

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/324060925>

Applicability Analysis of Major Crop Models on Korea for the Adaptation to Climate Change

Article · June 2014

CITATIONS

6

READS

532

4 authors, including:



Chul-Hee Lim

Kookmin University

98 PUBLICATIONS 1,114 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Woo-Kyun Lee

Korea University

269 PUBLICATIONS 3,381 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Science-Technology Cooperation for Response to Climate Crisis on the Korean Peninsula [View project](#)



Development of an Integrated DBH Estimation Model Based on Stand and Climatic Conditions [View project](#)

기후변화 대응을 위한 주요 작물모델의 국내 적용성 분석

Applicability Analysis of Major Crop Models on Korea for the Adaptation to Climate Change

송용호* · 임철희* · 이우균** · 엄기철** · 최솔이* · 이은정* · 김은지***

*고려대학교 환경생태공학과, **세종데이터해석연구원, ***고려대학교 기후환경학과

Song, Yongho*, Lim, Chul-Hee*, Lee, Woo-Kyun**, Eom, Ki-Cheol**,
Choi, Sol-E*, Lee, Eun Jung* and Kim, Eunji***

*Division of Environment Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul 136-701, Korea,

**Sejong Institute of Data Analysis, Suwon 443-766, Korea

***Department of Climate Environment, Korea University, Seoul 136-701, Korea,

요 지

작물의 안정적 재배에 있어서 적합한 기후는 필수적 요소이며, 이는 곧바로 작물의 생산량 증가로 이어진다. 국내의 경우, 기후변화에 따른 곡물 및 작물의 수량 예측을 위하여 작물모델을 이용한 연구가 진행되었으나, 각기 다른 작물모델의 사용과 국외 실정에 맞춘 입력 자료의 사용으로 연구 결과의 신뢰성을 낮게 하는 경향이 있었다. 이에 본 연구에서는 국외에서 개발된 작물 모델을 비교 분석하여 국내에서의 적용 가능성을 검토하였다. 또한, 모델별 입력자료 확보 가능성을 기초로 구동 가능 모형을 선정하였으며, 이의 문제점을 파악한 후 국내 적용방안을 제시하였다.

키워드 : 기후변화, 작물모델, 수량 예측, 적용성 분석

ABSTRACT

Suitable climate condition is essential for stable growth of crops which directly leads to an increase in crop production. Preceding domestic researches mostly used crop models to predict grain or crop yield in relation to climate change. However, the use of various models and input data based on foreign background lowered the reliability for result. Therefore in this study, we evaluated domestic applicability by comparing and analyzing various crop models developed abroad. In addition, we selected models based on the possibility of acquiring input data and suggested domestic applicability.

Key words : Climate Change, Crop Model, Yield Prediction, Applicability Analysis

* Corresponding author : E-mail: leewk@korea.ac.kr

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발표한 5차 평가보고서에 따르면 1880~2012년에 전 지구 육지와 해양의 평균 표면 온도는 0.85℃ 상승하였으며, 평형기후민감도(Equilibrium Climate Sensitivity, ESC)¹⁾는 1.5~4.5℃ 범위가 될 가능성이 높은 것으로 나타났다(IPCC AR5, 2013).

중위도와 고위도에서 평균기온이 최대 1~3℃ 범위로 상승한 지역은 작물에 따라 수확량이 다소 증가할 것이나, 그 이상 기온이 상승하는 지역에서는 감소할 것으로 전망하였다(IPCC AR4, 2007). 특히, 저위도 지역처럼 계절적으로 건조하고 열대성인 지역에서는 지역 기온이 상승하더라도(1~2℃) 작물 생산량이 감소할 것으로 전망되었는데, 이는 병해충 증가, 수문 취약성 증가, 재해 빈도 증가 등이 원인이 될 것으로 나타났다(IPCC AR4, 2007). 그리고 전 지구적 1~3℃ 범위의 평균 기온 상승은 곡물생산의 잠재적 증가에 도움이 될 것이나 그 이상 상승할 경우 곡물생산에 장애요인으로 작용할 것으로 전망하였다(IPCC AR4, 2007).

기후변화가 농업생태계에 미치는 영향은 직접적 영향과 간접적 영향으로 나누어진다. 직접적 영향은 작물 등의 광합성과 증산활동에 대한 영향이고, 간접적 영향은 온도, 수문 상태변화, 해수면 상승 등으로 인한 영향이다(이정택, 2007). 이러한 영향으로 농업생태계에서는 식물의 건물생산력 확대와 물 이용효율 향상, 식물 생육 가능기간 증가 및 적지의 확대 등의 긍정적인 측면뿐 아니라, 지온 및 수온의 상승, 적설기간 단축, 증발량 증대, 토양수분 부족 심화 등으로 인한 작물 재배지역의 이동 유발과 잡초, 병원생물의 활발화, 해충의 다발화 등의

부정적인 측면을 유발할 수 있다(이승호 등, 2008).

우리나라의 경우, 중위도 지역에 속하여 작물의 생육이 온도에 큰 영향을 받으며, 기후변화에 따른 기온상승에 의하여 작물의 수확량이 증가할 수 있으나, 작황 및 작물별 주산지의 변동 가능성이 높다(이충근 등, 2011). 기후변화에 따른 한반도 농업생태계의 영향과 기작을 증명하고, 이에 따른 수확량 평가 및 재배적지를 예측하는 것이 시급한 실정이다.

미래작물 예측에 대한 연구는 농작물에 대한 기후변동성의 효과(Carlson *et al.*, 1996; Phillips *et al.*, 1998), 농작물 생산성에 대한 기후변화 영향(Rosenzweig and Parry, 1994; Riha *et al.*, 1996; Parry *et al.*, 2004) 등 국외에서는 물론, 국내에서도 여러 연구자가 관심을 가지고 연구된 바 있다(윤진일, 1990; 이변우 등, 1991; Shin and Lee, 1995; 심교문 등, 2010; 남영식 등, 2012; 송응호 등, 2013). 하지만 국내에서 수행된 연구들은 기후변화에 따른 개괄적인 농업생태계 영향 분석에 치중되어 있거나, 단순 모형을 활용한 경우가 많아, 과학적 기법에 근거한 작물생산량의 예측은 부족한 실정이다.

작물생산량 및 기후변화에 따른 농업생태계의 변화에 대한 정량적 분석과 예측은 작물모델(Crop Model)로 수행할 수 있다. 이러한 작물모델은 토양 및 기상환경과 작물 종류 및 품종에 따른 작물 생육 양상을 예측하기 위해 고안되었다(Lee, 2008).

해외에서는 다양한 작물모델을 개발하고 이용하여 미래 기후변화에 따른 작물 생산량을 예측 및 평가하는 연구가 활발히 수행되고 있다(Rosenzweig and Parry, 1994; Easterling *et al.*, 1996; Southworth *et al.*, 2000; Aggarwal and Mall, 2002; Parry *et al.*, 2004; Tao and Zhang, 2010). 국내의 작물모델을 이용한 생산

1) 대기 중 이산화탄소 농도가 두 배로 증가했을 때 만들어진 평형상태에서 전 지구 평균 지표온도 변화이다.

량 예측 연구는 여러 작물 중 벼에 국한되어 있으며, CERES-Rice 모델과 ORYZA2000을 이용하여 드물게 수행되고 있는 실정이다(윤진일 등, 2001; 이태석 등, 2012; 정유란 등, 2006; 조경숙 등, 1999). 국내에서 수행된 작물모델을 이용한 연구에서는 국외에서 개발된 특정작물 모델과 과거 우리나라의 벼 작물 생산량과의 일치성을 통한 검증에 집중되어 있다. 실제 작물 생산량과 기후변수와의 관계가 연구 결과를 뒷받침하는지에 대한 명확한 관계 규명이 부족한 실정이며, 모델 적용 시 사용되는 자료의 부족으로 인한 한계가 존재한다. 또한, 대부분의 해외 모델들은 특정 지역 또는 국가 자료를 토대로 개발되었기 때문에, 한국의 농업환경 특성을 제대로 반영하지 못할 가능성이 있다. 따라서 이러한 모델의 국내 적용에는 확인되지 않은 문제가 발생되거나, 이용 자체에 제약이 있을 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 국내의 작물생산량 예측 모델 개발이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 국내 작물별 생산량 예측을 수행하기 위한 실효성이 입증된 해외의 작물모델들을 구현지역의 규모, 입력 자료의 확보 가능성, 활용분야 등을 기준으로 비교 분석하고, 국내 적용 가능성을 모색하였다. 또한, 국내에서 입력 가능한 자료들을 조사하여 향후 개발될 한국형 작물모델의 기반 구축에 기여하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기후변화 대응과 미래작물 예측

기후변화는 21세기 인류가 직면한 최대 화두라고 표현할 만큼 세계적 관심이 주목되고 있다. 이러한 기후변화에 대한 대응에는 크게 두 가지 방법으로 나누어지는데, 기후변화를 완화하기 위한 온실가스 감축과 기후변화에 대한

적응이다. 일반적으로 농업분야는 기상과 밀접함으로 기후변화 적응에 무게를 두지만, 농작물의 재배과정에서 온실가스를 배출하기에, 이를 감축하는 방안 혹은 작물과 토양을 이산화탄소 흡수원으로 활용하는 방안을 통해 완화로서 역할도 가능하다. 본 연구에서 접근하는 작물모델 또한 적응을 중심으로 활용되나, 정밀한 작물생육 예측은 온실가스 배출량 및 흡수량 산정을 가능하게 하므로 완화에도 충분히 기여할 가능성이 있다.

기후변화에 따른 작물의 주산지 및 생산량 변화는 국제적으로 통용되고 있으며(IPCC AR4, 2007), 국가 및 지역별 적응을 위한 연구도 적지 않게 수행되고 있다. Aggarwal (2002)은 CERES 모델을 이용하여 인도의 지역별 곡물 생산 민감도를 측정하였으며, 이와 비슷한 연구는 중국(Tao, 2010), 미국(Southworth, 2000)에서도 수행된 바 있다. 반면에 국내에서 이러한 작물모델을 토대로 한 작물예측 연구가 미비한 것이 사실이며, 이는 우리나라 전체 산업 내 농업의 비율이 높지 않았던 것과 기존의 국가전략산업에 농업 분야가 포함되지 못한 것이 주된 요인으로 예상된다. 그럼에도 최근 농촌진흥청에서는 미래 상세 전자기후도'를 제작하여 미래작물을 예측할 수 있는 기반을 구축한 바 있으며, 이를 통하여 국내의 미래 작물에 대한 연구가 점차 확산될 것으로 전망된다.

2.2 작물생장과 모델

작물모델의 모의(simulation)는 작물 종류에 따른 작물주기의 토양-작물시스템 반응에 따라 이루어지며, 시스템 상부 경계는 표준기후변수(복사량, 최고 및 최저기온, 강수량, 증발산과 바람 및 습도)에 의한 대기이고, 하부 경계는 토양과 하층토양의 인터페이스 등이 해당된다(Brisson, 2003).

작물모델에서 작물의 정량적 평가는 일반적

으로 지상부 바이오매스, 질소함량, 엽면적지수, 수확된 작물의 바이오매스 및 수량으로 평가된다. 작물에서 식물생장과 관련된 기관(잎, 나뭇가지 및 새싹)은 그들의 바이오매스와 연관이 있으며, 작물에 영향을 주는 토양의 구성요소로는 수평층의 순서로 설명되어, 각층의 수분함량, 무기물, 질소 함량 및 유기질소 함량 등이 있다. 이러한 토양과 작물은 뿌리를 통해 상호 작용하는데, 이는 뿌리의 대부분이 토양단면에 분포하는 것으로 설명된다(Brisson, 2003). 또한, 작물의 생장은 식물 탄소 축적에 따른다(de Wit, 1978). 태양복사열은 작물의 잎에 의해 흡수되고, 이산화탄소와 함께 동화작용을 하여 지상부 바이오매스로 변환되는데, 이때 토양의 질소 및 탄소량에 따라 작물의 바이오매스량이 결정된다. 따라서 작물 모형에는 태양-지상부 환경요소(일사량, 온도, 강수량)-지하부 질소함량 및 탄소량, 수분함량의 연계성이 고려되어야 한다. 또한, 식물종류에 따라 작물모형은 온열지수, 광열지수나 춘화현상을 고려하여야 한다. 수분스트레스와 질소스트레스가 있는 경우, 물과 질수평형모형이 계산된 스트레스 지수에 따라 바이오매스 축적과 잎 생장을 감소시키므로 작물관리와 환경생리학에 연관이 있는 것을 고려한 토양-작물-기후 시스템에 대한 작물관리 모형이 필요하다.

2.3 작물모형의 일반적 사항

작물모형은 유전자, 환경, 작물관리 간의 상호작용에 영향을 미치는 식물성장과정의 수학 및 정량적 표현으로, 과학 연구, 작물 관리, 농업 정책 분석을 지원하기 위한 필수적인 도구가 되고 있다(Fischer *et al.*, 2000; Hammer *et al.*, 2002; Hansen, 2002). 모든 작물 모형은 식물의 성장과 발달, 기관 간의 바이오매스 배분(잎, 줄기, 뿌리, 그리고 생식 구조) 및 수율 형성에 대한 시뮬레이션을 포함하여야 한다. 환경 분야

의 여러 범위에 걸쳐 이루어지는 이러한 시뮬레이션 결과의 정확도는 작물의 환경생리학적 프로세스와 모형을 구성하는 수학적 통합 지식의 기본적인 이해에 따라 달라진다(Yang, 2004).

작물모형에 대한 연구는 생화학적 및 수학적 수식을 이용한 접근방법으로 자연현상에 대한 명확한 모의와 그 결과에 대한 정확한 분석을 목표로 한다. 이러한 접근방식을 토대로 연구관리자나 정책입안자 또는 경영자의 입장에서 작물생육모형 연구에 하향식으로 접근한다면, 농업 분야의 문제의 해결이나 조사보고서 작성 등의 영역에서 다양한 정보를 다룰 수 있게 된다.

70년대 초반, 농업기상의 통계적 회귀 모형은 다양한 도시의 곡물수확량 예측에 활용되었다. 그러나 통계적 모형은 종종 병충해와 질병 그리고 심각한 가뭄이나 홍수 피해, 이례적인 기후발생에 의한 변동성, 역사적으로 기록되지 않은 가치를 감지하는 것에 실패하였다. 이후 연구에서는 위성영상으로 얻은 식생지수나 넓은 지역의 작물 생산량 추정을 위한 식물생장모형으로 작물 예측을 실시하여 기존연구의 한계를 극복하였다(Liu, 1989). 최근에는 컴퓨터 및 정보기술의 급속한 발전으로 복잡하게 개발된 작물생육 모형을 구동할 수 있게 되어, 작물 생산량의 예측과 평가 등에 대한 연구가 보다 활발히 진행되고 있으며, 이를 이용하여 작물의 생화화적인 반응과 환경요소에 대한 물리적 변화 등을 상세하게 예측할 수 있게 되었다. 또한, 이러한 작물 모형의 정확도를 검증하기 위한 여러 가지 시도가 이루어지고 있다.

일반적으로 작물모형은 하위 모듈로 구성되어 있으며, 각 하위 모듈은 특정한 메커니즘을 다루는 서브 모듈을 이루고 있다. 예를 들어, STICS (Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard) 모형(Fig. 1)은 3개의 서브모듈로 구성되어 있고, 첫 번째 모듈에서는 식



Fig. 1. STICS model frame work(Brisson *et al.*, 2003).

물의 지상 부분(phenology, shoot growth, yield formation)의 생리학적인 부분을 모의하고, 4개의 서브 모듈로 구성된 두번째 모듈에서는 식물의 지하 부분(root growth, water balance, nitrogen balance, soil transfers)의 상호작용 결과를 모의한다. 그 외에 작물관리(crop management) 모듈은 토양-작물시스템 사이의 상호작용을 다루며, 미기후(micro climate) 모듈은 캐노피 내부의 온도 및 습도에 대한 기후와 물 균형의 결합 효과를 모의하도록 구성되어 있다.

3. 연구 방법

기후변화에 대응하기 위해서는 우리나라의 규모, 기후, 지형 등에 적합한 작물모델을 통하여 미래의 적정작물 및 작물의 생산량을 예측하여 농업부문 적응 정책으로의 과학적 근거를 제시하여야 할 것이다. 본 연구는 문헌고찰을 통해 해외 주요 작물모델들의 국내 적응성을 분석하며, 이를 위해 해외에서 개발되어 실제 예측이 이루어진 작물모델들에 대한 기초조사를 시행하였고, 지역규모에 대한 적합성과 예측

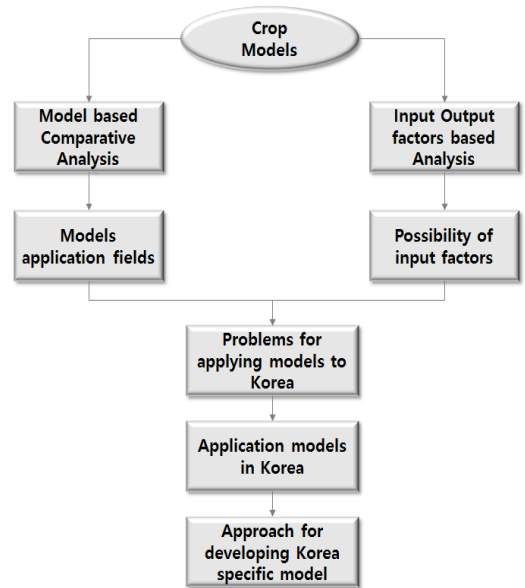


Fig. 2. The schemes flow of this study.

타당성이 검증된 11개의 모델을 선정하였다(Oteng-Darko *et al.*, 2012; Graeff *et al.*, 2012; Perkins, 2012). 먼저, 선정된 작물모델에 대하여 규모, 방법론, 종류, 구성 등의 구조적 측면에서 비교 분석하고, 이후 각 모델의 입출력 인자를 파악하여 국내 입력인자의 확보 가능성과 출력인자의 활용 가능성을 분석한 후 최종적으로 한국형 모델 개발을 위한 접근 방법을 제시하였다(Fig. 2).

4. 결과 및 고찰

4.1 작물 모델의 구성면의 비교

본 연구에서는 다양한 해외 작물 모형 중 대표적으로 활용되고 있는 12개의 모델을 비교하였다(Table 1). 국가별로 구축된 모델의 수를 분석한 결과, 미국 4개, 오스트레일리아 1개, 중국 1개, 네덜란드 2개, 캐나다 1개, 프랑스 1개, 스위스 1개 그리고 콜롬비아 1개로 나타났다. 모델들의 수량 예측의 지리적 규모(scale)는 지역규

Table 1. Characteristics of crop model

Model	Scale	Characteristic	Country	Year	Developer
AquaCrop	P	The estimation of crop productivity in relation to water supply and agronomic management based on plant physiological and soil water budgeting concepts	USA	2010	D. Raes
APSIM	R	The model does not include the effects of pests and diseases. hence, the simulation results are most likely to be higher than the actual observed yields	Australia	1996	R.L. McCown
CERES-Maize	P	Prediction crop phenological stages and grain yield	Columbia	1989	W.T.H. Liu
DSSAT	R	Process-based model to simulate crop growth & development, soil water, nitrogen balance	USA	1989	IBSNAT
EPIC	R	Using a unified approach to simulate more than 100 types of crops. Long term effects of various components of soil erosion on crop production	USA	1983	Williams and others
GEPI	R	Integration of EPIC model with GIS	Switzerland	2006	J. Liu
GUMCAS	R	Process-oriented model, describing the growth of cassava	Canada	1993	R.B. Matthews
Hybrid-Maize	P	Combining the strengths of two modeling approaches, the growth, development functions and the mechanistic formulation	USA	2003	Dobermann
ORYZA2000	N	Simulating growth and development of lowland rice under potential production, water limitations, N limitations	Netherlands	2004	Bouman and Van Laar
STICS	R	Using of generic parameters relevant for most crops, interactive modelling platform	France	2003	Brisson and others
SVAT	P	Process-based crop growth model developed to predict regional crop yield, water consumption and water use efficiency using remotely sensed data	China	2004	X. Mo
WOFOST	R	The growth and production of annual crops in physical terms developed by the Centre for World Food Studies	Netherlands	1989	C.A. van Diepen

* P: Plot, R: Region, N: Nation

모 7개와 plot 단위의 모델이 4개가 있었으며, 국가 규모가 1개로 나타났다. 대부분의 모델에서 작물과 토양의 수분 균형에 대한 영향이 포함되어 있었으나, 일부 모델에서는 이를 고려하지 않은 것으로 분석되었다.

4.2 모델의 활용분야

AquaCrop 모델은 수분의 공급과 식물 생리학 및 토양 수분 유지 개념에 근거하여 작물 생산성을 예측하는 모델이다. AquaCrop 모델 구동 시 작물 데이터는 시간, 관리 정도, 지역 특성에 따라 변하지 않으며, 작물성장에 이상적인 환경적 상황으로 고정되어 있는 것이 특징이다. 따라서 AquaCrop 모델은 주로 수분에 따른 작물의 변화 예측 시에 활용되며, 지역적 규모보다는 국가적 규모로 수행되고 있다(Raes *et al.*, 2009).

APSIM(Agricultural Production Systems Simulator) 모델은 기후조건에 따른 작물의 생물리학적 특성과 함께 수확량에 따른 경제적 측면을 고려하여 식물의 생산성을 예측하고, 장기적인 농업 시스템의 경영에 대한 기본 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 이 모델은 주로 곡물 및 섬유질 작물에 대하여 토양 pH, 질소 및 인의 함유량과 토양수분과 같은 다양한 환경요인을 입력인자로 이용하여 작물의 분포와 변화를 예측하여 활용되고 있다(Wang *et al.*, 2002).

CERES(Crop Environment Resource Synthesis)-Maize 모델은 광범위한 지역의 옥수수 생산량 예측에 주로 이용된다. 본 모델은 옥수수의 성장량을 예측하는 모듈과 생물계절학적 발아 시기를 판단하는 모듈, 그리고 생산량을 예측하는 모듈로 구성되어 있다. 또한, 많은 양의 자료를 필요로 하지 않은 장점이 있어 많은 연구에서 옥수수의 생리적 성숙도 및 생산량을 예측하는데 활용되고 있다. 하지만 생물계절 현상

중 발아시기의 물 부족과 관련된 여러 요인들이 작용으로 옥수수의 발아가 지연되었을 경우 과대 추정되는 경향이 있다(Carberry *et al.*, 1989).

DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 모델은 100여개 국가에서 적용된 사례가 있으며, 농업부문 기후변화 적응을 위해 전방위적으로 활용되고 있다. DSSAT-CSM(Cropping System Model)으로도 불리는 이 모델은 모듈접근방법을 활용하였으며, 다년간에 걸쳐 개발된 여러 종류의 작물모형들을 동일한 자료로 입출력할 수 있도록 통합한 일종의 패키지 소프트웨어라 볼 수 있다. 이 패키지에는 CERES, CROPGRO 등이 포함되어 있다.

EPIC(Environmental Policy Integrated Climate, originally known as Erosion Productivity Impact Calculator) 모델은 기상 및 지표면 유출, 증발산량, 질소 및 인, 온도 등을 이용하여 작물의 생산량을 예측하는 모델로서, 100가지 이상의 작물에 적용하여 활용될 수 있는 대표적인 포괄적(Generic) 모델이며, 주로 미국에서 작물과 관련하여 다중규모 대기질 모델(Community Multi-Scale Air Quality; CMAQ)의 활용과 개발에 이용되고 있다. 또한, 수분 공급과 시비에 따른, 작물의 수분생산성(Crop Water Productivity)과 잠재수량(Potential crop yield) 예측에 주로 활용되고 있다(Easterling, 1996).

GEPIC(GIS-based EPIC) 모델은 EPIC 모델이 GIS 기반으로 개량된 버전으로 EPIC과 같은 특징 및 입출력 인자를 가지고 있다. 모델 구동에 있어 GIS 프로그램 중 Esri社의 ArcGIS를 통해 EPIC 모델이 연동되며, 입출력자료 또한 GIS 형태를 갖추므로 입력자료 구축의 용이함과 출력자료의 활용성을 넓혀주고 있다(Liu, 2007).

GUMCAS 모델은 IBSNAT(International Benchmark Sites Net-work for Agrotechnology Tr-

ansfer)의 농업분야에 대한 의사결정을 지원하기 위하여 개발된 모델이다. 이 모델은 6개의 모듈로 구성되며, 각각은 수분 균형을 예측하는 모듈과 작물의 식물계절현상 판단모듈, 바이오매스 생산성 예측모듈, 바이오매스 분할모듈, 작물의 노화 예측모듈로 구성되어 있다(Matthews and Hunt, 1994).

Hybrid-Maize 모델은 CERES-Maize 모델과 INTERCOM (INTERplant COMPETITION), WOFOST 모델의 장점을 결합한 모델이다. 이 모델은 주로 옥수수 잎의 확장, 지하부의 건조 물질의 축적, 곡물과 사료용 줄기와 잎의 생산량을 예측하는데 주로 활용되고 있다. 또한, 작물 생장의 방해요인을 최소로 관리하기 위하여 활용되기도 한다. CERES-Maize, INTERCOM, WOFOST의 세 가지 모델에서 엽면적지수(LAI, Leaf Area Index)가 높은 식물의 밀도가 과소 추정되는 경향이 존재하는데, Hybrid-Maize 모델은 보다 정확하게 측정되어, 앞의 3개의 모델보다 LAI가 높은 작물의 예측에 주로 활용되고 있다(Yang *et al.*, 2004).

ORYZA2000 모델은 수분 균형, 토양 내 질소 함량 등을 고려하여, 주로 저지대의 벼의 생산량과 생산량을 상황에 따라 추정하는 모델이다. 이 모델은 작물의 지하부 생장량, 증발산량, 질소의 교환, 토양수분, 기타 등의 5개 모듈로 구성되어 있다. 특히, 관개 및 질소 비료 사용 등과 같은 작물 관리 방법에 따른 생장량 및 생산량에 대한 예측을 보다 정밀하게 모의할 수 있는 특징이 있어, 작물관리 분야에 주로 활용되고 있다(Bouman and Van Laar, 2006).

STICS 모델은 생물계절현상, 단기생장, 생산량 형성(Yield formation), 작물 관리, 미세기후, 뿌리 생장 등을 통해 작물을 관리하기 위한 모델로 활용된다(Brisson *et al.*, 2003).

SVAT(Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) 모델은 주로 지역적인 작물 생장을 예측하는데

이용된다. 특히, 이 모델은 수분이용효율과 수분의 소비를 원격탐사 자료를 이용하여 입력하는 모델로, 탄소와 수분의 유동을 광합성, LAI와 지하부의 토양 수분을 통하여 추정한다. 주로 토양-식생-대기의 작물의 생화학적인 반응 측면에 초점이 맞추어져 있기 때문에 이 모델은 주로 건조지에서 작물의 생산량과 수분의 소비량 추정에 이용된다(Mo *et al.*, 2005).

WOFOST(WORLD FOOD STUDIES) 모델은 작물 생육기간 동안의 작물별 토양 유형, 수분 조건과 날씨에 의한 물리적인 측면을 고려한 모델이다. 따라서 이 모델은 연간 작물의 생장과 생산량을 추정하는데 주로 활용되고 있다(Diepen *et al.*, 1989).

4.3 모델의 입출력 인자

각 모델들은 유사함을 가지면서도 각기 다른 입력 인자와 출력 인자를 가지고 있다. 문헌자료를 근거로 Table 2, Table 3과 같이 입력 및 출력 인자를 비교분석하였다. 그 결과, 입력 자료는 크게, 기상자료, 토양자료, 작물자료 등으로 구분되는데, 기상자료는 대부분 작물이 성장하는데 필요한 기상학적 요소로 최저온도, 최고온도, 강수량, 일사량, 증발산량, 대기압, 습도, 풍속 등이 포함된다(Table 2). 이는 12개 모델 중 11개의 모델에 사용하는 것으로 나타났다. 토양인자는 토성, 수분함량, 뿌리깊이, 토양 pH, 포장 용수량, 토양 내 질소 함유량 등이 포함되며, 10개의 모델에서 사용된 것으로 확인되었다. 작물 관련 인자는 작물별 성장인자, 품종, 생육도일, 일장강도, 최대 성장률, LAI(Leaf Area Index) 등 다양한 인자를 가지고 있으며, 기상자료 및 토양자료와는 다르게 모델별로 다양하게 나타났다.

모델 구동에 따른 출력 인자를 분석한 결과(Table 3), 12개 모델 모두 최종 결과물로 곡물 및 작물에 대한 수량 예측이 도출되었다. 기본

Table 2. Input factors of models

Model	Input factors
AquaCrop	Climatic : minimum and maximum air temperature, evapotranspiration Soil : saturated hydraulic conductivity, volumetric water content at saturation, field capacity, permanent wilting point Crop : GDD, crop-specific parameters(provides default or sample values)
APSIM	Climatic : minimum and maximum temperature, precipitation, solar radiation Soil : rooting depth, plan available water capacity for each soil layer, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, initial nitrogen and organic carbon, soil pH Crop : cultivars, a date of sowing and weeding, fertilizer management(type, amount, dates of application), inter cropping, plant density, crop phenology, photoperiod sensitivity, potential harvest index, canopy height
CERES-Maize	Climatic : minimum and maximum air temperature, precipitation, solar radiation, cloud cover data Soil : lower limit of plant-extractable soil water content, drained upper limit soil water content, saturated soil water content, soil depth based on rooting depth, soil albedo, whole profile drainage coefficient, run-off curve number Crop : hybrid, GDD, photoperiod sensitivity, potential kernel number, potential kernel growth rate, LAI, historic yield
DSSAT	Climatic : daily maximum and minimum temperature, rainfall and solar radiation Soil : clay content, carbon content, description, layers, nitrogen content, pH, water holding capacity Crop : fertilizer, irrigation, manure, residue incorporation, plat cultivar variety, row spacing, plant population
EPIC & GEPIC	Climatic : minimum and maximum temperature, number of wetting days, precipitation Soil : land use, soil depth, percent sand and silt, pH, organic carbon content, DEM(Digital Elevation Model), slope Crop : fertilizer, irrigation, manure, tillage, plant species
GUMCAS	Climatic : runoff, drainage, soil evaporation, daily minimum and maximum temperatures, photoperiod Soil : soil evaporation, soil water deficit factor, actual water uptake, potential water uptake Crop : maximum crop growth rate, LAI, LAR, SLA(specific leaf area)
Hybrid-Maize	Climatic : minimum and maximum air temperature, precipitation, solar radiation Soil : total N application amount, plant population density, and actual dates of planting, emergence, silking, and physiological maturity, sowing depth, a date of sowing Crop : GDD, canopy architecture, grain filling period, historic grain yield
ORYZA2000	Climatic : solar radiation, temperatures, concentration of CO_2 Soil : N fertilization rate maximum leaf N content, stem N content Crop : cultivars, transplanting date, sampling times, development stage, number and maximum growth rate, partitioning factor, fraction of stem reserves
STICS	Climatic : minimum and maximum temperatures, radiation, rainfall, evapotranspiration Soil : organic nitrogen content, active lime content, clay content, run-off coefficient, pH, soil evaporation accumulation(during the potential phase) Crop : sowing(date, daph, density, variety), planting(interraw, row orientation), mineral and organic fertilisation, irrigation, fertigation, soil tillage with ploughing-in of residues, use of plant or plastic mulching, thinning, cutting(forage) or harvesting

Table 2. Continued.

Model	Input factors
SVAT	Climatic : mean, minimum and maximum air temperature, mean vapor pressure, atmospheric pressure, daily sunshine duration, daily rainfall Soil : land use/cover digital data and land use map, irrigated/rainfed distribution map, DEM, soil texture map Crop : County-level crop yield data
WOFOST	Climatic : minimum and maximum air temperature, irradiation, humidity, wind speed, monthly rainfall, number of rainy days Soil : soil type, maximum rooting depth, presence of ground water table, soil moisture characteristics, soil hydraulic conductivity, N-fertilizer, P-fertilizers, K-fertilizers Crop : initial dry weight, life span of leaves, properties that determine assimilation and respiration rates, rate of phenological development, death rate, fractions of assimilates partitioned to plant organs, and the minimum and maximum nutrient concentrations per plant organ

Table 3. Output factors of models

Model	Output factors
AquaCrop	Depletion of the root zone, transpiration, canopy cover
APSIM	Crop yield, biomass, plant growth stages, water use and stress, nutrient use and dynamics runoff and leaching, soil carbon dynamics, protein in crops, total soil water, total soil N, deep ripping and N fertiliser on grain yield, sowing dates on shoot biomass production, soil erosion losses
CERES-Maize	The date of all the phenological stages throughout the growth cycle, cumulative biomass, LAI*, max LAI, evapotranspiration, plant transpiration, rooting depth, root length, weight(leaf, root, stem, ear), rooting depth, silking and maturity date, grain yield, kernel weight
DSSAT	Yield, nitrogen uptake, root exudate, soil water & temperature dynamics, biomass nitrogen, total carbon & nitrogen
EPIC & GEPIC	Yield, seasonal ET***, crop water productivity, biomass, transpiration, irrigation, harvest index, N fertilizer input, annual ET
GUMCAS	Soil water deficit, vegetative rate of progression, reproductive rate of progression, crop growth rate, daily leaf weight increment, leaf size
Hybrid-Maize	LAI*, max LAI, maize leaf area expansion, grain and stover yield, HI, dry matter accumulation, AG biomass**, PAR, gross assimilation, leaf biomass growth, the minimum fraction of dry matter partitioning to roots
ORYZA2000	LAI*, biomass of total dry matter, leaves, stems, panicles, grain yield, daily rate of canopy CO ₂ assimilation, daily potential demand for N
STICS	LAI*, Max LAI, potential yield, soil water content, Evaporation, Transpiration
SVAT	Crop dry mass, yield, spatial patterns of crop yield, dynamic crop growth, water consumption, water use efficiency
WOFOST	Dry weights of living leaves, stems and storage organs, leaf area index, development stage, crop transpiration rate, gross assimilation rate, maintenance respiration rate, total above ground biomass, actual transpiration and evaporation rates, soil moisture content, surface water storage and amount of water stored in the soil

*LAI: Leaf Area Index, ** AG biomass: Aboveground dry matter accumulation ***ET: Evapotranspiration

입력 자료에 따른 중간 결과물로는 LAI, 작물 중량, 수확 손실량, 바이오매스 생산량 등이 산출되었다. 또한, 작물생장에 직접적으로 작용하는 수분에 관한 출력자료를 제공하는 모델은 4개로 나타났으며, 주로 증발산량(Evapotranspiration)과 물 소비량(water consumption) 등이다.

모델에 따라서 입력 자료로 활용되었던 인자들이 다른 모델에서는 출력 자료로 도출되기도 하였으며, 그 대표적인 예로 증발산량, LAI, 뿌리 깊이 등이 있다.

4.4. 입력자료 확보 가능성

모델 개발에서는 입력 자료에 따른 예측과 추정이 중요할 뿐만 아니라, 얼마만큼 정확하게

도출했는지 모델 결과 값을 검증할 수 있어야 한다. 검증자료에는 주로 지리정보시스템(GIS) 기반의 현장 측정 자료와 원격 탐사 자료가 활용되며, 최근 정확도 향상을 위해 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용한 생태학적 모델링 연구가 많이 이루어지고 있다(Cao and Prince, 2002). 작물 모델은 대기와 식생 그리고 토양인자들을 고려해야 할 뿐만 아니라, 지형적 인자와 인간에 의한 교란도 고려되어야 한다. 따라서 위성자료와 GIS 기법 및 Plot 단위의 통합모형 구축이 필요하다.

이러한 입력 인자와 GIS 주제도, 위성자료 등을 근거로 모델 구축이 가능한 요소를 Table 4와 같이 도출하였다. 그 결과, 외국 모델에서 적용된 기상, 토양, 작물, 식생 인자들은 우리나라

Table 4. Ensuring possibility to build input data for applicable models

Class	Factors	Applicable foreign models	Possibility	Map scale in Korea
Climatic	Temperature	9	○	Climatic map 1km
	GDD	3	○	
	Solar radiation	7	○	
	Precipitation	6	○	
Soil	Soil evaporation	5	○	Soil map 1/25,000
	Soil texture	5	○	
	Water capacity	5	○	
	Soil pH	3	○	
	Rooting depth	4	○	
	Run-off	2	○	
	Drainage	3	○	
Crop	Crop growth rate	4	○	Agriculture map 1/25,000
	Cultivars	3	○	
	Crop phenology	3	○	
	Photoperiod sensitivity	3	○	
	Historic yield	2	○	
	Canopy architecture	3	-	

라 기상청, 농촌진흥청, 환경부, 산림청 등 기관에서 확보 가능한 인자로 분석되었다. 이는 국내 작물 모델의 구축 및 개발에 있어서 기초적인 자료로 제공될 수 있는 것으로 예상된다.

4.5 작물모델의 기존 국내 적용 결과와 한계점

Zhang *et al.* (2007)은 APSIM 모델을 이용하여 국내의 쌀 생산량을 예측하기 위하여, 질소비료의 정도를 7단계로 나누고, 경기농업기술원에서 조사한 국내 쌀 품종과 현장조건을 고려하여 1997년부터 2004년까지 모델의 유효성을 검토하였다. 그 결과, 현장자료와 유사한 결과를 나타낸 것을 확인하였으며, 이는 쌀 생산량과 관계가 높은 변수로서, 정확한 결과를 위해서는 국내 쌀 품종에 대한 광주기 기간에 대한 정확도를 높여야 함을 확인하였다.

정상옥(2010)은 AquaCrop 모델을 이용하여

기후변화가 논 용수 환경과 작물의 증발산량 및 수확량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 그 결과, 벼 잠재생산량과 물의 생산성은 2020년 각 23%, 19% 증가, 2050년 각 55%, 44% 증가, 2080년 44%, 75 % 증가하는 것으로 예측되었다. 그러나 입력자료로 한 개의 기상시나리오를 상세화한 결과를 이용하였고(GCM 모형결과를 MM5 지역기후모형을 이용하여 상세화), 30년 월 평균 기상 값을 활용한 것은 많은 불확실성을 내포하는 요인이 되었다. 여러 모형과 시나리오를 사용하는 앙상블 모형 연구 및 구체화된 예측 기상 값을 활용하여야 보다 나은 예측 값을 얻을 수 있을 것이다.

이충근 등(2005)은 ORYZA2000 모델을 적용하여 질소 제한조건에서 벼 생육을 모의하였다. 그 결과, 벼의 생산량은 질소 시비량이 많은 조건에서 과대 추정되었고, 이와 별개로 벼의 지상부 건중량은 질소의 총 흡수량과 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 벼의 출수기

Table 5. Description of models applied to Korea

Models	Description	Objectives
APSIM (Zhang <i>et al.</i> , 2005)	Testing the simulation capability of APSIM-ORYZA under different levels of nitrogen fertiliser and transplanting time regimes in Korea	To validate the model for Korean rice varieties and field conditions, the measured yields and flowering times from three field experiments conducted by the Gyeonggi Agricultural Research and Extension Services (GARES) in Korea were compared against the simulated outputs for different management practices and rice varieties.
AquaCrop (정상옥, 2010)	Simulating Evapotranspiration and Yield Responses of Rice to Climate Change using FAO-AquaCrop	AquaCrop 3.1 crop model is used to analyze the impact of climate change (such as CO ₂ concentration, temperature, precipitation) to water environment (at farm), evapotranspiration and yield of crops.
ORYZA 2000 (이충근 등, 2005; 서명철 등, 2012)	Growth simulation of rice under Korean environments using ORYZA2000	To verify about the feasibility of model to Korean environment and species, the rice (target species) yield has been predicted, and attempted to execute growth simulation based on climate data.
	Simulation of Rice Production on Climate Change New Scenario(RCP8.5) Using ORYZA 2000 Model	The objective of this study was to evaluate the potential impacts of future climate change on the rice production and adaptation methods in Korea.

와 수량 예측을 모의하였을 때, 출수기의 시점 변화와 수량의 경향은 일치하였지만, 총량에서 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 정확한 생육모의를 위해서는 발육단계와 질소이용 효율에 대한 종합적인 보완이 필요할 것으로 판단된다.

서명철 등(2012)은 최고기온, 최저기온, 평균 기온, 강수량, 일사량, 증기압 등을 이용하여 벼 수량 예측을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 조생종, 중생종, 중만생종은 미래로 갈수록 수량 감소가 두드러지게 나타났고, 중만생종은 수량 감소의 폭이 더 크게 나타났다. 또한, 신 시나리오(RCP8.5)를 이용한 우리나라 미래 벼 수량에 대하여 예측하였다. 그 결과, 평년 수량에 비하여 2020년, 2050년, 2090년은 각각 17.6, 26.3, 32.6%가 감소되었다. 특히 2020년에 조생종, 중생종, 중만생종이 평년 수량에 비해 각각 83.0, 82.2, 81.3% 정도의 수량성을 나타냈다. 이는 약 17~20%의 수량 감소 요인이 발생되었으며, 대책이 시급한 것으로 분석되었다. 이와 같이, ORYZA2000 모델은 기온 상승이 생산성을 하락시키는 것으로 모의되어 실제 생산량과 상이한 측면에 대한 보완이 요구되는 모델이다.

4.6 한국형 모델을 위한 접근방법

기후변화의 원인인 이산화탄소 발생에 가장 크게 기여한 요소는 인간의 활동이며, 이로 인한 이산화탄소 배출량은 매년 증가하고 있다(IPCC, 2007). 또한, 우리나라는 복잡한 지형으로 인한 미기후 및 토양의 차이가 심하기 때문에 기후변화에 대한 작물의 분포 변화 및 수량 예측을 하고자 할 때 지형적 요소도 배제할 수 없다. 그러나 앞에서 언급된 대부분의 모델에서 지형인자가 대기나 토양과 비교하여 거의 포함되지 않고, 인간의 시비방법에 따른 인자는 거의 고려하지 않고 있었다. 따라서 한국형 모델

을 개발하기 위해서는 기상-토양-작물특성-지형-인간의 간섭을 입력 파라미터로 하는 구성요소를 포함한 연구가 진행되어야 한다.

특히, 전 지구적 모델은 규모가 너무 커서 우리나라의 복잡한 환경을 충분히 설명하지 못하고 있다. 따라서 Plot 규모의 표본점 단위에서 연구가 이뤄질 수 있는 입력 자료를 이용하여 모델 구축의 정확성을 높일 수 있어야 하며, 구축된 모델의 결과 값을 해석하는데 검증할 수 있는 신뢰성 있는 작물 수량과 관련된 지표가 마련되어야 한다.

5. 결론

기후변화에 따른 농업생산성 변화 대응과 농가의 소득 보호를 위해서는 미래 작물 예측에 보다 높은 정확성이 필요하다. 본 연구는 해외 작물모델들의 국내 적용을 위한 목적으로, 기존 연구를 통해 정확성이 검증된 작물모델들을 문헌분석하여, 모델의 특징 및 입출력자료를 파악하였고, 이를 바탕으로 국내 자료 확보 가능성과 기존 국내 적용 연구들의 한계점, 그리고 한국형 모델을 위한 제언을 제시했다.

총 12가지 주요 작물 모델의 활용분야, 입출력자료, 자료 확보 가능성 등을 면밀히 파악하였다. 먼저, 주요 작물 모델들의 특징은 지리적 규모, 모델 구동 특성, 포괄적 혹은 특정 작물 사용 등의 요소로 정리되었다. 작물모델들의 입력 자료는 크게 기상자료, 토양자료, 작물자료 등으로 구분되며, 출력자료는 작물 수량을 기본으로 수분에 관한 정보를 도출하는 모델도 확인되었다. 국외 주요 작물 모델에서 적용된 기상, 토양, 작물, 식생 인자들은 우리나라 기상청, 농촌진흥청, 환경부, 산림청 등 기관에서 확보 가능한 인자로 분석되어, 국내 적용 가능성이 높다고 예상된다.

국내에서 기 적용된 일부 작물 모델의 연구에서는, 모델 유효성 검토에 그치거나, 입력자

료의 정확성 혹은 출력 결과의 신뢰성 등에 한계점을 발견하여, 실제 기후변화 대응 정책에 적용하기에는 보완할 부분이 많은 것으로 확인되었다.

작물모델의 국내 적용과 한국형 모델 개발 시 정확도를 높이기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 할 것이다. 첫째, 표본점 단위의 지상조사와 인공위성을 이용한 원격탐사 및 지리정보시스템(GIS) 기법으로 현존 작물분포도를 예측할 수 있어야 한다. 둘째, 우리나라의 지형에 적합한 지역적 규모의 모델을 구축하여야 한다. 셋째, 기상-토양-작물특성-지형-인간의 간섭을 입력 파라미터로 하는 구성요소를 포함한 연구가 요구되며, 특히, 기상, 토양, 작물정보 등의 입력 자료의 경우 체계적인 DB화가 요구된다. 넷째, 구축된 모델의 결과 값을 해석하는데 검증할 수 있는 작물별 수량 및 기후변화와 관련된 지표가 마련되어야 한다.

작물 생육에 직접적인 기후변화가 가속화되는 현 시점에서, FTA를 비롯한 대외환경 변화로 농업의 새로운 국면을 맞이할 국내 상황까지 고려할 때, 본 연구의 수행은 시의 적절하였다고 판단된다. 본 연구를 통해 제시된 결과는 국내 미래작물 예측을 위한 해외작물 모델의 국내 적용과 한국형 작물모델 개발의 기초자료로 활용될 수 있으며, 향후 연구에서는 실효성 있는 모델 구동을 통해 미래작물 생산을 예측하여 농업 부문 기후변화 적응 정책에 기여하길 기대한다.

사사

본 논문은 농촌진흥청 농업공동연구 농업기후변화적응체계구축사업(과제번호: PJ00987003)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참고문헌

김대준, 노재환, 김정균, 윤진일, 2013, 파종일

변경이 기후변화 조건에서 곡물생산량에 미치는 영향, 한국농림기상학회지, 15권 1호, 26-39.

김준환, 이충근, 손지영, 최경진, 윤영환, 2012, 작물모형 평가를 위한 통계적 방법들에 대한 비교, 한국농림기상학회지, 14권 4호, 269-276.

남영식, 양승룡, 송용호, 박호정, 2012, 기후변화로 인한 한국 쌀(정곡) 생산변화에 관한 연구: RCP 8.5 시나리오를 중심으로, 농업경제연구, 53권 4호 61-88.

서명철, 손연규, 홍석영, 정남수, 조현숙, 전원태, 2012, ORYZA 2000 모형을 이용한 기후변화 신시나리오(RCP8.5)에 대한 벼 수량 예측 시뮬레이션, 한국토양비료학회 학술발표회 초록집, 282-283.

송용호, 이우균, 곽한빈, 김문일, 양승룡, 2013, 기온변화에 대한 옥수수과 밀 생산량 취약성 평가-미국과 중국을 사례로-, 한국기후변화학회지, 4권 4호, 371-384.

심교문, 노기안, 소규호, 김건엽, 정현철, 이덕배, 2010, 지구온난화에 따른 벼 생육 및 생산성 변화 예측, 한국기후변화학회지, 1권 2호, 121-131.

심교문, 이덕배, 민성현, 김건엽, 정현철, 이슬비, 강기경, 2011, A1B 기후변화시나리오에 따른 미래 겉보리 잠재생산성 변화 예측, 한국기후변화학회지, 2권 4호, 317-331.

윤진일, 1990, 대기중 이산화탄소 배증조건하의 기후시나리오에 의한 국내 쌀생산 추정, 한국기상학회지, 26권 4호, 263-274.

윤진일, 조경숙, 2001, 기상자료 공간내삽과 작물 생육모의기법에 의한 전국의 읍면 단위 쌀 생산량 예측, 한국농림기상학회지, 3권 1호, 37-43.

이변우, 신진철, 봉종현, 1991, 대기중 CO₂ 농도 증가에 따른 기후변화가 농업기후자원, 식생

- 의 순 1차 생산력 및 벼 수량에 미치는 영향, 한국작물학회지, 36권 2호, 112-126.
- 이승호, 허인혜, 이경미, 김선영, 이운선, 권원태, 2008, 기후변화가 농업생태에 미치는 영향-나주지역을 사례로-, 대한지리학회지, 43권 1호, 20-35.
- 이정택, 2007, 기후변화가 농업에 미치는 영향, 토양과 비료, 32권, 7-20.
- 이충근, 광강수, 김준환, 손지영, 양원하, 2011, 미래 기후변화 및 그에 따른 재배시기 조정이 벼 생태형별 생육기간과 생육온도에 미치는 영향, 한국작물학회지, 56권 3호, 233-243.
- 이충근, 신진철, 광강수, 이정일, 2005, 우리나라 환경조건에서 ORYZA2000을 이용한 벼 생육 모의, 한국농림기상학회 학술발표논문집, 2005, 80-83.
- 이태석, 최진용, 유승환, 이상현, 오윤경, 2012, 기후변화 시나리오에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량 변화 분석, 한국농공학회지, 54권 1호, 47-54.
- 정상옥, 2010, FAO-AquaCrop을 이용한 기후변화가 벼 증발산량 및 수확량에 미치는 영향 모의, 한국농공학회지, 52권 3호, 57-64.
- 정유란, 조경숙, 이변우, 2006, 지구온난화에 따른 우리나라 벼농사지대의 생산성 재평가, 한국농림기상학회지, 8권 4호, 229-241.
- 조경숙, 윤진일, 1999, 일기상자료에 의한 읍면별 벼 작황진단 및 쌀 생산량 예측, 한국농림기상학회지, 1권 1호, 12-19.
- 통계청, 2009, 2009년 농작물생산통계, 통계청, 144 pp.
- Aggarwal, P. K., and R. K. Mall, 2002, Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment, **Climatic Chage**, **52**, 331-343.
- Bouman, B., and H. Van Laar, 2006, Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions, **Agricultural Systems**, **87**, 249-273.
- Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, and P. Burger, 2003, An overview of the crop model STICS, **European Journal of Agronomy**, **18**, 309-332.
- Carberry, P., R. Muchow, and R. McCown, 1989, Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment, **Field Crops Research**, **20**, 297-315.
- Carlson, R. E., D. P. Todey, and S. E. Taylor, 1996, Midwestern corn yields and weather in relation to extremes of the southern oscillation, **Journal of Production Agriculture**, **9**, 347-352.
- De Wit, C. T., 1978, Simulation of assimilation respiration and transpiration of crops. In: Simulation Monographs, Center for Agriculture Publishing and Documentation, Wageningen, 60-87.
- van Diepen, C. A., J. Wolf, H. van Keulen, and C. Rappoldt, 1989, WOFOST: a simulation model of crop production, **Soil use and management**, **5**, 16-24.
- Easterling, W., X. Chen, C. Haysl, J. Brandle, and H. Zhang, 1996, Improving the validation of model-simulated crop yield response to climate change: an application to the EPIC model, **Climatic Research**, **6**, 263-273.
- Fischer, G., H. van Velthuizen, M. Shah, and F. O. Nachtergaele, 2002, Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and result, International Institute for Applied Systems Analysis, Vienna, 65-

- 103.
- Giraldo, L., L. Lizcano, A. Gijsman, B. Rivera, and L. Franco, 1999, Adapting the CROPGRO model of DSSAT to simulate the growth of *Brachiaria decumbens*, **The Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development**, Lima, Peru, 1-10.
- Graeff, S., J. Link, J. Binder, and W. Claupein, 2012, Crop models as decision support systems in crop production, **Crop Production Technologies**, 3-28.
- Hammer, G. L., M. J. Kropff, T. R. Sinclair, and J. R. Porter, 2000, Future contributions of crop modeling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement, **European Journal of Agronomy**, **18**, 15-31.
- Hansen, J. W., 2000, Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges, **Agriculture System**, **74**, 309-330.
- IPCC, 2007, Climate change: Physical science basis, Paris, France, 2-21.
- IPCC, 2013, Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: The physical science basis.
- 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, The DSSAT Cropping system model, **European Journal of Agronomy**, **18**, 235-265.
- Lee, C., 2008, Development and application of model for estimating grain weight and grain N content in rice, Seoul National University, Ph.D thesis 102-134. (in Korean with English abstract)
- Liu, J., J. R. Williams, A. J. B. Zehnder, and H. Yang, 2007, GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale, **Agricultural Systems**, **94**, 478-493.
- Liu, W., D. Botner, and C. Sakamoto, 1989, Application of CERES-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid, **Agricultural and Forest Meteorology**, **45**, 299-312.
- Matthews, R., and L. Hunt, 1994, GUMCAS: a model describing the growth of cassava (*Manihot esculenta* L. Crantz), **Field Crops Research**, **36**, 69-84.
- Mo, X., S. Liu, Z. Lin, Y. Xu, Y. Xiang, and T. McVicar, 2005, Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT- crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain, **Ecological Modelling**, **183**, 301-322.
- Oteng-Darko, P., S. Yeboah, S. N. T. Addy, S. Amponsah, and E. Owusu Danquah, 2013, Crop modeling: A tool for agricultural research - A review, **E3 Journal of Agricultural Research and Development**, **2**, 1-6.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fisher, 2004, Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenario, **Global Environmental Change**, **14**, 53-67.
- Perkins, S., 2012, Crop models review and sweet sorghum crop model parameter development, Master thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 12-34.
- Phillips, J. D., M. A. Cane, and C. Rosenzweig, 1998, ENSO seasonal rainfall patterns, and

- simulated maize yield variability in Zimbabwe, **Agricultural and Forest Meteorology**, **90**, 39-50.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Ferreres, 2009, AquaCrop The FAO Crop Model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description, **Agronomy Journal**, **101**, 438-447.
- Riha, S. J., D. S. Wilks, P. Simoens, 1996, Impacts of temperature and precipitation variability on crop model predictions, **Climate Change**, **32**, 293- 311.
- Rosenzweig, C., and M. L. Parry, 1994, Potential impacts of climate change on world food supply, **Nature**, **367**, 133-138.
- Shin, J. C., and M. H. Lee, 1995, Rice production in south Korea under current and future climates, In: R. B. Matthews, M. J. Kropff, D. Bachelet, and H. H. van Laar (Eds), *Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia*. IRRI & CAB International, Wallingford, UK, 199-215.
- Southworth, J., J. C. Randolph, M. Habeck, O. C. Doering, R. A Pfeifer, D. G. Rao, and J. J. Johnston, 2000, Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States, **Agriculture Ecosystem and Environment**, **82**, 139-158.
- Tao, F. L., and Z. Zhang, 2010, Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: Quantify the relative contributions of adaptation options, **European Journal of Agronomy**, **33**, 103-116.
- Wang, E., M. Robertson, G. Hammer, P. Carberry, D. Holzworth, H. Meinke, S. Chapman, J. Hargreaves, N. Huth, and G. McLean, 2002, Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM, **European Journal of Agronomy**, **18**, 121-140.
- Yang, H., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Walters, T. J. Arkebauer, and K. G. Cassman, 2004, Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modeling approaches, **Field Crops Research**, **87**, 131-154.
- Zhang, X., J. H. Lee, Y. Abawi, Y. H. Kim, D. McClymont, and H. D. Kim, 2007, Testing the simulation capability of APSIM-ORYZA under different levels of nitrogen fertiliser and transplanting time regimes in Korea, **Australian Journal of Experimental Agriculture**, **47**, 1446-1454.