

## 03

## SNAK을 위한 생물물리학적 작물 모형 (Biophysical Crop Model) 개발



김광수  
서울대학교 / 부교수  
luxkwang@snu.ac.kr

## 1. 서언

기후변화 조건에서 농업 생태계의 자원관리 최적화를 위해, 주어진 환경 조건에서 자원의 투입에 따른 작물의 생산성 변화를 추정하고, 이로 인한 경제적인 효과를 분석하는 것이 요구된다. 특정 재배 및 환경조건에서 작물의 생육을 모의할 수 있는 작물 생육 모형들은 수자원 투입에 따른 효과를 분석하기 위해 사용될 수 있는 도구 중 하나이다 (Lee et al., 2012). 작물 생육 모형들을 이용하여 미래의 기후변화가 작물 생산에 미치는 부정적인 영향을 최소화할 수 있는 재배관리를 탐색하기 위해 사용되어왔다 (Kim et al., 2015a). 또한, 작물 모형을 사용하여 시비관리에 따른 작물 생산성의 공간적 변동양상을 파악할 수 있다 (Hedley, 2015).

국내에서는 작물의 생육 과정을 수식화하여 생산성을 추정할 수 있는 생물 물리학적 작물 모형들이 사용되어왔다 (Kim et al., 2015b). 이러한 과정 중심의 작물 생육 모형들은 Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT; Jones et al., 2003)에 통합되어 있는 작물 모형들이나, ORYZA 2000 모형 (Bouman et al., 2001), Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM; Zhang et al., 2007) 모형들이 포함된다.

과정 중심의 작물 모형들은 작물이 재배되고 있는 토양과 대기조건과 같은 개별 환경요인들을 고려하여 작물 생육을 모의할 수 있도록 다양한 모듈들이 하나의 시스템으로 통합되어 구현된다 (Thorp et al., 2012).

그러나, 작물이 재배되고 있는 환경조건의 복잡성으로 인해, 작물 모형을 구동하기 위해 상당한 양의 자료가 요구된다. 특히, 생육과 연관된 개별 모듈들이 다수의 모수에 의존하기 때문에, 과정 중심 모형들은 대개 많은 수의 모수를 사용한다. 예를 들어, 일부 작물 모형의 경우, 200개 이상의 모수를 사용하여 작물 생육 모의를 수행한다 (Makowski et al., 2006).

최근, 작물 모형의 자료 요구도를 낮출 수 있는 단순한 형태의 과정 기반 작물 모형을 개발하려는 시도가 진행되고 있다. 예를 들어, Senthold et al. (2019)은 20개 이하의 모수를 사용하여 일 단위의 작물 생육을 모의할 수 있는 Simple 모형을 개발하였다. 이러한, 단순한 모형들은 관행적으로 재배되는 작물들로부터 얻을 수 있는 잠재 수량을 추정하기 위해 활용될 수 있다.

다양한 농업 생산 환경조건에서 물-에너지-식량의 복잡한 연관 관계를 고려하여 작물 생육 모의를 수행할 경우, 범용성과 특화된 기능을 부여할 수 있는 작물 모형을 개발하는 것이 필요하다. 특히, 노지와 시설재배를 포함하는 다양한 형태의 재배조건에서 수자원과 작물의 생육을 연계하여 모의할 수 있는 작물 생육 모의 체계가 요구된다. SNAK을 위해 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 객체지향적 작물 모형을 개발하고 있어, 이에 대한 소개를 하고자 한다.

## 2. 객체지향적 생물물리학적 작물 모형 (Object Oriented Biophysical Crop Model)

객체지향적 모형은 모델링 대상의 구조와 기능

을 클래스라고 하는 단위로 설계를 하고, 클래스로부터 생성된 객체 사이의 상호작용을 컴퓨터 언어를 통해 구현하는 방식으로 개발된다. 클래스에는 모의 대상의 특성과 기능을 나타내기 위한 멤버 변수와 멤버 함수들이 정의된다. 농업 생태계에 존재하는 객체들을 일일이 정의하는 것은 어렵다. 대신, 개별 개체들을 대표할 수 있는 부모 클래스를 정의하고, 이들로부터 상세한 객체들을 표현할 수 있는 상속과정을 거쳐 구체화된 작물 생육 모의를 수행할 수 있다. 특히, 상속을 사용할 경우, 추상적으로 정의된 부모 클래스로부터 구체화된 기능을 가진 객체들을 구현할 수 있다. 따라서, 다양한 조건에서 재배되는 작물들의 생육을 모의할 수 있는 작물 모형을 개발하기에 유리하다.

객체지향적 생물물리학적 작물 모형에는 생태계의 구성요소를 모의하기 위한 공통적인 멤버 변수와 멤버 함수를 가지는 EcosystemComponent 클래스로부터 파생된 클래스들로 정의된다. (그림 1). EcosystemComponent 클래스에는 에너지와 물질 교환이 이루어지는 공간적 위치를 나타내기 위해 위도와 경도 및 고도 등을 저장하기 위한 멤버 변수를 가진다. 농업 생태계 내 생물물리학적 과정들을 시간에 따라 모의하기 위해, 모의설정 초기화 및 종료, 그리고 시간별 모의를 수행하기 위한 Initialize(), Finalize() 및 DoTimeStep() 등의 멤버 함수가 EcosystemComponent 클래스에 포함된다.

EcosystemComponent 클래스에 주요 특성과 기능을 상속받아 농업 생태계의 생물학적 및 비생물학적 요소를 대표하는 클래스들이 정의되었다. 노지 재배조건에서 대기, 토양, 작물 및 재배관리에 따른 작물 생육을 모의할 수

있도록 Atmosphere 클래스, Soil 클래스, 및 SimplePlant 클래스를 각각 정의하였다. 이러한 클래스들은 개별 생태계 구성요소들을 모의할 수 있는 단순한 형태의 개별 모형들로 구성되도록 설계하였다.

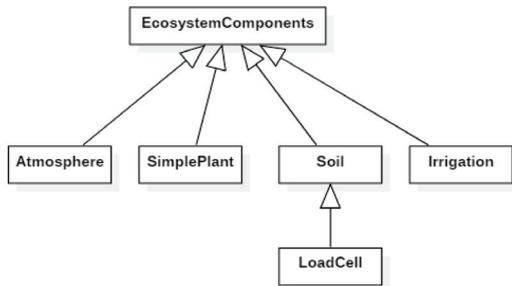


그림 1. 농업 생태계의 개별 구성요소 나타내는 클래스들로 구성된 객체지향형 생물물리학적 작물모형의 클래스 다이어그램. 화살표는 클래스 사이의 상속관계를 나타냄.

Atmosphere 클래스는 일별 기상자료들을 농업 생태계를 구성하는 개별 객체들에 전달하는 기능을 가진다 (그림 1). Atmosphere 객체의 입력자료는 손쉽게 처리될 수 있는 텍스트 형식의 기상 입력 파일들이 사용되며, 이들 자료를 처리하기 위한 멤버 함수와 멤버 변수들이 정의되어 있다. 작물의 생육을 모의하기 위해 필수적인 기상변수로 일별 일사량, 온도, 습도 및 풍속 등이 사용된다. 따라서, 이들 자료들이 객체지향형 작물 모형에서 사용될 수 있도록 설계하였다. 특히, 입력자료의 호환성을 높이기 위해, 국내외에서 널리 사용되는 DSSAT 모형의 기상 입력자료 형식을 따르도록 구현하였다. 또한, 국내 기상 관측소에는 일사량 자료를 제공하는 곳이 상대적으로 적기 때문에, 일조시간으로부터 일사량을 추정할 수 있는 멤버 함수를 추가하였다.

대기 및 작물과 상호작용을 하는 토양을 모의하기 위해 Soil 클래스를 설계하였다 (그림 1). 특히,

Soil 클래스의 멤버 함수에서 Atmosphere 클래스와 SimplePlant 클래스 사이에 자료교환이 이루어지도록 구현하였다. 대부분의 농가에서 표준화된 시비관리가 이루어지고 있으나 관개수 부족이나 관개시설 미비로 인해 작물 생산성에 심각한 피해가 발생할 수 있어, 질소 스트레스보다는 수분 스트레스에 따라 작물의 생육이 영향을 받는 것으로 Soil 클래스의 멤버 함수들을 설계하였다. 토양 중 저장 수분이 작물의 뿌리를 통해 전달되는 과정을 모의하기 위해 Soil 클래스의 멤버 변수와 SimplePlant 클래스의 멤버 변수가 자료 교환을 수행하도록 구현하였다. 또한, 강수 조건이나 관개가 진행될 때 토양 중 수분이 채워질 수 있도록 Soil 클래스와 Atmosphere 클래스가 상호작용을 할 수 있도록 멤버 함수들을 정의하였다.

노지에서 재배되는 작물 뿐만 아니라 시설에서 재배되고 있는 작물의 생육을 모의할 수 있도록, LoadCell 클래스를 정의하였다. 주로 시설 내 작물이 성장하면서 발생하는 증발산량과 관개수량을 모니터링하기 위해 사용되는 LoadCell을 대표하기 위해 정의된 LoadCell 클래스는 Soil 클래스로부터 파생되어 정의되었다. LoadCell 클래스는 증산을 위해 식물체에 공급된 수분량과 관개를 통해 투입된 수분량을 계산하기 위해 사용된다.

SimplePlant 클래스는 경험식을 사용하여 식물체 성장을 모의할 수 있도록 설계하였다. Monteith (1965) 는 일사량 중 일부가 작물의 생체중으로 전환된다는 가정하에 광사용효율 계수를 사용하는 경험식을 제안하였다. SimplePlant 클래스에서도 문헌에서 보고된 개별 작물의 광사용효율 계수를 사용하여 광합성량을 추정하도록 작물 생육 관련 멤버 함수가 설계되었다. 또한, 작

물의 발육 과정을 모의하기 위해 성장도일을 활용하도록 구현되었다.

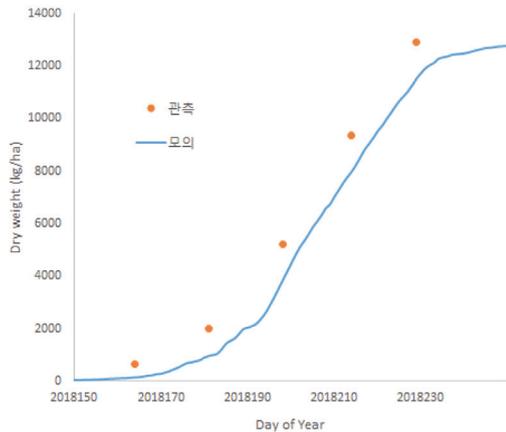


그림 2. 2018년 경기도 화성시 실험포장에서 얻어진 벼 건물중의 관측치와 추정치의 비교.

객체지향적 생물물리학적 모형을 사용하여 잠재조건에서의 벼 생육을 모의하였다. 작물 생육 모의값과 관측값을 비교하기 위해, 2018년에 경기도 화성시에 위치한 실험포장에서 관행 관개조건에서 재배된 벼 생육 자료를 수집하였다. 수원 시에서 관측된 기상자료를 사용하여 벼의 생육을 모의한 결과, 벼 건물중의 시계열적 추이를 비교적 정확하게 추정하였다 (그림 2). 그러나, 벼 모형의 모수들이 국내 다양한 품종에 적합하도록 추정되지는 않았다. 따라서, 여러 벼 품종의 생육자료들을 수집하여, 국내에서 재배되고 있는 벼 품종에 활용 가능한 모수의 추정이 필요할 것으로 보인다. 또한, 객체지향적 작물 모형은 시설내에서 재배되는 작물에 적용 가능하므로, 앞으로 이들 작물에 대한 생육자료 수집 및 모수 추정이 요구된다.

### 3. 마치면서 또는 결론

객체 중심의 대기, 토양, 및 작물 모형을 통합하여 노지 조건에서 작물의 생육 양상을 모의할 수 있는 모형들이 개발되고 있다. 객체 중심의 모형을 사용할 경우, 간작 재배조건과 같이 복잡한 생태계 상호작용을 모의할 수 있는 모형을 구축하기에 유리하다 (Kim et al. 2018). 국내에서는 객체지향형 생물물리학적 작물 모형의 개발이 시작되는 단계이기 때문에, 앞으로 많은 연구들이 진행되어야 할 것이다. 특히, 국내에서는 작물 모형의 검증 및 모수 추정을 위한 생육 자료가 상당히 부족하기 때문에, 생육 자료의 생산 및 공유가 필요할 것으로 보인다. 이러한 작물 모형은 궁극적으로 기후변화 조건에서 수자원 관리, 식량 생산 및 에너지 사용에 있어 최적의 관리 방식을 탐색하는 도구로 사용될 수 있다. 특히, 보다 실질적인 의사결정 지원을 위해 작물 모형의 신뢰도 제고를 위한 상당한 노력이 진행되어야 할 것이다.

사사 : 본 성과물은 농촌진흥청 공동연구사업(세부과제번호 : PJ01343502)의 지원을 받아 연구되었음.

### 참고문헌

1. Bouman, B. A. M., M. J. Kropff, T. P. Tuong, M. Wopereis, H. F. M. Ten Berge, and H. H. Van Laar, 2001: ORYZA2000: modeling lowland rice.
2. Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M. H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J. M. Machet, J. M. Meynard, and R. Delecolle, 1998: STICS: a generic model for the

- simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311–346.
3. Bulatewicz, T., X. Yang, J. M. Peterson, S. Staggenborg, S. M. Welch, D. R. Steward, 2010: Accessible integration of agriculture, groundwater, and economic models using the Open Modeling Interface (OpenMI): methodology and initial results. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 521–534.
  4. Bulatewicz, T., A. Allen, J. M. Peterson, S. Staggenborg, S. M. Welch, and D. R. Steward, 2013: The simple script wrapper for OpenMI: enabling interdisciplinary modeling studies. *Environmental Modelling & Software* 39, 283–294.
  5. Castronova, A. M., J. L. Goodall, and M. B. Ercan, 2013: Integrated modeling within a hydrologic information system: an OpenMI based approach. *Environmental Modelling & Software* 39, 263–273.
  6. Gregersen, J. B., P. J. A. Gijbbers, and S. J. P. Westen, 2007: OpenMI: Open modelling interface. *Journal of Hydroinformatics* 9(3), 175pp.
  7. Hedley, C. 2015: The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95, 12–19.
  8. Jiang, P., M. Elag, P. Kumar, S. D. Peckham, L. Marini, and L. Rui, 2017: A service-oriented architecture for coupling web service models using the Basic Model Interface (BMI). *Environmental Modelling & Software* 92, 107–118.
  9. Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. C. Hunt, P. W. Wilkens, U. Singh, A. J. Gijsman, and J. T. Ritchie, 2003: The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18(3–4), 235–265.
  10. Kim, J., C. K. Lee, H. Kim, B. Y. Lee, 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.
  11. 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.
  12. Kim, K. S., S. Hyun, B. Yoo, B.-S. Seo, H.-Y. Ban, J. Park, and B.-W. Lee, 2018: Simulation of crop growth under an intercropping condition using an object oriented crop model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 20(2), 214–227.
  13. 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)
  14. Lobov, A., J. L. M. Lastra, and R. Tuokko, 2005: Application of UML in plant modeling for

+  
특집 | SNAK을 위한 생물물리학적 작물 모형 (Biophysical Crop Model) 개발

- model-based verification: UML translation to TNCES. IEEE, 495–501.
15. Makowski, D. Hillier, J., Wallach, D., Andrieu B., Jeuffroy, M.-H, 2006. Parameter Estimation for crop models. Working with Dynamic Crop Models : Evaluating, Analyzing, Parameterizing and Using Them, Eds. Daniel Wallach, David Makowski, James Jones, Elsevier, pp.101–141
  16. Monteith, J. L., 1965: Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany* 29(1), 17–37.
  17. Moore, R. V., and C. I. Tindall, 2005: An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). *Environmental Science & Policy* 8(3), 279–286.
  18. Assesng S., Kim, K.S, Zhao, C., Liu B., Xiao, L., Stockle, C., Hoogenboom, G., Boote, K.J., Kassie, B., Pavan, W., Shelia, V., Zhu, Y., Hernandez-Ochoa, I., Wallach, D., Porter, C. 2019. A simple model. *European Journal of Agronomy*. In press.
  19. Thorp, K. R., J. W. White, C. H. Porter, G. Hoogenboom, G. S. Nearing, and A. N. French, 2012: Methodology to evaluate the performance of simulation models for alternative compiler and operating system configurations. *Computers and Electronics in Agriculture* 81, 62–71.
  20. 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. *Animal Production Science* 47(12), 1446–1454.