

## 국내 작물모형의 개발 및 활용

김광수<sup>1,2\*</sup> · 김수옥<sup>3</sup> · 김준환<sup>4</sup> · 문경환<sup>5</sup> · 신재훈<sup>6</sup> · 조재일<sup>7</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 식물생산과학부, <sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학연구원, <sup>3</sup>국가농림기상센터,  
<sup>4</sup>농촌진흥청 국립식량과학원 작물재배생리과, <sup>5</sup>농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구소,  
<sup>6</sup>농촌진흥청 국립농업과학원, <sup>7</sup>전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학전공  
(2018년 6월 26일 접수; 2018년 6월 27일 수정; 2018년 6월 27일 수락)

## Development and application of crop models in Korea

Kwang Soo Kim<sup>1,2\*</sup>, Soo-Ock Kim<sup>3</sup>, Jun Hwan Kim<sup>4</sup>,  
Kyung Hwan Moon<sup>5</sup>, Jae Hoon Shin<sup>6</sup> and Jaeil Cho<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Korea.

<sup>2</sup>Research Institute Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>3</sup>National Center for Agro-Meteorology, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>4</sup>Crop Physiology and Production, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration,  
Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

<sup>5</sup>Research Institute of Climate Change and Agriculture, National Institute of Horticultural and Herbal  
Science, Rural Development Administration, Jeju, 63607, Korea,

<sup>6</sup>National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju-gun,  
Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

<sup>7</sup>Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro,  
Gwangju 61186, Republic of Korea

(Received June 26, 2018; Revised June 27, 2018; Accepted June 27, 2018)

기후변화와 이상기상에 대응하기 위해 주어진 기상조건에서 작물의 반응을 모의할 수 있는 작물모형이 활용되어 왔다(Peng *et al.*, 2004; Lobell *et al.*, 2008; Rosenzweig *et al.*, 2013). 기후변화시나리오에 따르면 미래에는 대기 중 이산화탄소의 농도가 증가하고 이로 인한 기온변화가 발생한다고 예상되며, 이러한 조건의 실험포장을 갖추기는 쉽지 않은 일이다. 따라서 외국에서는 작물 모형을 사용하여 대기중 이산화탄소 농도의 증가와 이에 따르는 온도변화로 인한 작물 생산성의 변화를 사전에 파악하고 이러한 조건에서 피해를 최소화하거나 생산성을 확대시킬 수 있는 재배 관리 방안을 모색하려는 노력이 진행되어 왔다. 국내에서도 작물모형에 대한 관심이 높아지고 있으나(Kim *et al.*, 2015a), 아직까지도 국내의 작물모

형 개발 및 활용은 아직 초보적인 단계에 머무르고 있다. 물론, 벼와 같은 주요작물을 대상으로 기존 모형을 개선하기 위한 노력들은 오랜 기간 동안 진행되어 왔다(Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012). 그러나, 그 이외의 상당수 작물에 대해서는 아직까지 작물모형 활용조차 미비한 실정이다.

국내에서 재배되는 주요 작물에 알맞은 작물모형을 개발하기 위해 다양한 분야에서의 협력이 필요하다(Kim *et al.*, 2015b). 우선, 기존의 작물 생육관련 연구 결과로부터 환경조건에 따른 작물 반응을 수치적으로 표현할 수 있는 수식들의 수집 및 검토가 선행되어야 한다. 작물모형에 포함되어 있는 수식들은 변수와 모수들이 다차원 및 비선형 방정식으로 정의된다. 이들 수식들을 구성하는 모수들은 특정 기상 및 토양 조건



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

에서 얻어진 고품질의 작물 생육 자료들과 생육 모의값의 오차를 최소화 하는 방식으로 추정된다. 또한, 모수가 추정된 조건과 다른 환경조건이 나타나는 실제 포장에서 이들 모수값의 적용 가능성을 검토하기 위해 장기간 수집된 작물 생육 자료가 필수적이다. 작물모형의 모수추정과 검증에 위해 사용되는 생육 자료들은 주로 파괴적인 식물체 샘플링 방식에 의존하며, 자료 수집을 위해 상당한 노력과 비용이 소요된다. 마지막으로, 여러 수식들로 구성된 작물모형들이 컴퓨터에서 작동될 수 있는 시스템을 구축하기 위해 소프트웨어 엔지니어들이 사용하는 전문적인 컴퓨터 프로그래밍 언어들이 활용된다.

실제로 작물모형을 활용하여 작물의 생육과 생산성을 모의하기 위해서는 상당한 노력과 주의가 요구된다. 우선, 작물모형은 복잡한 실제 환경조건과 식물 반응을 단순화하여 모의하기 때문에, 생육 모의값이 불확도를 가지는 것은 불가피하다. 예를 들어, 주어진 환경조건에서 작물의 생육 특성을 고려하기 위해 사용되는 품종모수는 제한적인 조건에서 수행된 실험 결과로부터 추정되는 경우가 많아, 작물모형의 불확도를 증가 시킬 수 있다. 작물모형에서 예측된 생육 모의값들은 품종모수 뿐만 아니라 토양 모수들에게서도 크게 영향을 받는다. 그러나, 토양은 물리화학적 특성의 공간적 변이가 크기 때문에, 하나의 포장에서조차 이러한 특성들이 고려된 하나의 모수를 추정하는 것은 어렵다. 입력 기상 자료 역시, 관측값이라 하더라도 시공간적 불확도가 내재적으로 존재하며, 기후변화 연구를 위한 미래 기후 시나리오 자료가 사용되는 경우에는 불확도가 큰폭으로 증가하게 된다. 따라서, 작물모형에 사용된 모수와 입력자료의 불확도를 감안하여 작물 생육 모의값들을 해석하여야 한다. 또한, 개별 작물모형마다 사용된 수식의 종류에 따라 각각의 모의 특성이 다르기 때문에, 작물모형 특유의 반응 양상을 이해하여야 한다. 따라서, 대상 작물 및 환경조건들의 특성을 이해하지 못한 상태에서 작물모형을 사용한다면, 작물 생육 모의값은 실재를 반영하지 못하는 컴퓨터 상에서 가공된 수치들에 지나지 않는다. 특히, 각각의 실험 목적에 대한 고려 없이 일반 사무용 컴퓨터 프로그램을 사용하는 방식으로 작물모형을 사용한다면 작물모형으로부터 얻어진 결과와 현장에서 기대되는 값들에 상당한 괴리가 존재할 가능성이 높다.

이번 특별호에서는 작물모형을 개발하고 활용하기 위해 사용될 수 있는 여러 연구방법 및 기술들을 소개하고, 앞으로 국내에서 작물 생육 모의에 필요한 요소 기술에 대한 발전방향에 대해 제시하고자 하였다. 특히, 환경조절 설비를 이용한 생육자료 수집 및 품종모수의 추정, 온도 기반의 생물계절의 예측 및 최적지 분석, 작물모형 개발에 필수적인 비파괴적 생육 자료의 확보 기술, 보편적인 프로그래밍 도구를 활용한 작물모형의 구현, 작물모형 통합을 위한 객체지향적 접근 등을 주제로 다음과 같은 논문들이 게재되었다.

작물모형은 주어진 환경조건 하에서 예상되는 작물의 생물리학적 반응들을 제시하기 위해 개발되므로, 미래의 기후조건이나 이상기상 조건과 같은 다양한 기상조건에서 얻어진 작물 생육 자료를 수집하고 이를 활용하여 작물모형의 개발과 검증이 수행되어야 한다. Lee *et al.*(2018a), Lee *et al.*(2018b), 및 Bak *et al.*(2018) 은 온도구배 챔버와 Soil-Plant-Atmosphere-Research (SPAR) 설비를 사용하여 기온 상승 및 이산화탄소 농도 증가 조건에서 변화하는 작물의 생육 양상을 보고하였다. 특히, Bak *et al.*(2018)은 특정 조건에서 얻어진 작물 생육 자료를 수집하고 품종모수를 추정하였는데, 이러한 연구 결과들이 축적된다면 기후변화 및 이상기상조건에서 작물의 생산성 예측의 정확도 향상에 기여할 것이다. 또한, 이들 연구는 기존의 작물모형 연구에서 자주 다루어지지 않은 콩과 감자의 생육반응을 관찰하였으며, 앞으로 좀더 다양한 작물들을 대상으로 확대되어야 할 것이다.

작물의 재배시기는 재배관리에 관한 의사결정에 있어 중요한 요소 중의 하나이다. 작물모형을 사용하여 여러 환경조건에서 작물의 생육을 모의하고 이들 중 작물의 최대 생산성을 얻을 수 있는 재배시기를 추정할 수 있다. Wi *et al.*(2018), Moon *et al.*(2018a) 및 Yang *et al.*(2018) 은 다양한 온도와 수분 조건에서 따른 최적의 재배시기에 대한 결과들을 보고하였다. 특히, 배추가 국내에서 가장 중요한 채소 중의 하나임에도 불구하고, 널리 활용될 수 있는 작물모형이 개발되지 못한 점을 고려할 때, Wi *et al.*(2018)이 보고한 다양한 온도조건에서의 생육 반응 결과는 앞으로 배추 생육모형 개발에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. Moon *et al.*(2018a)이 보고한 양액재배 조건에서 예상되는 토마토의 생육 양상 결과는 스마트팜의 핵심기술 중의 하나인 작물모형을 기반의 시설환경조절 기술 개발에 기여할 수 있다. Yang *et al.*(2018)

은 북한 지역의 기온자료를 활용하여 출수기 및 수확기의 한계시점을 추정하고 이를 활용하여 작부체계 설계에 사용될 수 있는 작물의 재배시기를 파악한 결과를 보고하였다. 이러한 결과는 앞으로 북한의 식량 생산 제고에 활용가치가 높을 것으로 예상된다.

작물모형의 개발을 위해서는 최신 기술들이 접목되어야 한다. 특히, 작물 생육 자료 수집을 위해, 일반 소비자들을 대상으로 개발된 저가형 센서들을 연구장비로 활용하려는 시도를 한 Lee and Kim(2018)의 연구결과는 시사하는 바가 크다. 작물학 분야에서 사용되는 전통적인 자료 수집 방식들은 대개 상당한 노력이 요구되고 실험 재현성이 제약된다. 급격하게 발전하고 있는 센서 기술을 기반으로 비파괴적인 작물 생육 자료 수집 기법들이 개발된다면, 보다 편리하고 연속적으로 작물모형 개발 및 검증에 요구되는 자료를 수집할 수 있을 것이다.

작물모형 구현을 위해 소프트웨어 공학적 패러다임에 기반한 전문적인 모형 개발 방식뿐만 아니라 일반 연구자들이 쉽게 모형을 개발할 수 있는 방식들이 동시에 시도되어야 한다. Kim et al.(2018)이 제안한 객체 지향적 작물모형 개발은 소프트웨어 공학 분야에서 활용되고 있는 객체를 기반으로 작물모형을 개발하여 코드의 재사용 뿐만 아니라 복잡한 생태계 내의 상호작용을 보다 쉽게 모의할 수 있는 통합모형을 개발할 수 있다는 것을 보여주었다. 그러나, 이러한 방식의 작물모형 개발은 프로그래밍 전문가들에 의해 사용되기 때문에, 일반 연구자들이 쉽게 작물모형을 개발할 수 없는 단점이 있다. Moon et al.(2018b)은 이러한 단점을 보완할 수 있도록, 일반 사무용 스프레드시트 프로그램인 마이크로소프트 엑셀을 활용하여 작물모형을 개발하였다. 특히, 이러한 연구 결과는 전문적인 소프트웨어 개발자가 아니더라도 작물모형 개발이 가능하다는 것을 보여주어, 결국에는 모형 개발뿐만 아니라 활용의 지면 확대에 기여할 수 있을 것이다.

해외 주요 선진국은 독자적인 작물모형을 구축하고 이들을 기후변화 영향평가와 개발도상국 식량지원을 위한 의사결정에 활용하고 있다. 국내에서는 작물모형을 활용한 기후변화 영향평가 관련 연구들은 국내 일부 지역에서 진행되고 있으나, 아직도 해외 지역에서의 작물 생산성 예측 기술 개발에 한계가 있는 실정이다. 특히, 최근 북한과의 관계 개선으로 남북한 농업 기술 개발 협력의 필요성이 높아지고 있는 시대적 기대에 부응하여 한반도에 적합한 작물모형의 개발과 활

용을 통해 기후변화 및 이상기상 대응 뿐만 아니라 식량안보 제고와 농업기반 시설 구축을 위한 의사결정을 지원할 수 있는 체계가 구축되어야 할 것이다. 또한, 스마트팜 구축을 위해 사용되는 센서와 제어기기와 같은 하드웨어는 급격하게 발전하고 있으나, 시설 환경을 포함하는 다양한 환경조건에서 적용 가능한 작물모형의 개발 속도는 상대적으로 지체되고 있는 것이 현실이다. 따라서, 스마트팜을 위한 작물모형 개발에 보다 많은 노력과 투자가 필요할 것이다. 특히, 아직까지도 작물모형 개발 및 활용관련 연구를 수행할 수 있는 인력들이 미미한 수준이므로 앞으로 작물모형과 관련한 연구 주제들을 발굴하고, 이를 수행할 수 있는 인력 양성을 위한 환경들이 조성되어야 할 것이다.

## 감사의 글

보다 더 개선된 논문들이 발간될 수 있도록 뛰어난 식견과 해박한 지식으로 논리 정연한 의견들을 제시하여 주신 심사위원분들, 그리고 특별호가 출판되기까지 수고를 아끼지 않고 지원을 해 주신 박진유 편집 간사님께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Bak, G., G. Lee, and E. Lee, 2018: A prospect on cv. Superior potato production in South Korea using DSSAT cropping model under RCP 8.5 climate condition *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 166-174.
- Kim, J., W. Sang, P. Shin, H. Cho, M. Seo, B. Yoo, and K. S. Kim, 2015a: 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. S., H. Kim, B. Y. Lee, C. K. Lee, and J. Kim. 2015b: Requirement analysis of a system to predict crop yield under climate change. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **17**(1), 1-14
- Kim, K. S., S. Hyun, B. H. Yoo, B.-S. Seo, H.-Y. Ban, J. Park, and H.-W. Lee, 2018: Simulation of crop growth under an intercropping condition using an object oriented crop model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 214-227.

- Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. 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. (in Korean with English abstract)
- Lee, J. T., K. M. Shim, H. S. Bang, M. H. Kim, K. K. Kang, Y. E. Na, M. S. Han, and D. B. Lee, 2010: An analysis of changes in rice growth and growth period using climatic tables of 1960s (1931~1960) and 2000s (1971~2000). *Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer* **43**(6), 1018-1023. (in Korean with English abstract)
- Lee, S., and K. S. Kim, 2018: Estimation of fresh biomass for cabbages using the Kinect sensor. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 205-213.
- Lee, Y.-H., H.-S. Cho, J.-H. Kim, W.-G. Sang, P. Shin, J.-K. Baek, and M.-C. Seo, 2018a: Effect of Carbon Dioxide Concentration, Temperature, and Relative Drought on Growth Responses and Yield in Spring Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 149-158.
- Lee, Y.-H., H.-S. Cho, J.-H. Kim, W.-G. Sang, P. Shin, J.-K. Baek, and M.-C. Seo, 2018b: The Effects of Increased Temperature on Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] Growth and Seed Yield Responses in Temperature Gradient Chamber. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 159-165.
- Lobell, D. B., B. B. Marshall, C. Tebaldi, M. D. Mastrandrea, W. P. Falcon, and R. L. Naylor, 2008: Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* **319**, 607-610.
- Moon, D.-G., S.-H. Kim, M.-W. Cho, I.-H. Yu, H.-R. Ryu, K.-H. Choi, Y.-H. Kwon and S.-J. Lee, 2018: Effect of Plant Growth and Production of Tomato on the Water Content Control in Rockwool Culture. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 183-189.
- Moon, K. H., E. Y. Song, S. H. Wi, and S. Oh, 2018: Chinese cabbage modeling using Excel program. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 228-232.
- Peng, S., J. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004: Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **101**(27), 9971-9975.
- Rosenzweig C., J. Elliott, D. Deryng, A. C. Ruange, C. Müller, A. Arneth, K. J. Boote, C. Folberth, M. Glotter, N. Khabarov, K. Neumann, F. Piontek, T. A. M. Pugh, E. Schmid, E. Stehfest, H. Yang, and J. W. Jones, 2013: Assessing agricultural risks of climate change in the 21<sup>st</sup> century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **111**(9), 1-6.
- Wi, S. H., E. Y. Song, S. J. Oh, I. C. Son, S. G. Lee, H. J. Lee, B. Mun, and Y. Y. Cho, 2018: Estimation of Optimum Period for Spring Cultivation of 'Chunkwang' Kimchi Cabbage Based on Growing Degree Days in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 175-182.
- Yang, W., S. Kang, S. Kim, J.-S. Choi and J.-H. Park, 2018: Assessment of the Rice Cropping Period Based on Temperature Data in Different Regions of North Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 190-204.