

## 재배기간 동안 이상고온 발생에 따른 콩의 수량반응 탐색

정유란<sup>1\*</sup> · 조현숙<sup>2</sup> · 김준환<sup>2</sup> · 상완규<sup>2</sup> · 신평<sup>2</sup> · 서명철<sup>2</sup> · 정우석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>APEC 기후센터, 응용사업부, 응용사업팀

<sup>2</sup>농촌진흥청 국립식량과학원, 작물재배생리과 기후변화대응연구실

<sup>3</sup>건국대학교, 생명환경과학대학 응용생물학과

(2016년 10월 19일 접수; 2016년 10월 27일 수정; 2016년 11월 17일 수락)

## Responses of Soybean Yield to High Temperature Stress during Growing Season: A Case Study of the Korean Soybean

Uran Chung<sup>1\*</sup>, Hyeoun-Suk Cho<sup>2</sup>, Jun-Hwan Kim<sup>2</sup>, Wan-Gyu Sang<sup>2</sup>, Pyeong Shin<sup>2</sup>, Myung-Chul Seo<sup>2</sup>, Woo-Seuk Jung<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Climate Application Department, Climate Application Team, APEC Climate Center, Busan

<sup>2</sup>Climate Change Assessment Research Lab., National Institute of Crop Science, RDA, Jeonju

<sup>3</sup>Department of Applied Bioscience, College of Life & Environmental Sciences, Konkuk University, Seoul

(Received October 19, 2016; Revised October 27, 2016; Accepted November 17, 2016)

### ABSTRACT

In soybeans, responses of high temperature according to shift of sowing dates during the growing season was explored using the crop model, CROPGRO-soybean. In addition, it analyzed impact on change of sowing dates affects yield potential of soybean under future climate scenario (2041-2070). In Jeonju and Miryang during 1981-2010, if sowing at 15 or ten days ahead from 10 June, namely in shorten of the sowing day (i.e. when sown on 25 or 30 May), the yield potential reduced. However, the yield potential increased when sown 5 June. In the case of delay of sowing day (i.e. when sown on 15 or 20 June), reduction of yield potential in the average -5% was higher than increase in the average +2%. In particular, the 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 except when sown on 25 May. 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 Miryang, while the yield potential decreased in Jeonju except when sown on 5 June. However, delay of the sowing day influenced on the reduction of yield potential both in two sites. In future climate scenario of Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 during from 2041 to 2070, the increase and decrease of yield potential for shorten of the sowing day were +10/-9% for RCP 8.5 of Jeonju, and +14/-9% for RCP 8.5 of Miryang, respectively. Additionally, it showed +10/-17% for RCP 8.5 in Jeonju, and +10/-29% for RCP 8.5 in Miryang, respectively in the increase and decrease of yield potential for delay of the sowing day.

**Key words:** High temperature, Reproductive stage, Soybean, Rainfed crop, Climate change, Crop simulation models



\* Corresponding Author : Uran Chung  
(uchung@apcc21.org)

## I. 서 언

우리나라에서 최근 쌀 적정 생산 유도과 곡물자급률 향상을 위한 정책으로 농가에 타작물, 특히 밭작물 재배를 장려하고 있다. 기후 특성상 춘천, 연천과 같은 강원, 경기북부에서는 콩을 단작으로 재배해왔고, 남부지역에서는 주로 가을 보리, 마늘, 양파 등 동계작물과 이모작 체계로 콩을 많이 재배해왔다. 최근에는 온난화에 의해 봄감자, 봄배추 등 하계작물과의 작부체계에도 콩을 도입하는 경우가 많아졌다. 그러나 기후변화에 의한 빈번한 이상기상(예, 고온 혹은 한발) 발생으로 작물의 안전한 생육과 수량성 확보에 대한 염려가 증가하고 있다. 특히 개화시기에서 등숙기에 고온이 발생하면 수량이 크게 감소할 수 있다. 콩의 경우 생식생장기에 적정 평균기온은 29°C로써 37°C의 고온에서는 수량이 크게 감소할 수 있으며(Gibson and Mullen, 1996), 옥수수의 경우 2°C만 상승해도 수량이 5~13%가 감소할 수 있다고 하였다(Lobell *et al.*, 2013).

우리나라에서 기후변화에 의한 작물 생산성 영향평가는 벼에 대해서는 많이 이루어졌으나 밭작물에 대한 연구보고는 매우 적다. Park *et al.*(2014)은 온난화에 의해 작물의 생육기간이 길어지면서 만파 재배면적이 증가함에 따라 만파에 따른 생육 및 수량 반응을 평가하였고, Song *et al.*(2014)은 고추의 생육기간 중 고온에 의한 고추의 수량 감소를 평가하였다. 또한 Kim *et al.*(2013)은 콩 생육모형인 CROPGRO-Soybean을 한반도 미래 기후변화 시나리오에 적용하여 파종기 이동에 따른 미래의 콩 생산성 변동을 전망하였다. CERES-Wheat 나 APSIM-Nwheat, WheatGrow와 같은 대표적인 밀 생육모형에서 고온 반응을 개선하여 미래 고온 조건의 시나리오에서 생육 및 수량 반응을 평가한 연구 결과들이 최근 발표되었다(Liu *et al.*, 2016; Marioano *et al.*, 2016). 그러나 앞서 언급한 바와 같이 벼나 밀과 같은 작물에서는 고온 영향을 고려한 생육모형의 수정이 이루어지고 있으며 재배환경의 변화, 예를 들면 고온 조건에서 파종기 이동에 따른 수량 변화에 대한 연구들이 이루어지고 있는 반면, 콩이나 옥수수와 같은 작물에서는 아직 많지 않다. 뿐만 아니라 생육모형은 작물의 재배환경(예, 토양, 기상, 파종시기, 관개와 시비의 일정과 양 등) 정보에서부터 생물계절과 품종의 유전적 정보에 이르기까지 많은 정보를 필요로 한다.

국내에서 벼 생육모형(예, CERES-Rice 혹은 Oryza2000 등)을 위한 벼 품종의 유전적 정보와 벼의 생육모형에 대한 연구뿐만 아니라 고온 영향에 대한 연구 사례들은 많다(Lee *et al.*, 2001; Chung *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2015). 그러나 밭작물 특히, 국내 콩 작물 및 그 생육모형에 대한 연구와 그 생육모형을 구동할 수 있는 품종의 유전적 정보 및 콩의 생물계절 정보 등이 부족한 실정이다. 그럼에도 불구하고, 본 연구는 국내 콩 생육모형의 유전적 정보가 이미 보정 및 검증되어 있다는 가정하에서 파종일 이동에 따라 콩의 생식생장기 동안의 이상고온이 콩의 잠재수량 변화에 미치는 영향을 탐색하고자 수행하였다. 또한 미래 기후변화 시나리오에서도 파종일 이동에 따라 콩의 재배기간 동안 중 발생할 수 있는 이상고온이 콩의 잠재수량 변화에 미치는 영향을 찾고자 수행하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 작물모형: 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; Bassu *et al.*, 2014). DSSAT에서 두류의 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(Boote *et al.*, 1989; Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2010). 본 연구에서는 DSSAT 4.6 version에 포함된 콩 생육모형인 CROPGRO-Soybean을 사용하였다.

### 2.2. 콩의 생육단계

우리나라 작물시험장의 2003년부터 2010년까지 작황시험보고서에 의하면 단작의 경우 5월 25일에 파종, 이모작일 경우 6월 10일에 파종되었다. Table 1은 미국에서 콩의 생육단계별 평균 이동 일수(<http://www.extension.umn.edu/agriculture/soybean/growth-and-development/growth-stages/>)를 바탕으로 우리나라

**Table 1.** Growth stages of 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	September
	R5 to R6	15	
	R6 to R7	18	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 trifoliolate

V3: Three unrolled trifoliolate

V4: Four unrolled trifoliolate

V5: Five unrolled trifoliolate

R1: Beginning bloom

R2: Full bloom

R3: Beginning pod

R4: Full pod

R5: Beginning seed

R6: full seed

R7: Beginning maturity

R8: Full maturity

라 작황시험보고서의 국내 콩의 파종시기 정보를 고려하여 생육단계별 평균 이동 일수를 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 R2(개화기)에서 R4(꼬투리 신장기)까지를 7월 30일에서 8월 20일까지, R5(종실 착생기)에서 R7(생리적성숙기)까지를 8월 20일에서 9월 10일로 설정하였다. 또한 전주와 밀양에서 2003년부터 2013년까지 태광콩의 파종일로부터 개화시기와

수확기까지의 GDD(growing degree day, 생장온도일수)를 기준온도 0°C와 10°C에 대해 각각 계산하였다.

### 2.3. 기후자료

국립식량과학원 벼맥류부(익산)와 기능성작물부(밀양)의 인근에 있는 기상청 표준기상관측소의 과거 관측 기후자료를 2003년부터 2013년까지 수집하였다. 콩의 작황시험성적은 국립식량과학원 벼맥류부(익산)과 기능성작물부(밀양)의 2003년부터 2013년까지의 자료를 이용하였는데, 익산의 기상자료를 활용하지 않은 것은 기상청 표준기상관측소(전주) 기상자료를 활용하기 위해서였다. 2003년부터 2013년 동안 2.2에서 정의된 콩의 생육단계 중 개화 직후의 기후가 평년보다 2°C이상 높았던 2006-2007년과 2010년을 이상고온의 해(abnormal high temperature year)라고 정의하고, 그러한 이상고온을 보이지 않았던 나머지 해, 2003-2005년과 2008-2009년에 대해서는 정상온도의 해(normal temperature year)라고 명명하였다.

두 지점의 미래 기후변화 시나리오 자료는 2041년부터 2070년까지 기상청에서 제공된 남한 상세 기후변화 시나리오 자료를 수집하였다. 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 연구에서는 2041년부터 2070년까지 RCP 4.5와 RCP 8.5에 대한 전주와 밀양의 일별 미래 기후변화 시나리오 자료를 DSSAT의 기상 입력자료 형태로 변환하여 콩 생육모형 구동에 입력하였다.

### 2.4. 작물모형 구동

#### 2.4.1. 콩의 유전적 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. 국내콩에서 주요 보급 품종인 태광콩에 대한 재배관련 연구가 진행되어 왔다(Kim *et al.*, 1992; Lee *et al.*, 2008), 그러나 작물 생육모형 시뮬레이션을 위해 필요한 정보, 특히 유전모수와 관련된 연구 정보가 드문데, Kim *et al.* (2004)과

**Table 2.** The two references of genetic parameters for the Korean soybean cultivar, Taegwang

References	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	LFMAX	SLAVR	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR
NICS (2010)	12.70	0.32	18.71	4.92	9.52	35.84	9.56	1.03	350	300	1	0.19	10.10	1.35	29.28
Kim <i>et al.</i> (2004)	12.68	0.30	19.80	8.00	15.50	36.50	18.00	1.03	318	180	1	0.25	12.10	1.28	10.00

NICS: National Institute of Crop Science

Kim *et al.* (2012)이 장류콩(황금콩, 장엽콩, 태광콩 등)과 나물콩(은하콩)에 대해 유전모수를 추정 한 사례가 있으며, NICS(2010)에서 태광콩과 대원콩의 유전 모수를 추정한 사례가 있다(Table 2). 본 연구에서는 콩 주요 보급 품종인 태광콩(NICS, 2010)의 유전모수를 수집하여 2003년부터 2013년까지 수집된 밀양과 대구, 익산 등의 작황시험자료로부터 검증하여 활용하였다(data not show). 유전적 모수의 검증은 DSSAT 패키지의 GenCalc 프로그램을 이용하였다.

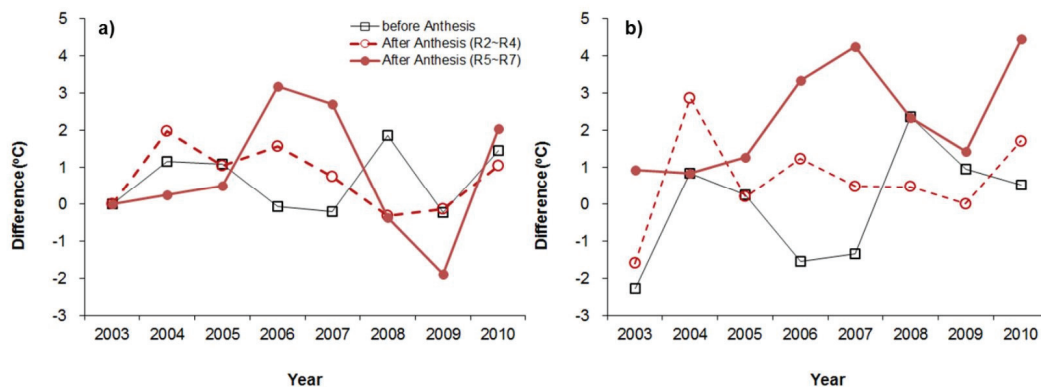
**2.4.2. 작물모형 구동을 위한 토양정보**

DSSAT의 토양 입력파일에서 모든 토양층에 공통으로 적용되는 정보들은 토양표면의 반사율(albedo), 하루 동안 최대로 증발시킬 수 있는 물의 양, 하루 동안 중력에 의해 토양층으로부터 제거되는 수분의 비율, 미국 농무부 토양보전국(Soil Conservation Service, SCS)의 유기특성곡선 번호 등이다. 또한 각 토층위별 정보로는 유효수분 최저한계(연구위조점에서 수분함량), 유효수분 최대한계(포장용수량에서의 수분함량), 포화용수량 상태에서의 최대수분, 뿌리생장지수(0.0-1.0), 포화상태 수리전도도, 가비중, 토양유기물

의 탄소당량 등이 있으며, 이 밖에 점토함량과 미사질 함량, 자갈함량, 전질소함량, 토양산도, 양이온치환용량 등이 필요한데, 본 연구에서는 국립농업환경과학원의 정밀토양도에서 해당 지점에 포함된 토양의 토성별(soil texture) 세부적인 물리 및 화학적 속성 정보를 바탕으로 토양정보를 추출하였다(<http://soil.rda.go.kr>).

**2.4.3. 파종일 이동 및 시뮬레이션 설정**

준비된 전주와 밀양의 과거 관측 기후(1981-2010년) 입력자료로부터 각각 4개의 파종일에서 콩 생육모형을 구동하였다. 4개의 파종일은 5일 간격으로 6월 5일, 10일, 15일, 20일로 설정하였으며 수분 스트레스가 없는 조건에서 모형을 반복 구동하였다. 또한, 미래 기후변화 시나리오 전망 조건에서는 콩 생육모형을 모의하기 위한 이산화탄소 설정이 필요한데, DSSAT package에서는 2가지 방법이 있다 (Kim *et al.*, 2012; Chung, 2015). CO2045.WDA 파일을 이용하는 방법과 실험설계 파일 (File X)의 재배환경에서 설정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 실험설계 파일의 재배환경 정보에서 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오의 이산화탄소 농도 변화를 입력하여 모형을 구동하였다.



**Fig. 1.** Past climate during growing season from 2003 to 2010 in Jeonju (a) and Miryang (b). The zero line represents normal climate.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 재배기간 동안 연구지역의 기후특성

Fig. 1은 2003년부터 2010년까지 전주와 밀양에서 파종 후 개화시기 전(before anthesis)까지와 개화 후 종실비대기간(after anthesis)까지 두 시기의 기온을 평년 기온과 비교한 것이다. 두 지점에서 2006년, 2007년, 그리고 2010년에 개화 후 종실비대기간 동안의 기온이 평년보다 평균 3~4°C이상이나 높았고, 특히 밀양에서 2010년에는 이 기간의 기온이 평년보다 5°C나 높았다. 이렇게 발생한 이상고온이 그 해의 콩 수량에 영향을 주었는지 비교해보려 했지만, 익산과 밀양에서 2006-2007년 사이의 수량자료를 수집할 수 없었다. 그래서 이 기간 동안 전주와 밀양의 관측 기후 자료에 의해 CROPGRO-Soybean에서 모의된 수량과 동일 기간의 통계청의 두류자료(전주시와 밀양시)와 기능성작물부의 일부 수량자료 간 비교를 시도하였다 (data not show).

CROPGRO-Soybean에서 모의된 수량들은 입력 기상자료에 따라 수량반응이 비교적 뚜렷하여 2006년과 2007년, 2010년의 수량이 다른 해보다 감소하는 경향이 뚜렷했지만 통계청의 두류 수량자료(전주시와 밀양시)는 이상고온이 발생한 해와 그렇지 않은 해의

수량 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았는데, 이유는 여러 요인, 예를 들면 통계청의 자료는 농협 등 지자체에서 농가별로 집계되기 때문에 수량의 연차변이가 뚜렷하지 않은 것은 아닌가 하는 의문이 든다. 또한 기능성작물부(밀양)의 수량자료에서도 이상고온이 발생한 2010년의 수량이 이상고온이 발생하지 않은 전년(2009년)의 수량보다 높은 것으로 기록되었는데, 결과 해석에 도움을 줄 수 있는 정보, 예를 들면 고온이 외의 정보, 즉 관수량(irrigation)의 변화가 생육 및 수량 구성요소의 증감에 영향을 주었는지에 대해 해석할 수 있는 정보 혹은 재배방법 및 기술의 변화가 수량변화에 영향을 주었는지 등을 해석할 수 있는 정보들이 필요하다(<http://www.fao.org/docrep/w5183e/w5183e08.htm>). 그러나 이와 같이 재배환경과 관련된 불충분한 정보가 작물 생육모형의 결과의 해석을 어렵게 할 수 있다.

콩은 기준온도 10°C에서 생장이 시작되는 여름작물이다. 두 지점에서 2003년부터 2013년까지 기준온도 10°C에서 GDD(growing degree day, 생장온도일수)를 계산하여 적산하고, 작황시험보고서에 기록된 관측 개화일과 성숙일을 중첩하여 나타내었다(Fig. 2). 가장 높은 적산 GDD를 보인 해는 전주의 2013년과 밀양의 2010년이고, 가장 낮은 적산 GDD를 보인

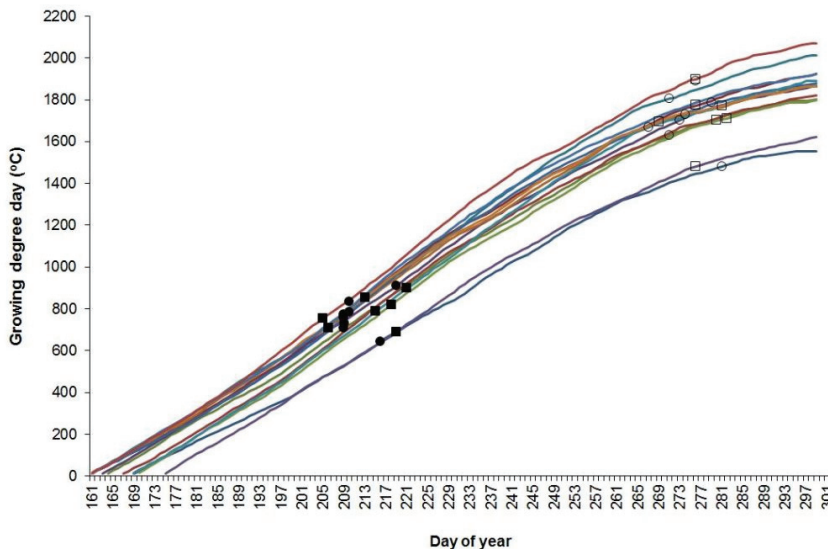


Fig. 2. Growing degree day (GDD) of Jeonju and Miryang during 2003 to 2013. Solid rectangle represents the observed flowering day and empty rectangle represents the observed maturity day at Jeonju. Solid circle expresses the observed flowering day and empty circle expresses the maturity day at Miryang.

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.

### 3.2. 파종시기 이동에 따른 콩의 수량반응

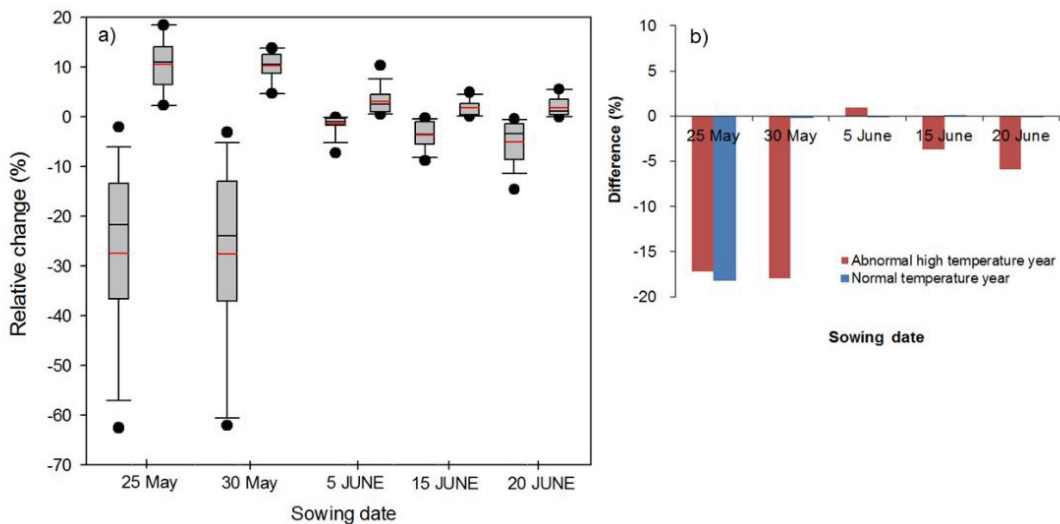
전주와 밀양에서 1981년부터 2010년까지 6개의 파종일(5월 25일과 30일, 6월 5일과 10일, 15일, 20일)에서 CROPGRO-Soybean를 모의하였다. 최근 작황시험보고서(2003-2013년)의 파종일 정보를 바탕으로 6월 10일을 기준 파종일로 설정한 후, 6월 10일 파종일을 기준으로 각각 5개의 다른 파종일에서 모의된 잠재수량(yield potential)과의 차이를 계산하였다(Fig. 3a and Fig. 4a). 또한 2.3에서 제시한 것과 같이 최근 2003년에서 2010년 동안의 이상고온의 해(abnormal high temperature year)와 정상온도의 해(normal temperature year)에서도 각각 다른 5개의 파종일에서 모의된 잠재수량과의 상대적 차이를 분석하

였다(Fig. 3b and Fig. 4b).

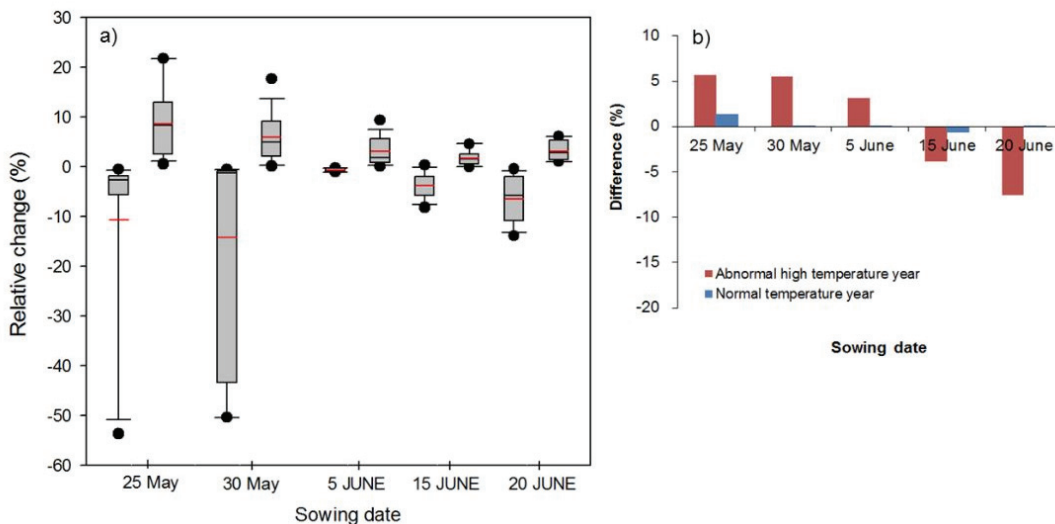
1981-2010년 동안 전주와 밀양 두 지점에서 5월 25일의 파종일 단축에 의한 잠재수량의 증가(평균 9%, 밀양에서 최대 11%)는 감소(평균 -14%, 전주에서 최대 -37%)보다 작게 모의되었다. 마찬가지로 5월 30일의 파종일 단축에서도 수량증가(평균 8%, 밀양에서 최대 18%)보다는 감소(평균 -15%, 밀양에서 최대 -43%)가 더 커서 5월 말 파종일 단축이 수량증가에 반드시 도움이 되지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 6월 5일의 파종일 단축에 의한 잠재수량의 증가(평균 +3%, 밀양에서 최대 +9%)는 감소(평균 -1%, 전주에서 최대 -2%)보다 큰 것으로 나타났다. 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 잠재수량의 감소(평균 -5%, 밀양에서 최대 -13%)가 증가(평균 +2%, 전주에서 최대 +5%)보다 더 큰 것으로 나타났다.

최근 2003년부터 2010년 동안 전주에서 정상온도의 해의 5월 25일의 파종일 단축(-18% 감소)을 제외하고 5월 30일과 6월 5일의 파종일 단축과 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 잠재수량의 상대적 차이는 거의 나타나지 않았다. 그러나 전주에서 정상온도의 해임에도 불구하고 5월 25일의 파종일 단축에서 상대적 잠재수량의 감소가 크게 발생한 것은 이상고온의 해로 정의되지 않았던 2004년의 5월 25일 파종일의 잠재수량이 작았다.

전주에서 이상고온의 해에서는 6월 5일의 파종일



**Fig. 3.** Comparison of differences of yield potential according to different sowing dates during 1981-2010 (a) and 2003-2010 (b) in Jeonju.



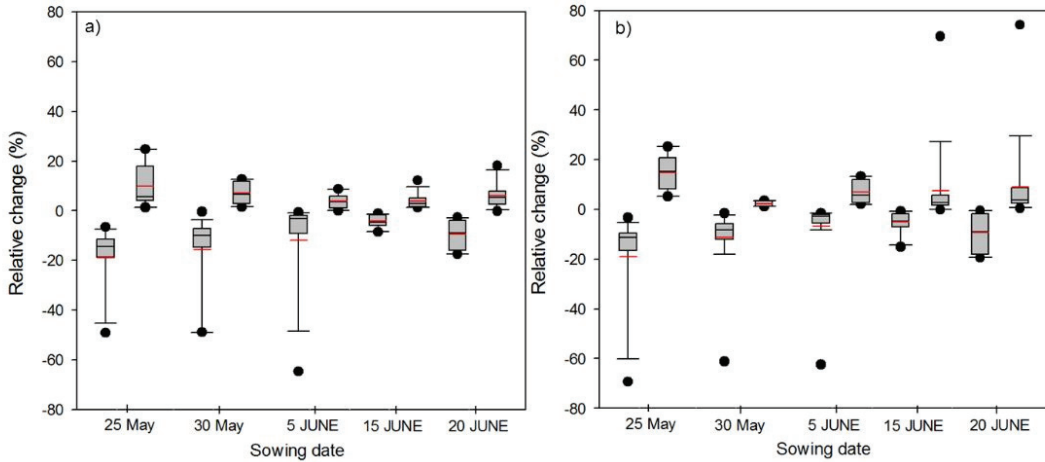
**Fig. 4.** Comparison of differences of yield potential according to different sowing dates during 1981-2010 (a) and 2003-2010 (b) in Miryang.

단축(+1% 증가)을 제외하고 상대적 잠재수량의 감소가 5월 25일과 30일의 파종일 단축(-17%, -18%)뿐만 아니라 6월 15일과 20일의 파종일 지연(-4%, -6%)에서도 나타났다. 2003년부터 2010년 동안 밀양에서 정상온도의 해의 경우, 5월 25일의 파종일 단축에 의해 약 +1%의 상대적 잠재수량의 증가가 나타났고, 6월 15일의 파종일 지연으로는 약 -1%의 상대적 잠재수량의 감소가 나타났을 뿐 큰 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다. 특이한 사항은, 전주에서는 이상고온의 해의 파종일 단축에서도 상대적 수량의 감소가 크게 나타난 반면, 밀양에서는 이상고온의 해의 파종일 단축(5월 25일과 30일, 6월 5일)의 경우 모두 상대적 잠재수량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이상고온의 해에서 6월 10일의 파종을 기준으로 6월 15일과 20일의 파종일 지연은 잠재수량을 -4~8% 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

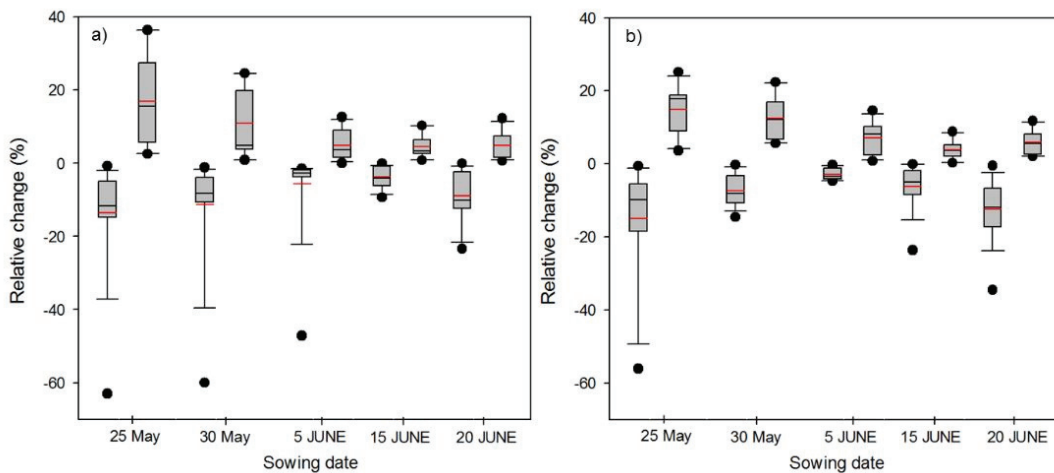
**3.3. 미래 기후변화 시나리오 조건에서 파종일 이동에 따른 콩의 수량반응**

전주와 밀양의 2041년부터 2070년까지 미래 기후변화 시나리오의 RCP 4.5와 RCP 8.5에서 각각 6개의 파종일에 대해 CROPGRO-Soybean을 모의한 후, 6월 10일 파종 기준으로 5월 25일과 30일, 6월 5일과 15일, 20일의 파종일 이동에 따른 잠재수량의 차이를 비교하였다(Fig. 5와 Fig. 6). RCP 4.5의 경우, 전주

에서 5월 25일과 30일, 6월 5일의 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +7%/-13%(최대는 5월 25일의 +25%와 6월 5일의 -42%)로 나타났다. 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +5%/-13%(최대는 6월 20일에서 +18%/-18%)로 나타났다. 밀양에서는 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소가 평균 +14%/-10%(최대는 5월 25일에서 +36%/-42%)로 나타났고, 파종일 지연에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +11%/-16%(최대는 6월 20일에서 +12%/-23%)으로 나타났다. RCP 8.5의 경우, 전주에서 6월 10일을 기준으로 5월 25일과 30일, 6월 5일의 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +10%/-9%(최대는 5월 25일 +25%/-60%)로 나타났고, 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +10%/-17%(최대는 6월 20일에서 +37%/-20%)로 나타났다. 밀양에서는 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소가 평균 +14%/-9%(최대는 5월 25일 +25%/-56%)로 나타났고, 파종일 지연에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소는 평균 +10%/-29%(최대는 6월 20일에서 +12%/-24%)로 나타났다.



**Fig. 5.** Comparison of relative changes of yield potential on different sowing dates during 2041-2070 of RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b) in Jeonju.



**Fig. 6.** Comparison of relative changes of yield potential on different sowing dates during 2041-2070 of RCP 4.5 (a) and RCP 8.5 (b) in Miryang.

#### IV. Conclusion

콩 생육모형에서 고온 조건이 반드시 부정적인 요인으로만 작용하지 않는다. 본 연구에서 사용한 콩 생육모형에서 향상시켜야 할 입력 요소들(예, 유전 모수, 토양 정보 등)이 여전히 존재하지만, 기온 상승 조건이 콩 작물에 있어 꼭 부정적인 영향으로 작용한다고 볼 수 없는 것이 재확인되었다. 콩 생육모형에서 과거 1981년부터 2010년 동안 파종일의 이동이 꼭 잠재수

량(yield potential)의 변화에 긍정적인 영향을 주지도 않았으며, 그렇다고 꼭 부정적 영향을 미치지도 않았다. 6월 10일 기준으로 파종일의 단축은 잠재수량을 최대 +18%(밀양)까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. 감소의 경우는 최대 -43%(밀양)까지 나타나서 변이가 클 것으로 예상된다. 파종일의 지연의 경우, 잠재수량을 최대 +5%(전주)까지 증가시킬 수 있고, 잠재수량 감소에는 최대 -13%(밀양)까지 부정적인 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 최근 2003



년부터 2010년까지로 좁혀, 콩 작물의 개화시기 후 종실비대기 때 3~5°C 이상의 고온이 발생했던 해(이상고온의 해: 2006-2007년과 2010년)와 그렇지 않았던 해(정상온도의 해: 2003-2005년과 2008-2009년)의 파종일 이동에 따른 잠재수량을 비교해 보면, 전주에서 정상온도의 해에서 5월 25일 파종을 제외하고 파종일 이동에 따른 효과가 잠재수량의 증감에 크게 반영되지 않는 것으로 나타났다. 또한 밀양에서도 파종일 이동에 의한 상대적 잠재수량의 증가 및 감소가 크게 나타나지 않았다. 이상고온의 해의 경우, 전주에서 6월 5일 파종을 제외하고 5월 25일과 30일의 파종일 단축뿐만 아니라 6월 15일과 20일의 파종일 지연에서도 상대적 잠재수량의 감소가 나타났다. 그러나 밀양에서는 6월 10일의 파종을 기준으로 파종일 단축의 경우 상대적 잠재수량이 증가시켰지만 6월 15일과 20일의 파종일 지연은 상대적 잠재수량을 -4~-8%까지 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

미래 기후변화 시나리오 조건에서 파종일 이동이 잠재수량의 변화에 미치는 영향의 정도는 차이는 있지만 과거 및 현재 기후에서 보여진 결과(3.2절)와 비슷한 경향으로 나타났다. 즉, 파종일의 단축이 잠재수량의 변화에 꼭 긍정적으로만 작용하는 것이 아니라 부정적으로도 반영되어 최대 -13%(RCP 4.5의 전주)까지 잠재수량이 감소할 수 있었고, 파종일 지연에서는 꼭 부정적으로만 나타난 것이 아니라 긍정적으로도 작용하여 최대 +11%(RCP 4.5의 밀양)까지 잠재수량을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 미래 기후변화 시나리오 전망에서 파종일 이동이 잠재수량의 변화에 미치는 영향에 대한 분석에 HadGEM-RA 모형의 미래 기후변화 시나리오만을 이용하였지만, 후속 연구에서는 다양한 기후모형에서 상세화된 미래 기후변화 시나리오를 활용할 것이다. 또한 본 연구에서 사용한 태광콩의 유전모수(NICS, 2010)와 Kim et al. (2004)의 유전모수를 비교 및 검증할 수 있는 추가적인 정보수집을 통해서 유전모수 정보의 지속적인 향상을 도모할 수 있을 것이다. 아울러 콩의 종실비대기에 영향을 미칠 수 있는 임계온도에 대한 추가 연구를 토대로 미래 기후변화 시나리오의 이상고온에 따른 잠재수량 변화의 범위를 평가할 수 있을 것이다.

## 적 요

본 연구는 콩 생육모형을 활용하여 우리나라에서 콩 재배기간 동안 발생할 수 있는 이상고온에서 파종일 이동에 따른 콩의 수량반응과 그 영향을 탐색하였다. 또한 미래 기후변화 시나리오(2041-2070년)에서도 파종일 이동이 잠재수량(yield potential)의 변화에 미칠 수 있는 영향을 분석하였다. 1981-2010년 동안 전주와 밀양 두 지점에서, 6월 10일의 파종일을 기준으로 5월 25일과 30일의 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량의 변화는 증가보다는 감소 경향으로 나타난 반면, 6월 5일의 파종일 단축에 의한 잠재수량은 증가(평균 +3%)하는 것으로 나타났다. 그러나, 6월 15일과 20일의 파종일 지연에 의한 잠재수량의 감소(평균 -5%)가 증가(평균 +2%)보다 큰 것으로 나타났다. 또한 두 지점의 최근 2003년부터 2010년 동안 정상온도의 해에서, 6월 10일의 파종일을 기준으로 전주의 5월 25일을 제외하고 파종일 이동에 의한 상대적 잠재수량의 변화에 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러나 이상고온의 해에서, 밀양의 경우 파종일 단축에 의한 상대적 잠재수량이 모두 증가하였지만 전주는 6월 5일의 파종일 단축을 제외하고 파종일 단축에서도 상대적 잠재수량의 감소가 나타났다. 파종일 지연에서는 두 지점 모두에서 상대적 잠재수량이 감소하는 것으로 나타났다. 두 지점에서 2041-2070년의 미래 기후변화 시나리오 전망에서 파종일 단축에 따른 잠재수량의 증감효과는 RCP 4.5에서 +7%/-13%(전주)와 +14%/-10%(밀양)로 나타났고, RCP 8.5에서 +10%/-9%(전주)와 +14%/-9%(밀양)로 나타났다. 또한 파종일 지연에 따른 잠재수량의 증감효과는 RCP 4.5에서 +5%/-13%(전주)와 +11%/-16%(밀양)로 나타났고, RCP 8.5에서는 +10%/-17%(전주)와 +10%/-29%(밀양)로 나타났다. 절대적인 값의 차이는 작지만 상대적 잠재수량의 변화에서 파종일 이동에 의한 영향이 RCP 8.5에서 더 반영된 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 농촌진흥청 국립식량과학원의 아젠다 사업(PJ011425032016)의 지원으로 APEC 기후센터에서 수행되었습니다. 이 논문의 질적 향상을 위해 심사해주신 세분의 심사자들께 감사의 말씀을 전합니다.

## REFERENCES

- 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**(7), 2301-2320.
- Boote, K. J., J. W. Jones, G. Hoogenboom, G. G. Wilkerson, and S. 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, 2015: Improvement of agricultural assessment of impact on climate change using downscaled climate prediction. APEC Climate Center, Report 2015-18, 94 pp.
- FAOSTAT, 2012: Agriculture organization of the United Nations. Statistical database.
- 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. Gijssman, G. Y. Tsuji, and J. Koo, 2010: *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5* [CDROM], University of Hawaii, Honolulu.
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijssman, and J. T. Ritchie, 2003: DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 235-265.
- 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**(1), 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**(3), 132-141.
- 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.
- Lee, C. K., 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**(3), 233-243.
- Lee, K. J., D. N. Nguyen, 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**(2), 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**(5), 1890-1903.
- 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.
- 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).
- 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**(3), 709-714.
- 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**(4), 483-491.
- 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**(4), 349~358