yeongcheon	0.61
Uiseong	0.47	Uiseong	0.73
Geochang	0.74	Geochang	0.61

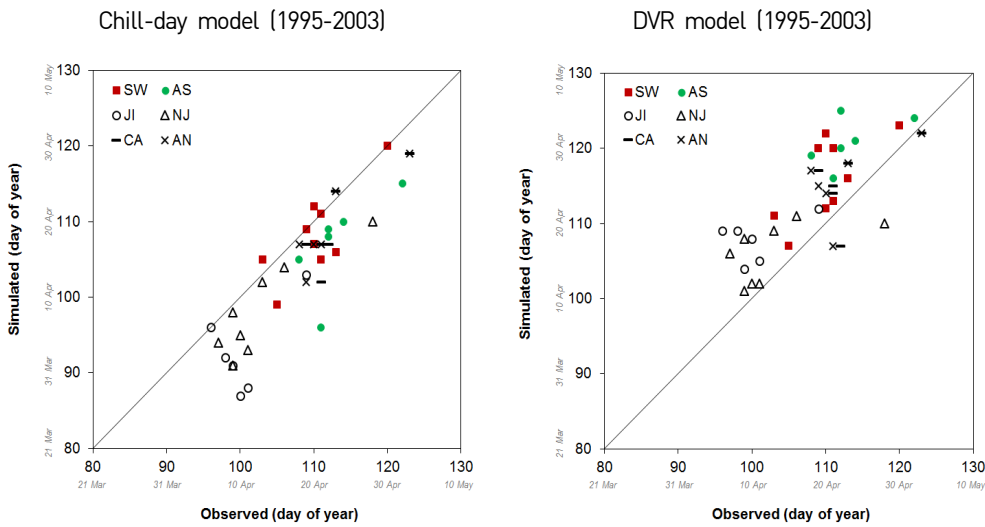


그림 69 관측 개화일과 개화시기 예측 모형에서 추정된 배 주요 재배지역 (수원, 안성, 진주, 나주, 천안, 아산)의 예측 개화시기

표 18 배 개화시기 예측모형 (휴면시계모형과 발육속도모형)의 성능 비교

Chill-day model		DVR model	
Growing area	R ²	Growing area	R ²
Suwon	0.64	Suwon	0.49
Anseong	0.47	Anseong	0.32
Jinju	0.34	Jinju	0.23
Naju*	0.78	Naju	0.33
Cheongan	0.7	Cheongan	0.33
Asan	0.8	Asan	0.35

3.6.1.3 포도 주요 재배지역의 개화일 변화와 모형의 예측성

그림 70은 휴면시계모형과 발육속도모형으로부터 포도 품종 캠벨얼리의 주요 재배지역에서 1995년부터 2003년까지의 개화시기를 예측한 결과이다. X축은 포도 품종 캠벨얼리의 관측 개화일이고 Y축은 과거 관측기간 동안의 기후자료에 의해 예측된 개화일이다. 대부분의 지점에서 발육속도모형의 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 과소평가하는 것으로 나타났다. 휴면시계모형의 경우는 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 다소 과대평가하는 것처럼 보이지만 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 표 19는 두 모형의 결정계수 (R^2)로부터 두 모형의 예측성능을 비교한 것인데, 사과나 배에서와 같이 대부분의 지역에서 휴면시계모형의 결정계수가 발육속도모형의 결정계수보다 높아 휴면시계모형이 발육속도모형보다 예측 성능이 높은 것으로 나타났다.

3.6.1.4 복숭아 개화일 변화와 모형의 예측성

그림 71은 휴면시계모형과 발육속도모형으로부터 복숭아 품종 장호원황도의 주요 재배지역에서 1995년부터 2003년까지의 개화시기를 예측한 결과이다. 복숭아의 경우 여러 지역에 대하여 복숭아의 개화시기 예측 모형의 검증을 적용하지 못한 이유는 앞서 설명한 것과 같이 국립원예특작과학원의 수원 시험장 자료만 수집하였기 때문이다. X축은 복숭아 품종 장호원황도의 관측 개화일이고 Y축은 과거 관측기간 동안

의 기후자료에 의해 예측된 개화일이다. 발육속도모형의 경우, 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 대부분 과소평가하는 것으로 나타난 반면, 휴면시계모형의 경우는 예측 개화일이 관측 개화일에 대하여 다소 과대평가하는 듯 보이지만 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 휴면시계모형의 결정계수는 0.7로 발육속도모형 (0.43)보다 예측 성능이 높은 것으로 나타났다. 이것은 Kim et al. (2012)의 결과와 같은 연구 결과를 보였다.

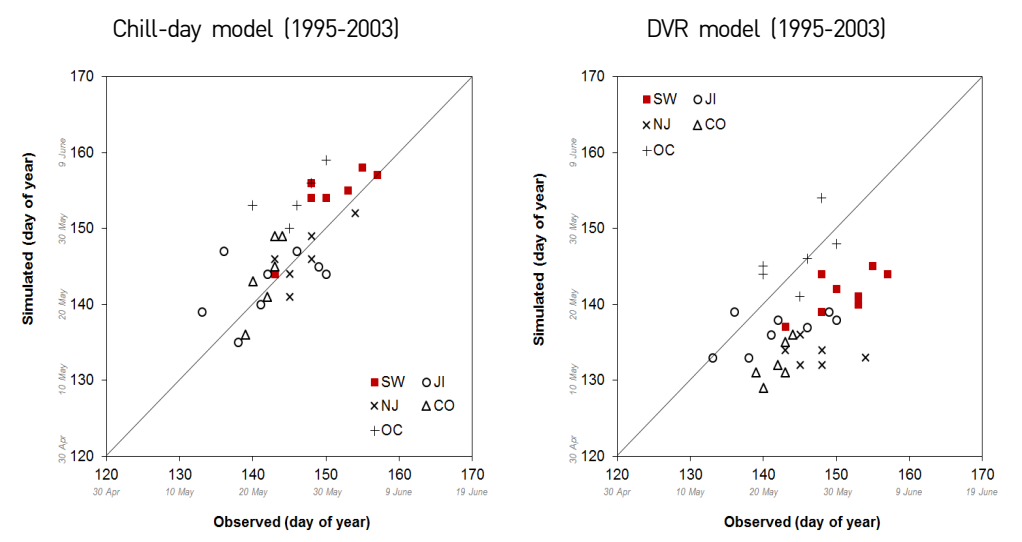


그림 70 관측 개화일과 개화시기 예측 모형에서 추정된 포도 주요 재배지역 (수원, 진주, 칠곡, 옥천, 나주)의 예측 개화시기

표 19 포도 개화시기 예측모형 (휴면시계모형과 발육속도모형)의 성능 비교

Chill-day model		DVR model	
Growing area	R ²	Growing area	R ²
Suwon	0.67	Suwon	0.47
Jinju	0.22	Jinju	0.36
Chilgok*	0.74	Chilgok	0.56
Okcheon	0.39	Okcheon	0.29
Naju	0.63	Naju	0.08

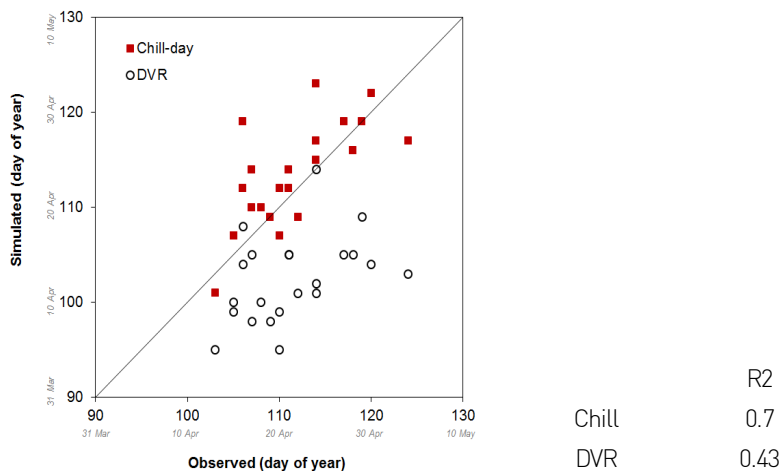


그림 71 수원지역의 복숭아 관측 개화일과 개화시기 예측 모형에서 추정된 복숭아 예측 개화시기

3.6.2 미래 기후변화 시나리오 전망에 따른 주요 과수 개화일 변화

휴면시계모형과 발육속도모형에 56개 기상관측소의 미래 기후변화 시나리오 전망 자료를 입력하여 각 지점에 대한 주요 과수의 개화시기를 예측하고 우리나라 대표 유역별 로 미래 기후변화에 따른 개화시기의 변화를 표출하였다.

3.6.2.1 사과 개화일 변화와 불확실성

그림 72는 휴면시계모형에서 예측된 한강 유역의 미래 개화일 변화이고, 그림 73은 발육속도모형에서 출력된 한강 유역의 미래 개화일 변화이다. 특히 사향은 휴면시계모형의 경우, 한강 유역의 RCP4.5뿐만 아니라 RCP8.5 미래 기후변화 시나리오 전망에서 미래 사과 품종 후지의 개화일은 지연될 것으로 예측하였으며, 특히 개별기후모형 INMCM4에서는 14일 이상 지연될 것으로 전망하였다. 그러나 발육속도모형에서 사과 품종 후지의 미래 개화시기는 한강 유역에서 빨라질 것으로 전망하였다. 그림 74와 그림 75는 낙동강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형에서 전망된 사과 품종 후지의 미래 개화일 변화이다. 후지의 미래 개화시기는 두 모형에서 모두 단축될 것으로 전망되었다.

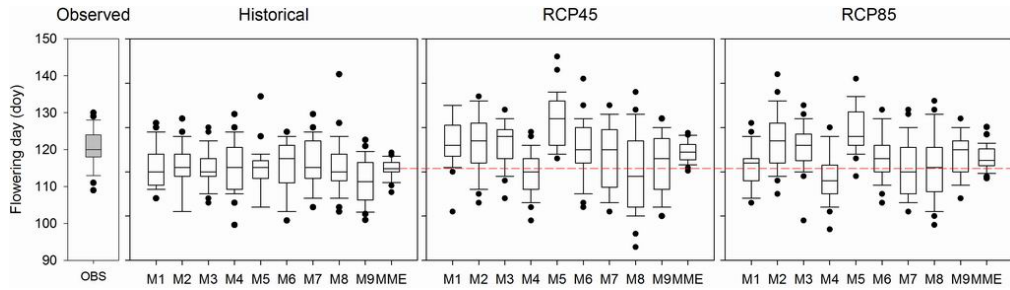


그림 72 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 사과 개화시기 변화

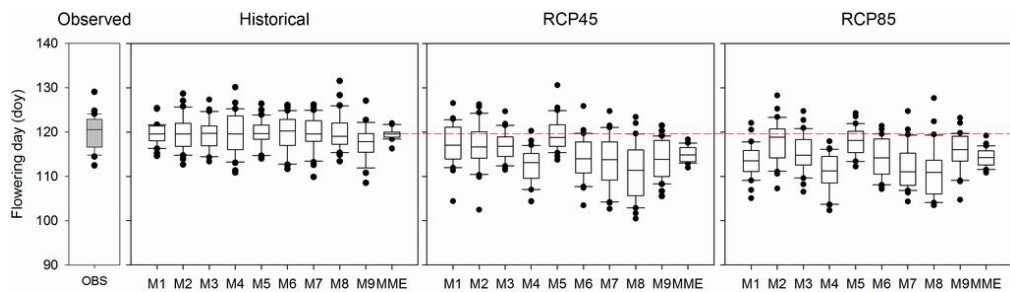


그림 73 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 사과 개화시기 변화

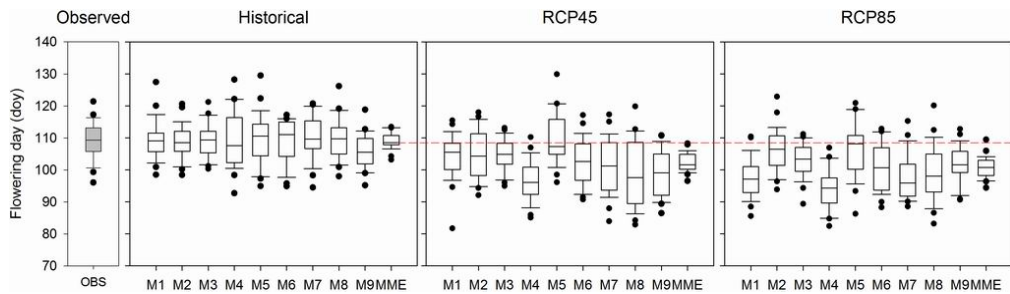


그림 74 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 사과 개화시기 변화

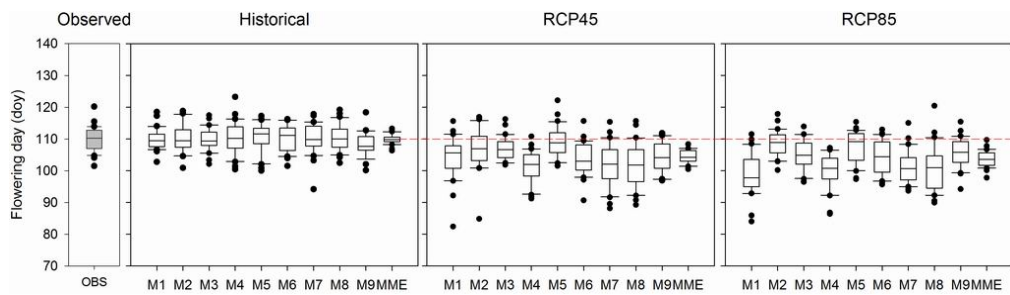


그림 75 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 사과 개화시기 변화

그림 76은 휴면시계모형에서 예측된 금강 유역의 미래 개화일 변화이고, 그림 77은 발육속도모형에서 출력된 금강 유역의 미래 개화일 변화이다. 특이 사항은 개별기후모형 HadGEM-CC에서 전망한 개화시기가 다른 개별기후모형에서 예측한 개화시기보다 평균 5일이 단축되는 것으로 나타난 반면, 개별기후모형 INMCM4에서 전망한 미래 개화시기는 과거와 비교하여 지연 혹은 단축 경향이 나타나지 않았다. 이러한 경향은 RCP4.5와 RCP8.5 모두에서 비슷하게 나타났다. 그림 78과 그림 79는 섬진-영산강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형에서 전망된 미래 개화일 변화인데, 역시 개별기후모형 INMCM4에서 전망한 후지의 미래 개화시기는 과거와 비교하여 지연 혹은 지연 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았다.

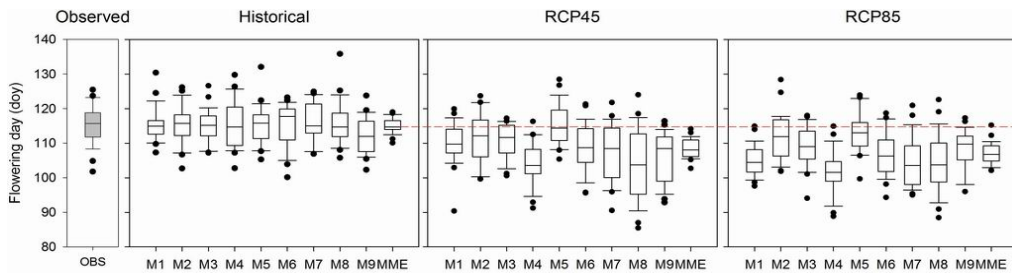


그림 76 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 사과 개화시기 변화

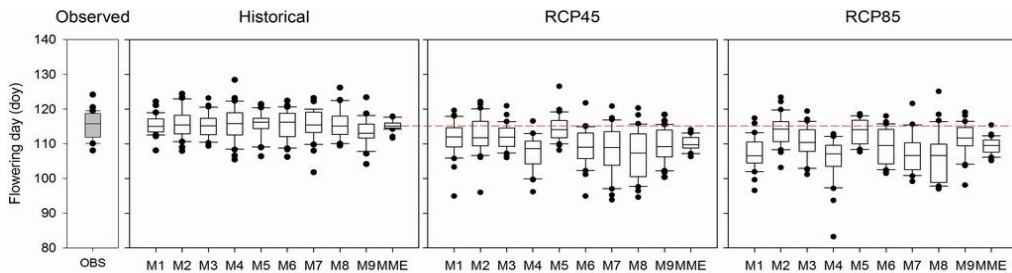


그림 77 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 사과 개화시기 변화

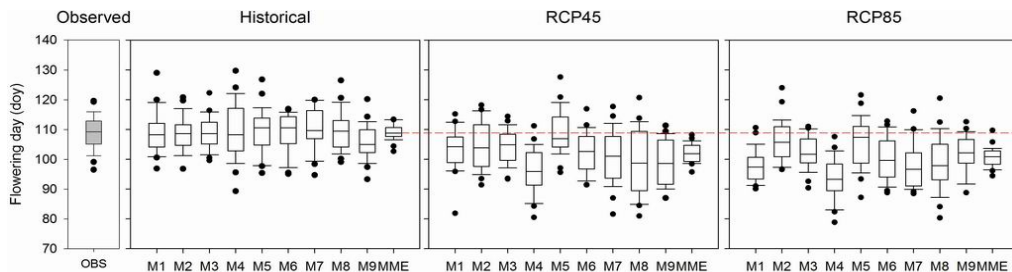


그림 78 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 사과 개화시기 변화

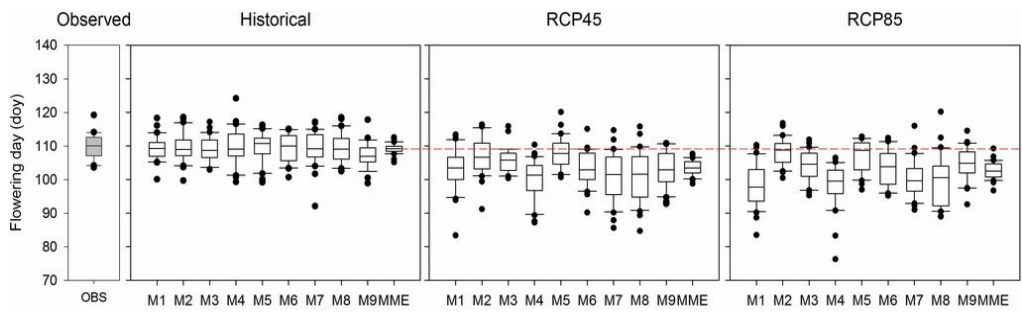


그림 79 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 사과 개화시기 변화

3.6.2.2 배 개화일 변화와 불확실성

그림 80은 휴면시계모형에서 예측된 한강 유역의 배 품종 신고의 미래 개화일 변화이고, 그림 81은 발육속도모형에서 출력된 한강 유역의 미래 개화일 변화이다. 특히 사항은 금강과 섬진-영산강 유역에서 사과의 개화일 전망과 유사하게 개별기후모형 INMCM4의 미래 개화시기의 변화가 크지 않은 것으로 전망되었다. 그림 82와 그림 83은 낙동강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형에서 전망된 배 품종 신고의 미래 개화일 변화이다. 특히 사항은 휴면시계모형에서 개별기후모형 INMCM4의 미래 개화시기를 제외하고 대부분의 개별기후모형은 신고의 미래 개화시기가 단축될 것으로 전망하였다. 발육속도모형의 경우, 단축되기는 하지만 단축의 정도가 크지 않았고 오히려 GFDL-ESM2G와 GFDL-ESM2M, INMCM4에서 전망한 신고의 미래 개화시기는 지연되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 RCP4.5와 RCP8.5 두 시나리오에서 비슷하게 나타났다.

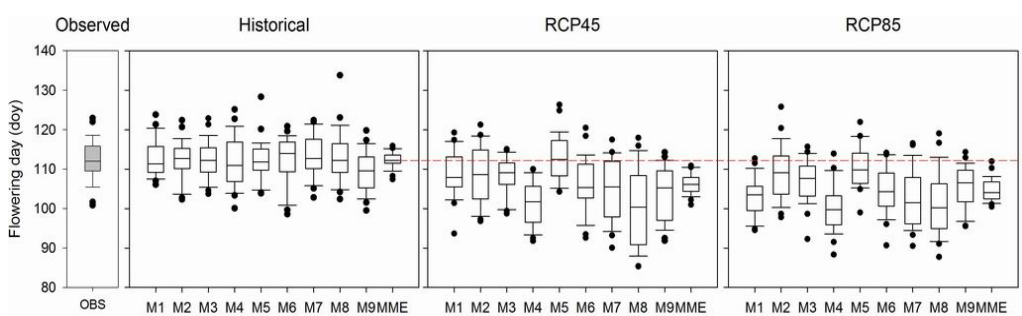


그림 80 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 배 개화시기 변화

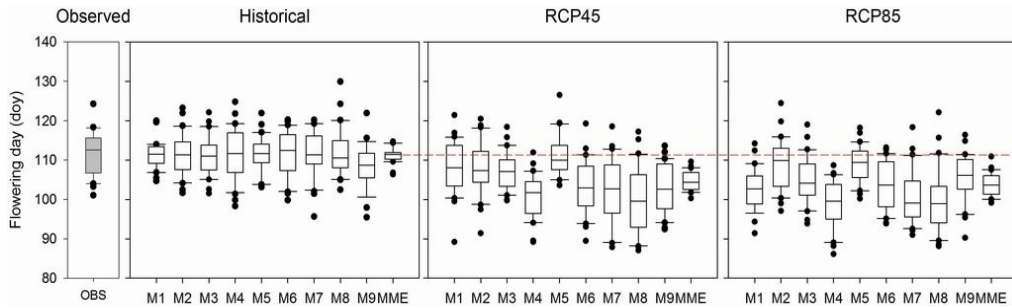


그림 81 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 배 개화시기 변화

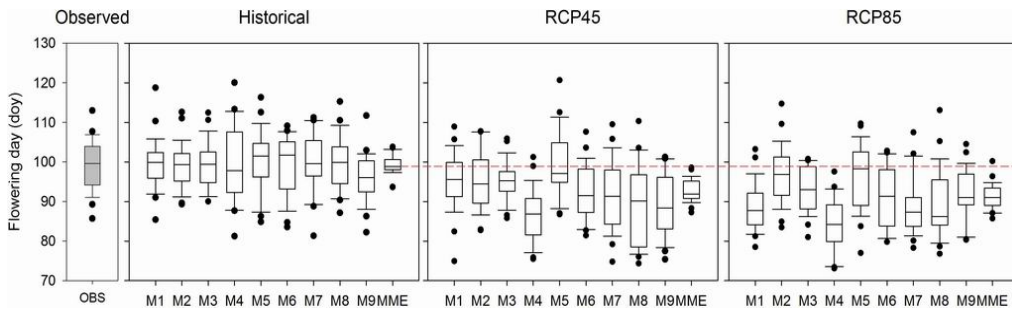


그림 82 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 배 개화시기 변화

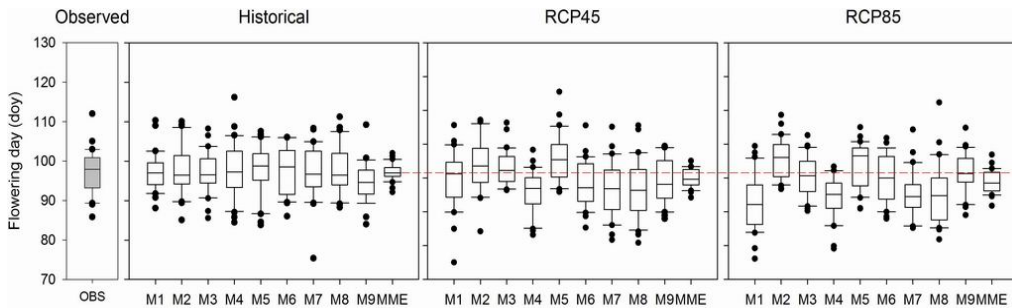


그림 83 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 배 개화시기 변화

그림 84는 휴면시계모형에서 예측된 금강 유역의 배 품종 신고의 미래 개화일 변화이고, 그림 85는 발육속도모형에서 출력된 금강 유역의 미래 개화일 변화이다. 특이 사항은 개별기후모형 HadGEM-CC에서 전망한 개화시기가 다른 개별기후모형에서 예측한 개화시기보다 단축 정도가 컸고, 개별기후모형 INMCM4에서 전망한 미래 개화시기는 과거와 비교하여 지연 혹은 단축 경향이 나타나지 않았다. 이러한 경향은 RCP4.5 와 RCP8.5 모두에서 비슷하게 나타났다. 또한 그림 86과 그림 87은 섬진-

영산강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형에서 전망된 배 신고 품종의 미래 개화일 변화인데, 개별기후모형 INMCM4에서 전망한 신고의 미래 개화시기는 과거와 비교하여 단축 혹은 지연 경향이 뚜렷하게 나타나지 않았을 뿐만 아니라 휴면시계모형에서 전망한 INMCM4의 신고 개화시기는 다른 개별기후모형의 개화시기와 다르게 다소 지연되는 것으로 전망되었다.

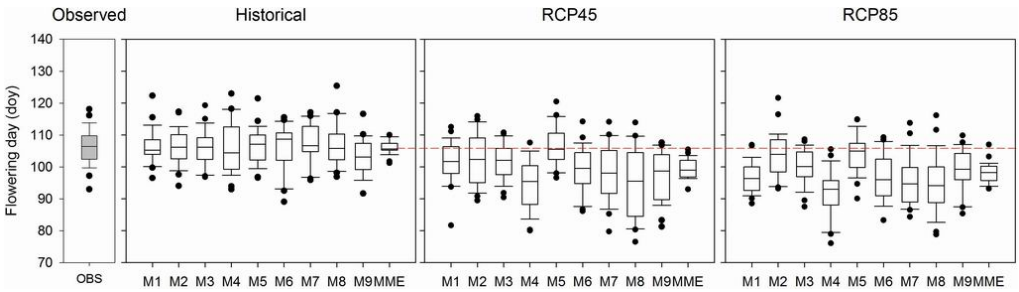


그림 84 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 배 개화시기 변화

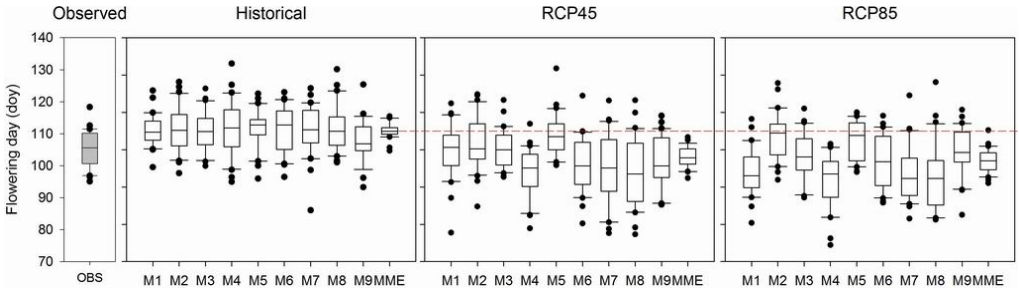


그림 85 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 배 개화시기 변화

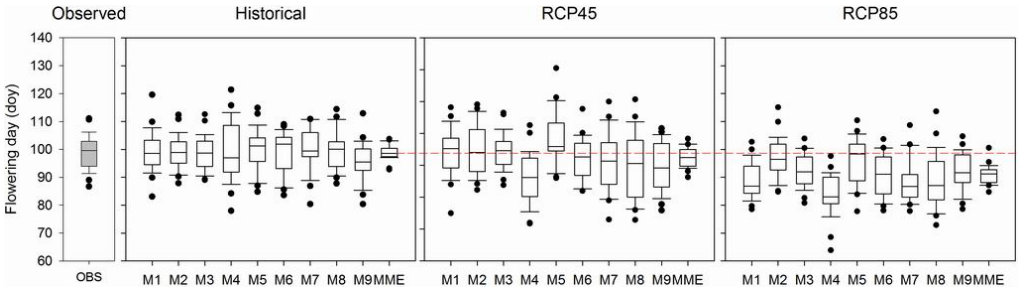


그림 86 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 배 개화시기 변화

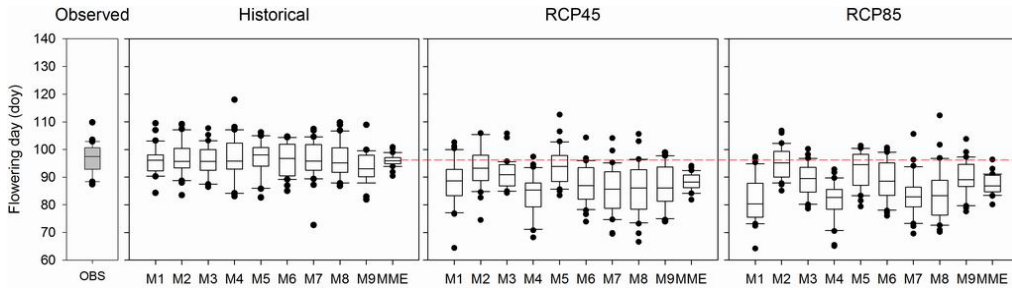


그림 87 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 배 개화시기 변화

3.6.2.3 포도 개화일 변화와 불확실성

그림 88은 휴면시계모형에서 예측된 한강 유역의 포도 품종 캠벨얼리의 미래 개화일 변화이고, 그림 89는 발육속도모형에서 출력된 금강 유역의 미래 개화일 변화이다. 두 개화시기 예측 모형 모두에서, 개별 기후모형 INMCM4에서 전망한 캠벨얼리의 미래 개화시기는 과거와 비교하여 지연 혹은 단축 경향이 나타나지 않았고, 오히려 다른 개별 기후모형과 다르게 다소 지연되는 것으로 전망되었다. 이러한 경향은 RCP4.5 와 RCP8.5 모두에서 비슷하게 나타났으며 나머지 3개 유역에서 모두 비슷하게 나타났다. 그림 90과 그림 91는 낙동강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형에서 전망된 캠벨얼리의 미래 개화일 변화이고 그림 92와 그림 93는 금강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형의 캠벨얼리의 미래 개화시기 전망이다. 그림 94와 그림 95는 섬진-영산강 유역에서 휴면시계모형과 발육속도모형의 캠벨얼리의 미래 개화시기를 전망한 결과이다.

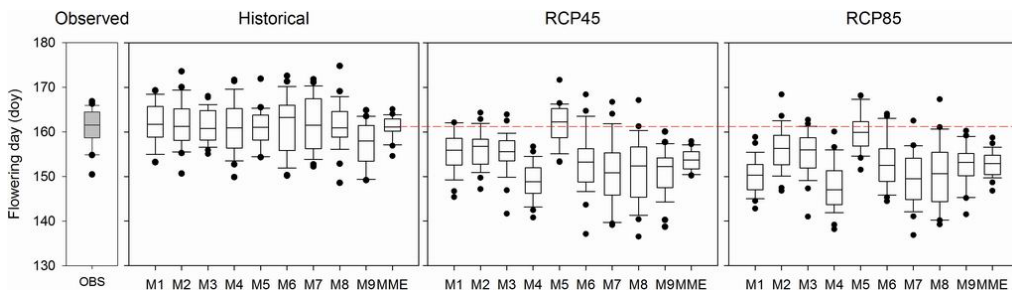


그림 88 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 포도 개화시기 변화

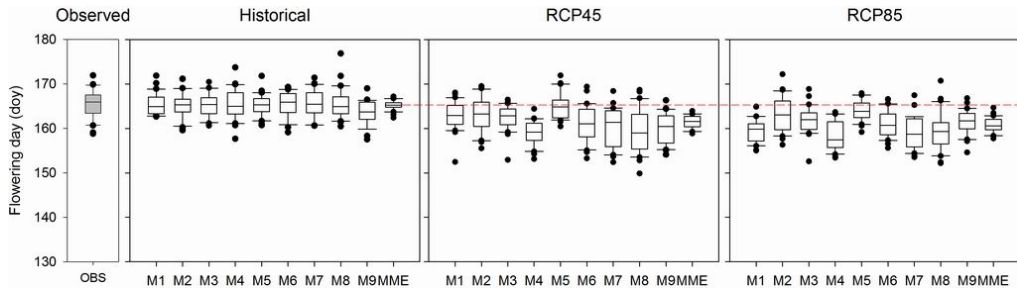


그림 89 한강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 포도 개화시기 변화

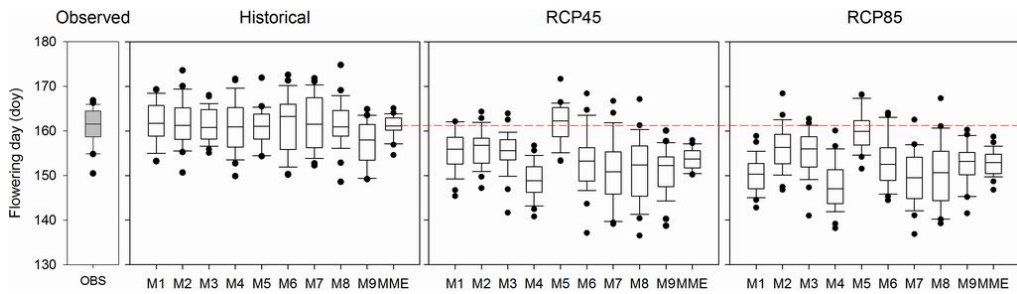


그림 90 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 포도 개화시기 변화

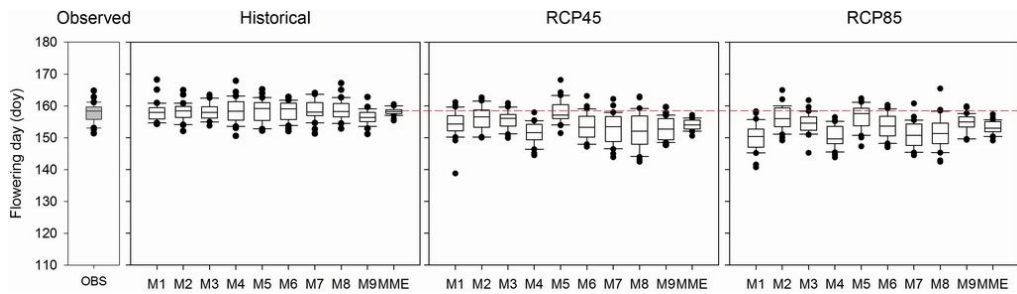


그림 91 낙동강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 포도 개화시기 변화

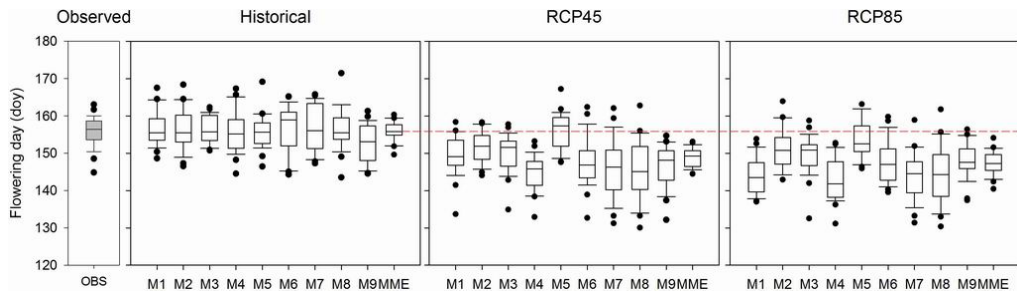


그림 92 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 포도 개화시기 변화

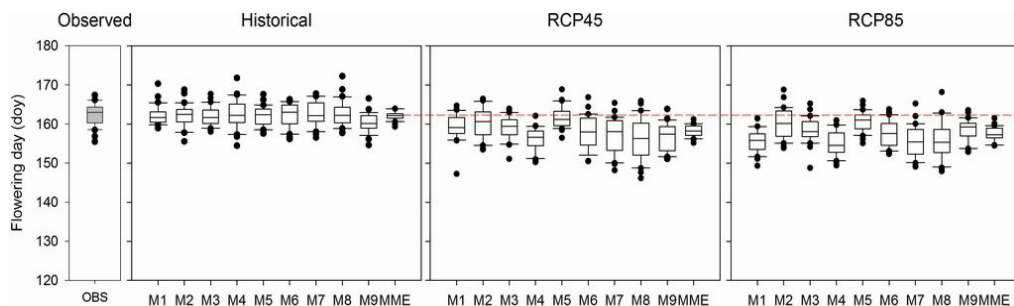


그림 93 금강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도계모형 기반의 포도 개화시기 변화

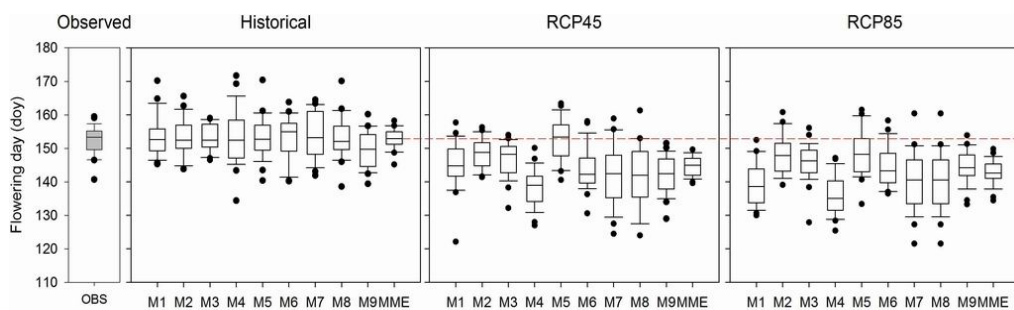


그림 94 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 휴면시계모형 기반의 포도 개화시기 변화

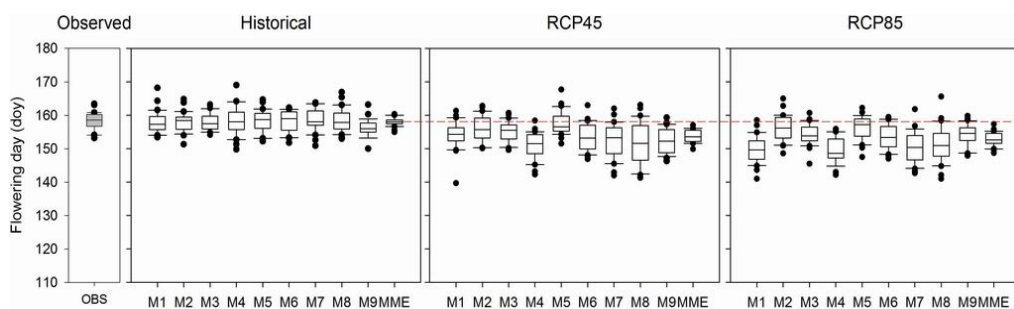


그림 95 섬진-영산강 유역에서 기후변화 시나리오 전망에 따른 발육속도모형 기반의 포도 개화시기 변화

3.6.3 기후변화에 따른 주요 과수의 개화일 변화속도

그림 96은 주요 과수의 개화시기가 얼마나 빨리 혹은 얼마나 늦어지는지에 대한 상대적 변화율을 계산한 결과이다. RCP4.5 미래 기후변화 시나리오에서 사과, 배, 포도, 복숭아의 개화시기는 평균 18% 빨라지는데 특히 포도가 23%로 다른 과수에 비해 변화속도 빠른 것으로 나타났고 사과가 15%로 상대적 변화속도가 다른 과수에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. 그러나 RCP8.5 미래 기후변화 시나리오에서는 사과와 복숭아의 변화속도가 52%로 급격하게 빠른 속도로 변화할 것으로 전망된 반면 포도의 상대적 변화속도는 21%로 다른 과수의 변화속도에 비해 낮게 전망되었다.

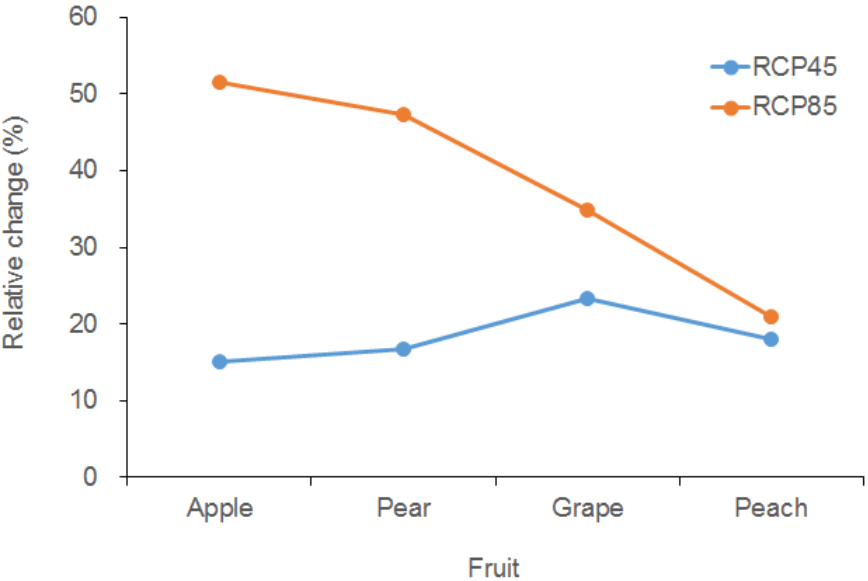


그림 96 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 따른 주요 과수의 개화시기 변화율

4. 결론 및 향후계획

4.1 기후변화에 따른 보리의 작물반응/작물영향

보리와 같은 겨울작물의 경우 생육기간 전반에는 월동기간 중에 저온기간을 지나게 된다. 월동기간 중 저온기간 혹은 저온량은 겨울작물의 생육단계 혹은 생육시기, 수량구성요소에 영향을 줄 수 있다. 대구 지역에서는 출수시기에 미치는 기온의 영향이 적었지만 진주와 나주 지역에서는 생육기간 전반 동안의 일별 최고기온이 일별 최저기온보다 출수시기에 영향을 미치는 것으로 나타났는데 겨울기간 동안의 저온보다는 고온 영향이 생육단계 전개에 더 영향을 주기 때문이다. 수량의 경우는 대구, 진주, 나주 지역에서 생육기간 후반 동안의 일별 최저기온이 수량 변화에 더 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타난 반면 수원 지역에서 겉보리 수량 변화에는 생육기간 후반 동안의 일별 최고기온이 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 익산 지역은 다른 4지역과 다른 결과를 보였다. 익산을 제외한 다른 4지역에서는 생육기간 후반 동안의 일별 기온 상승에 따라 수량이 감소한 반면 익산에서는 일별 기온 상승에 따라 수량도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 익산시 기후자료를 이용하지 못하고 인근 기상관측소 자료를 사용했기 때문에 결론을 내리기 어려울 것으로 판단된다. 추후 지역적응 및 작황시험장과 가장 가까운 기상관측소의 기후자료 수집이 필요할 것이다. 또한 생육기간 전반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온이 출수시기와 반응하는 기온 범위는 4°C 범위 내에서 변화하였다. 생육기간 후반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온이 수량 변화에 영향을 미치는 기온 범위는 평균 2°C 범위 내에서 영향을 미치는 것으로 나타나서 기후변화가 생육단계 전개에 미치는 영향보다는 수량구성요소에 미치는 영향이 더 큼을 예상할 수 있다.

Kim et al. (2013)에 의하면, 출수기가 파종기의 연장 및 단축과 상관없이 비슷하다고 하였는데, 이유는 겨울작물임을 고려할 때, 생장한계온도 기후 아래로 내려가는 날이 많은 겨울의 경우, 기후 자체가 생장의 영향을 적게 주어 결과적으로 출수기와 생리적 성숙기는 비슷한 시기에 나타난 것으로 추정한다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 기후변화 시나리오 전망에서 출수기가 단축되는 것으로 나타나 조금 다른 양상을 보였는데, 그 이유는 본 연구에서는 9개 개별기후모형을 분석에 이용하였기 때문인 것으로 판단된다. 최근 수행되고 있는 많은 연구에 다중앙상블 기후모형뿐만 아니

라 다중앙상블 모형 시뮬레이션이 활용될 것으로 예상된다. 파종일 변경 시나리오를 배제한 상태에서 이산화탄소 배출 증가 시나리오 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오에서 RCP8.5의 출수시기는 빨라졌고 수량 증가 효과도 RCP8.5가 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 장흥, 해남 지역에서는 출수시기는 빨라졌지만 수량은 감소하는 것으로 나타났다. 최근 따뜻해진 겨울로 인해 이들 지역에서 파성소거에 필요한 저온노출기간 부족으로 수량이 감소한 것으로 판단된다. Kim et al. (2013)은 조기 파종에 의한 증수 효과는 파종 지연에 의한 감수 효과보다 클 것으로 예상된다고 하였으므로 파성소거에 필요한 저온노출기간을 충분히 확보할 수 있도록 파종일을 변경하면 장흥, 해남과 같은 남부지역의 기후변화에 따른 작물모형 시뮬레이션에서 증수 효과를 가져 올 수 있을 것으로 판단된다. 또한 겉보리 안전재배한계 구분에 성장한계온도의 지속출현빈도 보다는 저온노출기간의 변동 정보가 더 유용할 것으로 판단된다.

4.2 기후변화에 따른 주요 과수의 작물반응/작물영향: 개화시기 변화

주요 과수작물의 재배지역에서 발육속도모형 기반의 개화시기 예측 모형의 성능이 휴면시계모형보다 다소 낮게 평가되었다. 그 이유는 발육속도모형의 기온반응식에 입력되는 상수가 모두 1990년 초반에 개발 및 추정된 것으로, 경험적인 기온반응식과 상수에 의해 예측되는 발육속도모형이 기후변화에 의한 기온에 정확하게 반응하지 못하는 것으로 판단된다. 그러므로 향후 연구에서는 변화된 기후에 대한 발육속도모형의 기온반응식 및 상수에 대해 검증하고 데이터베이스화하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 주요 과수의 개화시기 변화율은 이산화탄소 배출 증가 시나리오 RCP4.5에서는 포도 > 복숭아 > 배 > 사과 순으로 기후변화에 따른 포도의 개화시기 변화율이 크고 사과의 개화시기 변화율이 크지 않을 것으로 전망되었다. 그러나 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 의해서는 사과 > 배 > 포도 > 복숭아 순으로 사과의 개화시기 변화율이 급격히 증가하였고 복숭아 개화시기 변화율이 크지 않을 것으로 전망되어 주요 과수들 중에서 사과의 개화시기가 기후변화에 민감할 것으로 예상된다.

5. 국문적요

미래 기후변화에 대한 농업 생산성 및 취약성에 대한 영향평가를 위해서는 첫 번째 그 지역의 기후자원을 분석·이해하고 분석된 기후 및 이상기후·기상 이벤트에 따른 작물의 반응을 이해하는 일이 우선되어야 할 것이다. 두 번째는 이러한 기후자원 및 기후변화에 대한 작물의 반응을 작물모형에 반영하여 모의하는 일이다. 세 번째는 이렇게 작물의 반응이 반영된 작물모형과 기후모형에서 생산된 미래 기후변화 시나리오 전망과 결합하여 기후변화에 대한 작물반응을 전망하고 평가하는 것이다. 본 연구에서는 보리에 대하여 과거 기후변화에 따른 생육기간 동안의 출수시기와 수량구성요소의 변화를 분석하였다. 과거 관측기간, 기후모형의 기후변화 시나리오 전망의 과거기간 및 미래기간에 대하여 보리의 월동기간 중 생장한계온도 지속출현일과 빈도를 계산하였다. 이것을 보리 안전재배한계 구분도와 결합하여 보리 안전재배에 대한 잠재 위험정보를 표출하였다. 작물모형 시뮬레이션을 통해 기후변화에 따른 보리의 출수와 잠재 수량의 변화를 평가하였다. 또한 다년생 과수 작물의 개화시기 예측모형 구동을 통해 주요 재배지역에서 기후변화에 따른 개화시기의 변화 및 불확실성을 평가하였다.

연구 결과, 대구 지역에서 생육기간 전반 동안의 일 최저기온이 출수시기 변화에 미치는 영향이 일별 최고기온의 영향보다 크게 나타났다. 진주와 나주에서는 생육기간 전반 동안의 일별 최고기온이 출수시기 변화에 미치는 영향이 더 크게 나타나서 월동기 고온이 생육단계 전개에 있어 저온보다 영향이 큰 것으로 나타났다. 수량의 경우, 대구, 진주, 나주 지역에서 생육기간 후반 동안의 일별 최저기온이 겉보리 수량 변화에 더 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타난 반면 수원 지역에서는 겉보리 수량 변화에는 생육기간 후반 동안의 일별 최고기온이 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 익산 지역은 다른 4지역과 다른 결과를 보였는데, 익산을 제외한 다른 4지역에서는 생육기간 후반 동안의 일별 기온 상승에 따라 수량이 감소하였다. 그러나 익산에서는 생육기간 후반 동안의 일별 기온 상승에 따라 수량도 증가하는 것으로 나타났다. 생육기간 전반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온이 출수시기와 반응하는 기온 범위는 4°C 범위 내에서 변화하였다. 생육기간 후반 동안 일별 최고기온과 일별 최저기온이 수량 변화에 영향을 미치는 기온 범위는 평균 2°C 범위 내에서 영향을 미치는 것

으로 나타났다. 또한 대부분의 겉보리 재배지역에서 저온노출기간이 감소한 것으로 나타났다. 과거 관측기간과 개별기후모형의 과거기간 및 미래기간에 대하여 CERES-Barley 모형을 구동한 결과, 파종일 변경 시나리오가 배제된 상태에서도 이산화탄소 배출 증가 시나리오에 의한 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오에서 출수시기는 빨라졌으며 수량 증가 효과는 RCP4.5 보다 RCP8.5의 기후변화 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 장흥, 해남 지역에서는 RCP4.5와 RCP8.5 기후변화 시나리오에서 수량 감소가 전망되었다.

주요 과수작물의 재배지역에서 휴면시계모형 기반의 개화시기 예측 성능이 발육속도모형보다 높게 평가되었다. 기후변화에 따른 주요 과수의 개화시기 변화율은 이산화탄소 배출 증가 시나리오 RCP4.5에서는 포도 > 복숭아 > 배 > 사과 순으로 기후변화에 따른 포도의 개화시기 변화율이 크고 사과의 개화시기 변화율이 크지 않을 것으로 전망되었다. 그러나 RCP8.5 기후변화 시나리오 전망에 의해서는 사과 > 배 > 포도 > 복숭아 순으로 사과의 개화시기 변화율이 급격히 증가하였고 복숭아 개화시기 변화율이 크지 않을 것으로 전망되어 주요 과수들 중에서 사과의 개화시기가 기후변화에 민감할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- 국립농업환경과학원, 1990: 주요 과수의 개화시기 반응식
- 권익석, 김익제, 이기열, 2012: 이상기상에 대응한 복숭아 수분수 선발. 원예과학기술지 제30권, 101-110.
- 김성재, 박태양, 김성민, 김상민, 2012: 기후변화에 따른 농업생산기반 재해 취약성 평가를 위한 대리변수 선정. 한국 관개 배수 논문집, 제18권, 제2호.
- 농림축산식품부, 2014: 농업이상기후지수 개발, 146pp.
- 농업기술연구소, 1990: 주요과수재배지대의 기후특성. 농촌진흥청, 205pp.
- 농촌진흥청, 2012: 보리의 생존전략-식량부터 공익적 가치까지의 팔방미인. RDA Interrobang 70, 1-20.
- 농촌진흥청, 1989: 농업지대별 작목배치도. 농촌진흥청, 741pp.
- 양정석, 박진혁, 김남기, 2012: 경향성 분석을 통한 가뭄취약성 지수의 개발. 대한토목학회논문집, 제32권, 185-192.
- 이상규, 최장선, 최준명, 이희주, 박수형, 도경란, 2013: 이상기상 조건이 배추의 생육 및 세포 조직에 미치는 영향. 시설원예·식물공장 제22권, 87-90.
- 이정택, 2011: 기후변화와 농업생태계. 기후변화 교과서, 도서출판 도요새, 315-358.
- 임상준, 박승우, 강문성, 1997: 이상기후에 따른 농작물의 수확량 및 재해발생 확률의 추정. 한국농공학회지 39 (6), 31-40.
- 임정남, 1992: 지구온난화가 우리나라 농업생태계에 미치는 영향. 생태계 위기와 한국의 환경 문제, 도서출판 따님. 103~123.
- 조재필, 2013: 불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가, APEC 기후센터, 36pp.
- 하용웅, 2000: 보리, 농촌진흥청 작물시험장, 거목문화사, 81-82.
- 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.
- Ando, T., 1969: Weather influence on agricultural productivity. Journal of the Agricultural

- meteorology of Japan, 25(2), 132-133.
- Cesaraccio, C., D. Spano, R. L. Snyder, and P. Duce, 2004: Chilling and forcing model to predict bud-burst of crop and forest species. *Agricultural and Forest Meteorology* 126, 1-13.
- Choi, G. Y., W. T. Kwon, K. O. Boo, and Y. M. Cha, 2008: Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the republic of Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, 43, 681-700.
- Chung, U., J. Cho, and E. J. Lee, 2015: Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 17, 108-125.
- Godwin, D., U. Singh, J. T. Ritchie, and E. C. Alocilja, 1992: A users guide to CERES-Rice, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL.
- 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 & Earth System Sciences* 16, 3383-3390.
- Heo, I. H., S. H. Lee, and W. T. Kwon, 2006: The characteristics of summer and winter unusual temperature distribution in Korea. *Proceedings of the Spring Meeting of the Korea Meteorological Society*, 40-41.
- Holden, N. M., A. J. Brereton, R. Fealy, and J. Sweeney, 2003: Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology* 116, 181-196.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijsman, G. Y. Tsuji, and J. Koo, 2010: Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CDROM], University of Hawaii, USA.
- Jin, D., D. Ge, H. Chen, and J. Feng, 1995: Effects of climate change on rice production and strategies for adaptation in south China. In: C. Rosenzweig, J.T. Ritchie, J.W. Jones, G.Y. Tsuji and P. Hildebrand, Editors, *Climate change and Agriculture: Analysis of Potential International Impacts*, American Society of Agronomy.
- Jones, C. A., and J. R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A & M University Press, College Station, Texas.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* 18, 235-265.

- Jung, J. E., E. Y. Kwon, U. Chung, and J. I. Yun, 2005: Predicting cherry flowering date using a plant phenology model. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 7, 148-155.
- Kim., D. J., K. H. Moon, and J. I. Yun, 2014: Drought index development for agricultural drought monitoring in a catchment. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16, 359-367.
- Kim, D. J., J. H. Roh, and J. I. Yun, 2013: Grain yield response of CERES-Barley adjusted for domestic cultivars to the simultaneous changes in temperature, precipitation, and CO2 concentration. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 15, 312-319.
- Kim, D. J., J. H. Kim, J. H. Roh, and Jin 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. 161-169.
- Kim, D. J., S. O. Kim, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2013: An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate condition. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 14(3), 132-141. <http://dx.doi.org/10.5532/KJAFM.2012.14.3.132>
- Kim, S. O., J. H. Kim, U. Chung, S. H. Kim, G. H. Park, and J. I. Yun, 2009: Quantification of temperature effects on flowering date determination in Niitaka Pear. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 11, 61-71.
- Kim Jin-hee, 2010: Freeze risk assessment for 'Changhowon Hwangdo' peach trees using a dormancy clock model during winter season. MS thesis, Kyunghee University. 65pp.
- Kim Soo-Ok, 2012: Flowering date prediction for pear orchards based on site-specific temperature estimation in cold lake areas. PhD dissertation, Kyunghee University. 92pp.
- Kweon, H. J., D. H. Sagon, Y. Y. Song, M. Y. Park, S. I. Kwon, and M. J. Kim, 2013: Chilling requirement for breaking of internal dormancy of Main Apple cultivars in Korea. Korean Journal of Horticulture Science Technology 31. 666-676. DOI <http://dx.doi.org/10.7235/hort.2013.12206>.
- Kwon, E. Y., G. C. Song, and J. I. Yun, 2005: Prediction of dormancy release and bud burst in Korean grapevine cultivars using daily temperature data. K 7, 185-191.
- Kwon, E. Y., J. E. Jung, U. Chung, S. J. Lee, G. C. Song, D. G. Choi, and J. I. Yun, 2006: A thermal time-driven dormancy index as a complementary criterion for grape vine

- freeze risk evaluation. Korean 8, 1-9.
- Kwon, Y. S., S. O. Kim, H. H. Seo, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: Geographical Shift in Blooming Date of Kiwifruits in Jeju Island by Global Warming. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 14, 179-188.
- Lee, J. G., Y. J. Kim, and S. H. Jeong, 2010: The climatological regional characteristics of the occurrence of extraordinary temperature events associated with crop cultivation. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 12, 157-172.
- Lee, T., J. Y. Choi, S. H. Yoo, S. H. Lee, and Y. G. Oh, 2012: Analyzing consumptive use of water and yields of paddy rice by climate change. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 54(1), 47-54.
- Lee, H. S., J. H. Kim, and J. I. Yun, 2014: Recent trends in blooming dates of spring flowers and the observed disturbance in 2014. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16, 396-402.
- Lin E., W. Xiong, H. Ju, Y. L. Xu, Y. Li, L. P. Guo, and L. Y. Xie, 2005: Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B360, 2149-2154.
- Ministry of the Environment, Japan, 2009: Global warming impact on Japan -Long-term climate stabilization levels and impact risk assessment-. S-4 Comprehensive assessment of climate change impacts to determine the dangerous level of global warming and appropriate stabilization target of atmospheric GHG concentration. Second Report.
- Park, J. H., M. S. Kang, I. H. Song, 2012: Bias Correction of RCP-based Future Extreme Precipitation using a Quantile Mapping Method; for 20-Weather Stations of South Korea. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, 54, 133-143. doi:<http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2012.54.6.133>
- Ritchie, J. T., and S. Otter. 1985. Description and performance of CERES-Wheat: A User-oriented wheat yield model. p. 159-175. In ARS Wheat Yield Project. ARS-38. National Technology Information Service, Springfield, Missouri.
- Ritchie, J. T., U. Singh, D. C. Godwin, and W. T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. p. 79-98. In: [G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, and P. K. Thornton, Editors]. Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Nether.
- Sharpley, A. N., and J. R. Williams, 1990: EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation, Technical Bulletin No. 1768. USDA-ARS, 235pp.

- Shim, K. M., Y. S. Kim, M. P. Jung, I. T. Choi, and S. H. Min, 2014: Agro-climatic zonal characteristics of the frequency of abnormal duration of sunshine in South Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 16, 83-91.
- Shim, K. M., S. Y. Kim, M. P. Jung, S. C. Kim, S. H. Min, and K. H. So, 2013: Agro-climatic zonal characteristics of the frequency of abnormal air temperature occurrence in South Korea. Climate Change Research, 4[2], 189-199.
- Shim, K. M., S. H. Min, D. B. Lee, G. Y. Kim, H. C. Jeong, S. B. Lee, and K. K. Kang, 2011: Simulation of the effects of the A1B climate change scenario on the potential yield of winter naked barley in Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 13(4), 192-203 (in Korean with English abstract).
- Shim, K. M., S. H. Yun, Y. S. Jung, J. T. Lee, and K. H. Hwang, 2002: Impact of recent weather variation on yield components and growth stages of winter barley in Korea. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 4(1), 38-48 (in Korean with English abstract).
- Shim, K. M., J. T. Lee, Y. S. Lee, and G. Y. Kim, 2004: Reclassification of winter barley cultivation zones in Korea based on recent evidences in climate change. Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology 6, 218-234.
- Singh, U., and J. L. Padilla, 1995: Simulating rice response to climate change. In: Climate change and agriculture: Analysis of potential international impacts, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 99-121.
- Tao, F. L., Y. Hayashi, Z. zhang, T. Sakamoto and M. Yokozawa, 2008: Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment, Agricultural and Forest, Meteorology 148. 94-110.
- Yun, S. K., Y. U. Shin, I. K. Yun, E. Y. Nam, J. W. Han, I. M. Choi, D. J. Yu, and H. J. Lee, 2011: Developmental rate equations for predicting bud bursting date of 'Campbell Early' (Vitis labrusca) grapevines. Korean Journal of Horticulture Science Technology 29. 181-186.
- Xiong, W., D. Conway, E. Lin, Y. Xu, H. Ju, S. Calsamiglia-Mendlewicz, and L. Erda, 2008: The impact of climate change on chinese agriculture-Phase II, National Level Study: The impact of climate change on cereal production in China, Report to DECC and DFID, ED02264, Issue 2, October 2008.

연구보고서 2015-18

상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의
기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발
- 농업이상기후/생산성지수 -

Improvement of Agricultural Assessment of Impact on
Climate Change Using Downscaled Climate Prediction

정유란



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

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

www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-115-2