

벼 작물생육모형 국내 도입 활용과 앞으로의 연구 방향

김준환* · 상완규 · 신평 · 백재경 · 조정일 · 서명철

농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과, 전라북도 완주군 이서면 혁신로 181
(2019년 9월 16일 접수; 2019년 9월 25일 수정; 2019년 9월 27일 수락)

History and Future Direction for the Development of Rice Growth Models in Korea

Junhwan Kim*, Wangyu Sang, Pyeong Shin, Jaekyeong Baek, Chongil Cho and Myungchul Seo

Division of Crop Physiology and Production, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, Hyoksin-ro 181, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do, Republic of Korea

(Received September 16, 2019; Revised September 25, 2019; Accepted September 27, 2019)

ABSTRACT

A process-oriented crop growth model can simulate the biophysical process of rice under diverse environmental and management conditions, which would make it more versatile than an empirical crop model. In the present study, we examined chronology and background of the development of the rice growth models in Korea, which would provide insights on the needs for improvement of the models. The rice crop growth models were introduced in Korea in the late 80s. Until 2000s, these crop models have been used to simulate the yield in a specific area in Korea. Since then, improvement of crop growth models has been made to take into account biological characteristics of rice growth and development in more detail. Still, the use of the crop growth models has been limited to the assessment of climate change impact on crop production. Efforts have been made to apply the crop growth model, e.g., the CERES-Rice model, to develop decision support system for crop management at a farm level. However, the decision support system based on a crop growth model was attractive to a small number of stakeholders most likely due to scarcity of on-site weather data and reliable parameter sets for cultivars grown in Korea. The wide use of the crop growth models would be facilitated by approaches to extend spatial availability of reliable weather data, which could be either measured on-site or estimates using spatial interpolation. New approaches for calibration of cultivar parameters for new cultivars would also help lower hurdles to crop growth models.

Key words: Process-oriented crop growth model, Site-specific weather data, Parameter calibration, Climate change, Decision support system

I. 서 론

기후변화에 따른 작물의 생산량 변동을 예측하거나 당해 년도의 작황을 예측하기 위해 기상요소 자료와

생산량 자료와의 관계식에 기반한 경험모형(empirical model)이 사용되어 왔다(한 등, 2011; Kim *et al.*, 2017a; Kim *et al.*, 2017b). 최근에 big data를 이용한



* Corresponding Author : Junhwan Kim
(sfumato@korea.kr)

data mining 기법들이 발달함에 따라 이러한 경험모형에 대한 활용도가 높아질 것으로 기대되고 있다(Jeong *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2019). 그러나 전통적인 통계적 경험모형이나 최근의 data mining 기법들은 black box 모형으로 기상의 변화에 따라 수량의 변화를 설명할 수 있지만, 작물 생리학적인 관점에서 이러한 결과가 얻어지는 과정을 파악하기 어렵다(Fig. 1). 따라서, 경험모형은 단순히 수량을 예측하기 위해서는 실용적이나, 특정 환경조건에서 작물들이 반응하는 경로와 이로 인한 생리학적적인 결과들을 알아내는 것에는 한계가 있다.

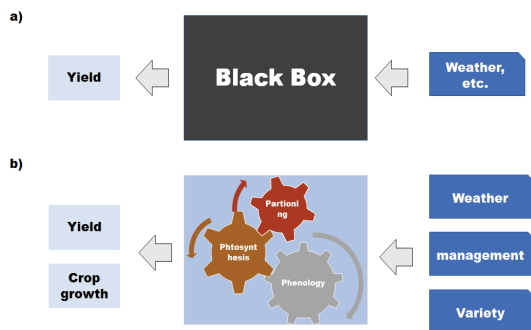


Fig. 1. Schematic diagram of an empirical model (a) and a process-oriented crop growth model(b).

농업분야에서는 다양한 환경조건에서 작물의 생산성을 예측하기 위해, 과정지향형 작물생육 모형(Process-oriented crop growth model)이 개발되어 사용되고 있다(Basso *et al.*, 2013; Joens *et al.*, 2017; Peart and Shoup, 2018). 특히, 과정지향형 작물 모형은 작물학적인 관점에서 수량이 형성되는 과정을 모의하고, 이를 통해 모형으로부터 얻어진 생산성 예측값에 대한 작물학적인 이해를 높여준다. 특히, 생육 과정 중에 발생한 문제점들을 생육 모의를 거쳐 파악하고, 이를 통해 재배적 개선점을 탐색할 수 있다. 따라서, 많은 비용이 소모되는 재배실험을 수행하지 않더라도 기후변화 적응 뿐만 아니라 여러 재배관리 방안 중 최적의 방안을 찾아낼 수 있다(Jame and Cutforth, 1996; Kim *et al.*, 2012). 또한, 이러한 문제점 파악 및 재배적 조치의 개선은 스마트팜에서 양분 및 관개량을 제어할 수 있는 알고리즘을 구축하기 위해 활용될 수 있다. 따라서, 작물생육모형은 농업 부분 4차 산업혁명의 중요한 기술 요소가 될 수 있을 것이다.

국내에서는 과정지향형 작물 생육 모형 개발을 위한 사례가 적을 뿐만 아니라(Kim *et al.*, 2017c; Moon *et al.*, 2018), 이러한 작물 모형에 대한 이해가 넓지 않다. Lee *et al.*(2010)은 벼의 생육을 모의할 수 있는 모형을 개선한 결과들을 보고하였으나, 이러한 연구 결과는 소수에 불과하다. 또한, 국내에서 기후변화 연구들을 제외하고, 벼 이외의 다양한 식량 및 채소작물들을 대상으로 생산성을 예측하기 위해 과정지향형 작물모형을 활용한 사례들은 찾아 보기 어렵다(Kim *et al.*, 2018b).

본 논문에서는 작물모형에 대한 이해도와 활용도를 넓히기 위해, 국내 벼 작물 생육모형의 도입 및 개발사를 돌아보고 앞으로 연구 방향에 논의해 보고자 한다. 특히, 해외에서 개발되어 온 작물 모형을 국내에 도입하여 활용된 사례와 이러한 연구 결과들을 기반으로 작물 모형을 개선하기 위한 노력들에 대한 조명을 하고자 하였다. 또한, 앞으로 스마트팜 관련 기술들의 폭넓은 도입을 위해 작물 모형들의 개발 및 활용에 요구되는 사항들을 제시하고자 하였다.

II. 네덜란드 개발 생육모형 도입

국내 벼 작물생육모형 연구에서 확인할 수 있는 가장 빠른 연구는 80년대 후반부터 시작되었다. 작물시험장(1989, 1990)에서는 벼 생육 및 수량진단 모형 개발 연구과제에서 이앙기 및 지대 변화에 따른 출수기와 건물생산성 변동을 예측하기 위해 작물모형을 개발하였다. 이후 작물시험장(1991)에서는 동일한 연구과제에서 국제미작연구소(IRRI, International Rice Research Institute)와 국제 공동연구를 통해 MACROS (Modules of an Annual CROp Simulator, Penning de Vries *et al.*, 1988)모형을 도입하였다. 이 기간 동안에는 기존에 수집된 자료를 작물모형에 적용하기 위해, 국내 품종에 대한 모수의 적합도과 예측 정확성을 평가하고 과정 지향형 모형의 구조에 대해 연구가 시작되었다. Yun (1990)은 MACROS를 이용하여 대기중 이산화탄소 배증 조건하에서 기후시나리오에 따른 국내 쌀 생산량을 전망하였다. 특히, 이는 과정 지향형 작물 모형이 국내에 도입된 이후 최초로 실질적인 연구에 적용된 사례로 여겨질 수 있다.

1990년대에는 벼 전용 작물생육모형인 Oryza1 (Kropff *et al.*, 1995)모형을 사용한 연구들이 시작되었다. MACROS와 Oryza1모형은 네덜란드에서 유래

Table 1. Phenological and growth parameters of the Oryza2000 model

Phenological development parameters	Parameters for growth
-Base temperature for development	-Table of specific leaf area
-Base temperature for juvenile leaf area growth	
-Maximum temperature for development	-Table of N fraction in leaves on leaf area basis
-Optimum temperature for development	
-Development rate in juvenile phase	-Table of fraction total dry matter partitioned to the shoot, leaves, root, panicle
-Development rate in photoperiod-sensitive phase	
-Development rate in panicle development	
-Development rate in reproductive phase	- Nitrogen parameters
-Maximum optimum photoperiod	
-Photoperiod sensitivity	
-Transplanting shock	

된 School of De Wit 계열의 모형이기 때문에(Bouman *et al.*, 1996; Kropff *et al.*, 1995), 작물 모형의 접근 방식이 유사하다. 따라서, 국내에서도 MACROS 모형을 사용하던 경험을 통해 모형 구동을 위한 국내 품종의 모수 생성 및 구동 조건에 관련한 연구가 진행되었다. 예를 들어, Shin and Lee (1995)은 Oryza1 모형을 사용하여 아시아 지역의 기후변화에 따른 영향평가를 위한 국제 공동연구에 참여하였다.

2000년대에 들어, Oryza1모형을 기반으로 수분 부족 또는 질소 부족 조건을 모의할 수 있는 Oryza2000 모형이 Bouman *et al.*(2001) 에 의해 개발되었고, 국내에서도 이를 도입하여 기후변화 영향 평가에 활용되었다. 예를 들어, 기후변화 시나리오와 해상도에 따른 벼의 수량 영향평가를 위해 Oryza2000 모형이 사용되었다(Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2015). 이 시기는 국내 주요 생태형에 대한 품종 모수가 완성되고 모형 자체의 문제점을 파악하여 개선해 나가는 단계였다. Oryza2000 모형은 품종모수가 대단히 복잡하다(Table 1). 따라서, 모수의 정확한 calibration을 위해서는 별도의 포장 실험이 요구되며, 관측자료의 요구도가 높아 자료 수집에 상당한 노력이 요구된다.

Oryza2000 모형을 사용한 연구들은 주로 기후변화 영향평가와 관련한 것들이 대부분이었으나, 국내 품종에 대한 모수 탐색, 지역별 최적 파종기 또는 이앙기 결정을 위한 방법론 등 모형을 활용하여 실질적인 적응대책을 수립할 수 있는 기술이 확보되었다(Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2015). 또한, 임실물(Nguyen *et al.*, 2014), 면적당 영화수(Park *et al.*, 2002; 이변우, 2002) 등 Oryza2000 모형에 부족한 모듈들을 추가 개발하여 정확도를 높일 수 있었다. 국내에서 개선된 Oryza2000 모형을 활용하여 실제 국내 벼 작황예측에 활용하는 단계에 이르렀으며 현재 국립식량과학원에서는 경험적 모형과 함께 작물생육모형을 활용 중이다(Kim *et al.*, 2017a).

III. 복미 개발의 벼 작물생육 모형 도입과 활용

국내 벼생육 모형의 도입의 다른 큰 축은 DSSAT의 CERES모형이다. Cho and Yun (1999)과 Yun (2003)은 CERES-RICE (Godwin *et al.*, 1992) 모형을 도입하여 실제 작황예측에 적용하기 위해 전국을 168개의

Table 2. Genetic coefficient of the CERES-RICE model

P1	P2O	P2R	P5	G1	G2	G3	G4
Basic vegetative phase	Critical photoperiod or the longest day length	Panicle initiation is delayed for each hour increase in photoperiod above P2O.	Beginning of grain filling to physiological maturity	Potential spikelet number coefficient	Single grain weight (g) under ideal growing conditions	Tillering coefficient) relative to IR64 cultivar under ideal conditions	Temperature tolerance coefficient

재배단위로 구분하여 생산성을 예측하였다. CERES-RICE 모형은 품종 모수의 수가 비교적 적어 calibration이 상대적으로 용이한 편이고(Table 2) 또한 DSSAT 내에 자체 calibration 프로그램이 제공되어 널리 활용되고 있다.

이 때문에 국내에서도 많이 활용되고 있으며 주로 기후변화 연구에 활용되고 있다(Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013). CERES-RICE 모형을 국내 환경에 맞추어 개선하기 위한 연구가 진행되어 CERES-JAPONICA (농촌진흥청, 2002) 모형이 개발되었다. 이 개선된 모형은 기존의 CERES-RICE 모형에 엽수 추정 모형(Lee *et al.*, 2001)과 광이용 효율 모형(Bum *et al.*, 2006), 면적당 영화수(Park *et al.*, 2002; 이변우, 2002)의 내용이 추가된 것이다. 이 모형은 농가에 실질적인 적용을 목표로 하였으며 농가에 시비 처방 등 영농정보를 제공하기 위한 시스템의 일부로서 개발된 것이다. 따라서 향후 노지 스마트팜 연구를 위해서 선행 연구로서 검토할 가치가 있을 것으로 사료된다. Chung *et al.*(2006)은 CERES-JAPONICA 모형을 이용하여 국내 벼 생산량의 기후변화 영향평가를 수행하였다.

IV. 기타 벼 생육모형

이 밖에 농업기술연구소(1989)에서는 벼군락내 미세기상환경과 물질생산 모형 연구를 통해 기상조건에 따른 벼의 생육반응에 대한 모형 개발을 시도하였다. 그러나, 그 이후 독립적인 벼 생육모형의 개발은 이루어지지 않는 않았다. 벼 모형 중 일본의 Horie (1993)에

의해 개발된 SIMRIW (Simulation Model for Rice Weather relation)의 도입이 시도되었고 인공호수 생성에 따른 농경지 잠재생산성 영향평가에 사용하였다(Lim *et al.*, 1997). 그러나, 국내에서는 SIMRIW와 관련된 지속적인 연구가 이루어지지 못하였다.

V. 벼 작물생육모형의 활용과 확장

앞서 살펴본 바와 같이 대부분의 작물생육모형의 활용은 기후변화 영향평가에 등으로 국한되어 있다(Table 3).

이를 다양한 농업 분야에서 실용적으로 활용하기 위해서는 여러 장애 요소가 존재하며, 이러한 요소가 극복될 경우, 작물모형의 폭넓은 활용이 기대된다. Oryza2000 모형의 경우 도입에서 작황예측 활용까지 20년 가까운 노력이 필요하였다. 이러한 노력에는 앞서 설명한 바와 같이 단순한 품종모수의 calibration에서부터 추가되거나 개선되어야 할 모듈들의 개발이 필요하다. 그러나 모형의 개선이 이루어진다 하더라도 곧바로 실제 작황 예측에 활용되거나 스마트팜에 적용되기 어렵다. 이러한 문제점을 실제 작황 예측 사례를 통해 검토하고, 이에 대한 해결책이 제시되어야 한다.

벼 작물 생육 모형을 이용한 작황 예측은 기본적으로 우리나라의 주요 생태형인 조생종, 중생종, 중만생종에 대한 품종 모수를 결정하는 것이 우선적이다. 문제는 농가 단위의 모의를 하는 경우 각 개별 품종에 대한 품종모수가 없다는 것이다. 이는 작황 예측뿐만 아니라 추후 스마트팜에 적용할 때에도 문제가 될 수 있다. 그러나 품종 모수의 추정은 상당한 노력을 요구

Table 3. Application of rice crop growth models in South Korea

Application	Model	Researcher
Performance test	MACROS	NICS(1991)
Climate change	MACROS Oryza1 Oryza2000 CERES-RICE CERES-JAPONICA	Yun(1990) Shin and Lee (1995) Lee <i>et al</i> (2011), Kim <i>et al.</i> , (2015) Cho and Yun(1999), Yun(2003) Kim <i>et al</i> (2012), Kim <i>et al</i> (2013) Chung <i>et al</i> (2006)
Yield Forecast	Oryza2000	Kim <i>et al.</i> (2017)
Decision support for farmers	CERES-JAPONICA	RDA(2002)

하는 일이다. 품종이 나오기 전에 지역적응시험자료 등을 통하여 모수를 추정할 수도 있다(Hyun and Kim, 2019). 그러나 수집된 재배지역이 충분히 다양하지 않을 경우에는 편의된 결과를 얻을 수도 있다. 이 때문에 서 향후 연구해야 할 문제들은 동일 생태형 내에서 동일한 범주의 품종을 판별하여 집단화 해야 할 필요가 있다. 현재 작물모형을 표현형에 활용하려는 시도가 있다(Dingkuhn *et al.*, 2017). 따라서 유전적 특성을 작물모형의 표현형과 연결시킬 수 있다면 이러한 품종별 집단화가 가능할 것으로 보인다. 특히, High Throughput Phenotyping 이 확산되고 있다는 점을 고려할 때, 국내에서도 이러한 시도가 필요하다. 따라서, 작물모형의 장기적인 연구방향은 품종모수를 정량적 표현형 자료로 활용할 수 있게 유전육종분야와의 융합이 필요하다. 장기적인 측면이 아닌 현재의 실용적인 방법을 제시하면 Fig. 2와 같은 방법을 제시할 수 있다.

신품종의 경우 우선 calibration을 할 수 있는 충분한 자료가 존재한다면 정확한 품종 모수를 얻어 내고 그렇지 않더라도 저품질 자료로 품종모수를 얻어 모의한 후 주어진 지역의 표준품종(example variety)의 품종 모수를 이용하여 동일한 모의를 한 후 각각의 값을 사용자에게 제시하는 것이다. 이 경우 표준 품종에 대한 품종모수 DB가 필요하지만 지역별로 이들 품종수

는 한정되어 있다(농촌진흥청, 2016). 이 표준 품종은 지역별로 1~2개 품종으로 제한적으로 충분히 구축할 수 있을 것으로 보인다. 각 지역의 표준품종은 농가 등 사용자에게 익숙한 품종이기 때문에 이 품종의 모의 결과와 신규품종의 모의 결과를 제시하여 신품종의 모의결과에 대한 신뢰성을 판단할 수 있는 근거로 삼을 수 있다. 이 판단체계 구축을 위해 지역별 표준품종을 선정하고 이를 DB화 하는 연구가 필요하다.

재배관련 가장 중요한 요소인 파종기 또는 이앙기를 결정하는 것은 작물모형의 활용도를 높이기 위해 시급히 해결해야 할 문제이다. 특히, 작황예측 뿐만 아니라 스마트팜 기술이 적용되더라도 최적 이앙시기를 제공하기 위한 방법이 필요하다. 이를 위해, 지역별 최적 파종기 조건은 등숙기 온도를 기준으로 하거나 최대 생산량이 발생하는 시점을 기준으로 결정할 수 있다(Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2015). 따라서 이부분에서 비교적 큰 문제없이 결정할 수 있다.

거시적인 측면에서 문제가 되는 것은 2가지인데 하나는 기상관측소와 모의하고자 하는 지점간의 거리 문제 그리고 각 지역별 토양비옥도 문제이다. 기상관측소와 거리가 멀어질수록 또는 강이나 산과 같이 지형적 특징이 변화될 경우 예측의 오차가 발생하기 마련이다(Kim *et al.*, 2018a; Hyun and Kim, 2017). 따라

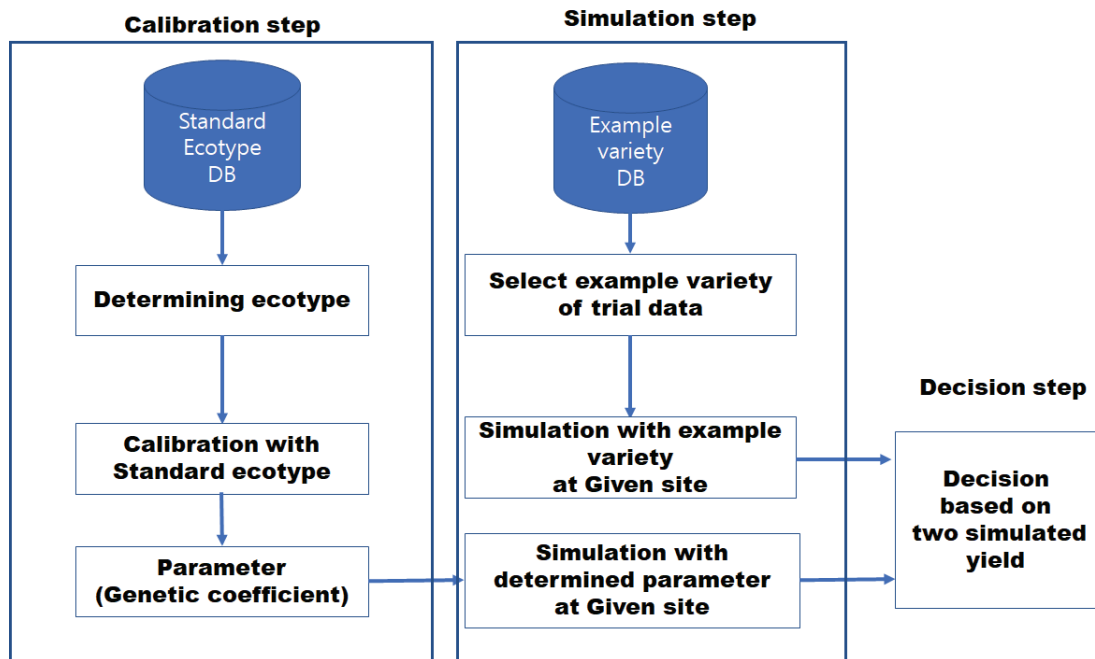


Fig. 2. Schematic processes of decision support at a farm level using crop growth models.

서, Kim *et al.*(2018a)은 4 km 이내에 기상관측 지점이 필요하다고 제시하였는데 이는 현실적으로 불가능하다. 농가수준에서 자체 기상관측장치를 설치할 수 있는 경우 큰 문제가 없지만 그렇지 못한 경우에는 결국 공공기관의 기상관측자료를 사용해야한다. 따라서, 농장 수준에서 신뢰도 높은 기상자료를 제공하기 위한 연구가 진행되어야 한다. 이는 작물 분야와 기상 분야에서의 협업이 필요한 것으로 농림기상분야에서 계속되고 있는 전자기후도의 발전과 함께, 고해상도 기상자료를 사용할 때 발생할 수 있는 작물모형의 불확도를 평가하고 낮추기 위한 연구가 필요하다.

작물모형의 모수로 사용되는 토양 비옥도 역시 단기적으로 해결하기 어려운 문제이다. Oryza2000과 CERES-RICE 모형별로 비옥도를 모수를 사용하여 임의로 조절할 수 있다. 예를 들어, Oryza2000 모형의 경우 SOILSP (Indigenous soil N-supply rate, kg N/ha/d)를 사용하여 토양 비옥도를 조절할 수 있다. CERES 모형에서도 토양모수 중의 하나인 SLPF (Soil fertility factor)를 이용하여 토양비옥도를 조절할 수 있다. 따라서, 새로운 지역에서 정확한 모형 예측값을 얻기 위해, 토양 비옥도 관련 요소를 조절하기 위한 다년간의 예비 시험 자료가 필요하다. 토양 비옥도와 관련한 요소는 작황예측보다는 실제로 농가 수준에서 스마트팜을 운영할 때 문제가 될 수 있기 때문에 토양모수의 추정을 위한 연구 또는 토양의 양분과 수분관련 연구가 더 진행될 필요가 있다. 이 경우 군락내의 수분 이동과 연관되어 질 수 있기 때문에 군락 광합성 및 증산에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다. 지금까지는 작물모형을 활용한 기후변화 영향평가가 주로 되어 토양특성에 대한 고려가 낮았지만 토양 특성에 따라 동일 기상조건에서도 수량반응이 차이가 발생할 만큼 중요한 요인이 될 수 있기 때문에 지속적인 연구가 필요하다(Sang *et al.*, 2017).

VI. 결 론

작물생육모형이 국내에 도입된 이후 30년 가까운 시간이 지났지만 아직까지는 벼 작물생육모형의 활용은 기후변화 영향평가를 위한 것이 대부분이다. 이는 작물모형을 실용적으로 활용할 때 발생할 수 있는 주요한 오차 원인들을 극복하지 못했기 때문이다. 최근 농업부분에서도 4차 산업혁명 기술의 도입과 함께 자동화 및 지능화가 절실한 상황인 만큼 농업 이외의

분야와의 협업을 통해 이러한 문제점들을 극복하는 것이 시급하다. 또한, 작물모형을 활용하는 것을 어렵게 하는 장애요인들을 제거하기 위한 연구들을 확대하여 작물모형이 확산될 수 있도록 노력하여야 할 것이다.

적 요

작물 생육모형은 기존의 경험적 작물모형과는 달리 벼의 생장과정을 모의 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 작물생육 모형들은 80년대 후반부터 적극적으로 국내 도입이 이루어 졌다. 유럽에서 개발된 MACROS로 부터 시작하여 이후 Oryza1 및 Oryza2000 모형과 북미에서 개발된 DSSAT 계열의 모형인 CERES-RICE 모형을 도입하게 되었다. 각각의 모형들은 최초에는 단순히 품종수 적합 후 특정지역에의 수량을 모의하는데 활용되었으나 2000년대에 이르러서는 국내에 적합한 작물모형으로 발전시킬 수 있는 단계에 이르게 되었다. 그러나, 작물생육모형을 기후변화 영향평가를 위한 용도로 주로 사용하였고 실용적인 수준에서의 활용은 미미하였다. 일부 농가 적용을 위한 시도가 있었으나 널리 활용되지는 못하였다. 이러한 활용상의 문제점은 기상자료의 공간해상도가 문제가 가장 크며, 그 다음으로는 각 지역별이 품종에 대한 품종모수 자료가 부족하기 때문이다. 이러한 활용상의 문제점을 극복하기 위해서는 기상관측의 공간해상력을 높이기 위한 관측소의 확대 또는 공간 내삽법이 필요할 것으로 생각된다. 또한 신품종이 일정 재배면적 이상 확대될 경우에 대해 품종모수를 적합할 제도적 기술적 방법이 필요하다. 작물모형의 활용 확대를 위해서는 기상 또는 토양 분야와도 연결이 필요하다. 이를 위해서는 군락의 증산 속도와 토양모형에 정보가 필요하며 이는 군락 광합성 관련 부분과 토양 특성에 대해서 새로운 접근이 필요함을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 농업공동연구(Project No. PJ014498012019)의 지원아래 이루어졌음.

REFERENCES

- 농업기술연구소, 1989: 벼군락내 미세기상환경과 물질생산 모형 연구. 81-96.

- 농촌진흥청, 2002: 벼농사 정밀 재배관리 전문가 시스템 개발.
- 농촌진흥청, 2016: 2015년도 하계작물 신품종개발 공동연구 보고서.
- 작물시험장, 1989: 벼 생육 및 수량 진단 모형 개발. 596-605, 818-823, 860-861.
- 작물시험장, 1990: 벼 생육 및 수량 진단 모형 개발. 540-550.
- 작물시험장, 1991: 벼 생육 및 수량 진단 모형 개발 746-747.
- 한석호, 이병훈, 박미성, 승준호, 양현석, 시성철, 2011: 기상요인을 고려한 단순예측 모형 개발 연구, 정책연구보고서 P152, 한국농촌경제연구원.
- Basso, B., D. Cammarano, and E. Carfagna, 2013: Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. In *Proceedings of the first meeting of the scientific advisory committee of the global strategy to improve agricultural and rural statistics*, FAO Headquarters, Rome, Italy, 18-19.
- Bouman, B. M., H. van Keulen, H. H. van Laar, and R. Rabbinge 1996: The 'School of de Wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* **52**, 171-198.
- Bouman, B. M. J. Kropff, T. P. Tung, M. Woperesis, H. ten Berge, and H. H. van Laar, 2001: *Oryza2000: Modeling lowland rice*. IRRI, Manila, Philippines.
- Cho, K. S., and J. Yun, 1999: Regional crop evaluation and yield forecast of paddy rice based on daily weather observation. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **1**(1), 12-19.
- Chung, U., K. S. Cho, and B. Lee, 2006: Evaluation of site-specific potential for rice production in Korea under the changing climate. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **8**(4), 229-241.
- Dingkuhn, M., 2017: Crop-model assisted phenomics and genome-wide association study for climate adaptation of *indica* rice. 2. Thermal stress and spikelet sterility. *Journal of Experimental Botany* **68**(15), 4389-4406.
- Godwin, D., U. Singh, J. T. Ritchie, and E. C. Alcocija, 1992: *A user guide to CERES-RICE*, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, AL, USA.
- Horie, T., 1993: Predicting the effects of climatic variation and elevated CO₂ on rice yield in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **48**(5), 567-574.
- Hyun, S., and K. S. Kim, 2017: Estimating of heading date for rice cultivars using *Oryza*(V3). *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **19**, 246-251.
- Hyun, S., and K. S. Kim, 2019: Calibration of cultivar parameters for cv. Shindongjin for a rice growth model using the observation data in a low quality. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **21**, 42-54.
- Jame, Y. W., and H. W. Cutforth, 1996: Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science* **76**, 9-19.
- Jeong, H., C. Kim, and D. Moon, 2013: Impact of abnormal weather factors on rice production. *Climate Change Research* **4**, 317-330.
- Jeong, J. H., J. P. Resop, N. D. Mueller, D. H. Fleisher, K. Yun, E. E. Butler, D. J. Timlin, K. M. Shim, J. S. Gerber, V. R. Reddy, and S. H. Kim, 2016: Random forests for global and regional crop yield predictions. *PLoS One* **11**(6):e0156571. doi:10.1371/journal.pone.0156571.
- Jones, J. W., J. M. Antle, B. Basso, K. J. Boote, R. T. Conant, I. Foster, H. C. J. Godfray, M. Herrero, R. E. Howitt, S. Janssen, B. A. Keating, R. I. Munoz-Carpena, C. H. Porter, C. Rosenzweig, T. R. Wheeler, 2017: Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* **155**, 240-254.
- Kim, D., S. Kim, K. Moon, and J. I. Yun, 2012: An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP 8.5 climate condition. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141.
- Kim, H., J. Ko, S. Kang, and J. Tenhunen, 2013: Impact of climate change on paddy rice yield in a temperate climate. *Global Change Biology* **19**, 548-562.
- Kim, J., W. Sang, H. Shin, H. Cho, M. Seo, B. Yoo, and K. Kim, 2015: Evaluation of regional climate scenario data for impact assessment of climate change on rice productivity in Korea. *Journal of Crop Science and Biotechnology* **18**, 257-264.
- Kim, J., C. K. Lee, W. Sang, H. Shin, H. Cho, and M. Seo, 2017a: Introduction to empirical approach to estimate rice yield and comparison with remote sensing approach. *Korean Journal of Remote Sensing* **33**, 737- 740.
- Kim, J., W. Sang, H. Shin, H. Cho, and M. Seo, 2017b: A meteorological analysis on high rice yield in 2015 in South Korea. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **19**, 54-61.

- Kim, S. K., H. J. Lee, H. S. Lee, B. Mun, and S. G. Lee, 2017c: Effect of soil water content on growth, photosynthetic rate, and stomatal conductance of Kimchi Cabbage at the early growth stage after Transplanting. *Protected Horticulture and Plant Factory* **26**, 151-157.
- Kim, J., W. Sang, H. Shin, H. Cho, and M. Seo, 2018a: Calibration of crop growth model CERES-MAIZE with yield trial data. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **20**, 227-283.
- Kim, K. S., S.-O. Kim, J. H. Kim, K. H. Moon, J. H. Shin, and J. Cho, 2018b: Development and application of crop models in Korea. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **20**, 145-148.
- Kim, J., J. Lee, W. Sang, H. Shin, H. Cho, and M. Seo, 2019: Rice yield prediction in South Korea by using random forest. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **21**, 75-84.
- Kropff, M. J., H. H. van Laar, and R. B. Matthews, 1995: The Oryzal model for potential production of rice.
- Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. Yang, Y. Yoon, K. Choi, and K. Kim, 2012: Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **14**, 207-221.
- Lee, C. K., K. S. Kwak, J. H. Kim, J. H. Shon, and W. H. Yang, 2011: Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and growing temperature in different rice maturity types. *Korean Journal of Crop Science* **56**, 223-243.
- Lim, J. T., J. I. Yun, and B. S. Kwon, 1997: Change in potential productivity of rice around lake Juam due to construction of dam by SIMRIW. *Korean Journal of Crop Science* **46**(2), 729-738.
- Moon, K. H., E. Y. Song, S. H. Wi, and S. Oh, 2018: Development of a Chinese cabbage model using Microsoft Excel/VBA. *Korean Journal of Agriculture and Forest Meteorology* **20**, 228-232.
- Nguyen, D., K. Lee, D. Kim, N. T. Anh, and B. Lee, 2014: Modeling and validation of high-temperature induced spikelets sterility in rice. *Field crop research* **156**, 293-302.
- Penning de Vries, F. W. T., D. M. Jansen, H. H. M. ten Berge, and A. H. Bakema, 1988: *Simulation of ecophysiological processes in growth of several annual crops*. The international Rice Research Institute.
- Park, D., R. Cui, and B. Lee, 2002: Relationship of spikelets number with nitrogen content, biomass and nonstructural carbohydrate accumulation during reproductive stage of rice. *Korean Journal of Crop Science* **47**, 486-491.
- Peart, R. M., and W. D. Shoup, 2018: *Agricultural Systems Modeling and Simulation*. CRC press.
- Sang, W., J. Kim, P. Shin, H. Cho, M. C Seo, and G. Lee, 2017: A study on grain yield response and limitations of CERES-Barley model according to soil types. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* **50**, 509-519.
- Shin, J. C., and M. H. Lee, 1995: Rice production in South Korea under current and future climates. *Modeling the impact of climate change on rice production in ASIA*. Cab international, UK, 199-214.
- Yun, J., 1990: Analysis of the climatic impact on Korean rice production under the carbon dioxide scenario, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **26**(4), 263-742.
- Yun, J., 2003: Prediction regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems* **77**, 23-38.