

미래기후조건에서 이상고온이 우리나라 콩 생육 및 종실수량에 미치는 영향

Influence of extreme high temperature on the growth and grain yield of
soybean under the projected future climate in South Korea

정유란

미래기후조건에서 이상고온이 우리나라 콩 생육 및 종실수량에 미치는 영향

Influence of extreme high temperature on the growth and grain yield of
soybean under the projected future climate in South Korea

정유란

발간사

기후변화에 의한 이상기후 현상의 빈발로 작물의 안전한 생육과 수량성 확보에 대한 염려가 증가함에 따라 이상기후 현상에 따른 작물반응 및 생산성 변동에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구가 수행되어 왔다. 또한 최근 다양한 기후모형에서 생산되는 상세 기후정보의 활용이 증가하게 되면서, 상세 기후정보와 작물모형 기반의 작물반응 및 생산성 영향평가에 대한 불확실성 정보를 제공하기 위해 본 연구는 기획되었다. 이에 지난 2015년 연구에서 센터의 상세 미래 기후변화 전망정보를 겨울 밭작물 생산성 영향평가에 활용하였고 올해 연구에서는 여름 밭작물의 생산성 영향평가에 활용하였다. 이와 같이 상세 기후 전망정보와 농업모형을 활용한 작물생산성 영향평가에 대한 심층연구들을 시리즈로 발표할 수 있게 된 것은 관련 분야의 연구자들에게 고무적인 소식이 아닐 수 없다. 또한 본 연구보고서는 모형연구 분야에서 가장 전문성을 가진 국내 연구진들이 기획의 취지에 적극 공감하고 활발한 교류를 통해 완성해 낸 결과라는 점에서 더욱 의의가 있다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었다. 무엇보다도 연구의 기획 단계부터 자문위원으로서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 농촌진흥청 KOPIA 필립핀 센터장의 이정택 박사와 경희대학교 윤진일 교수, 농촌진흥청 농업환경과학원의 박찬원 박사에게 깊은 감사를 표하는 바이다. 또한 보고서의 수준을 제고하도록 좋은 논평을 해 주신 익명의 검토자들과 본 연구보고서를 총괄하고 최종 집필한 본원의 정유란 박사에게도 감사의 뜻을 전한다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바란다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

Soybean crop responses to the extreme high temperature during major development stages were explored using the crop model, CROPGRO-soybean. Specifically, we simulated the growth of soybean under abnormally higher temperatures (e.g., 39°C and 27°C for the daily maximum and minimum temperature, respectively) during the reproductive stage (R5–R7) in the past climate (1981–2010) and as well as future (2021–2050) projected by climate scenarios. Data was modeled using 8 general circulation models of Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5. The 8 future climate scenarios were collected from the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) archive. Future scenarios of the 6 sites were spatially downscaled using a bias-corrected and non-parametric quantile mapping method. Late-July to mid-August is an important period for crop reproduction; therefore, the temperature data used in the study was taken during these months. The Korean soybean cultivar (Taegwang) was used in this study. We calculated the number of days on which daily maximum and minimum temperature would exceed the threshold while the cultivar is in the reproductive stage, using the 8 future scenarios of the six sites, and used that number to determine the frequency of high-temperature occurrences. The frequency at which the daily maximum temperature exceeded the threshold could not be determined for six sites during the 2050s (2021–2050). However, the frequency of high-temperature occurrences in minimum temperature increased in 5 sites beginning in the 2050s, with the exception of Hongcheon. Especially in the case of Jeonju and Miryang, the occurrence of days over 39°C increased 7 and 14 days and the frequency of

duration of three days its temperature showed one and three times in the daily maximum temperature in Jeonju and Miryang, respectively, under the future climate scenario of RCP 8.5, the pathway with the highest greenhouse gas emissions as compared to the present climate. Additionally, the occurrence of days over 27°C in Jeonju and Miryang increased by 115 and 18 days respectively, while the frequency of duration of three days its temperature occurred 14 and 2 times. These critical temperatures occurred mostly during grain filling after flowering, and the crop model simulations resulted in reductions in the pod number during this period.

We again simulated the model to investigate a change in sowing dates. In Jeonju and Miryang during 1981–2010, if sowing at five days ahead from 10 June, namely in shorten of the sowing day, increase of yield potential in the average 5% was higher than reduction of yield potential in the average –1%. However, reduction of yield potential in the average –15% was higher than increase in the average 5% if sowing five or 10 days later than 10 June. In particular, relative changes for shorten of the sowing day or delay of the sowing day do not be shown in normal years which high temperatures did not abnormally occur during the growing season from 2003 to 2010. In abnormal years which high temperatures occurred during the critical period, especially R5 to R7, shorten of the sowing day affected to the increase of yield potential in average 1 ~ 3%, however, delay of the sowing day influenced on the reduction of yield potential in average –4 ~ –8%. In the result of the future climate scenario of Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 during from 2041 to 2070, the increase and decrease of yield potential for shorten of the sowing day were average +5/–5% for RCP 4.5 and average +8/–4% for RCP 8.5, respectively. Additionally, it showed average +7/–8% for RCP 4.5 and average +4/–12% for RCP 8.5, respectively in the increase and decrease of yield potential for delay of the sowing day. In addition, simulations revealed that a 2°C increase in temperature had a positive rather than a negative influence on soybean

growth with no water stress. However, an increase of 4°C is expected to have a negative effect; abnormally high temperature had a greater negative impact during the period of grain filling.

Neither research on rainfed crops nor crop modeling for Korean cultivars is popular in South Korea. The preliminary results of this study will serve to raise awareness of the importance of investigating the effects of climate change on rainfed crops in the Korean Peninsula.

목 차

1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
2. 연구자료 및 방법	3
2.1 연구대상지 설정 및 자료 준비	3
2.2 콩 작물의 발육단계별 임계온도 설정	4
2.3 콩 생육 모의	7
2.3.1 콩 생육모형 CROPGRO-Soybean	7
2.3.2 품종 특성 및 모수	7
2.3.3 토양 입력정보	9
2.3.4 고온 환경 설정	10
2.3.5 파종일 이동	11
2.3.6 분석 기간과 평가 방법	11
3. 결과	12
3.1 콩 생육모형의 성능	12

3.2 연구대상지의 기온과 생물계절 변화-----	13
3.2.1 기온변화-----	13
3.2.2 재배기간의 변화-----	17
3.3 이상기온연도의 작물반응-----	21
3.3.1 종실비대기에서의 이상고온 영향-----	21
3.3.2 파종시기 이동에 따른 수량반응-----	23
3.4 미래기후조건 하의 작물반응-----	25
3.4.1 평년기후 대비 2°C 및 4°C 상승에 따른 작물반응----	25
3.4.2 이상고온발생 전망-----	29
3.4.3 이상고온에 따른 수량변화 전망-----	31
4. 결론 및 다음 단계-----	35
Ⅰ REFERENCE-----	37

1. 서론

1.1 연구배경

우리나라에서 최근 쌀 적정 생산 유도와 곡물자급률 향상을 위한 정책으로 농가에 타작물, 특히 밭작물 재배를 장려하고 있다. 기후 특성상 춘천, 연천과 같은 강원, 경기북부에서는 콩을 단작으로 재배해왔고, 남부지역에서는 주로 가을보리, 마늘, 양파 등 동계작물과 이모작 체계로 콩을 많이 재배해왔다. 최근에는 온난화에 의해 봄감자, 봄배추 등 하계작물과의 작부체계에도 콩을 도입하는 경우가 많아졌다. 그러나 기후변화에 의한 이상기상 현상 (예, 고온 혹은 한발)의 빈발로 작물의 안전한 생육과 수량성 확보에 대한 염려가 증가하고 있다. 특히 개화기에서 등숙기 사이에 고온이 발생하면 수량이 크게 감소할 수 있다. 콩의 경우 생식생장기에 적정 평균기온은 29°C로써 39°C의 고온에서는 수량이 크게 감소할 수 있으며 (Gibson and Mullen, 1996), 옥수수에서는 2°C만 상승해도 수량이 5~13%가 감소할 수 있다고 하였다 (Lobell et al., 2013).

우리나라에서 기후변화에 의한 작물 생산성 영향평가는 대부분 벼 중심의 연구로써 밭작물에 대한 기후변화 영향평가는 드문 실정이다. 국내에서는 Park et al. (2014)은 기후변화에 의해 작물의 생육기간이 길어지면서 이모작에 의한 만파가 증가함에 따라 만파에 따른 생육 및 수량반응을 평가하였고, Song et al. (2014)은 고추의 생육기간 중 고온에 의한 고추의 수량감소를 평가하였다. 또한 Kim et al. (2013)은 콩 생육모형인 CROPGRO-Soybean을 한반도 미래 기후변화 시나리오에 적용하여 앞으로의 콩 생산성의 변동을 전망한 바 있는데, 이 연구에서는 미래 기후변화 시나리오 전망에서 재배기간 중 이상고온이 발생된 시기 혹은 생육단계별 이상고온이 발생된 시기를 고려하지 않고 단순히 미래 기후변화 시나리오 전망에 대한 콩 생산성 변동을 평가한 것이다. 국외에서는 CERES-Wheat 나 APSIM-Nwheat, WheatGrow 와 같은 밀 생육모형에서 고온반응을 개선하여 미래 고온조건의 시나리오에서 생육 및 수량반응을 평가한 연구결과들이 최근 발표되었다 (Liu et al., 2016; Marioano et al., 2016). 그러나 앞서 언급한 바와 같이 벼나 밀과 같은 작물에서는 고온영향을 고려한 생육모형의 수정이 이루어지고 있고, 재배환경의 변화, 예를 들면 고온조건에서 파종기 이동에 따른 수량반응 등에 대한 연구들이 이루어지고 있는 반

면 콩이나 옥수수과 같은 작물의 생육모형에서는 아직 드물다.

작물의 생육모형은 작물의 재배환경 (예, 토양, 기상, 파종시기, 관개와 시비의 일정과 양 등) 정보에서부터 생물계절과 품종의 유전적 정보에 이르기까지 많은 정보를 필요로 한다. 국내외적으로 벼 생육모형 (예, CERES-Rice 혹은 Oryza2000 등)을 위한 벼 품종의 유전적 정보와 벼의 생육모형에 대한 연구뿐만 아니라 고온영향에 대한 연구 사례들은 많다 (Lee et al., 2001; Chung et al., 2006; Lee et al., 2011; Lee et al., 2015). 반면 앞서 언급한 최근 밭작물에 대한 연구들이 수행되고 있지만, 국내 콩 작물 및 콩의 생육모형에 대한 연구와 콩의 생육모형을 구동할 수 있는 품종의 유전적 정보 및 생물계절 정보 등이 여전히 부족한 실정이다.

1.2 연구목적

그럼에도 불구하고, 본 연구는 국내 콩 생육모형의 유전적 정보가 이미 보정 및 검증되어 있다는 가정하에서 콩 생육모형을 구동하였다. 즉, 1) 과거 관측기후에서 생식생장기 동안 이상고온에 의한 콩의 발육단계별 영향을 분석하고, 2) 파종일 이동에 따른 생식생장기의 이상고온 변화(이동)가 콩의 잠재수량 변화에 미치는 영향을 탐색하였다. 또한, 3) 미래 기후변화 시나리오에서 콩의 재배기간 중 수량증감에 영향을 미칠 수 있는 시기 (예, 개화 후 종실비대기 등)에서 이상고온 발생 가능성과 그 영향을 탐색하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구대상지 설정 및 자료 준비

국립식량과학원의 벼맥류부가 있는 익산과 기능성작물부가 소재한 밀양을 작물구동을 위한 연구대상지로 설정하였고, 인근 전주기상대와 밀양기상관측소의 기후자료를 1981년부터 2013년까지 수집하여 1981년부터 2010년까지를 각 지역의 평년기후(normal8110)라고 명명하였다. 콩의 생육 및 수량자료는 벼맥류부(익산)와 기능성작물부(밀양)에서 2003년부터 2013년까지 수행한 작황시험성적으로부터 얻었다.

두 지점 (전주와 밀양)의 상세화된 미래 기후변화 시나리오 자료의 경우, 일 최고기온, 일 최저기온, 일적산 강수량, 일별 일사량 등 작물 생육모형 연구에 필요한 4개 기상변수를 모두 포함하고 있는 8개 GCMs의 일별 자료 (조재필 등, 2013; Chung et al. 2015)와 국립기상과학원의 남한 상세 기후변화 시나리오를 수집하였다 (Table 1). 수집된 남한 상세 기후변화 시나리오는 전지구기후모형 (Global Climate Model, GCM) 중 HadGEM2-AO를 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM) 인 HadGEM-RA에 의해 역학적으로 상세화된 12.5km 한반도 일별 미래 기후변화 시나리오이다 (<http://www.climate.go.kr>). 본 연구에서 적용한 미래 기간은 2021년부터 2050년까지이며, RCP 4.5와 RCP 8.5에 대한 전주와 밀양의 일별 미래 기후변화 시나리오 자료를 DSSAT의 기상입력자료 형태로 변환하여 콩 생육모형 구동에 입력하였다.

Table 1 The individual Global Climate Models used in this study (source: 조재필, 2013)

Model	Institute	Country	Resolutions (pixels)
KMA 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 콩 작물의 발육단계별 임계온도 설정

콩의 재배기간 동안의 생육단계를 표현한 것이 Fig. 1이다. 우리나라 작황시험장의 2003년부터 2010년까지 작황시험보고서에 의하면 단작의 경우, 5월 25일에 파종(적파), 이모작일 경우, 6월 10일에 파종(만파)되었다. 콩의 생육과정은 지역이나 품종 또는 파종기에 따라 크게 다르다. 또한, 생육일수도 실제 재배에서 보통 90일에서 160일이지만 변이가 커서 75일에서 200일 범위에 있으며 온도와 일장에 따라 크게 다르다(조재영 등, 1989). 우리나라에서 주로 평야지에서 단작으로 봄에 파종하여 늦여름 혹은 초가을에 수확하는 여름콩은 대립으로 생육일수가 짧다. 반면 우리나라의 남부 평야지에서 맥후작 형식으로 재배하는 가을콩은 생육일수가 길다.

Table 2는 미국에서 콩의 생육단계별 평균 이동 일수 (<http://www.extension.umn.edu/agriculture/soybean/growth-and-development/growth-stages/>)를 바탕으로 앞서 언급한 우리나라 작황보고서의 국내 콩의 파종시기 정보를 고려하여 생육단계별 평균 이동일수를 계산하여 나타낸 것이다. 파종 후 영양생장기까지는 6월, 생식생장기와 종실비대기간(혹은 등숙기)을 포함한 기간은 7월에서 9월, 수확기는 10월에 해당하게 된다. 본 연구에서는 파종 후 영양생장기간 중 개화 직전까지와 개화

후 생식생장기간 중 R2에서 R4 (꼬투리 형성)까지를 7월 30일에서 8월 20일까지, R5에서 R7 (종실비대기)까지를 8월 20일에서 9월 10일로 설정하였다. 또한 2003년에서 2013년까지 태광공의 파종일로부터 개화시기와 수확기까지의 GDD (growing degree day)를 각각 계산하여 생육단계별 평균 이동일수에 대한 평균 GDD를 비교하였다.

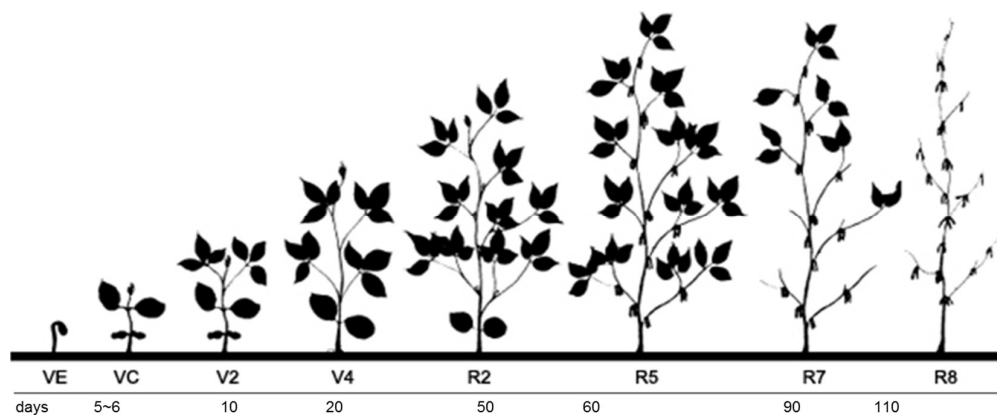


Figure 1 Soybean growth and development stages: days represent the number of days after sowing.

Table 2 The detailed stages of growth and development for soybean

Stages	Detailed stages	Average days	
Vegetative stages	VE to VC	10	June
	VC to V1	5	
	V1 to V2	5	
	V2 to V3	5	July
	V3 to V4	5	
	V4 to V5	5	
	beyond V5	3	
Reproductive stages	R1 to R2	3	August
	R2 to R3	10	
	R3 to R4	9	
	R4 to R5	9	
	R5 to R6	15	
	R6 to R7	18	September ~ October
	R7 to R8	9	

VE: Emergence

VC: Cotyledon

V1: First Trifoliolate: one unrolled trifoliolate, Fully developed unifoliolate leaves (the first node)

V2: Two unrolled trifoliates

V3: Three unrolled trifoliates
 V4: Four unrolled trifoliates
 V5: Five unrolled trifoliates
 R1: Beginning bloom
 R2: Full bloom
 R3: Beginning pod
 R4: Full pod
 R5: Beginning seed
 R6: full seed
 R7: Beginning maturity
 R8: Full maturity

Table 3은 콩의 생육단계별 임계온도 범위를 나타낸 것이다 (Holmberg, 1973; Judd et al., 1982; Gibson and Mullen, 1996). 본 연구에서는 과거 기후뿐만 아니라 미래 기후변화 시나리오 전망에서 콩의 재배기간 동안 중요한 생육단계에서 이상고온에 노출되었을 때의 수량구성요소 변화에 대한 영향을 평가하기 위해서는 생육단계별에 영향을 미치는 이상고온, 즉 임계온도 정의가 필요하다. 즉, 임계온도에 대한 정보로부터 임계온도 이상의 온도가 발생할 때와 임계온도 지속기간으로부터 이상고온발생일수와 빈도를 계산할 수 있다. 그래서 본 연구에서는 미래 기후변화 시나리오 전망의 일 최고기온의 경우 39°C 이상, 일 최저기온의 경우 27°C 이상일 때를 이상고온 발생으로 간주하고 그 발생일수를 계산하였다. 또한 Gibson and Mullen (1996)은 개화시기에 고온이 지속되면 화분의 수정에 영향을 미친다고 하였다. 그래서 본 연구에서는 일 최고기온에서 39°C 이상과 일 최저기온에서 27°C 이상의 임계온도가 연속적으로 (예, 3일 이상) 지속되는 기간에 대한 빈도 계산에 이러한 정보를 반영하고자 하였다.

Table 3 The critical temperatures on growth stages of soybean (Holmberg, 1973; Judd et al., 1982; Gibson and Mullen, 1996)

Crop	Vegetation period			Reproduction period		
	Base Temp.	Opt. Temp.	Range of Opt.Temp.	Opt. Temp.	Range of Opt.Temp.	Failure Temp.
Soybean	10	23-24	25-30 (DT*), 19-24(NT**)	26-27	26-32 (DT), 22-27(NT)	37

*DT: day time

**NT: night time

2.3 콩 생육 모의

2.3.1 콩 생육모형 CROPGRO-Soybean

DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)은 미국에서 개발된 것으로 동일한 입출력 파일에 의해 여러 작물의 생육모형을 사용할 수 있도록 표준화시킨 패키지 소프트웨어이며 많은 사용자를 가지고 있는 생육모형 중 하나이다 (Paola et al., 2015; Basso et al., 2014). DSSAT에서 콩과 작물모형 (예, soybean, peanut)은 CROPGRO에서 구동된다. CROPGRO는 매일의 기상 조건을 입력 받아 콩 작물과 토양 시스템에서 탄소와 질소 흡수, 고정 및 형성 등 탄소와 질소 수지를 모의할 수 있으며, 잎 수준에서 광합성을 모의하기 위해 시간단위로 계산할 수 있는 과정도 추가되어 있다 (Boot et al., 1989; Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010). 본 연구에서는 DSSAT package 4.6 version에 포함된 콩 생육모형인 CROPGRO-Soybean을 사용하였다.

2.3.2 품종 특성 및 모수

DSSAT에는 국제적으로 잘 알려져 있거나 많이 재배되는 품종들에 대한 유전모수의 정보가 이미 포함되어 있지만 국내 작물들의 품종에 대해서는 정보가 없기 때문에 생육모형 구동 전에 그 작물 품종에 대한 유전모수를 추정해야 한다 (Table 4). 우리나라 콩의 경우, Kim et al. (2004)과 Kim et al. (2012)이 장류콩 (황금콩과 장엽콩)과 나물콩 (은하콩)에 대해 유전모수를 추정한 사례가 있고, 태광콩과 대원콩의 유전모수를 추정한 사례가 있다 (Kim et al., 1992; Lee et al., 2008). 본 연구에서는 국립식량과학원의 작황시험성적 자료에서 콩 주요 보급 품종 중에 하나인 태광콩의 품종 모수 (NICS, 2014)를 수집하여, 2003년부터 2013년까지 수집된 밀양과 대구, 익산 등의 작황시험자료로부터 보정/검증하여 활용하였다. 모수 보정/검증은 DSSAT package의 GenCalc 프로그램을 이용하였다. Table 5와 Table 6은 우리나라 품종인 태광콩과 DSSAT에 내장되어 있는 중만생종인 Forrest (5)의 유전모수 정보이다. CSDL (생식생장 전환 한계 일장), PPSEN (광주기 반응), SD-PM (종자형성부터 생리적 성숙까지의 기간), LFMAX (최대광합성률), SLAVR (엽면적), XFRT (일 생장

량에서 험/립으로의 최대 분배 비율), WTPSD (최대종자무게) 등은 비슷한 경향을 보였다. 그러나 EM-FL (출아기부터 개화기까지의 기간, FL-SH (개화기부터 꼬투리 형성까지의 기간), FL-SD (개화기부터 종자 형성까지의 기간), FL-LF (개화기부터 잎 확대까지의 기간) 등 기간은 Forrest (5)가 길었다. 또한 SFDUR (표준성장에서 꼬투리에 종자가 차있는 지속기간)과 SDPDV (꼬투리당 평균종자)도 Forrest (5)가 컸다. 그러나 SIZLF (잎 최대면적)와 PODUR (마지막 꼬투리가 나올 때까지 걸리는 수확요구시간)은 태광콩이 컸다. 즉 비슷한 증만생종이지만 태광콩의 종자가 더 크고 태광콩의 등숙기가 더 길 수 평가될 수 있다.

Table 4 The definitions of genetic parameters for soybean in CROPGRO

Parameters	Definition
CSDL	Critical Short Day Length below which reproductive development progresses with no daylength effect (for shortday plants) (hour)
PPSEN	Slope of the relative response of development to photoperiod with time (positive for shortday plants) (1/hour)
EM-FL	Time between plant emergence and flower appearance (R1) (photothermal days)
FL-SH	Time between first flower and first pod (R3) (photothermal days)
FL-SD	Time between first flower and first seed (R5) (photothermal days)
SD-PM	Time between first seed (R5) and physiological maturity (R7) (photothermal days)
FL-LF	Time between first flower (R1) and end of leaf expansion (photothermal days)
LFMAX	Maximum leaf photosynthesis rate at 30 C, 350 vpm CO ₂ , and high light (mg CO ₂ /m ² -s)
SLAVR	Specific leaf area of cultivar under standard growth conditions (cm ² /g)
SIZLF	Maximum size of full leaf (three leaflets) (cm ²)
XFRT	Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed + shell
WTPSD	Maximum weight per seed (g)
SFDUR	Seed filling duration for pod cohort at standard growth conditions (photothermal days)
SDPDV	Average seed per pod under standard growing conditions (#/pod)
PODUR	Time required for cultivar to reach final pod load under optimal conditions (photothermal days)
THRSH	Threshing percentage. The maximum ratio of (seed/(seed+shell)) at maturity. Causes seeds to stop growing as their dry weight increases until shells are filled in a cohort.
SDPRO	Fraction protein in seeds (g(protein)/g(seed))
SDLIP	Fraction oil in seeds (g(oil)/g(seed))

Table 5 The genetic parameters of Taegwang in CROPGRO (source: NICS, 2014)

CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	LFMAX	SLAVR
12.70	0.32	18.71	4.92	9.52	35.84	9.56	1.03	350.00

SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR	THRSH	SDPRO	SDLIP
300.00	1.00	0.19	10.10	1.35	29.28	78.00	0.40	0.20

Table 6 The genetic parameters of Forrest (5) in CROPGRO

CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	LFMAX	SLAVR
12.83	0.303	21.10	8.00	15.00	35.00	18.00	1.03	355

SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR	THRSH	SDPRO	SDLIP
140	1.0	0.180	23.00	2.05	9.00	78.0	0.400	0.200

2.3.3 토양 입력정보

DSSAT의 토양 입력파일에서 모든 토양층에 공통으로 적용되어야 하는 정보들은 토양표면의 반사율 (albedo), 하루 동안 최대 증발시킬 수 있는 물의 양, 하루 동안 증력에 의해 토양층으로부터 제거되는 수분의 비율, 미국 농무부 토양보전국 (Soil Conservation Service, SCS)의 유거특성곡선 번호 등이다 (Table 7). 또한 각 토층위 별 정보로는 유효수분 최저한계 (영구위조점에서 수분함량), 유효수분 최대한계 (포장 용수량에서의 수분함량), 포화용수량 상태에서의 최대수분, 뿌리생장지수 (0.0-1.0), 포화상태 수리전도도, 가비중, 토양유기물의 탄소당량 등이 있으며, 이 밖에 점토함량과 미사질함량, 자갈함량, 전질소함량, 토양산도, 양이온치환용량 등이 필요하다. 본 연구에서는 국립농업과학원의 정밀토양도에서 해당 지점에 포함된 토양의 토성별 (soil texture) 세부적인 물리 및 화학적 속성 정보를 바탕으로 국립농업과학원의 정밀토양도에서 추출할 수 있는 토양정보들을 추출하였으며 (<http://soil.rda.go.kr>), 그 외 토양정보들은 DSSAT package의 기본 토양정보를 사용하였다. 모형구동에 필요한 토양정보들은 텍스트 형태로 준비되었다 (Fig. 2).

Table 7 The prepared soil information among File S for CROPGRO

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

Figure 2 The File S for the simulation of crop model (source: 정유란, 2015).

2.3.4 고온 환경 설정

CROPGRO-Soybean에서 이상고온에 따른 생육단계별 작물반응을 관찰하기 위해 간단하게 2가지 고온 조건 (예, +2°C 와 +4°C), 즉 임계온도 이상의 고온 조건을 만들어서 모형을 모의하였다. 간단하게 인위적인 고온 발생 조건은 먼저 준비된 전주와 밀양의 과거 평년 기후 (1981-2010년)의 일 최고기온 및 일 최저기온에서 동일하게 2°C (normal8110 +2°C)와 4°C (normal8110 +4°C)를 더하여 고온발생 조건을 만들었다. 이때 파종일은 6월 10일로 고정하였고, 수분 스트레스는 없는 상태에서 모형을 구동하였으며, 생육반응 출력은 7일 간격으로 하였다.

2.3.5 파종일 이동

남부지역에서는 대체로 6월 10일 (만파)에 파종해 왔고 앞 절(2.3.4)에서 이상고온에 대한 반응을 모의하기 위해서는 파종일을 고정하였는데, 이번에는 파종시기 이동에 의해 콩의 생육단계와 고온발생의 변화가 수량구성요소에 미치는 영향을 평가하기 위해 4가지 파종일에 대해 CROPGRO-Soybean을 모의하였다. 파종일은 6월 5일부터 5일 간격으로 10일, 15일 20일로 설정하였으며, 수분 스트레스가 없는 조건에서 모형을 구동하였으며, 7일 간격으로 생육반응을 출력하였다. 미래 기후변화 시나리오 조건에서도 같은 파종일 조건을 적용하였는데, 추가 사항은 미래 기후변화 시나리오 전망 조건에서 콩 생육모형을 모의하기 위해서는 RCP 4.5와 RCP 8.5의 이산화탄소 농도변화에 대한 설정이 필요하다. 이 정보는 실험설계 파일에 이산화탄소 농도변화 값을 입력하여 모형을 구동하였다.

2.3.6 분석 기간과 평가 방법

앞 절(2.3.4)에서 인위적인 고온 조건에서의 생육 및 수량반응 이외 관측 기후에서 나타난 생육단계별 임계온도 이상의 조건에서의 생육 및 수량반응에 대한 비교가 필요하다. 먼저, 30년 평년 기후 (1981-2010년)에 대한 CROPGRO-Soybean의 결과는 “normal8110” 이라고 명명하였다. 또한 모의된 평년 기간 중에서 2003년부터 2010년 동안, 앞 절(2.2)에서 정의된 콩의 생육단계 중 개화 직후의 기후가 평년 기온보다 높았던 2006-2007년과 2010년을 이상고온의 해 (high temperature year)라고 정의하고, 이러한 이상고온을 보이지 않았던 나머지 해, 즉 2003-2005년과 2008-2009년에 대해서는 정상기상의 해 (normal year)라고 명명하여 분석하였다. 수량구성요소의 변화에 대한 평가 방법으로는 두 값의 차이로부터 계산할 수 있는 상대적 변화 (relative change)를 활용하였다.

3. 결과

3.1 콩 생육모형의 성능

NICS (2014)의 태광콩 품종 모수를 이용하여 전주와 밀양의 과거 관측 기후 (2003-2013년)에서 CROPGRO-Soybean의 잠재수량을 예측하여 태광콩 품종 모수의 예측성을 평가한 결과, 태광콩의 품종 모수의 출수시기 예측성은 0.9, 잠재수량 예측성은 0.5로 나타났다 (Fig. 3). 생물계절 예측성은 높은 반면 수량 예측성은 그렇게 좋은 것은 아니었다. 본 연구에서는 NICS (2014)에서 추정된 태광콩의 품종 모수를 이용하였는데, 문헌정보에 의하면 Kim et al. (2004)의 태광콩 품종 모수가 있다. NICS (2014)에서 추정된 태광콩의 품종 모수에 대한 예측성 결과는 국가 식량안보와 관련된 보안으로 정확하게 알 수 없지만 이 정보가 본 연구에서는 가장 최근에 추정된 태광콩의 품종 모수이기 때문에 미래 기후변화 전망에서의 콩 수량반응을 예측하는 데에 사용되었다. 그러나 추후 Kim et al. (2004)의 태광콩 품종 모수에 의한 생물계절 및 수량반응 예측성을 검증한 후 본 연구결과와 비교할 필요가 있다.

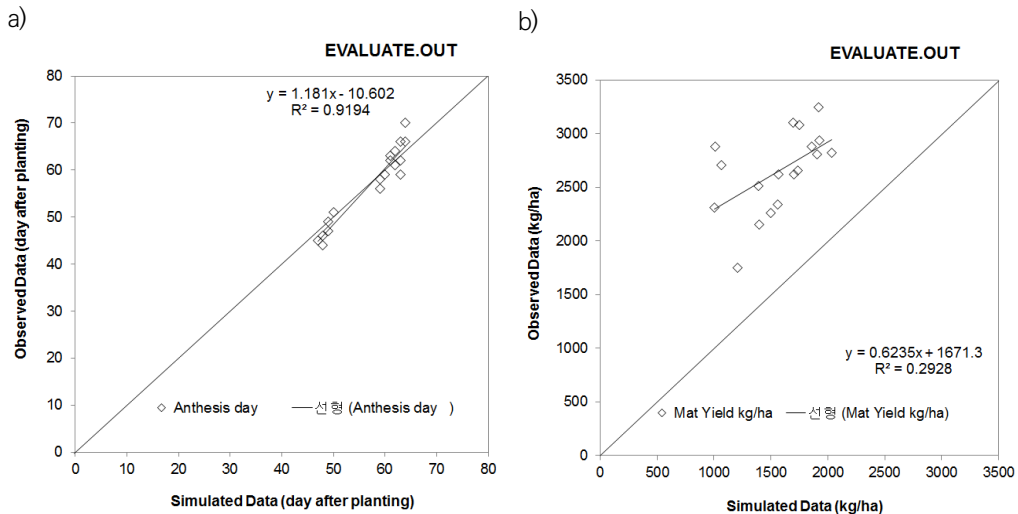


Figure 3 The result of calibration of the genetic parameters for Taegwang of soybean on the flowering time (a) and yield potential (b).

3.2 연구대상지의 기온과 생물계절 변화

3.2.1 기온변화

Fig. 4에서 Fig. 7은 2003년부터 2011년까지 전주와 밀양에서 파종 후 개화시기 전 (before anthesis)까지와 개화 후 종실비대기간 (after anthesis)까지 두 개의 생육단계기간 동안의 일 최고기온 및 일 최저기온, 일 평균기온을 평년 기온과 비교한 것이다. 두 지점에서 2003-2005년과 2008-2009년에는 개화 전인 영양생장기간 동안에 기온이 평년보다 높았던 반면, 2006년, 2007년, 그리고 2010년에 개화 후 종실비대기간 동안의 기온이 평년보다 평균 3~4°C 이상이나 높았고, 특히 밀양에서 2010년에는 이 기간의 기온이 평년보다 5°C 나 높았다 (Fig. 6과 Fig. 7).

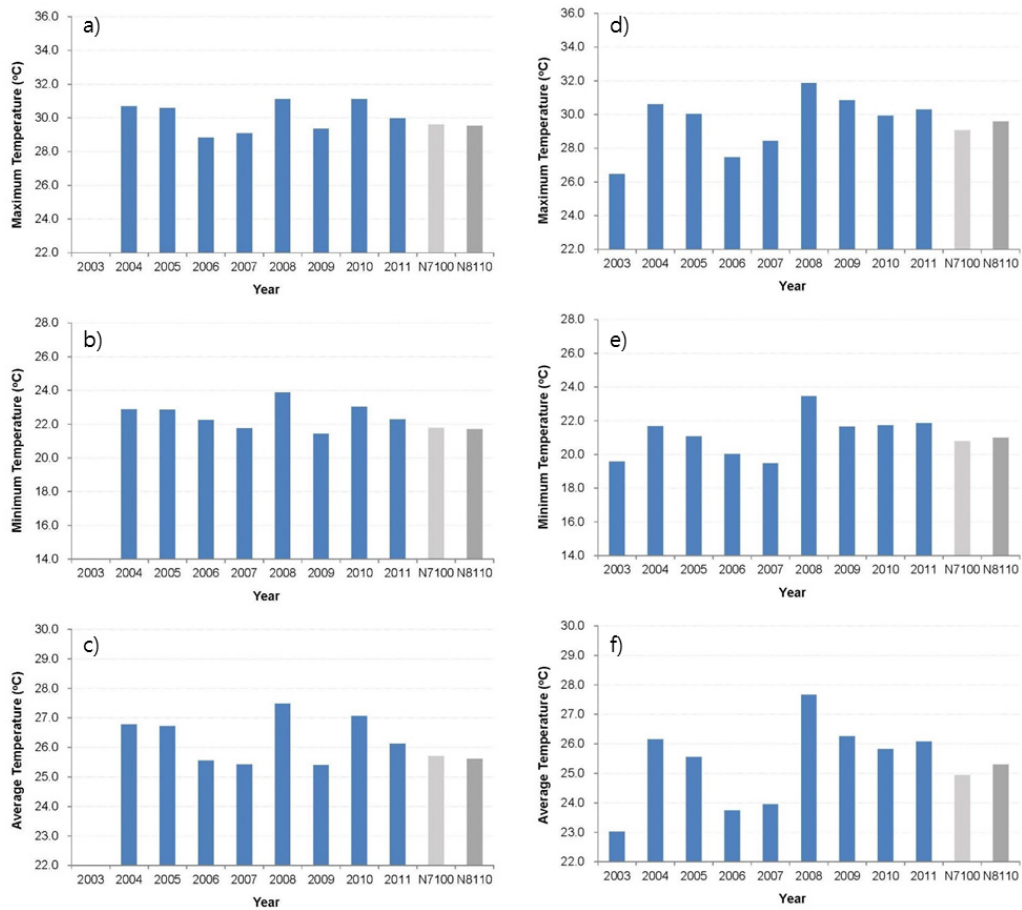


Figure 4 The past climate during between planting and before flowering stage in growing season from 2003 to 2010 and two periods (1971–2000 and 1981–2010) of the normal climate (N7100 and N8110) in Jeonju (a: maximum temperature, b: minimum temperature, c: precipitation) and Miryang (d: maximum temperature, e: minimum temperature, f: precipitation).

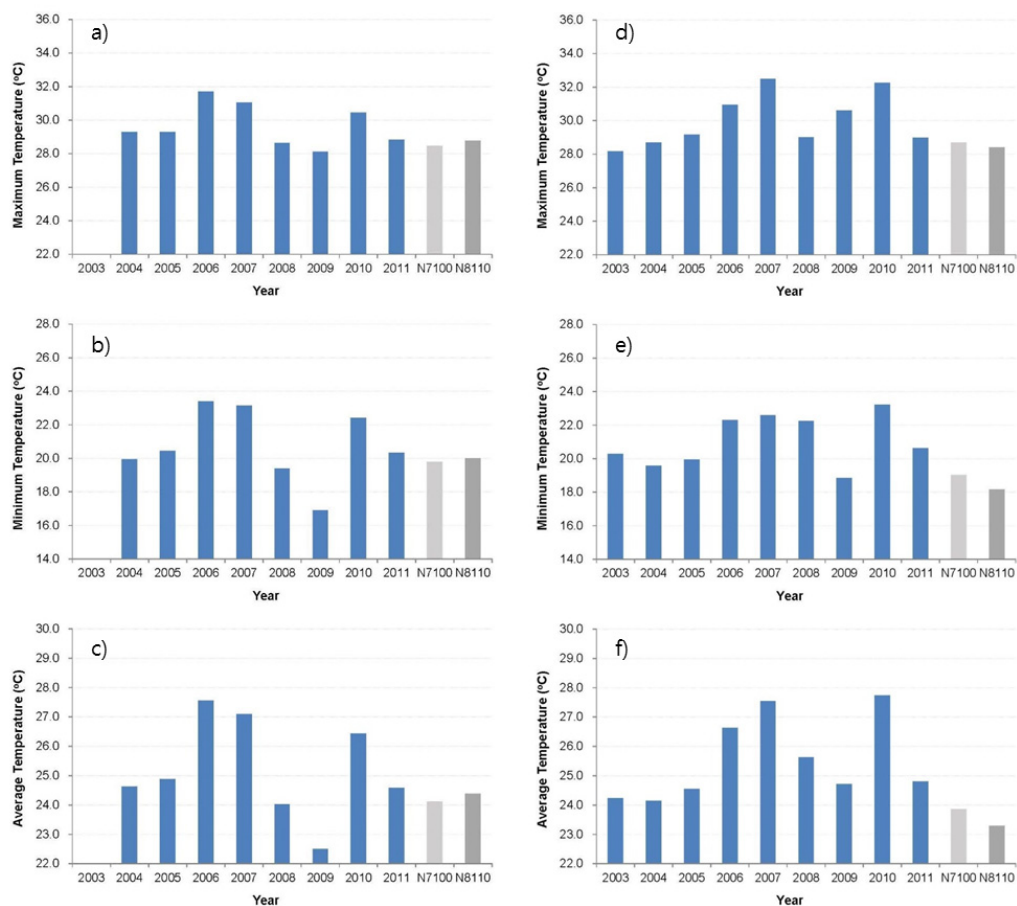


Figure 5 The past climate during between flowering and grain filling period in growing season from 2003 to 2010 and two periods (1971–2000 and 1981–2010) of the normal climate (N7100 and N8110) in Jeonju (a: maximum temperature, b: minimum temperature, c: precipitation) and Miryang (d: maximum temperature, e: minimum temperature, f: precipitation).

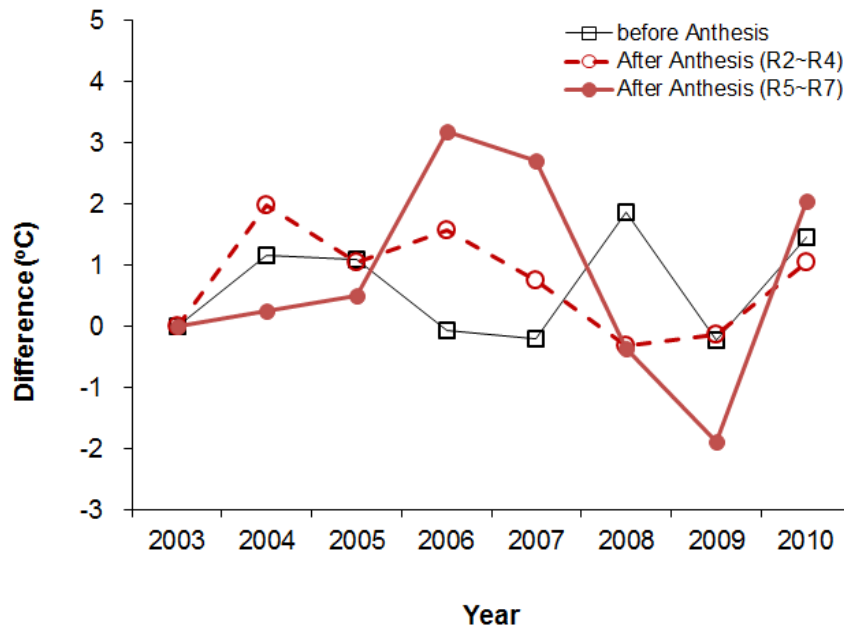


Figure 6 Past climate during growing season from 2003 to 2010 in Jeonju.

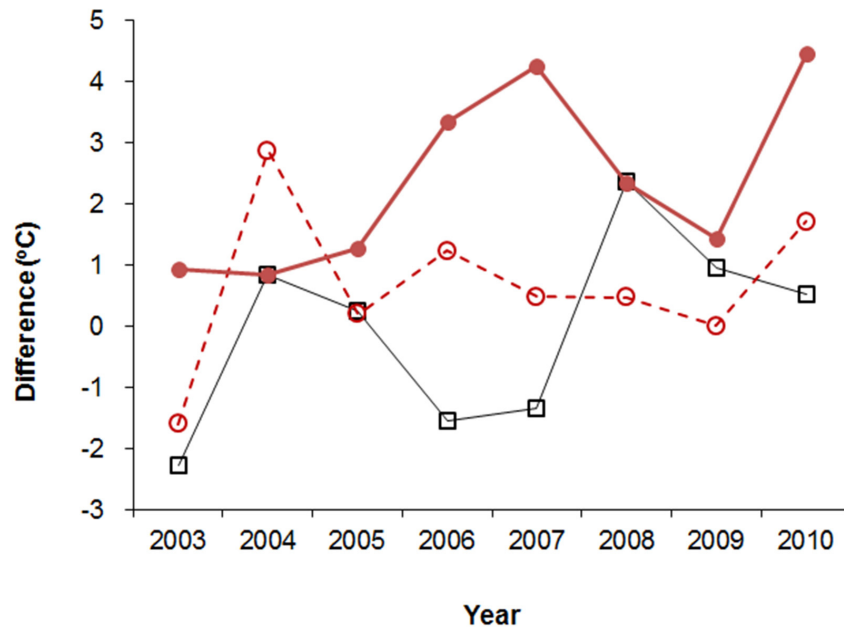


Figure 7 Past climate during growing season from 2003 to 2010 in Miryang.

3.2.2 재배기간의 변화

이상고온이 발생한 해 (2006-2007년과 2010년)와 그렇지 않은 해의 재배기간의 변화, 예를 들면, 파종 후 개화까지 걸린 시간 혹은 개화 후 성숙기까지 걸린 기간을 비교해 보았다 (Fig. 8과 Fig. 9). 영양생장기간의 경우, CROPGRO-Soybean에서 이상고온 해에 개화기까지 걸린은 약 47일, 정상기상 해에는 51 ~ 52일로 약 6일 내외의 차이를 보였고, 관측값의 경우는 45일과 50일로 약 5일내외의 차이를 보였다 (Fig. 8). 반면, 생식생장기의 경우, CROPGRO-Soybean에서 이상고온 해에 개화기에서 성숙기까지의 일수는 약 51 ~ 52일, 정상기상해에서는 65 ~ 66일로 약 11일 이상 차이를 보였다 (Fig. 9).

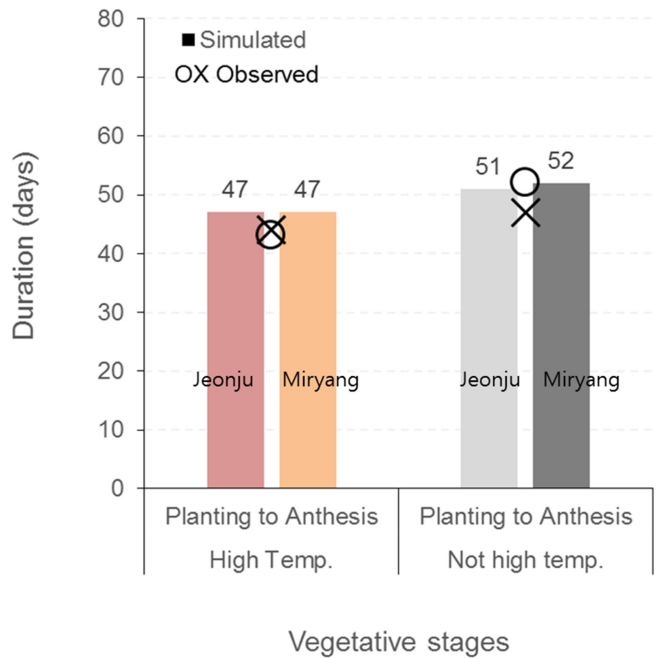


Figure 8 Comparison of the number of days between planting to anthesis in Jeonju and Miryang.

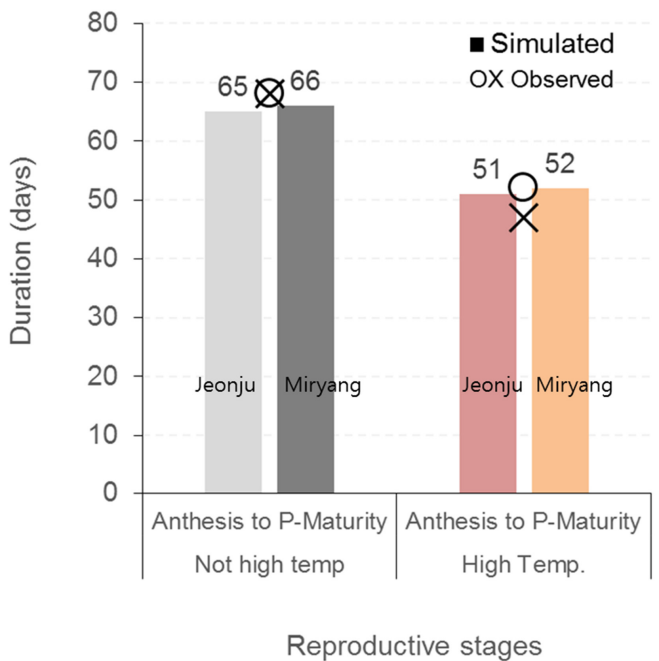


Figure 9 Comparison of the number of days between anthesis to maturity in Jeonju and Miryang.

콩은 기준온도 10°C에서 생장이 시작되는 하계작물이다. 기준온도 0°C와 10°C에서의 생장도일 (growing degree day, GDD)을 각각 계산하고 적산 GDD를 계산한 후, 전주와 밀양의 콩 작황시험보고서에 있는 태광콩의 관측 개화일과 성숙일에 해당하는 GDD를 추출하였다 (Table 8). 본 연구에서는 약 7년 동안의 관측 개화일과 성숙일로부터 적산 GDD 평균/추출하였는데, 오랜 기간 동안의 관측 데이터베이스로부터 우리나라 주요 콩 품종의 관측된 적산 GDD 정보가 있다면 작물의 생육모니터링 및 모형 연구에 중요한 정보가 될 수 있다. 관측 개화일과 성숙일이 가장 높은 적산 GDD를 보인 해는 전주의 2013년과 밀양의 2010년이고, 가장 낮은 적산 GDD를 보인 해는 전주의 2009년과 밀양의 2003년으로 나타났다. 물론 전주의 2010년과 밀양의 2013년의 적산 GDD는 두 번째로 높았다. 이상고온 해로 분류된 2010년에서 관측 개화일과 관측 성숙일 시점의 적산 GDD는 전주에서 각각 898°C, 1772°C, 밀양에서 775°C, 1805°C로, 이 시기 (2003-2013년)의 두 지점의 평균 관측 개화일의 적산 GDD (전주: 771°C, 밀양 746°C) 보다 각각 127°C, 30°C 높았고, 평균 관측 성숙일의 적산 GDD (전주: 1674°C, 밀양: 1691°C) 보다 각각 98°C, 114°C 높았던 것으로 분석되었다.

Table 8 The growing degree day (GDD) of flowering time and maturity time calculated at 0°C of base temperature and 10°C of base temperature, respectively in Jeonju and Miryang during 2003 to 2013

		T _{base} =0°C		T _{base} =10°C	
		Flowering	Maturity	Flowering	Maturity
Jeonju	2004	1267.5	2833.4	787.5	1703.4
	2005	1309.9	2841.3	819.9	1711.3
	2006				
	2007				
	2008				
	2009	1139.7	2502.6	689.7	1482.6
	2010	1428.2	2902.2	898.2	1772.2
	2011	1383.7	2785.6	853.7	1695.6
	2012	1156.8	2925.8	706.8	1775.8
	2013	1203.7	3059.7	753.7	1899.7
Miryang	2003	1122.9	2609.4	642.9	1479.4
	2004	1239.2	2967.8	759.2	1787.8
	2005	1167.8	2710.6	707.8	1630.6
	2006				
	2007				
	2008				
	2009	1480.0	2813.3	910.0	1703.3
	2010	1265.4	2915.3	775.4	1805.3
	2011	1285.0	2738.4	785.0	1668.4
	2012	1215.2	2858.3	735.2	1728.3
	2013	1333.3	3051.3	833.3	1891.3

3.3 이상기온연도의 작물반응

3.3.1 종실비대기에서의 이상고온 영향

전주와 밀양 두 지점에서 이상고온 해 (high temperature year: 2006-2007년과 2010년)와 정상기상 해 (normal year: 2003-2005년과 2008-2009년)의 잎 출현수와 꼬투리 수를 각각 비교하였다 (Fig. 10 에서 Fig. 13). 콩의 재배기간 동안, 개화 후 이상고온의 해와 정상기상의 해의 잎 출현수와 꼬투리 수는 모두 평년 기후 조건 (normal8110)의 결과와 비슷했다(Fig. 10과 Fig. 11 그리고 Fig. 18). 그러나 이상고온 해의 꼬투리 수는 평년 기후 조건에 임의로 $+2^{\circ}\text{C}$ 및 $+4^{\circ}\text{C}$ 상승 시켰을 때처럼 감소하였지만 (Fig. 12와 Fig. 13 그리고 Fig. 21) 경향은 다르게 나타났다. 밀양의 이상기상 해에는 꼬투리 형성기 때 꼬투리 형성수의 감소가 두드러지고 종실비대기부터는 차이가 감소하는 경향이 평년 기후에 임의로 기온을 상승시켰을 때의 반응과 비슷했다 (Fig. 12). 그러나 전주에서는 꼬투리 형성기 때 꼬투리 형성수의 차이는 크지 않았지만 종실비대기로 갈수록 그 감소가 증가하는 경향으로 모의되었다 (Fig. 13). 즉, 꼬투리 형성수의 감소가 종실비대기 때에 회복되지 않고 그 감소 경향이 지속적으로 증가하는 현상이 임의로 고온 조건일 때 감소 경향이 줄어드는 것과 비교했을 때 달랐다는 것이다.

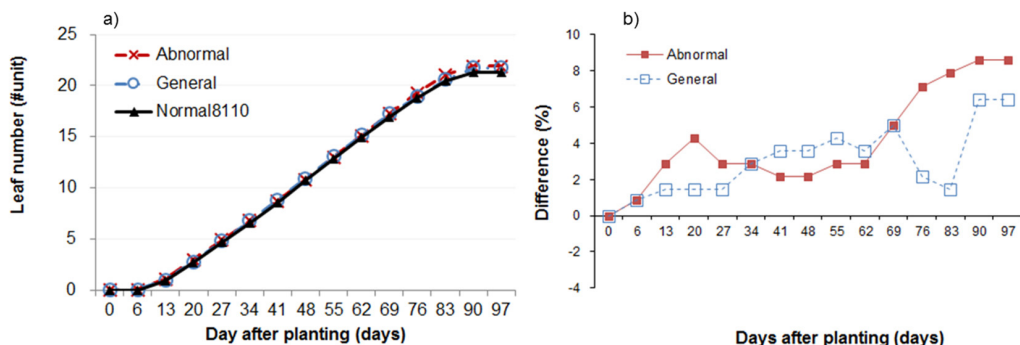


Figure 10 a) is the leaf number simulated in crop model during the years which the high temperature occurred and the years which the high temperature did not occur in Jeonju. b) is the difference of leaf number at two cases, respectively.

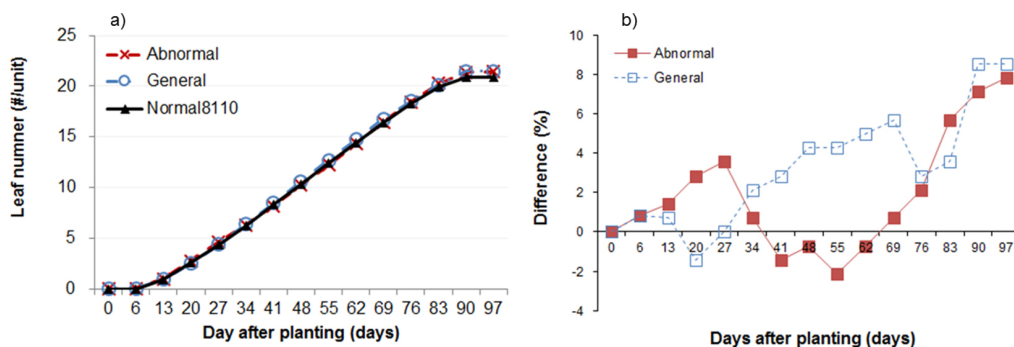


Figure 11 a) is the leaf number simulated in crop model during the years which the high temperature occurred and the years which the high temperature did not occur in Miryang. b) is the difference of leaf number at two cases, respectively.

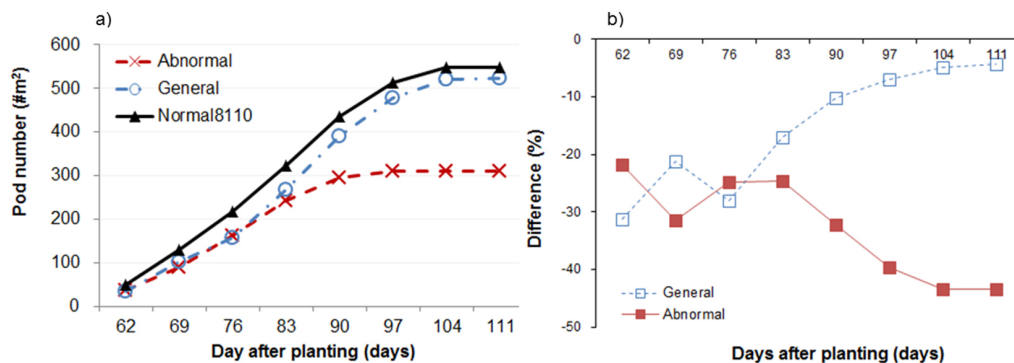


Figure 12 a) is the pod number simulated in crop model during the years which the high temperature occurred and the years which the high temperature did not occur in Jeonju. b) is the difference of pod number at two cases, respectively.

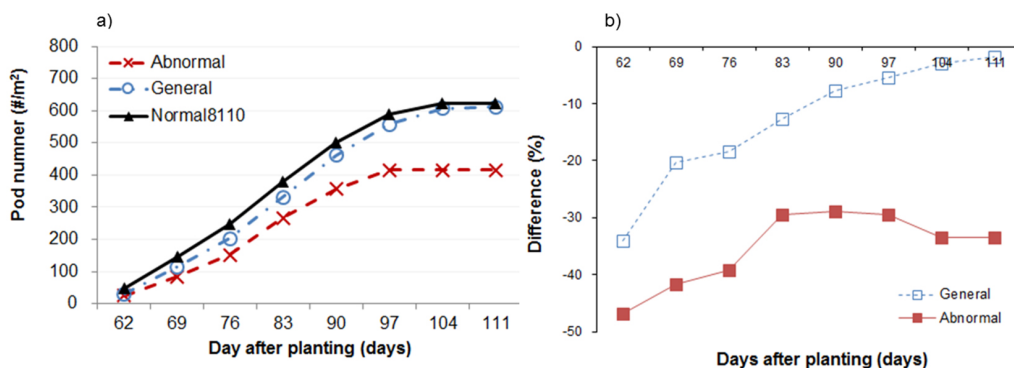


Figure 13 a) is the pod number simulated in crop model during the years which the high temperature occurred and the years which the high temperature did not occur in Miryang. b) is the difference of pod number at two cases, respectively.

3.3.2 파종시기 이동에 따른 수량반응

전주와 밀양에서 1981년부터 2010년까지 4개의 다른 파종일 (6월 5일, 10일, 15일, 20일) 조건에서 CROPGRO-Soybean를 모의하였다. 최근 작황시험보고서 (2003-2013년)의 파종일 정보를 바탕으로 6월 10일을 기준 파종일로 설정한 후, 6월 10일 파종일을 기준으로 각각 3개의 다른 파종일에서 모의된 잠재수량 (yield potential)과의 차이를 계산하였다 (Fig. 14와 Fig. 15). 또한 2.3.1에서 제시한 것과 같이 최근 2003년에서 2010년 동안의 이상고온의 해 (abnormal year)와 정상기상의 해 (normal year)에서도 각각 다른 3개 (6월 5일과 6월 15일, 20일)의 파종일에서 모의된 잠재수량을 6월 10일 파종일을 기준으로 잠재수량의 상대적인 차이를 분석하였다 (Fig. 14b and Fig. 15b). 1981-2010년 동안 전주와 밀양 두 지점에서 6월 5일의 파종일 단축에 의한 yield potential의 증가 (평균 +4%, 전주에서 최대 +10%)는 감소 (평균 -1%, 전주에서 최대 -7%)보다 큰 것으로 나타났고, 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 yield potential의 감소 (평균 -15%, 전주에서 최대 -15%)가 증가 (평균 +5%, 밀양에서 최대 +6%)보다 더 큰 것으로 나타났다. 두 지점의 최근 2003년부터 2010년 동안 normal year의 6월 10일 파종 기준에서 6월 5일의 파종일 단축 혹은 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 잠재수량의 상대적 차이는 거의 나타나지 않았다. 그러나 abnormal year에서는 6월 10일의 파종을 기준으로 6월 15일과 20일의 파종일 지연은 잠재수량을 -4 ~ -8% 감소시킬 수 있고, 파종일 단축은 +1 ~ +3%로 잠재수량을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 파종일이 이동되면 재배기간 중에 생육단계도 이동되고 이 이동에 의한 고온발생시기의 이동이 수량변화에 영향을 미쳤을 것이다.

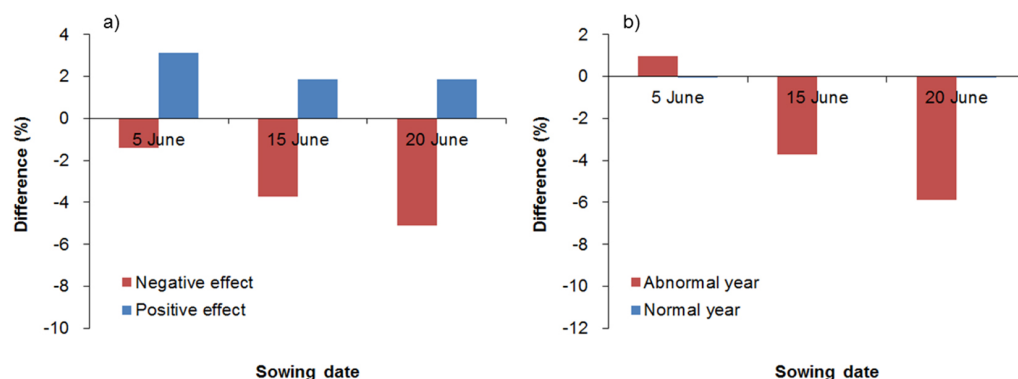


Figure 14 a) is the relative change of yield potentials for the sowing day shortage and delay during 1981-2010 in Jeonju. b) is the relative change of yield potential during 2003-2010. The relative change of yield potential was that the yield of June 5, 15, and 20 were subtracted respectively from the yield of June 10.

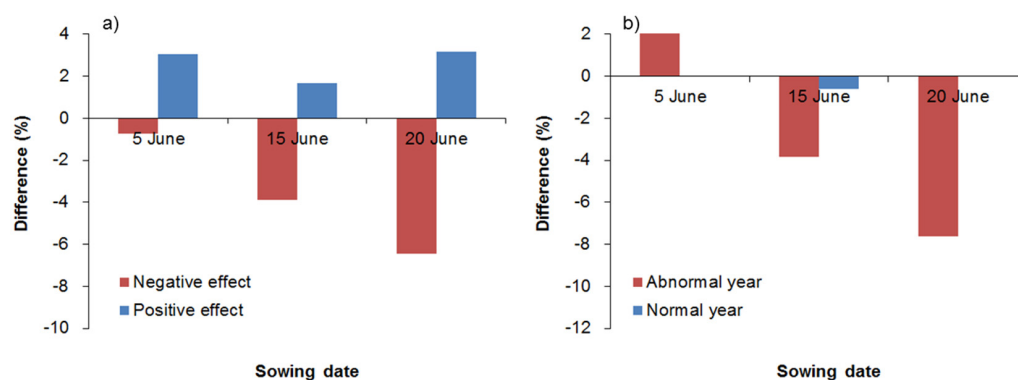


Figure 15 a) is the relative change of yield potentials for the sowing day shortage and delay during 1981-2010 in Miryang. b) is the relative change of yield potential during 2003-2010. The relative change of yield potential was that the yield of June 5, 15, and 20 were subtracted respectively from the yield of June 10.

3.4 미래기후조건 하의 작물반응

3.4.1 평년기후 대비 2°C 및 4°C 상승에 따른 작물반응

Fig. 16과 Fig. 17은 전주와 밀양의 평년 기후 (1981-2010년, normal8110)와 이 평년 기후에 임의로 2°C 및 4°C 상승 조건을 만들고 CROPGRO-Soybean를 모의한 후 잎 출현수 (leaf number)를 나타낸 것이다. 또한 임의의 2°C와 4°C 상승 조건에서의 잎 출현수와 평년 기후조건에서의 잎 출현수의 차이를 계산하였다 (Fig. 18). 전주와 밀양 두 지점 모두에서 파종 및 개화 후 잎의 출현이 마무리될 때까지, 전주와 밀양의 평년 기후의 2°C 상승 조건에서 콩 잎의 출현이 평년보다 1.3개/stem (19%)의 증가하는 긍정적인 효과로 나타났다. 4°C 상승 조건에서는 2°C 조건과 비슷했으며, 오히려 종실비대기가 완료될 때까지도 계속 진행되어 평년 기후조건에서보다 각각 2.6개/stem (38%)와 2.4개/stem (34%)로 왕성하게 잎의 발육이 진행될 수 있는 것으로 모의되었다. 특히, 4°C 상승 조건에서 개화 후 (after R2 stage) 잎의 발육이 2°C 상승 조건에서보다 각각 15 ~ 18%/week의 속도로 잎의 발육이 왕성하게 계속 진행되었다.

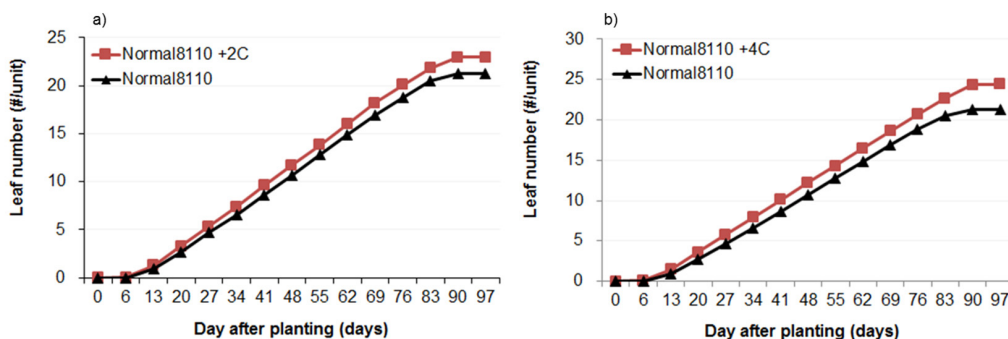


Figure 16 The leaf number simulated in crop model with the normal climate and added +2°C of temperature (a) and 4°C of temperature (b) to the normal climate during 1981–2010 in Jeonju.

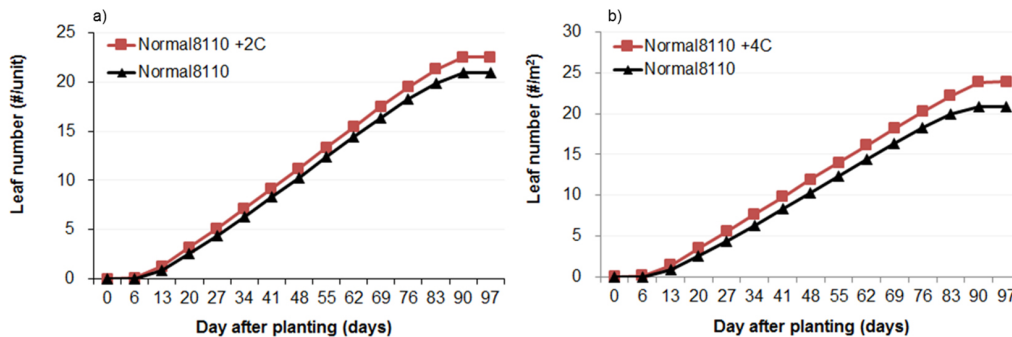


Figure 17 The leaf number simulated in crop model with the normal climate and added +2°C of temperature (a) and 4°C of temperature (b) to the normal climate, respectively during 1981–2010 in Miryang.

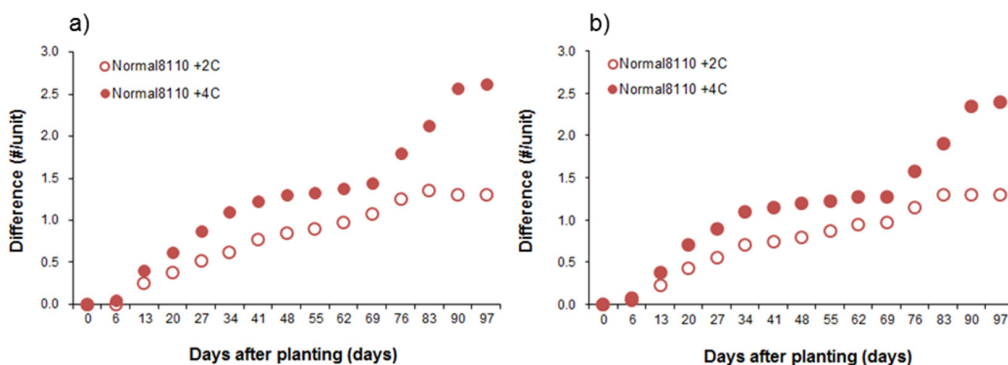


Figure 18 The difference of leaf number between the normal climate and added 2°C and 4°C to normal climate, respectively in Jeonju (a) and Miryang (b).

Fig. 19와 Fig. 20은 전주와 밀양의 평년 기후와 이 평년 기후로부터 임의로 2°C 및 4°C 상승 조건에서 CROPGRO-Soybean을 모의한 꼬투리 수 (pod number)이다. 또한 임의의 2°C와 4°C 상승 조건에서의 꼬투리 수와 평년 기후조건에서의 꼬투리 수의 차이를 계산하였다 (Fig. 21). 평년 기후의 2°C 상승 조건의 경우, 두 지점 모두에서 꼬투리가 형성되는 시기에는 평년 기후에서보다 각각 -25%와 -33% 감소하였지만 이 차이가 점점 감소하여 약 30일이 경과한 후(after R5)에는 평년보다 증가하는 경향을 보여 결과적으로 각각 10%와 9% 증가하여 종실무게 (grain weight)에서도 각각 10%와 9%의 긍정적인 효과로 반영될 수 있는 것으로 모의되었다. 그러나 평년 기후의 4°C 상승 조건에서는 2°C 상승 조건에서의 긍정적인 반응과는 다른 반응을 보였다. 전주에서는 개화 후 꼬투리가 형성되는 시기에 평년보다 거의 -67%까지 감소하였다가 종실비대기 이후에도 약 -16%까지 감소되는 것으로 모의되었다. 밀양에서는 꼬투리 형성기에 평년보다 약 -56%까지 감소하였다가 종실비대기 후반에는 거의 -15% 감소되는 것으로 모의되었다. 그러나 두 지점 모두에서 꼬투리 형성기 때, 4°C 라는 고온이 이미 부정적으로 반영되었기 때문에 종실무게는 각각 -15%와 -17% 감소하는 것으로 모의되었다. 정리하면, 콩 생육모형의 평년 기후 (1981-2010년)의 2°C 상승 조건에서 개화 후 콩의 잎의 발육은 2%/week 내외로 계속 진행되었지만 꼬투리 형성 및 종실비대에 부정적인 영향보다는 긍정적인 영향을 작용할 수 있다. 그러나 4°C 상승 조건은 개화 후에도 15% 이상의 영양생장기관 (예, 잎 등)의 발육이 계속 진행되면서 꼬투리 형성과 종실비대에 부정적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

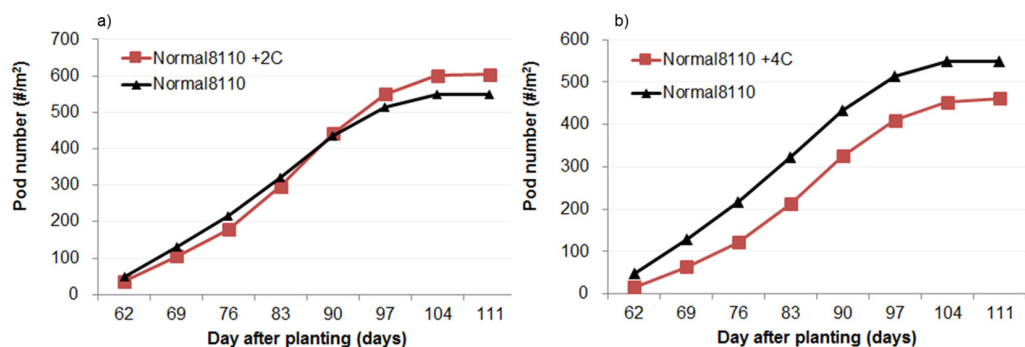


Figure 19 The pod number simulated in crop model with the normal climate and added +2°C (a) and 4°C (b) to the normal climate during 1981–2010 in Jeonju.

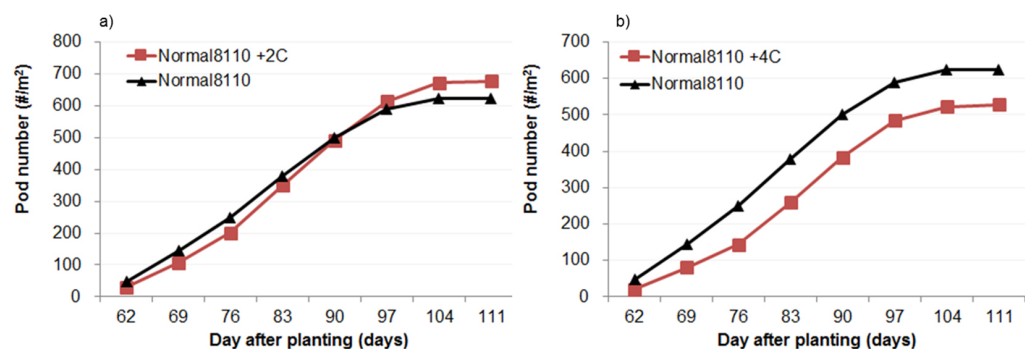


Figure 20 The pod number simulated in crop model with the normal climate and added +2°C (a) and 4°C (b) to the normal climate during 1981–2010 in Miryang.

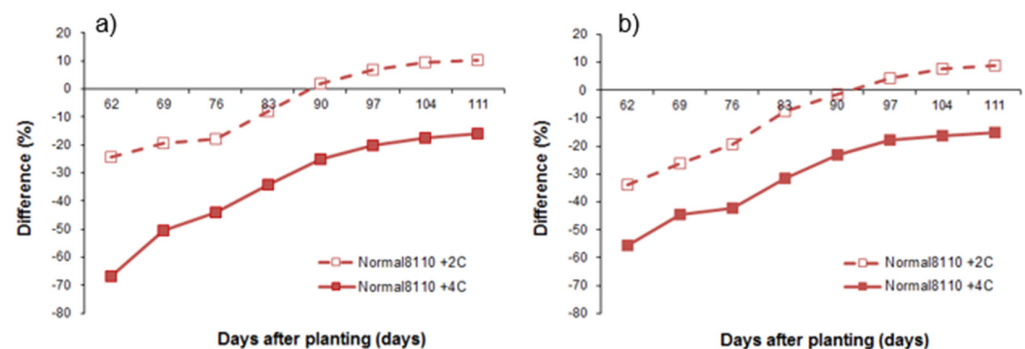


Figure 21 The difference of pod number between the normal climate and added 2°C and 4°C to normal climate, respectively in Jeonju (a) and Miryang (b).

3.4.2 이상고온발생 전망

전주와 밀양의 과거 관측 기후 (1981-2010년)의 일 최고기온에서 39°C 이상의 고온과 일 최저기온에서 27°C 이상 발생한 일수를 계산하였는데, 일 최고기온의 경우, 밀양에서만 3일 발생했다 (Fig. 22). 1994년 7월에 19일을 제외하고 18일, 20-21일 동안 39°C 이상의 고온이 3일 지속된 경우는 1회 발생했던 것으로 나타났다. 그러나 일 최저기온의 경우, 전주에서는 일 최저기온이 27°C 이상이었던 날이 9일 발생하였는데, 1983년과 1984년, 2002년에는 1일씩, 1994년과 1998년, 2001년에는 2일씩 발생했지만 일 최고기온에서처럼 연속적으로 3일 이상 지속된 경우는 나타나지 않았다. 정리하면 과거 관측기후에서 일 최고기온의 임계온도 발생 일수보다 일 최저기온의 임계온도 발생 일수가 많았을 뿐만 아니라 대부분 7월 말에 발생했는데, 이 시기가 콩 작물의 개화시기에 해당되면 화분의 수정에 영향을 줄 수 있었을 것이다.

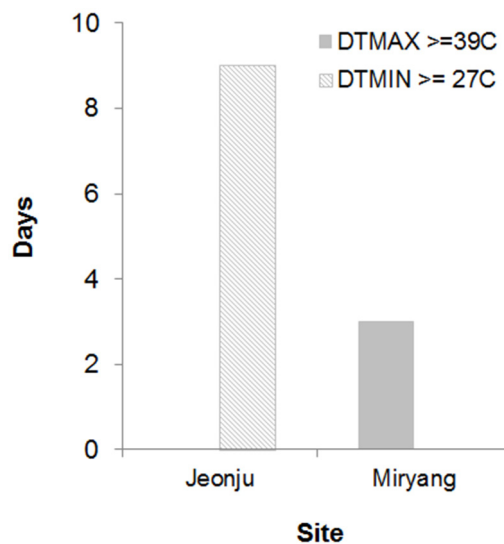


Figure 22 The number of days on which the critical temperatures, such as 39°C of daily maximum temperature and 27°C of daily minimum temperature, respectively occurred during observation (1981-2010).

전주와 밀양의 미래 기후변화 시나리오 (2020-2050년)의 일 최고기온과 일 최저기온에서 미래에 임계온도의 발생 일수를 계산하였다 (Fig. 23). 2020년부터 2050년까지 전주의 미래 기후변화 시나리오의 RCP 4.5와 RCP 8.5의 일 최고기온에서 39°C 발생 일수가 각각 27일과 7일, 밀양의 RCP 4.5와 RCP 8.5에서는 각각 23일과 14일로 나타나서 밀양에서 일 최고기온의 임계온도 발생이 더 많이 나타날 수 있는 것으로 전망되었다. 그러나 일 최저기온에서 27°C 발생 일수는 2050년까지 전주의 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 122일과 115일, 밀양의 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 22일과 18일로 나타나서 전주에서 일 최저기온에 대한 고온 발생이 거의 10배 이상 더 많이 발생할 수 있을 것으로 전망되었을 뿐만 아니라 일 최고기온의 임계온도 발생 일수보다 많았다.

또한 전주와 밀양의 미래 기후변화 시나리오에서 39°C와 27°C 발생이 3일 이상 지속되는 빈도 (frequency)를 계산하였다. 전주에서 39°C 발생이 3일 이상 지속되는 빈도가 2020년에서 2050년까지 RCP 4.5에서는 4회, RCP 8.5에서는 1회 나타나는 것으로 전망되었고, 밀양의 RCP 4.5에서는 2회, RCP 8.5에서는 3회 발생할 수 있을 것으로 전망되었다. 27°C 발생이 3일 이상 지속되는 빈도의 경우, 전주에서는 2050년까지 RCP 4.5에서 15회, RCP 8.5에서 14회, 밀양에서는 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 2회 발생할 수 있을 것으로 전망되었다. 일 기후자료에서 일 최고기온의 발생 시각과 일 최저기온의 발생 시각이 매일매일 다르다. 그러나 대체로 그들의 발생 시각을 유추할 수 있다. 대부분의 일 최고기온은 낮 시간대, 일 최저기온은 한 밤중 혹은 익일 해 뜨기 직전에 관측된다. 그런 점을 이해할 때, 일 최저기온에 대한 미래 임계온도의 발생 일수와 지속 발생 빈도가 일 최고기온에서의 발생 일수와 발생 빈도보다 높을 수 있는 것으로 전망된 것과 이러한 임계온도의 발생이 대부분 7월과 8월에 나타난 것을 고려할 때, 이 시기는 개화시기에서 꼬투리 형성 및 종실비대기로서 불임 혹은 꼬투리 형성 및 종실 비대에 고온에 대한 영향이 반영될 수 있었을 것으로 판단된다.

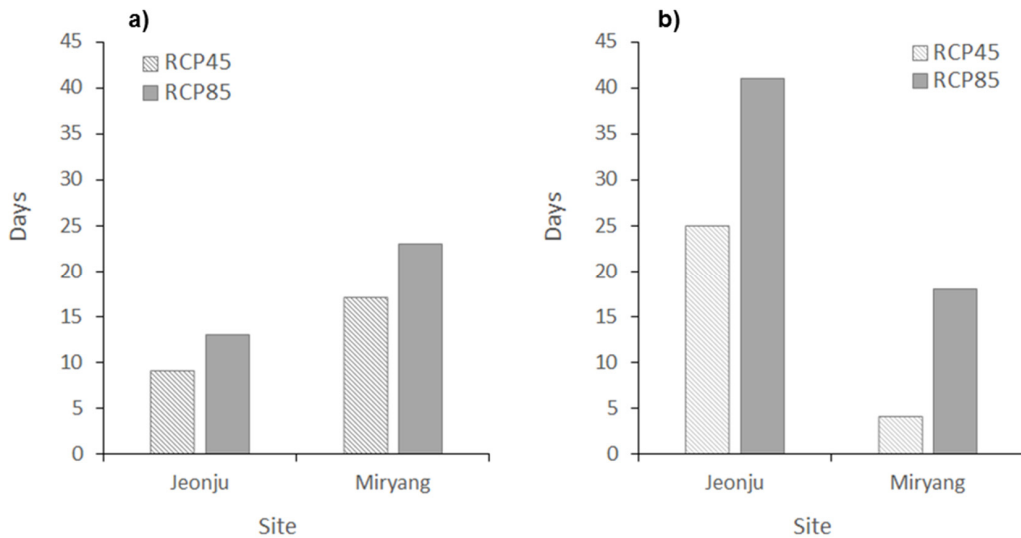


Figure 23 The number of days on which the critical temperatures, such as 39°C of daily maximum temperature and 27°C of daily minimum temperature, respectively occurred in the future climate scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5 during from 2021 to 2050.

3.4.3 이상고온에 따른 수량변화 전망

Fig. 24는 2021년부터 2050년의 미래 기후변화 시나리오에서 앞서 분석된 임계온도가 발생한 해와 그렇지 않은 해에 대하여 CROPGRO-Soybean에서 모의된 꼬투리 수를 나타낸 것이다. 미래 기간 중에도 임계온도가 발생하지 않은 해와 임계온도가 발생한 해의 꼬투리 수의 차이가 최근 과거 관측기후 (2003-2010년)의 이상해의 차이 및 반응과 비슷한 경향을 보였다. 또한, Historical 2021-2050년에 대해 모의된 잠재수량을 기준으로 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 모의된 잠재수량의 상대적 변화를 계산하였다 (Fig. 25). 종실비대기에 임계온도가 발생한 경우, RCP 4.5이든 RCP 8.5에서 모두 잠재수량이 감소하는 것으로 전망하였다. 감소 수준은 현재보다 약 -30%에서 -38% 정도로 감소할 것으로 전망되었다. 과거 관측기후 (3.3절)에서 파종기 이동에 의한 생육단계 이동에 따른 수량변화 분석을 본 것과 마찬가지로, 미래 기후에 대해서도 파종기 이동에 따른 잠재수량의 변화를 평가하였다. RCP 4.5에서, 6월 20일까지 지연했을 경우, 6월 10일보다 (상대적으로) 약 20%까지 감소할 수 있는 것으로 전망되었고, RCP 8.5에서는 감소 수준이 35%를 넘을 수 있는 것으로 전망되었다 (Fig. 26과 Fig. 27).

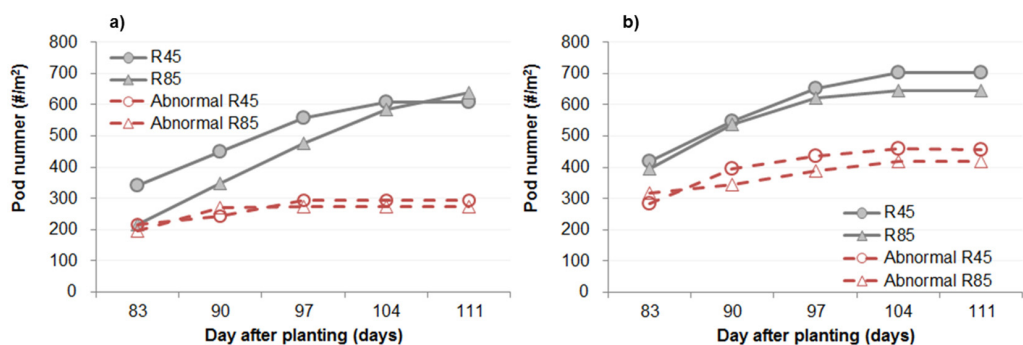


Figure 24 Comparison of pod number simulated in CROPGRO-Soybean in Jeonju (a) and Miryang (b) under future climate (2021 to 2050).

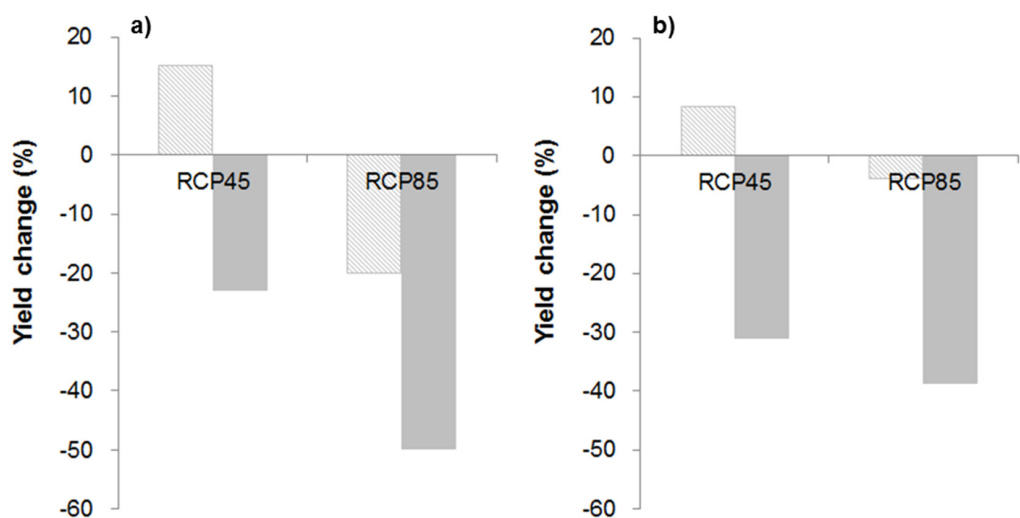


Figure 25 Comparison of the relative yield change calculated from the yield potential simulation of CROPGRO-Soybean in Jeonju (a) and Miryang (b) under future climate (2021 to 2050).

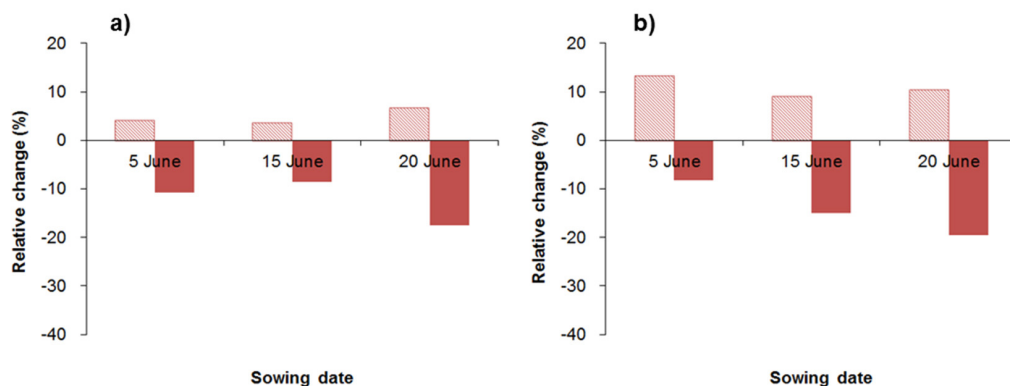


Figure 26 The relative change of yield potentials for the sowing day shortage and delay on future climate scenario of RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b), respectively during from 2021 to 2050 in Jeonju. The relative change of yield potential was that the yield of June 5, 15, and 20 were subtracted respectively from the yield of June 10.

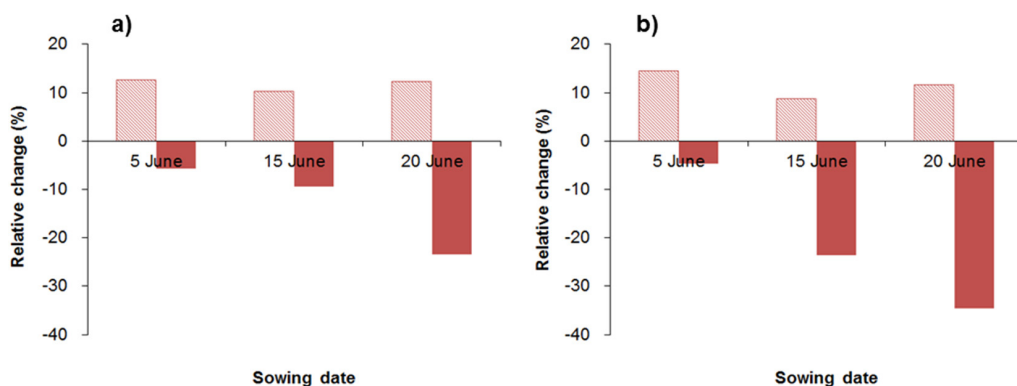


Figure 27 The relative change of yield potentials for the sowing day shortage and delay on future climate scenario of RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b), respectively during from 2021 to 2050 in Miryang. The relative change of yield potential was that the yield of June 5, 15, and 20 were subtracted respectively from the yield of June 10.

본 연구에서 사용한 콩 생육모형은 입력 요소 (예, 유전 모수, 토양 정보 등)의 개선이 필요하고 수량 예측성이 낮은 점 등 문제가 여전히 존재한다. 그러나 모형의 이러한 예측력을 알고 있는 상태에서 과거 관측기후에서 이상고온이 발생한 해와 정상기온 해에서 모형의 생육 및 수량반응을 비교하였고, 이 정보를 바탕으로 지속적으로 모형을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 비록 한 개의 미래 기후변화 시나리오(KMA-12.5km)에서 이상고온 발생한 해와 미래 기후변화에서도 정상기온인 해의 수량반응을 비교하였지만, 후속 연구에서 현재 다양한 방법으로 상세화된 미래 기후변화 시나리오에서 이상고온이 발생한 해와 미래 기후변화에서도 정상기온인 해의 수량반응을 비교함으로써 상세화 방법에 대한 특성과 불확실성뿐만 아니라 작물모형에서의 수량반응에 대한 특성에 대한 정보들도 분석하고 비교하려고 한다. 또한 전지구 기후변화 모형에서의 과거 기후변화 시나리오(historical)의 이상고온발생에 대한 재현성 비교 결과를 제시해야, 미래 기후변화 시나리오에서 이상고온발생에 대한 수량변화 전망에 대한 연구결과를 신뢰할 수 있을 것으로 판단되는데, 이것 또한 후속 연구에서 고려하고 있다.

4. 결론 및 다음 단계

콩 생육모의에 따르면 고온 조건이 항상 부정적인 요인으로만 작용하지 않는다. 본 연구에서 사용한 콩 생육모형에서 향상시켜야 할 입력 요소들 (예, 유전 모수, 토양 정보 등)이 여전히 존재하지만 콩 작물의 경우, 2°C 상승 조건은 부정적인 영향보다 긍정적인 영향으로 작용할 수 있고, 4°C 상승 조건은 부정적 영향을 미칠 수 있는 것으로 모의되었다. 즉 2°C 조건에서 꼬투리 형성기에 다소 감소하는 현상 (-25%와 -33%)이 발생하였지만 수확기에는 꼬투리 수가 증가하였고, 결과적으로 종실무게도 감소하지 않는 것으로 모의되었다 (10%와 9%). 그러나 4°C 조건에서는 꼬투리가 형성되는 시기에 거의 -56% ~ -67%까지 감소하였다가 종실비대기 이후에도 약 -15% ~ -16%까지 감소되는 것으로 모의되어 수량구성요소인 꼬투리 형성과 종실비대에 부정적인 영향을 주었다. 따라서 4°C 이상의 상승은 수량감소에 대한 임계온도로 가정할 수 있을 것으로 판단된다. 콩의 생육 및 수량구성요소에 영향을 미칠 수 있는 임계온도의 발생 일수와 3일 이상 지속되는 빈도가 최근 관측 기후 (1981-2010년)에 비해 미래 기후변화 시나리오 (2020-2050년)에서 크게 증가한다. 따라서 미래 기후 조건에서는 종실비대기 때 꼬투리수의 감소 경향이 증가하는 것으로 전망되었다. 하지만 최근 관측 기후 (2003-2010년)에서 콩의 개화기 이후 종실비대기 때 4°C 이상의 고온이 발생한 연도 (2006, 2007, and 2010)와 그렇지 않았던 연도 (2003-2005 and 2008-2009)를 비교한 결과, 잎 출현수와 꼬투리 수의 감소 경향이 '전 생육기간 온도 고정 상승 조건'에서의 모의 결과와 다른 것을 확인하였다. 발육단계별 선택적 고온 조건 부여 등 정확한 결론을 얻기 위해서는 후속 연구가 필요하다.

또한 본 연구에서는 한반도에 대한 8개 전지구기후모형 (Global Climate Model, GCM)으로부터 상세화된 미래 기후변화 시나리오만을 적용하였지만 본 연구의 후속 연구에서는 더 다양한 전지구기후모형에서 상세화된 기후변화 입력자료를 활용할 필요가 있다. 아울러, 작물 생육모형에 있어서도 DSSAT 패키지만을 사용하는 것이 아니라 APSIM 패키지와 토양수분 모듈 혹은 다른 모듈 (예, 광합성 등) 중심으로 만들어진 모형 등에서 추가적으로 더 선별하여 작물 생육모형의 다중양상별 시뮬레이션을 시도하는 것도 필요하다. 그러기 위해서는 작물 생육모형의 품종모수부터 토양정보에 이르기까지 많은 입력정보의 개선이 필요할 뿐만 아니라 각각의 작물 생육모형

의 구동에 필요한 입력정보의 데이터베이스 구축이 필요할 것으로 판단된다. 이런 점에서 아직 개선하고 준비할 사항들이 많지만, 본 연구를 통해 2가지 이상의 작물 생육모형 구동에 필요한 입력정보의 데이터베이스 구축에 대한 틀을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCE

- 국립식량과학원, 1989: 시험연구사업 보고서(전작편).
- 조재필. 2013. “불확실성을 고려한 농업용 저수지의 기후변화 영향 평가.” APEC 기후센터.
- 조재영 등. 1989. 전작. 향문사. pp230.
- 정유란, 2015: 상세화 기후변화전망 정보를 활용한 농업분야의 기후변화 영향평가 방법의 개선 및 개발-농업이상기후/생산성지수-, 연구보고서 2015-18.
- Bassu, S., N. Brisson, J.-L. Durand, K. Boote, J. Lizaso, J. W. Jones, C. Rosenzweig, A. C. Ruane, M. Adam, C. Baron, B. Basso, C. Biernath, H. Boogaard, S. Conijn, M. Corbeels, D. Deryng, G. De Sanctis, S. Gayler, P. Grassini, J. Hatfield, S. Hoek, C. Izaurralde, R. Jongschaap, A. R. Kemanian, K. C. Kersebaum, S.-H. Kim, N. S. Kumar, D. Makowski, C. Müller, C. Nendel, E. Priesack, M. V. Pravia, F. Sau, I. Shcherbak, F. Tao, E. Teixeira, D. Timlin, and K. Waha, 2014: How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?. *Global Change Biology*, 20, 2301-2320. DOI: 10.1111/gcb.12520
- Boote, K. J., J. W. Jones, G. Hoogenboom, G. G. Wilkerson, and S. S. Jagtap, 1989: PNUTGRO V1.02: Peanut crop growth simulation model. User's Guide. Florida Agricultural Experiment Station Journal No. 8420. University of Florida, Gainesville, FL. 76 pp.
- Chung, U., K. S. Cho, and B. W. Lee, 2006: Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(4), 229-241.
- Chung, U., J.P. 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*, Vol. 17, 108~125. Doi: 10.5532/KJAFM.2015.17.2.108
- _____, H. S. Cho, J. H. Kim, W. G. Sang, P. Shin, M. C. Seo, W. S. Jung, 2016: Responses of soybean yield to high temperature stress during growing season: A Case study of the Korean Soybean. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 18, 188~198. Doi: 10.5532/KJAFM.2016.18.4.188
- FAOSTAT. 2012: Agriculture organization of the United Nations. Statistical database.
- Gibson, L. R., and R. E. Mullen, 1996: Influence of Day and Night Temperature on Soybean Seed Yield. *Crop Science* 46, 99-104.

- Holmberg, S. A. 1973. Soybeans for cool season climates. *Agric. Hort. Genet.* 31:1-20.
- 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.
- 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.
- Judd, R., T. M. Tekrony, D. B. Egli, and G.M. White, 1982: Effect of freezing temperatures during soybean seed maturation on seed quality. *Agron J.* 74:645-650.
- Kim, S. K., J. S. Park, Y. S. Lee, H. C. Seo, K. S., Kim, and J. I. Yun, 2004: Development and use of digital climate models in Northern Gyeonggi Province - II. Site-specific performance evaluation of soybean cultivars by DCM-based growth simulation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 6, 61-69.
- Kim, D. J., S. O. Kim, K. H. Moon, and J. I. Yun, 2012: 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, 132-141. Doi: 10.5532/KJAFM.2012.14.3.132
- Kim, S. D., E. H. Hong, Y. H. Lee, Y. H. Hwang, Y. H. Moon, H. S. Kim, E. H. Park, Y. G. Seong, Y. H. Kim, W. H. Kim, Y. H. Ryu, and R. K. Park. 1992: Resistant to disease, good in seed quality, high yielding and widely adapted new soybean variety "Taekwangkong". *Research Report of RDA (U & I)*, 32, 11-15.
- Lee, E. S., and S. T. Yoon, 2008: Cultivation conditions and yield characteristics of soybean in Northern Gyeonggi region. *Korean Journal of International Agriculture*, 20, 85-93.
- Lee, C. K., B. W. Lee, Y. H. Yoon, and J. C. Shin, 2001: Temperature response and prediction model of leaf appearance rate in rice. *Korean Journal of Crop Science*, 46, 202-208.
- _____, K. S. Kwak, J. H. Kim, J. Y. Son, and W. H. Yang, 2011: Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Korean Journal of Crop Science*, 56, 233-243.
- Lee, K. J., D. N. Nhuan, D. H. Choi, H. Y. Ban, and B. W. Lee, 2015: Effects of elevated air temperature on yield and yield components of rice. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 17, 156-164.
- Liu, B., S. Asseng, L. Liu, L. Tang, W. Cao, and Y. Zhu, 2016: Testing the responses of

- four wheat crop models to heat stress at anthesis and grain filling. *Global Change Biology*, 22. 1890–1903. Doi:10.1111/gcb.13212
- Lobell, D. B., G. L. Hammer, G. McLean, C. Messina, M. J. Roberts, and W. Schlenker, 2013: The critical role of extreme heat for maize production in the United States, *Nature Climate Change* 3, 497–501. Doi:10.1038/nclimate1832
- Marioano, A., P. Martre, S. Asseng, F. Ewert, C. Muller, Others, 2016: Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles. *Field Crops Resource*, In press. Doi: 10.1016/j.fcr.2016.05.001
- NICS, 2014: Development of crop yield monitoring system using crop growth simulation models in major food crops, pp.142.
- Paola, A. D., R. Valentini, and M. Santini, 2015: An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96, 709–714. Doi: 10.1002/jsfa.7359
- Park, H. J., W. Y. Han, K. W. Oh, H. T. Kim, S. O. Shin, B. W. Lee, J. M. Ko, and I. Y. Baek, 2014: Growth and yield components responses to delayed planting of soybean in Southern region of Korea. *Korean Journal of Crop Science*, 59, 483–491. Doi: 10.7740/kjcs.2014.59.4.483
- Song, E. Y., K. H. Moon, I. C. Son, C. H. Kim, C. K. Lim, D. Son, and S. Oh., 2014: Impact of elevated temperature in growing season on growth and fruit quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 16, 349 ~ 358. Doi: 10.5532/KJAFM.2014.16.4.349

연구보고서 2016-18

**미래기후조건에서 이상고온이 우리나라 콩 생육 및
종실수량에 미치는 영향**

Influence of extreme high temperature on the growth and grain yield of
soybean under the projected future climate in South Korea

정유란



APEC 기후센터

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

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

www.apcc21.org



9 791156 981695

ISBN 979-11-5698-169-5