

저품질 관측자료를 사용한 벼 생육 모델의 신동진 품종모수 추정

현신우¹ · 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원
(2018년 11월 29일 접수; 2019년 3월 26일 수정; 2019년 3월 27일 수락)

Calibration of cultivar parameters for cv. Shindongjin for a rice growth model using the observation data in a low quality

Shinwoo Hyun¹ and Kwang Soo Kim^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Korea

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received November 29, 2018; Revised March 26, 2019; Accepted March 27, 2019)

ABSTRACT

Crop models depend on a large number of input parameters including the cultivar parameters that represent the genetic characteristics of a given cultivar. The cultivar parameters have been estimated using high quality data for crop growth, which require considerable costs and efforts. The objective of this study was to examine the feasibility of using low quality data for the parameter estimation. In the present study, the cultivar parameters for cv. Shindongjin were estimated using the data obtained from the report of new cultivars development and research from 2005 to 2016. The root mean square errors (RMSE) of the heading dates were less than 3 days when the parameters associated with phenology were estimated. In contrast, the coefficient of determination for yield tended to be less than 0.1. The large errors incurred by the fact that no growth data collected over a season was used for parameter estimation. This suggests that detailed observation data needs to be prepared for parameter calibration, which would be aided by remote sensing approaches. The occurrence of natural disasters during a growing season has to be considered because crop models cannot take into account the effects of those events. Still, our results provide a reasonable range for the parameters, which could be used to set the boundary of a given parameter for cultivars similar to cv. Shindongjin in further studies.

Key words: ORYZA2000 model, Crop parameters, Calibration, Quality assurance, Heading date, Yield



* Corresponding Author : Kwang Soo Kim
(luxkwang@snu.ac.kr)

I. 서 론

기후변화는 작물의 종류나 지역에 따라 작물 생산성에 긍정적 또는 부정적인 영향 미칠 수 있다(Kim *et al.*, 2015a; Parry *et al.*, 2004). 변화된 기후조건에 따른 작물 생산성 및 생육에 대한 영향을 전망하기 위해 다양한 작물모델들을 사용하는 연구가 수행되어 왔다(Shim *et al.*, 2010; Tao and Zhang, 2010; Asseng *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2014; Maiorano *et al.*, 2017). 예를들어, Kim *et al.*(2013)는 DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer)을 사용하여 미래 기후에서 작물에 따라 수량 변화에 차이가 있을 것으로 예상하였다. Asseng *et al.*(2015)는 APSIM, DSSAT, WOFOST 등 30가지 작물 모델을 사용하여 미래 기후 조건에서 밀 생산성이 감소할 것으로 전망하였다.

국내에서는 주요 작물인 벼의 생산성에 대한 기후 변화 영향 평가 및 적응대책 수립을 위해 벼의 생육과정을 모의하는 ORYZA2000 모델이 사용되어 왔다. Lee *et al.*(2012)는 ORYZA2000 모델을 사용하여 미래기후 조건에서 작물생산성 변화를 모의하였다. 그 결과 재배시기를 고정하였을 때 벼 수량이 감소하나 재배시기를 조정할 경우 수량이 증가할 수 있을 것으로 전망하였다. Kim *et al.*(2015b)는 ORYZA2000 모델을 사용하여 미래기후 조건에서 2020년대까지는 수량이 증가할 수 있으나, 그 이후로는 수량이 지속적으로 감소하여 2090년대에는 20%이상 줄어들 것으로 전망하였다.

ORYZA2000 모델과 같은 과정 중심의 작물모델을 구동하기 위해서 다수의 모수가 필요하다. 특히, 작물 품종마다 생육 특성이 달라지기 때문에 이들 품종들이 가진 유전적 특성을 대표할 수 있는 품종모수가 추정되어야 한다(Li *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2017). 예를 들어, Lee(2008)은 국내에서 재배되고 있는 오대벼, 화성벼, 일품벼에 대한 ORYZA2000 모델의 품종모수를 추정하였다. Shim *et al.*(2010)은 DSSAT에 포함되어 있는 CERES-Rice 모델에 적용가능한 오대벼, 화성벼, 추청벼 등의 품종모수를 추정하였다. Kim *et al.*(2012)은 DSSAT에 포함되어 있는 주요 식량작물인 벼, 보리 및 콩 품종에 대한 품종모수를 추정하였다. 개별 품종에 해당하는 품종모수가 보고되지 않은 경우, 같은 생태형으로 분류되는 품종모수를 사용하여 작물 모의를 수행할 수 있다(Wikarmpapraharn and Kositsakulchai,

2010).

보다 정확한 생육 모의를 위해서는 모의하고자 하는 품종별로 모수추정이 필요하며, 이를 위해 작물의 생육 자료 및 기상 자료 등 다양한 입력자료들이 필요하다. 특히, 모수추정을 위해서는 품질관리가 된 관측 자료를 사용하는 것이 유리하다. Hoogenboom *et al.*(2012)는 모델구동, 모델평가, 모수추정 등의 용도에 따라 요구되는 자료의 수준을 3가지 단계로 나누어 구분하였다. 또한, 모수추정을 위한 자료는 높은 수준의 품질과 함께 생육기간 중 기관별 건물중, 질소함량, 토양질소 등 가장 많은 종류의 자료가 필요하다고 보고하였다. Boote *et al.*(2016) 및 Kersebaum *et al.*(2015)는 자료의 품질에 따라 구분한 4가지 수준의 자료 중 모수추정을 위해서는 가장 높은 수준의 자료가 필요하며, 만약 충분하지 못한 자료를 사용하여 모수를 추정할 경우, 일부 변수에 한하여 신뢰도 높은 모의값을 얻을 수 있다고 보고하였다.

자료의 품질이 낮더라도 쉽게 얻을 수 있는 자료를 이용하여 품종모수를 추정할 경우, 추정된 모수의 신뢰도를 평가하는 것이 중요하다. 일반적으로 작물 모델의 모수 추정에 유리한 고품질의 생육자료를 확보하기 어렵다(Kim *et al.*, 2015). 고품질의 생육자료를 얻기 위해서는 직접 실험을 하여 확보할 수 있으나, 상세한 시계열 생육자료를 얻기 위해 상당한 비용과 노력이 필요하다(Kim *et al.*, 2018). 이미 진행된 연구결과나 문헌으로부터 생육자료를 수집할 수 있으나, 높은 수준의 품질을 가진 자료는 대체로 공개되어 있지 않다. 반면, 벼 신품종육성 및 이용촉진사업을 통해 조사된 벼 생육자료의 경우, 매년 발간되는 연구 보고서를 통해 생육자료의 일부를 확보할 수 있으며, 이를 사용한 연구가 이루어져왔다. 예를 들어, Kim *et al.*(2018)은 신품종 육성 결과 보고서를 활용하여 옥수수 생육 모델의 생물계절 관련 모수를 비교적 신뢰도 높게 추정할 수 있을 것으로 보고 하였다. 그러나, 이러한 저품질의 자료로 벼의 품종모수를 추정하였을 경우, 실제로 사용하기에 적합한 수준인지에 대한 평가가 되어 있지 않다.

본 연구에서는 신품종개발 공동연구 보고서에서 얻어진 자료들을 사용하여 벼의 품종모수를 추정하고자 하였다. 또한, 이들 모수로부터 얻어진 생육모의 결과들을 활용하여 저품질 자료의 활용가능성을 평가하고자 하였다. 특히, 출수기와 수량의 모의 자료 분석을 통해 이러한 보고서에 공개된 자료들을 사용하여 적절

한 모수추정의 가능성을 평가하고자 하였다. 이러한 결과들은 국내에서 재배되는 다양한 품종들을 대상으로 품종모수 추정에 필수적으로 수집되어야 하는 자료들의 요구도를 파악할 수 있게 한다(Kim *et al.*, 2015a). 이는, 모수추정과 생육 모의를 개선하기 위한 작물 생육 관측체계를 설계하고 구축할 수 있도록 지원할 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. ORYZA2000 모델

ORYZA2000 모델은 잠재생산성 조건, 수분제한 조건 및 질소제한 조건에서 벼의 생육을 모의할 수 있도록 개발된 작물모델이다. ORYZA2000 모델을 구동하기 위해 기상, 토양, 재배관리 및 품종모수 자료가 사용된다. 기상입력자료에는 일별 일사량, 최고기온, 최저기온, 수증기압, 풍속 및 강수량과 같은 기상변수와 기상관측소의 위치 정보가 포함된다. 일사량을 제공하는 기상관측소가 상대적으로 적기 때문에, 일조시간을 입력자료로 사용해야 할 수도 있다. 일조시간 자료가 사용될 경우에는 Angstrom-Prescott 계수가 사용되는 경험식으로부터 일사량을 추정하여 입력변수 값으로 사용한다. 만약, 일사량 자료를 사용할 경우 Angstrom-Prescott 계수가 0으로 설정된다(Hyun *et al.*, 2017). 토양자료는 관개가 제한된 포장에서 벼가 재배되는 경우를 모의할 때 사용된다. 토양의 특성을 나타내는 모수들은 토양층별 깊이, 수분함량 및 최대용수량 등이 포함된다. 재배관리에 따른 생육을 모의하기 위해 파종일, 육묘기간, 재식밀도 등의 기본적인 재배관리 정보가 사용된다. 또한, 수분 제한조건과 질소 제한조건에 따라 벼 생육이 모의될 경우, 관개관리 정보와 시비관리 정보가 추가적으로 입력된다. 모델에 사용되는 품종모수에는 생물계절학적 생육 속도, 기관별 동화산물의 분배계수, 기관별 호흡량 등이 포함된다.

2.2. 관측자료 수집

본 연구에서는 2005년부터 2016년까지의 신품종개발공동연구 보고서에 수록된 시험결과자료를 수집하였다. 이 보고서에는 우량계통 지역적응시험, 내병성 검정시험, 품질 특성 검정시험, 작황시험 등의 결과가 수록되어 있으며 각각 다른 종류의 시험결과가 제공된다. 작황시험에서는 시험 위치, 파종기, 이앙기, 재식

거리 및 시비량 등의 재배법과 함께 시기별 생육조사, 수량 구성요소 및 수량조사, 병해충 및 기상재해 조사 결과가 수록되어 있다. 지역적응시험에서는 시기별 조사를 제외한 재배법 및 수량구성요소, 수량 등의 자료를 얻을 수 있다.

국내에서 널리 재배되고 있는 신통진 품종에 대한 모수를 추정하기 위해 작황시험결과와 지역적응시험결과를 활용하였다. 해당 품종이 시험재배된 지역에서의 파종일, 이앙일, 재식밀도, 시비량 등의 재배관리 자료와 출수기 및 수량 자료가 수집되었다. 작황시험은 모두 익산에서 수행되었으며, 2016년까지 총 6개 년도에 대한 자료들이 확보되었다. 지역적응시험은 2005년과 2011년에 익산, 정읍, 진안 및 부안의 4개 지역에서 수행되었으며, 2006년에는 익산에서만 관측 자료가 수집되었다.

2.3. 모델 입력자료 생성

작황시험 및 지역적응시험이 진행되었던 지역들에 대한 기상자료는 WiseDownloader(Lee *et al.*, 2015)를 사용하여 생성하였다. 시험이 진행되었던 지역과 가장 가까운 종관기상 관측 자료를 수집하였다. 익산과 진안에서는 종관관측 기상자료가 측정되지 않기 때문에, 각각 전주와 임실의 기상자료를 대신 사용하였다. 일별 일조시간, 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속 및 강수량 자료가 기상청 웹사이트로부터 자동으로 수집되었다. 파종일, 이앙일, 재식밀도, 시비량 등의 재배관리 설정은 수집된 작황시험 및 지역적응시험 보고서에 맞추어 설정하였다. 벼는 대개 관개가 가능한 지역에서 재배된다는 점을 고려하여 수분스트레스가 없다고 가정하였다. CO₂ 농도에 따른 벼 생육 조건을 고려하기 위해 Mauna Loa 관측소에서 얻어진 년도별 연평균 CO₂ 농도자료를 입력자료로 사용하였다(Tans and Keeling, 2018).

2.4. 작물모수의 추정

ORYZA2000에서는 생물계절과 바이오매스 관련 모수 추정을 할 수 있는 도구인 DRATES와 PARAM을 제공한다(Bouman *et al.*, 2001). DRATES는 재배관리 및 유수분화기, 출수기, 성숙기의 시기를 사용하여 생물계절과 관련된 모수를 추정한다(Table 1). PARAM은 시기별 생육자료를 사용하여 생육과 관련된 모수를 추정하기 위해 사용된다. 본 연구에서 수집된 모수추정을 위한 자료는 시기별 생육자료를 포함하

고 있지 않기 때문에 PARAM은 사용할 수 없었다. 따라서, DRATES만을 사용하여 생물계절과 관련된 모수만을 추정하였다.

모든 종류의 모수를 추정하기 위해 Quantification of Uncertainty for Estimation, Simulation and Optimization (QUESO, Prudencio and Schulz, 2011)을 사용하였다. QUESO는 베이지안 추론을 바탕으로 모수 추정에 사용되는 통계적 알고리즘을 구현한 라이브리이다. 특히, QUESO를 사용할 경우 불확실성을 고려하여 모수를 추정할 수 있다. 예를 들어, 합성가스 연소 모델(Braman, 2013), 난류 모델(Cheung *et al.*, 2011), 종양 성장 모델(Lima *et al.*, 2016; Oden *et al.*, 2016) 등과 같이 모수의 종류와 구조가 복잡한 모델들에 QUESO가 적용되었다. QUESO에 포함되어 있는 모수 추정 알고리즘에 대한 자세한 설명은 Prudencio and Schulz(2011) 및 Estacio-Hiroms *et al.*(2016)에 제시되어 있다.

모수를 추정할 때에는 추정 대상 모수에 대해 일정 범위 내에서 값을 변경하고, 이러한 모수값들을 사용하여 모델을 구동한 후, 모의값과 관측값을 비교하는 과정을 거치게 된다. 모의값과 비교를 위한 관측 변수들은 유수분화기, 출수기, 성숙기, 수량 및 지상부 건물중이 포함되었다. 작황시험자료에는 출수기와 수량만이 제공되어 있어, 유수분화기, 성숙기 및 지상부 건물중 등 다른 변수들은 출수기와 수량으로부터 추정하여 모의값과 비교하였다. 유수분화기는 출수기를 기준으로 30일 전으로 가정하였으며(Yoshida, 1981), 성숙기는 출수기를 기준으로 50일 후로 가정하였다(Kim *et al.*, 2007). 지상부 건물중은 Harvest Index (HI)를 사용하여 수량자료로부터 계산하였으며, HI의 범위는 0.4~0.53로 설정하였다(Unkovich *et al.*, 2010).

비교 대상 변수들에 대한 신뢰도를 정량화 하기 위해 모의값과 관측값 사이의 유사한 정도를 나타내는 통계량인 log-likelihood (ll) 값을 사용하였다. 주어진 비교대상 변수들의 ll 값인 ll_{var} 를 다음과 같이 계산하였다(Jones *et al.*, 2011; He *et al.*, 2010):

$$ll_{var} = -\frac{n}{2} \log(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

sim 과 obs 는 각각 변수별 모의값과 관측값, σ^2 는 모델 오차의 분산을 나타낸다. 계산 과정을 단순화하기 위해 σ^2 값을 관측값의 분산값으로 대체하였다. 신품종개

발 공동연구 보고서에는 관측값의 분산이 공개되어 있지 않기 때문에 표본의 크기를 결정하는 식으로부터 다음과 같이 분산을 추정하였다:

$$\sigma^2 = N * (d * x)^2 / z^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서 N 과 x 는 각각 표본의 크기와 평균을 나타낸다. d 는 오차의 한계로, 본 연구에서는 5%로 설정하였다. z 는 신뢰수준을 나타내는 값으로, 95%의 신뢰수준을 나타내는 1.96으로 설정하였다. 모든 비교대상 변수들을 동시에 고려하기 위하여 모든 ll_{var} 를 통합하여 나타내는 ll_{param} 을 다음과 같이 계산하였다:

$$ll_{param} = \sum ll_{var} \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 var 는 비교 대상인 유수분화기, 출수기, 성숙기, 수량, 지상부 건물중을 포함한다.

본 연구에서는 생물계절 및 생육과 관련된 모수들이 추정되었다(Table 1 and Table 2). 생물계절과 관련된 10 종의 모수가 추정되었다. TBD, TBLV, TMD 및 TPD는 발육을 위한 기본 온도와 관련된 모수이며, DVRJ, DVRI, DVRP 및 DVRR은 벼의 발육 단계별 성장 속도를 결정한다. MOPP와 PPSE는 일장감응기 때 일장에 반응하는 정도를 나타내는 모수이다. 생육

Table 1. List of the phenology parameters for calibration

Parameter	Description
TBD	Base temperature for development (°C)
TBLV	Base temperature for juvenile leaf area growth (°C)
TMD	Maximum temperature for development (°C)
TOD	Optimum temperature for development (°C)
DVRJ*	Development rate in juvenile phase (°C d ⁻¹)
DVRI*	Development rate in photoperiod-sensitive phase (°C d ⁻¹)
DVRP*	Development rate in panicle development (°C d ⁻¹)
DVRR*	Development rate in reproductive phase (°C d ⁻¹)
MOPP	Maximum optimum photoperiod (h)
PPSE	Photoperiod sensitivity (h ⁻¹)

* DVRJ, DVRI, DVRP, DVRR are parameters estimated using both DRATES and QUESO

Table 2. List of the growth parameters for calibration

Parameter	Description
RGRLMX	Maximum relative growth rate of leaf area ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$)
SLATB	Table of specific leaf area (ha kg^{-1})
KDFTB	Table of light extinction coefficient for leaves (-)
NFLVTB	Table of N fraction in leaves on leaf area basis (g N m^{-2} leaf)
FSTR	Fraction of carbohydrates allocated to stems that is stored as reserves (-)
WGRMX	Maximum individual grain weight (kg grain^{-1})
FLVTB	Table of fraction shoot dry matter partitioned to the leaves (-)
FSTTB	Table of fraction shoot dry matter partitioned to the stems (-)
FSOTB	Table of fraction shoot dry matter partitioned to the panicles (-)
DRLVT	Table of leaf death coefficient (d^{-1})

과 관련된 모수 역시 10 종의 모수가 추정되었다. 추정된 모수로는 잎의 특성과 관련된 RGRLMX, SLATB, KDFTB, NFLVTB 및 DRLVTB가 포함되었다. 동화산물의 기관별 분배율을 결정하는 FLVTB, FSTTB 및 FSOTB 모수들이 추정되었다. 또한, 종실중과 관련된 FSTR과 WGRMX가 추정되었다. SLATB, KDFTB, NFLVTB, DRLVTB, FLVTB, FSTTB 및 FSOTB와 같은 일부 모수들은 발육단계별로 여러 개의 값이 추정되었다. 모수의 추정이 무작위적으로 이루어지기 때문에 불확실성을 줄이기 위하여 각각의 경우에 대하여 16번씩 반복적으로 모수를 추정하였다.

모수 추정에 있어 특정년도의 기상조건이 생육자료의 품질에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해, 우선 모든 기간의 자료를 사용하여 모수를 추정하였다. 또한, 개별년도 자료를 제외하여 모수를 다시 추정하였다. 모든년도 자료를 사용한 경우를 All이라 표기하였으며, 개별년도를 제외한 경우는 '-'기호를 추가하여 표기하였다. 예를 들어 2005년을 제외한 경우 2005로 표기하였다.

2.5. 추정된 모수의 평가

추정된 모수값들의 신뢰도를 평가하기 위하여, II 값과 다른 통계량을 사용하여 작물 생육 모의값들과 관측값을 비교하였다. 수량에 대해서는 모의값과 관측값 사이의 Root Mean Squared Error (RMSE) 및 결정계수(R^2)를 계산하였다. 출수기에 대해서는 RMSE만을 계산하였다. 신뢰도가 높은 관측자료로부터 추정된 모수들이 정확한 생육 추정에 기여할 것이라는 가정하였다. 또한, 관측자료의 신뢰도가 낮은 년도의 자료를

제외하고 모수를 추정하였을 경우, 추정치의 오차를 나타내는 통계량 값이 작아질 것으로 가정하였다. 이러한 가정하에 연차별 통계량 값들을 비교하여 연도별 관측자료의 신뢰도를 평가하였다. 추정된 모수를 사용하여 수량이 0으로 계산되는 경우, 모수추정이 완료되지 않은 것으로 판단하여 해당 모수는 분석에서 제외하였다.

생물계절 및 수량과 관련된 모수들의 적정 범위를 추정하기 위하여 출수기와 수량에 대하여 비교적 높은 정확도를 보이는 모수들을 선정하고, 선정된 모수들의 범위와 변이를 분석하였다. 출수기에 대하여 RMSE가 2일 이하인 모수들을 선정하였다. 수량의 경우에는, RMSE가 500 kg/ha 이하인 모수들을 선정하였다.

III. 결 과

3.1. 출수기 비교

DRATES를 사용하여 추정된 모수들을 해당하는 사례마다 각각 적용하였을 경우 RMSE가 0.93일로 매우 정확하게 모의되었다. 그러나 개별 모수들을 모든 사례에 적용하였을 경우, RMSE의 최소값과 중간값이 2.82일과 3.3일로 비교적 큰 값이 얻어졌다(Fig. 1). 반면, 추정된 모수들의 변동성은 비교적 작게 나타났다(Table 3). DVRJ의 경우, 변이계수가 14% 정도였으며, 나머지 모수들은 변이계수가 모두 5% 미만이었다.

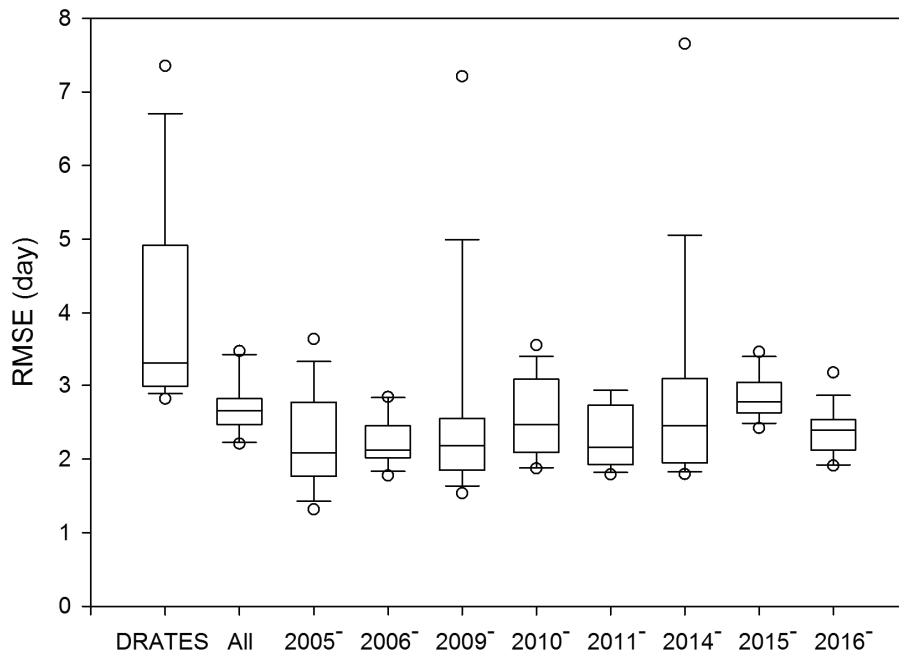
QUESO를 사용하여 모수를 추정할 경우 출수기에 대한 RMSE의 중간값(median)은 모두 3일 미만의 값

Table 3. The quantile values of the phenology development parameters calibrated with DRATES for ORYZA2000 model

Parameter	0%	50%	100%	Mean	SD ^a	CV ^b
DVRJ	0.000891	0.000957	0.001362	0.001019	0.000143	0.140089
DVRI	0.001718	0.001765	0.001855	0.001777	4.26E-05	0.023981
DVRP	0.000481	0.000495	0.000522	0.000497	1.30E-05	0.026081
DVRR	0.001232	0.001336	0.001479	0.001329	6.30E-05	0.047393

^a SD indicates standard deviation

^b CV indicates coefficient of variation

**Fig. 1.** Root Mean Square Error of heading date estimates for cv. Shindongjin using ORYZA2000 model.

들이 얻어졌으며, 대부분의 경우 DRATES를 사용하여 모수를 추정했을 때보다 낮은 RMSE 값을 보였다 (Fig. 1). 특히, 2005년을 제외한 결과인 2005⁻ 자료에서 중간값과 최소값이 각각 2.0일과 1.3일로 가장 낮게 나타났다. 2009⁻ 와 2014⁻ 자료들의 경우, 출수기에 대한 RMSE가 7일 이상의 큰 오차가 발생하는 경우가 나타났으나, 그 외에는 대부분 3일 이하로 나타났다.

QUESO를 사용하여 추정된 총 132개의 모수 집합 중에서 출수기의 RMSE가 2일 이하의 값을 얻을 수 있는 모수 집합은 단지 28개에 불과하였다. 이러한 결

과값을 얻을 수 있었던 모수 집합들은 2005⁻, 2006⁻, 2009⁻, 2010⁻, 2011⁻, 2014⁻, 2016⁻ 자료로부터 선정되었다. 출수기 추정 오차가 작았던 모수 집합에서 개별 모수들의 변동성은 상이하게 나타났다(Table 4). 예를 들어, DVRI의 변이계수는 50%로 가장 큰 값이 나타났으며, PPSE도 변이계수가 37%로 다른 모수들에 비해 큰 값이 나타났다. 반면, TMD와 MOPP의 변이계수는 각각 5%와 7%로 상대적으로 변동성이 작은 것으로 나타났다.

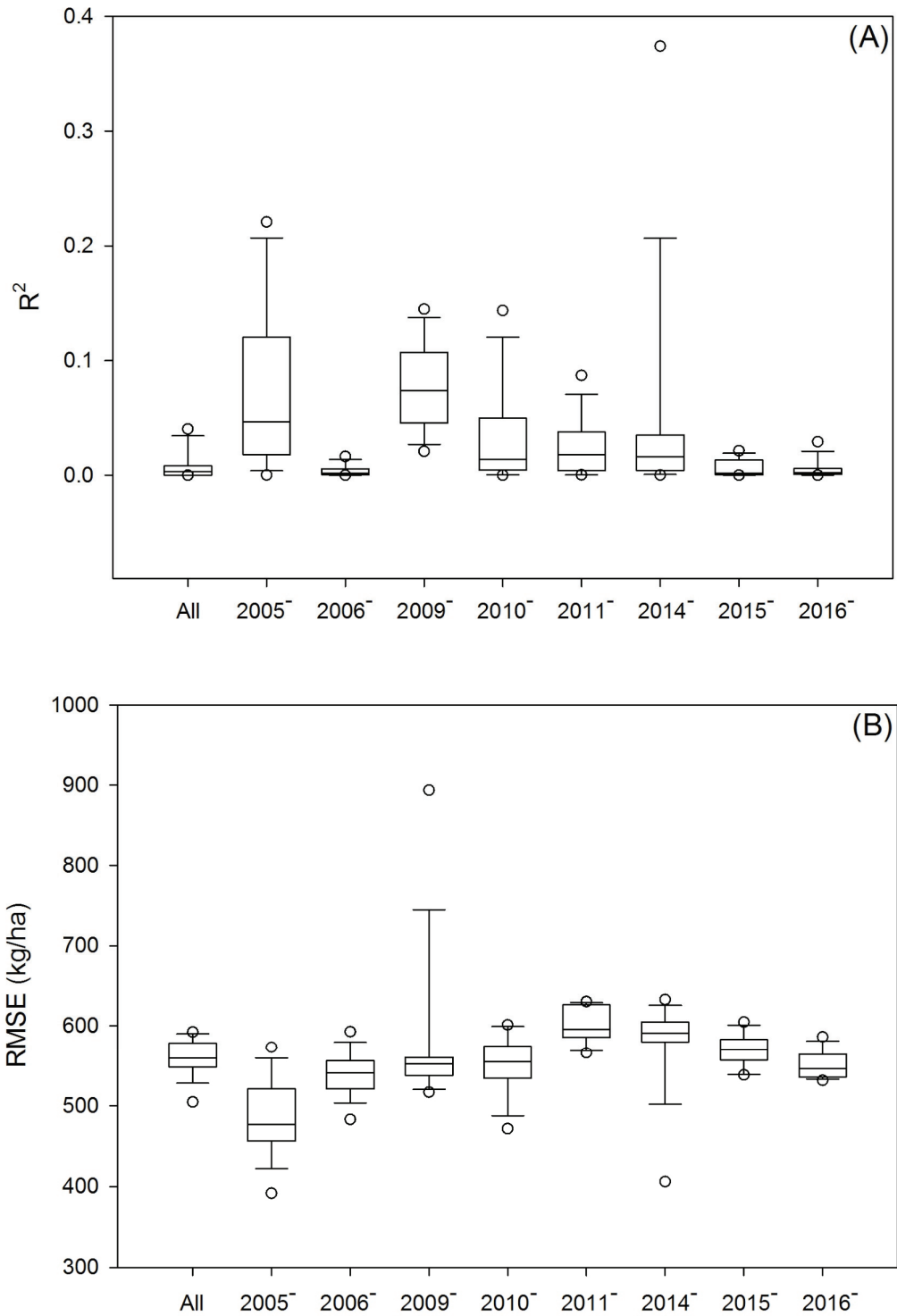


Fig. 2. The values of (A) the determinant coefficient and (B) root mean square error of yield estimates using ORYZA2000 model, respectively.

Table 4. The quantile values of the phenological development parameters calibrated with QUESO for ORYZA2000 model

Parameter	0%	50%	100%	Mean	SD ^a	CV ^b
TBD	6.025112	8.521905	11.94537	8.586955	1.171098	0.136381
TBLV	6.145639	7.264958	9.692451	7.489622	1.017737	0.135886
TMD	38.11202	40.6434	45.79769	40.97871	2.025607	0.049431
TOD	23.52653	24.8279	26.52901	24.91226	0.936578	0.037595
DVRJ	0.000442	0.001392	0.001965	0.001419	0.000282	0.198732
DVRI	0.001007	0.001291	0.004708	0.001614	0.000801	0.496283
DVRP	0.000683	0.00091	0.001169	0.000907	9.13E-05	0.100662
DVRR	0.000532	0.001692	0.001795	0.001598	0.000291	0.182103
MOPP	11.01379	12.7691	13.9981	12.66025	0.879536	0.069472
PPSE	0.129652	0.230116	0.492152	0.250229	0.092225	0.368562

^a SD indicates standard deviation^b CV indicates coefficient of variation**Table 5.** The quantile values of the growth parameters calibrated with QUESO for ORYZA2000 model

	0%	50%	100%	Mean	SD ^a	CV ^b
FSTR	0.168068	0.228865	0.289599	0.224213	0.043873	0.195676
WGRMX	3.11E-05	3.76E-05	4.00E-05	3.69E-05	2.77E-06	0.075068
FLVTB1	0.221552	0.65989	0.784961	0.605823	0.169229	0.279337
FLVTB2	0.487657	0.693369	0.796649	0.672935	0.118085	0.175478
FSTTB1	0.215039	0.34011	0.778448	0.394177	0.169229	0.429322
FSTTB2	0.203351	0.306631	0.512343	0.327065	0.118085	0.361044
FSTTB3	0.366218	0.535665	0.775486	0.56413	0.132107	0.234178
FSOTB	0.224514	0.464335	0.633782	0.43587	0.132107	0.303088
DRLVT1	0.001093	0.004358	0.009236	0.004523	0.00246	0.543887
DRLVT2	0.005084	0.014504	0.024301	0.013177	0.00715	0.542612
DRLVT3	0.017873	0.033597	0.043226	0.033586	0.00841	0.250402

^a SD indicates standard deviation^b CV indicates coefficient of variation

3.2. 수량 비교

수량의 경우 R^2 가 대부분 0.1 이하로, 모의 수량이 관측수량의 변이를 설명하기 어려운 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고, 이들 중 2009 자료의 경우 평균적인 R^2 가 상대적으로 높게 나타났으며, 2014 자료에서 가장 높은 R^2 값을 얻었다. 반면, RMSE는 2009 자료를 제외하면 모두 700 kg/ha 미만이었다. 2005 자료에서 다른년도를 제외하였을 경우보다 평균적으로 낮은 RMSE 값을 얻었다. 예를 들어, 2005 자료의 RMSE 최소값과 중간값은 각각 391.6 kg/ha와 476.9 kg/ha로

다른 자료들이 비해 가장 낮은 값이었다.

전체 자료 중에서 오차가 작았던 모수들은 추정된 모수들 중 극히 일부에 해당하였다. 예를 들어, 총 132 개의 모수 집합 중 15개의 모수 집합만이 500 kg/ha 이하의 RMSE가 얻어졌다. 이들은 2005, 2006, 2010, 2014 자료에서만 선정되었다. 수량과 관련된 모수들 역시 모수별로 서로 다른 변동성을 나타냈다 (Table 5). 또한, 같은 변수 내에서도 발육단계에 따라 서로 다른 변동성을 나타냈다. 예를 들어, FSTTB의 경우 발육단계에 따라 각각 43%, 36%, 23%로 비교적

큰 변이계수가 얻어졌다. 반면, WGRMX는 변이계수가 8%로 가장 작게 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구의 결과들에 따르면, 신품종 보고서의 결과만을 사용할 경우, 출수기를 정확하게 추정할 수 있는 모수 추정이 가능하다는 것을 암시한다. 일부 자료를 제외하고 추정된 모수를 사용하였을 때, 출수기의 RMSE가 대부분 3일 이내로 비교적 정확하게 추정되었다. 이러한 결과는 Kim *et al.*(2018)이 신품종보고서에 수록된 관측값을 활용하여 옥수수의 품종모수를 추정한 실험결과와 유사하였다. 출수기를 정확하게 예측할 수 있다면 효율적인 재배관리에 도움이 될 것이다. 예를 들어, 벼의 생산성은 출수기 전후의 기상조건에 크게 영향을 받기 때문에(Munakata, 1976), 생산성을 유지하기 위하여 파종기를 조절할 수 있을 것이며, 출수기를 기준으로 시비시기 결정에 도움을 줄 수 있을 것이다(Singh and Takahashi, 1962). 이들 모수에 대한 검증은 위해 신품종 보고서이외의 문헌으로부터 출수기 자료를 수집하여 추가적인 분석이 수행되어야 할 것이다.

Hyun *et al.*(2017)은 출수기의 추정오차는 실제 기상과 기상자료의 차이에서 발생할 수 있는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 전주와 진안의 경우 벼 생육 관측값이 얻어진 포장과 기상대 사이의 거리가 16km로 비교적 가까운 위치에 있었다. 그러나 전주의 경우 기상대가 시내에 위치해 있었으며, 특히 진안은 주변이 산으로 둘러 쌓여 있었기 때문에 기상조건에 비교적 큰 차이가 있었을 것으로 추정된다. 반면, 정읍에서는 포장과 기상대 사이의 거리가 10km 미만이었으며, 부안에서는 1km 미만으로 가까이 위치해 있었다. 따라서, 생육 관측지점을 대표할 수 있는 기상 관측자료를 사용하여 모수추정에 활용하여야 할 것으로 보인다. 예를 들어, 기상청에서 제공하고 있는 방재기상 관측소의 온도와 강수량 자료를 활용한다면 비교적 가까운 위치의 기상자료를 얻을 수 있을 것이다. 후속 연구에서는 기상관측소의 거리 별 또는 공간내삽이나 재분석으로 얻어진 기상 자료가 모수추정 신뢰도에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

2005 자료의 경우 다른 년도를 제외하였을 때보다 출수기 및 수량의 오차가 적었다. Park and Kim(2009)은 2005년에 집중호우 및 태풍으로 인하여 12.3만 ha

정도의 재배면적이 침수되어 남부지방에서 상당한 수량감소가 발생한 것으로 보고하였다. 특히, 정읍과 부안 지역의 경우 도복이 발생한 것으로 보고되어 있으며, 이 때문에 오차가 크게 나타난 것으로 추정된다. 이와 같은 자연재해로 인한 피해는 모델에서 고려할 수 없기 때문에 모의값이 과대추정되는 경향이 있었다. 이후 모수를 추정할 때에는 모델에서 고려할 수 없는 자료들은 제외하고 사용하는 것이 모수 추정의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

2005년과 같은 기상재해가 확연한 년도들을 제외하고 모수들을 추정하더라도, 수량의 오차가 비교적 큰 경향이 있었다. 특히, 수량 추정치의 결정계수가 상당히 낮아, 신뢰도 높은 모수들이 추정된 것으로 판단하기 어렵다. 이러한 결과는 작물이 자라는 중간 단계의 생육 관측자료를 사용하여 모수를 추정하지 못하였기 때문일 것이다. Soundharajan and Sudheer(2013)와 Li *et al.*(2011)은 각각 2년 동안의 시기별 생육 자료를 사용하여 ORYZA2000 모델의 품종모수를 추정하였다. 국내에서 재배되고 있는 품종들의 모수를 추정하기 위해 LAI나 건물중과 같은 생육 관측 자료들이 추가적으로 수집되어야 할 것이다. 이러한 생육자료들은 주로 파괴적인 방법으로 생육 자료들을 수집하고 있으나, 이를 위해, 상당한 노력과 비용이 소요된다. 자료 수집의 노력과 비용을 절감하기 위해 Lee and Kim(2018)이 제안한 것과 같은 영상을 활용한 비파괴적인 방식의 생육량 측정 기법을 도입하고 이들 자료의 모수 추정 활용도에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

Li *et al.*(2009)는 품종모수의 발육속도 및 동화산물의 분배 등 여러 모수들을 개별적으로 추정해야 하며, 나머지는 기본값을 사용해도 문제가 없다고 보고하였다. 그러나 이러한 기본값은 모델이나 연구에 따라 서로 다른 값을 보여준다. 예를 들어, 벼의 발육과 관련된 최고온도, 최적온도, 및 최저온도는 기본값으로 각각 42도, 30도, 8도 설정되어 있으나, DSSAT에서는 최적온도와 최저온도를 각각 33도와 9도로 설정되어 있다(Bouman *et al.*, 2001; van Oort *et al.*, 2011). 또한, Sánchez *et al.*(2014)은 자포니카 품종과 인디카품종에 따라 서로 다른 주요 온도를 보고하였다. 따라서, 본 연구에서 수행된 것과 같이 기본값이 사용되던 모수들 중에서도 품종에 특이적인 모수들을 파악하고 이들에 대한 추정이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서 사용한 ll_{param} 값은 출수기와 수량 외에

여러 변수들을 동시에 고려하였기 때문에 수량이나 출수기의 정확도를 완전히 대표하지는 못하였다. 예를 들어, 16번 반복 추정된 2005 자료 중 l_{param} 값이 두 번째 추정보다 (-258.166) 세 번째 추정에서 (-257.841) 더 높게 나타났으나, 수량과 출수기의 정확도에 있어서는 두 번째로 추정된 모수가 좀 더 좋은 결과를 나타냈다. 이는 l_{param} 값뿐만 아니라 개별 변수들에 대한 오차 분석이 필요하다는 것을 의미한다. 특히, 모수 선정에 유리한 통계량이 무엇인지에 대한 비교 분석이 필요할 것이다.

ORYZA2000 모델에서 제공되는 모수 추정 도구들을 사용할 때에는 신뢰성 높은 모수를 추정하는 것에 한계가 있을 것으로 보인다. ORYZA2000 모델에 포함되어 있는 DRATES나 PARAM과 같은 도구들은 실험결과별로 모수가 추정된다. 따라서, 동일한 품종이더라도 특정 시점, 재배지역 및 재배방법에 따라 상이한 모수값들이 추정될 수 있다(Lee, 2008). 본 연구에서도 개별 자료별로 모수가 추정되었을 때 상당히 낮은 오차가 얻어졌으나, 해당 모수들을 비교적 인접한 지역이나 동일한 장소에서 연차별로 수집된 자료를 사용하였을 때, 상당히 큰 오차가 발생하였다. 반면, 여러 조건에서 얻어진 자료들을 통합하여 모수를 추정하는 방식을 사용할 경우에는 비교적 신뢰성 높은 모수가 추정될 수 있다. 예를 들어, Kim *et al.*(2012)는 DSSAT 패키지 하부 모듈인 GenCalc를 사용하여 세 작물에 대한 모수를 추정하였다. Kim *et al.*(2018)은 DSSAT 패키지 내 품종모수 결정 프로그램인 GLUE를 사용하여 옥수수의 품종모수를 추정하였다. 따라서, ORYZA2000 모델에서 제공되는 DRATES 이외의 모수 추정 도구들을 사용하여 이들 사이의 장단점을 파악한다면, 벼 모수 추정에 유리할 것으로 보인다.

모수를 추정할 때에는 추정될 모수의 최대 및 최소값을 지정하는 것이 일반적이다. 예를 들어, Soundharajan and Sudheer(2013)은 ORYZA2000 모델의 일부 모수들에 대한 범위를 제시하였다. 그러나, 이러한 모수값의 범위가 필요이상으로 넓게 설정이 되면, 모수 추정에 상당한 시간이 소요될 수 있다. 또한, 모수의 범위가 너무 좁게 설정된 경우에는 적절한 모수 추정이 어렵게 된다. 본 연구에서는 신동진 품종의 출수기와 수량 추정치의 오차가 작았던 모수들의 범위를 제시하였다. 이러한 결과들은 앞으로 신동진과 유사한 품종의 품종모수를 추정하기 위해 모수의 범위를 설정할 때, 참고자료로 사용될 수 있을 것이다. 예를 들어,

TMD, MOPP, WGRMX 와 같은 기본적인 모수들은 추정범위를 작게 하고, DVRI와 FSTTB 와 같은 모수들은 범위를 확대한다면, 동일한 계산시간이 소요되었더라도, 보다 신뢰도 높은 모수가 추정될 수 있을 것이다.

벼와 같은 주요 식량작물들은 다양한 특성을 가진 품종들이 사용되어 왔으나, 개별 품종들에 대한 모수들은 보고되지 않는 경향이 있다. 예를 들어, 330종이 넘는 벼 품종이 국립종자원에 등록되어 있으며, 20종이 넘는 품종이 정부 보급종으로 공급되고 있다. 또한, 등록된 품종에는 식량용 벼와 달리 지상부 건물질을 증대시킨 사료용 품종(Ahn *et al.*, 2018) 등 다양한 특성을 가진 품종이 포함되어 있다. 그러나 대부분의 품종들에 대한 모수가 추정되어 있지 않기 때문에 각각의 품종 특성을 반영할 수 있는 모수를 추정하고, 이들의 신뢰도를 높이는 것이 후속연구에서 진전되어야 할 것이다.

적 요

작물 생육모델이 요구하는 다양한 모수들 중 품종의 유전적 특성을 나타내기 위한 품종모수는 개별 품종별로 추정되어야 한다. 모수 추정을 위해 상당한 비용과 노력이 요구되는 고품질의 상세한 생육자료를 사용하여 하나, 자료의 가용성이 대체로 낮기 때문에, 품질이 낮더라도 쉽게 얻을 수 있는 자료를 이용하여 품종모수를 추정하는 방식의 가능성과 문제점을 파악하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 신품종개발 공동 연구 보고서로부터 2005년부터 2016년까지 신동진 벼에 대한 자료들을 수집하고, 이를 사용하여 신동진 벼의 품종모수를 추정하였다. 또한, 추정된 모수를 사용한 생육모의 결과들을 활용하여 개별 항목에 대한 신뢰도를 평가하였다. 출수기에 대해서는 RMSE가 대부분 3일 이하로, 비교적 정확하게 모의할 수 있는 모수가 추정되었다. 수량에 대해서는 RMSE가 대부분 700 kg/ha 이하로 작게 나타났으나, 결정계수가 대부분 0.1 이하로 나타나, 신뢰도 높은 모수가 추정된 것으로 판단하기 어려웠다. 이러한 결과는 작물이 자라는 중간 단계의 생육 관측자료를 비교하지 못하였기 때문일 것으로 사료되었다. 따라서, 모수의 신뢰도를 높이기 위해 시기별 생육자료의 측정이 필요할 것이며, 이를 위한 시간과 비용을 절감하기 위한 기법이 개발되어야 할 것이다. 기상자료와 실제 기상과의 차

이로 인한 오차를 줄이기 위해서는 방재기상자료와 같은 가까운 기상자료를 사용하거나, 공간내삽 등의 방법을 활용하여야 할 것이다. 또한, 자연재해와 같이 모델에서 고려할 수 없는 요인으로 인해 영향을 받은 자료는 제외하는 것이 모수의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다. 본 연구에서 제시한 출수기와 수량 추정치의 오차가 작았던 모수들의 범위는 이후 연구에서 신동진과 유사한 품종의 모수를 추정할 때 참고자료로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ013452042019)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Ahn, E. K., Y. J. Won, H. M. Park, K. H. Jung, and U. J. Hyun, 2018: Feed value and yield potential of main whole-crop silage rice cultivars with harvesting time in the central plains of Korea. *Korean Journal of Crop Science* **63**(4), 294-303.
- Asseng, S., F. Ewert, P. Martre, R. P. Rötter, D. B. Lobell, D. Cammarano, B. A. Kimball, M. J. Ottman, G. W. Wall, J. W. White, M. P. Reynolds, P. D. Alderman, P. V. V. Prasad, P. K. Aggarwal, J. Anothai, B. Basso, C. Biernath, A. J. Challinor, G. De Sanctis, J. Doltra, E. Fereres, M. Garcia-Vila, S. Gayler, G. Hoogenboom, L. A. Hunt, R. C. Izaurralde, M. Jabloun, C. D. Jones, K. C. Kersebaum, A. K. Koehler, C. Müller, S. Naresh Kumar, C. Nendel, G. O'Leary, J. E. Olesen, T. Palosuo, E. Priesack, E. Eyshi Rezaei, A. C. Ruane, M. A. Semenov, I. Shcherbak, C. Stöckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, F. Tao, P. J. Thorburn, K. Waha, E. Wang, D. Wallach, J. Wolf, Z. Zhao, and Y. Zhu, 2014: Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* **5**(2), 143-147.
- Asseng, S., F. Ewert, C. Rosenzweig, J. W. Jones, J. L. Hatfield, A. C. Ruane, K. J. Boote, P. J. Thorburn, R. P. Rötter, D. Cammarano, N. Brisson, B. Basso, P. Martre, P. K. Aggarwal, C. Angulo, P. Bertuzzi, C. Biernath, A. J. Challinor, J. Doltra, S. Gayler, R. Goldberg, R. Grant, L. Heng, J. Hooker, L. A. Hunt, J. Ingwersen, R. C. Izaurralde, K. C. Kersebaum, C. Müller, S. Naresh Kumar, C. Nendel, G. O'Leary, J. E. Olesen, T. M. Osborne, T. Palosuo, E. Priesack, D. Ripoche, M. A. Semenov, I. Shcherbak, P. Steduto, C. Stöckle, P. Stratonovitch, T. Streck, I. Supit, F. Tao, M. Travasso, K. Waha, D. Wallach, J. W. White, J. R. Williams, and J. Wolf, 2013: Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* **3**(9), 827-832.
- Boote, K., C. Porter, J. Jones, P. Thorburn, K. Kersebaum, G. Hoogenboom, J. White, and J. Hatfield, 2016: Sentinel site data for model improvement-Definition and characterization. *Advances in Agricultural Systems Modeling* **7**, 125-158.
- Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. C. S. Wopereis, H. F. M. ten Berge, and H. H. van Laar, 2001: *ORYZA2000: modeling lowland rice*. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute, and Wageningen: Wageningen University and Research Centre, 235pp.
- Braman, K., T. A. Oliver, and V. Raman, 2013: Bayesian analysis of syngas chemistry models. *Combustion Theory and Modelling* **17**(5), 858-887.
- Cheung, S. H., T. A. Oliver, E. E. Prudencio, S. Prudhomme, and R. D. Moser, 2011: Bayesian uncertainty analysis with applications to turbulence modeling. *Reliability Engineering & System Safety* **96**(9), 1137-1149.
- Estacio-Hiroms, K. C., E. E. Prudencio, N. P. Malaya, M. Vohra, and D. McDougall, 2016: The QUESO Library, User's Manual. *arXiv preprint arXiv:1611.07521*.
- He, J., J. W. Jones, W. D. Graham, and M. D. Dukes, 2010: Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method. *Agricultural Systems* **103**(5), 256-264.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. C. Traore, and K. J. Boote, 2012: Experiments and data for model evaluation and application. *Improving Soil Fertility Recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*, 9-18.
- Hyun, S., and K. S. Kim, 2017: Estimation of heading date for rice cultivars using ORYZA (v3). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **19**(4), 246-251.
- Jones, J. W., J. He, K. J. Boote, P. Wilkens, C. H. Porter, and Z. Hu, 2011: Estimating DSSAT cropping system cultivar-specific parameters using Bayesian Techniques, *In: Ahuja, L. R. and L. Ma*

- (eds.) *Methods of Introducing System Models into Agricultural Research*. Madison, WI, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 365-394.
- Kersebaum, K. C., K. J. Boote, J. Jorgenson, C. Nendel, M. Bindi, C. Frühauf, T. Gaiser, G. Hoogenboom, C. Kollas, and J. E. Olesen, 2015: Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. *Environmental Modelling & Software* **72**, 402-417.
- 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 change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141.
- Kim, D. J., J. H. Roh, J. G. Kim, and J. I. Yun, 2013: The Influence of shifting planting date on cereal grains production under the projected climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(1), 26-39.
- Kim, J., C. K. Lee, H. Kim, B. W. Lee, and K. S. Kim, 2015a: Requirement analysis of a system to predict crop yield under climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(1), 1-14.
- Kim, J., W. Sang, P. Shin, H. Cho, and M. Seo, 2018: Calibration of crop growth model CERES-MAIZE with yield trial data. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(4), 277-283.
- Kim, J., W. Sang, P. Shin, H. Cho, M. Seo, B. Yoo, and K. S. Kim, 2015b: Evaluation of regional climate scenario data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. *Journal of Crop Science and Biotechnology* **18**(4), 257-264.
- Kim, K. Y., G. M. Lee, K. I. Noh, K. Y. Ha, J. Y. Son, B. K. Kim, J. K. Ko, and C. K. Kim, 2007: Varietal difference of germination, fat acidity, and lipoxygenase activity of rice grain stored at high temperature. *Korean Journal of Crop Science* **52**(1), 29-35.
- Lee, C., 2008: Development and application of model for estimating grain weight and grain nitrogen content in rice. Dissertation, Seoul National University.
- Lee, C. K., J. Kim, and K. S. Kim, 2015: Development and application of a weather data service client for preparation of weather input files to a crop model. *Computers and Electronics in Agriculture* **114**, 237-246.
- Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. H. Yang, Y. H. Yoon, K. J. Choi, and K. S. Kim, 2012: Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(4), 207-221.
- Lee, S., and K. S. Kim, 2018: Estimation of fresh weight for chinese cabbage using the Kinect sensor. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **20**(2), 205-213.
- Li, T., B. Bouman, and A. Boling, 2009: *The calibration and validation of ORYZA2000*. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute.
- Li, T., E. Humphreys, G. Gill, and S. Kukal, 2011: Evaluation and application of ORYZA2000 for irrigation scheduling of puddled transplanted rice in north west India. *Field Crops Research* **122**(2), 104-117.
- Lima, E., J. Oden, D. Hormuth, T. Yankeelov, and R. Almeida, 2016: Selection, calibration, and validation of models of tumor growth. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* **26**(12), 2341-2368.
- Maiorano, A., P. Martre, S. Asseng, F. Ewert, C. Müller, R. P. Rötter, A. C. Ruane, M. A. Semenov, D. Wallach, and E. Wang, 2017: Crop model improvement reduces the uncertainty of the response to temperature of multi-model ensembles. *Field crops research* **202**, 5-20.
- Munakata, K., 1976: Effects of temperature and light on the reproductive growth and ripening of rice. *Climate and Rice*, 187-210.
- Oden, J. T., E. A. Lima, R. C. Almeida, Y. Feng, M. N. Rylander, D. Fuentes, D. Faghihi, M. M. Rahman, M. DeWitt, and M. Gadde, 2016: Toward predictive multiscale modeling of vascular tumor growth. *Archives of Computational Methods in Engineering* **23**(4), 735-779.
- Park, J. S., and H. D. Kim, 2009: Viviparous germination characteristics of rice varieties adaptable to central region of Korea. *Korean Journal of Crop Science* **54**(3), 241-248.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fischer, 2004: Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change* **14**(1), 53-67.
- Prudencio, E. E., and K. W. Schulz, 2011: The parallel C++ statistical library 'QUESO': Quantification of uncertainty for estimation, simulation and

- optimization. *European Conference on Parallel Processing*, Springer, 398-407.
- Sánchez, B., A. Rasmussen, and J. R. Porter, 2014: Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global change biology* **20**(2), 408-417.
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131.
- Singh, J., and J. Takahashi, 1962: Effect of varying dates of top-dressing of nitrogen on plant characters leading to tendency to lodging in rice. *Soil Science and Plant Nutrition* **8**(5), 1-8.
- Song, Y., C. Lim, W. Lee, K. C. Eom, S. Choi, E. Lee, and E. Kim, 2014: Applicability analysis of major crop models on Korea for the adaptation to climate change. *Journal of Climate Change Research* **5**, 109-125.
- Soundharajan, B., and K. Sudheer, 2013: Sensitivity analysis and auto-calibration of ORYZA2000 using simulation-optimization framework. *Paddy and Water Environment* **11**(1-4), 59-71.
- Tans, P., and R. Keeling, 2018: *Trends in atmospheric carbon dioxide* [Online], NOAA/ ESRL, Available: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>
- Tao, F., 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**(2), 103-116.
- Unkovich, M., J. Baldock, and M. Forbes, 2010: Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: examples from Australian agriculture. *Advances in agronomy* **105**, Academic Press, 173-219.
- van Oort, P., T. Zhang, M. De Vries, A. Heinemann, and H. Meinke, 2011: Correlation between temperature and phenology prediction error in rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural and Forest Meteorology* **151**(12), 1545-1555.
- Wikarnpapraharn, C., and E. Kositsakulchai, 2010: Evaluation of ORYZA2000 and CERES-Rice models under potential growth condition in the Central Plain of Thailand. *Thai Journal of Agricultural Science* **43**(1), 17-29.
- Yoshida, S., 1981: *Fundamentals of rice crop science*, International Rice Research Institute,
- Yuan, S., S. Peng, and T. Li, 2017: Evaluation and application of the ORYZA rice model under different crop managements with high-yielding rice cultivars in central China. *Field Crops Research* **212**, 115-125.