

## 객체지향적 작물 모델을 활용한 간작조건에서의 작물 생육 모의

김광수<sup>1,2\*</sup> · 유병현<sup>1</sup> · 현신우<sup>1</sup> · 서범석<sup>1</sup> · 반호영<sup>1</sup> · 박진유<sup>2</sup> · 이변우<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 식물생산과학부

<sup>2</sup>서울대학교 농업생명과학연구원

(2018년 5월 2일 접수; 2018년 6월 19일 수정; 2018년 6월 20일 수락)

### Simulation of crop growth under an intercropping condition using an object oriented crop model

Kwang Soo Kim<sup>1,2\*</sup>, Shinwoo Hyun<sup>1</sup>, Byoung Hyun Yoo<sup>1</sup>, Beom-Seok Seo<sup>1</sup>, Ho-Young Ban<sup>2</sup>, Jinyu Park<sup>2</sup> and Byun-Woo Lee<sup>1,2</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

(Received May 2, 2018; Revised June 19, 2018; Accepted June 20, 2018)

#### ABSTRACT

An object oriented crop model was developed to perform crop growth simulation taking into account complex interaction between biotic and abiotic factors in an agricultural ecosystem. A set of classes including Atmosphere class, Plant class, Soil class, and Grower class were designed to represent weather, crop, soil, and crop management, respectively. Objects, which are instance of class, were linked to construct an integrated system for crop growth simulation. In a case study, yield of corn and soybean, which was obtained at an experiment farm in Rural Development Administration from 1984 to 1986, were compared with yield simulated using the integrated system. The integrated system had relatively low error rate of corn yield, e.g., <4%, under sole and intercropping conditions. In contrast, the system had a relatively large underestimation error for above ground biomass except for grain compared with those observed for corn and soybean. For example, estimates of biomass of corn leaf and stem was 31% lower than those of observed values. Although the integrated system consisted of simple models, the system was capable of simulating crop yield under an intercropping condition. This result suggested that an existing process-based model would be used to have more realistic simulation of crop growth once it is reengineered to be compatible to the integration system, which merits further studies for crop model improvement and implementation in object oriented paradigm.

**Key words:** Crop model, Object oriented programming, Intercropping, UML, Agricultural ecosystem



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

## 1. 서 언

작물 생육 모델은 대기 및 토양조건에 따른 작물의 반응을 모의할 수 있기 때문에 실제 포장실험을 수행하기 어려운 조건에서도 작물의 생육양상을 예측할 수 있다(White *et al.* 2011; Lee *et al.*, 2012). 예를 들어, 미래의 기후조건에서 재배관리조건에 따른 작물 생산성 변동양상을 전망하기 위해 작물 모델들이 사용되어 왔다(Lee *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2015). 작물 모델을 사용하여 시비관리에 따른 작물 생산성의 농장내 공간적 변동양상을 파악할 수 있다(Hedley, 2015; Basso *et al.*, 2001; Irmak *et al.*, 2001).

국내에서는 작물의 일별 생육, 생육단계 및 수량형성 등 작물의 생육과정을 모의할 수 있는 과정 중심의 모델들이 사용되어 왔다(Kim *et al.*, 2015). 예를 들어, Kim *et al.*(2013)은 Decision Support System for Agrotechnology Transfer(DSSAT)을 사용하여 기후 변화 조건에 따른 보리의 생육반응 모의결과를 보고하였다. Lee *et al.*(2012)는 ORYZA 2000 모델을 사용하여 재배관리를 변경하였을 때 기후변화 조건에서 벼의 생산성 감소를 최소화 할 수 있을 것으로 제안하였다. Zhang *et al.*(2007)은 Agricultural Production Systems Simulator(APSIM)를 사용하여 시비와 파종 시기에 따른 벼 생육을 모의하였다.

과정 중심의 작물 모델들은 토양, 작물 및 대기의 현상들을 모의할 수 있는 모듈들이 하나의 시스템으로 통합되어 구현된다(Jones *et al.*, 2003; Keating *et al.*, 2003; Bouman and van Larr, 2006; Thorp *et al.*, 2012). 또한, 과정 중심의 작물 모델들은 주로 동일한 식물들로 구성된 작물 군락이 인위적인 재배관리를 통해 재배된다는 가정하에 개발되었다. 따라서, 단일 품종으로 구성된 작물 군락이 대기 및 토양과 상호작용을 하는 과정을 모의할 수 있는 시스템으로 구성되어 있다. 반면, 작물이 재배되는 농업 생태계는 환경요인 뿐만 아니라 생물학적 요인들에 의해 영향을 받는다. 예를 들어, 간작으로 재배되는 작물의 생산성은 토양 수분 함량과 같은 환경요인 뿐만 아니라 두 작물의 생육 양상에 의해 결정된다. 이러한 생물학적 요인들을 고려한 작물 생산성을 모의하기 위해 개별적 요인들을 모의할 수 있는 모델 뿐만 아니라 이들 모델을 통합할 수 있는 체계가 필요하다. 예를 들어, Oryza 2000 모델과 DSSAT 모델을 통합할 경우 두가지 작물이 간작으로 재배되는 조건에서 작물의 생산성을 모의

할 수 있다.

개별 작물모델들은 독립적인 시스템으로 구성되어 있기 때문에, 이들 모델들을 또다른 시스템으로 통합하는 것은 어렵다. 예를 들어, 간작조건에서의 생산성을 모의하기 위해 Oryza 2000 모델과 DSSAT 모델에서 얻어지는 작물 생육 추정값들이 상호 교환되어야 한다. 그러나, 이들 모델들은 독립적으로 구동이 되기 때문에, 작물의 생체중과 같은 특정 변수의 값을 상호 교환할 수 있도록 지원하는 인터페이스가 존재하지 않는다. 또한, 개별 모델을 구성하는 모듈이 서로 다른 단위의 변수를 사용하기 때문에 모델 사이의 직접적 연계를 어렵게 한다. 예를 들어, Oryza2000 모델과 DSSAT 모델의 광합성 모듈은 각각  $KJ d^{-1}$ 와  $MJ d^{-1}$  단위의 일사량 값들이 사용하여 광합성량을 추정한다. 따라서, 단위의 변환 없이 두 모델의 광합성 모듈에서 추정된 변수값들을 직접적으로 교환하는 것은 불가능하다.

개별 모델들로 구성된 하나의 통합시스템을 구축하기 위해 모델들의 입출력자료를 교환하기 위한 다양한 방식들이 사용되어 왔다(Gregersen *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2017). 예를 들어, 모델들의 출력파일이나socket을 사용하여 모델사이에서 자료교환을 수행할 수 있다(Bulatewicz *et al.*, 2013). 그러나, 이러한 방식들은 비교적 속도가 느린 외부저장매체에 저장되어 있는 파일이나 네트워크를 통해 자료교환을 수행하기 때문에 자료교환에 상당한 시간이 소요된다. 또한, 다양한 모델들을 지원하기 위한 표준화된 자료교환 방식이 개발되어 있지 않아 복잡한 상호작용을 모의하기에는 제한적이다.

보다 효율적인 통합시스템을 구축하기 위해 시스템 메모리 상에서 개별 모델의 입출력자료를 다른 모델의 입출력자료로 사용할 수 있도록 지원하는 인터페이스인 Wrapper가 사용될 수 있다(Moore and Tindall, 2005; Peckham *et al.*, 2013; Castronova *et al.*, 2013). 예를 들어, Bulatewicz *et al.*(2013)는 수자원 가용도에 따른 작물 생산성을 예측하기 위해 Open Modeling Interface(OpenMI)를 활용하여 지하수 모델과 작물 모델을 통합한 시스템을 개발하였다. Wrapper는 개별 모델의 출력값을 해당 모델과 연결된 모델의 입력값의 형식으로 변환하는 기능을 가진다(Peckham *et al.*, 2013). 예를 들어, 변수의 이름이나 단위가 모델마다 상이하더라도, 모델 자체의 수정없이 다른 모델과의 자료교환을 수행할 수 있다. 또한, Wrapper 는 라이브

러리의 형태로 제공되므로 서로 다른 컴퓨터 언어를 사용하여 구현된 모델들을 하나의 시스템으로 구축할 수 있다(Bulatewicz *et al.*, 2013). 따라서, Wrapper를 사용할 경우 다양한 농업생태계 구성요소들 대표할 수 있는 다수의 모델들을 연계하여 하나의 시스템으로 구성할 수 있다.

Wrapper와 같은 인터페이스 라이브러리를 사용하여 개별 모델들을 하나의 시스템으로 통합할 경우, 객체지향적 모델들을 활용하는 것이 유리하다(Peckham *et al.*, 2013). 특히, 객체지향적 언어에서 제공하는 상속을 활용할 경우, 보다 유연한 인터페이스 라이브러리 구축이 가능하다. 예를 들어, 식물체를 구성하는 특성과 기능들을 대표하는 원형모델로부터 콩과 옥수수의 생육을 모의할 수 있는 모델들을 상속을 통해 구현할 수 있다(Kim *et al.*, 2015). 인터페이스 라이브러리를 사용하여 원형작물모델들이 통합된 시스템이 구축되었을 때, 추가적인 소스코드의 변경없이 상속관계를 가지는 개별작물모델들을 활용할 수 있다. 예를 들어, 일반적인 작물을 대표하는 작물모델의 원형을 사용하여 OpenMI로 연계된 통합시스템을 구축한 후, 콩과 옥수수로 구성된 간작조건에서 작물 생육 모의를 수행할 수 있다. 이때, 작물모델의 원형으로부터 파생된 콩과 옥수수 모델이 OpenMI를 통해 연계 될 경우, 대부분의 소스코드를 변경하지 않고도 간작조건에서 두 작물의 생육을 모의할 수 있는 통합시스템이 구축될 수 있다.

국내에서는 작물들의 특성과 기능을 동시에 고려하여 작물 생육을 모의할 수 있는 객체지향적 작물모델 구현과 관련한 보고가 되어있지 않다. 본 연구에서는 객체 중심의 작물모델을 개발하고 이를 활용하여 간작조건에서의 작물 생육 양상을 모의할 수 있는 통합시스템을 개발하고자 하였다. 특히, 작물과 토양을 대표하는 단순한 형태의 객체들을 구성하고 이들 사이의 상호작용을 고려할 수 있는 통합 시스템을 OpenMI를 활용하여 구현하고자 하였다. 이러한 통합 시스템은 OpenMI와 호환되는 다양한 모델들과 연계될 수 있다. 예를 들어, 가축, 병해충 및 잡초와 같은 다양한 농업 생태계 구성요소들의 동태를 모의할 수 있는 개별 모델들이 통합 시스템에 포함될 수 있다. 이러한 통합 시스템은 복잡한 농업 생태계내 상호작용을 고려한 작물 생육 모의를 가능하게 할 것이다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 객체지향적 작물모델 설계

객체지향적 모델은 모델링 대상의 특성과 기능을 하나의 단위로 처리할 수 있는 객체들을 중심으로 설계된다. 이들 객체들을 구조와 기능을 정의하기 위해 객체의 원형에 해당하는 클래스를 설계하였다. 클래스에는 객체의 특성을 대표하는 자료를 저장하기 위한 자료구조와 이들 자료들을 처리하기 위한 함수들이 정의된다. 각각의 개체를 개별적으로 정의하기 보다는 개체들 간의 공통적인 특성을 대표하는 부모클래스를 사용하여 정의될 수 있다. 특히, 부모 클래스에 정의된 특성과 기능들이 자식클래스들에게 사용될 수 있도록 상속이 사용된다. 상속을 작물 모델 설계에 적용할 경우, 다양한 작물의 생육을 모의할 수 있는 범용성 작물 모델을 설계하기에 유리하다.

작물생육과 관련한 객체들의 특성과 기능을 정리하기 위해 UML(Unified Modeling Language)이 사용되어왔다(Lobov *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2015). UML은 다양한 다이어그램들을 사용하여 개별 클래스와 클래스 사이에서의 상호작용을 설계하기 위해 사용된다. 특히, 실제 프로그래밍 언어가 사용되는 것이 아니라 시각적인 설계가 가능한 다이어그램을 활용하기 때문에, 컴퓨터 프로그래밍 언어에 익숙하지 않은 연구자들과 시스템 개발자들과 소통을 원활히 할 수 있다.

농업 생태계의 개별 구성요소를 대표하는 클래스 설계하기 위해 개별 클래스의 속성과 기능을 나타내는 클래스 다이어그램이 사용되었다(Fig. 1). 클래스 다이어그램은 해당 클래스의 속성 및 기능을 대표하는 멤버변수와 멤버함수를 사각형 도형 안에 열거한다. 예를 들어, 모든 생태계 구성요소들의 원형을 대표하는 경우, 클래스의 이름, 멤버변수 및 멤버변수가 3개의 구획으로 나뉘어진 도형 안에 표현된다. 또한, 상속관계와 같은 클래스 사이의 관계를 화살표 도식을 사용하여 표현할 수 있다.

### 2.2. 객체지향적 토양-식물-대기 연속체 모델 설계

객체지향적 작물 모델 개발을 위해 생태계의 구성요소가 가지는 기능과 특성을 모의할 수 있는 부모 클래스인 EcosystemComponent 클래스를 우선적으로 설계하였다(Fig. 1). EcosystemComponent 클래스에는 특정위치에서 발생하는 에너지와 물질 교환을 모의

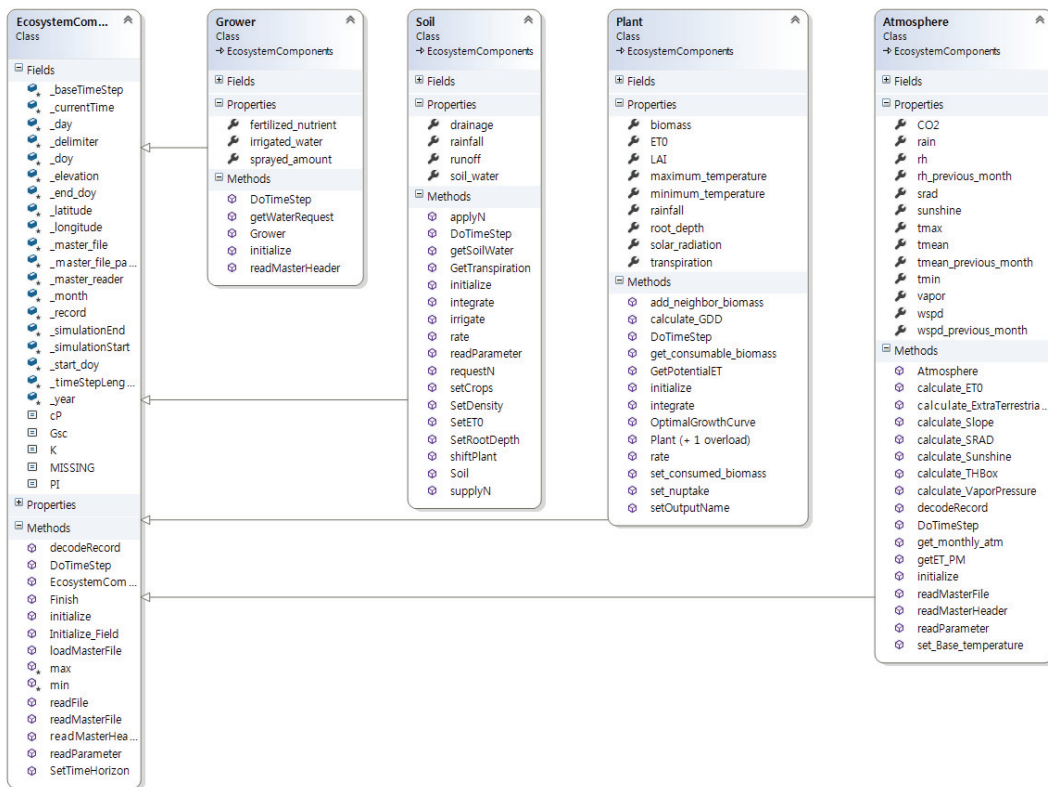
하기 위해 위도와 경도 및 고도 등 공간 정보를 저장하기 위한 멤버변수를 가지도록 설계되었다. 농업 생태계 모델들이 주어진 시간에 작물 생육과 관련된 과정들을 모의하기 때문에, 모의설정 초기화 및 종료, 그리고 매 시간별로 모의를 수행하기 위한 Initialize(), Finalize() 및 DoTimeStep() 멤버함수를 EcosystemComponent 클래스에 포함되도록 설계하였다.

EcosystemComponent 클래스로부터 농업생태계의 생물학적 및 비생물학적 요소를 대표하는 클래스들이 파생되었다. 특정 재배조건에서의 작물 생육을 모의하기 위해, 대기, 토양, 작물 및 재배관리를 모의할 수 있는 Atmosphere 클래스, Soil 클래스, Plant 클래스, 및 Management 클래스를 각각 설계하였다. 이러한 클래스들은 개별 생태계 구성요소들을 모의할 수 있는 단순한 형태의 개별 모델들로 구성되도록 설계하였다.

Atmosphere 클래스는 일사량과 기온과 같은 기상 변수값들을 농업 생태계 모형에 전달할 수 있도록 설

계되었다(Fig. 1). Atmosphere 클래스는 텍스트 형식의 기상입력자료의 처리를 담당하는 멤버함수와 입력 자료들을 기상변수별로 저장할 수 있는 멤버변수들로 구성되었다. 작물의 생육에 영향을 주는 기상변수인 일사량, 일별 온도, 습도 및 풍속을 입력기상변수로 사용할 수 있도록 설계하였다. 특히, 국내외에서 작물 생육모의에 널리 사용되고 있는 DSSAT 모델과 호환되는 형식의 기상입력자료를 지원하도록 구현하였다. 일사량 자료가 제공되지 않는 지역에서 작물 생육 모의를 수행할 수 있도록, 일사량을 추정할 수 있는 함수를 멤버함수에 추가하였다.

Soil 클래스에서는 Atmosphere 클래스와 Plant 클래스 등 토양과 상호작용을 하는 대기와 작물 사이에 에너지와 물질교환을 수행할 수 있도록 설계되었다 (Fig. 1). 발작물의 경우, 대부분의 농가에서 표준화된 시비관리가 이루어지고 있으나 관개시설이 갖추어진 농가들이 비교적 적으므로 질소스트레스보다는 수분



**Fig. 1.** Class diagram of EcosystemComponent class, Atmosphere class, Plant class, Soil class, and Grower class. Each class was represented by a rectangle with four compartments. Fields and methods indicate member variables and member functions of a class, respectively. Properties represents a function to access a selected set of member variables.

스트레스에 따라 작물이 생육에 영향을 줄 수 있는 기능들을 중심으로 Soil 클래스의 멤버함수들을 설계하였다. 특히, 토양 중 영양분과 수분을 식물체의 뿌리에 전달할 수 있는 멤버변수들을 정의하였다. 또한, 강수와 관계조건에 따라 토양 중 수분이 채워질 수 있도록 멤버함수들을 정의하였다. 토양 중 수분수지를 계산하기 위해, Woli *et al.*(2012)이 제안한 ARID 모델을 활용하여 수분 변화를 추정하는 함수들을 정의하였다. 토양 중 가용 수분량이 식물체의 증산 요구량보다 적을 경우, 식물체의 수분흡수량이 토양 수분량으로 제한되도록 작물의 증산량을 다음과 같이 계산되었다(Woli *et al.* 2012):

$$Tr = \min(AW, ET_0) \quad (1)$$

여기서  $Tr$ ,  $AW$ , 및  $ET_0$  은 각각 토양수분조건에 따른 실제 증산량 ( $\text{mm d}^{-1}$ ), 토양 중 가용수분량 ( $\text{mm d}^{-1}$ ), 및 기준 증발산량 ( $\text{mm d}^{-1}$ ) 이다.  $AW$ 값을 계산하기 위한 과정은 Woli *et al.*(2012)에 나타나있다.

여러 작물이 재배되는 조건에서의 작물 생육을 모의할 수 있도록 Soil 클래스를 설계하였다. 이를 위해 여러 종류의 작물들이 하나의 토양 조건에서 재배되는 경우에, 토양수분 요구량과 흡수량을 각각의 작물별로 처리할 수 있도록 멤버변수들의 자료형을 설정하였다. 특히, 식물체의 수분요구량을 나타내는  $ET_0$  멤버변수와 토양에서 식물체에 공급할 수 있는 수분량을 나타내는 transpiration 멤버변수를 linked list 자료형으로 선언하여 개별 작물 별로 토양 수분 요구량과 공급량을 할당할 수 있도록 설계하였다. Soil 클래스에는 토양수분이 단일층으로 구성된 토양으로부터 공급되도록 설계되었다. 따라서, 여러 작물에 토양수분을 공급하는 방식으로 작물의 바이오매스가 큰 순서로 토양 수분 흡수량의 우선권을 부여하고, 우선권이 높은 작물들 순으로 토양수분이 가용할 때까지 공급하는 알고리즘을 사용하였다.

Plant 클래스는 경험식을 사용하여 식물체 생장을 모의할 수 있도록 설계하였다. 작물모델들은 대개 제한된 자원의 이용효율을 기반으로 작물의 생육을 모의한다(Monteith, 1965; Li *et al.*, 1994; Steduto *et al.*, 2009). 예를 들어, Monteith(1965)는 일사량 중 일부가 작물의 생체중으로 전환된다는 가정하에 광사용효율 계수를 사용하는 경험식을 제안하였다. Li *et al.*(1994)

과 Steduto *et al.*(2009)는 작물 생산성 예측을 위해 각각 질소 사용효율과 물 사용효율에 기반한 작물 생육 모델을 개발하였다.

Plant 클래스는 토양 수분 흡수량을 활용하여 작물 생육을 모의하도록 설계되었다. 작물의 광합성량은 증산량과 비례하기 때문에, 특정일의 잠재 수분흡수량 ( $PWup$ ) 을 활용하여 일별 광합성량을 추정할 수 있다.  $PWup(\text{kg ha}^{-1})$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$PWup = FG \cdot PMWU - W \quad (2)$$

여기서  $PMWU$ 와  $W$  은 각각 작기 중 최대 수분 흡수량 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) 및 작물의 수분함량 ( $\text{kg ha}^{-1}$ )이다. 해당 일의 작물 생육 단계를 나타내는  $FG$ 는Li *et al.* (1994)가 제안한 다음과 같은 방식으로 계산할 수 있다:

$$FG = \begin{cases} 8.878 \cdot FGS^{3.87} & \text{if } FGS < 0.3 \\ -0.660 \cdot FGS + 3.485 \cdot FGS^2 - 0.930 \cdot FGS^3 - 0.899 \cdot FGS^4 & \text{if } FGS \geq 0.3 \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $FGS$ 는 작물의 상대 생육 지수를 나타내며 파종일로부터 해당일까지의 생장도일과 작물의 생육이 완료되는 생장도일의 비로 계산된다.  $PMWU$ 는 한 작기 동안 작물이 흡수할 수 있는 최대 수분량으로 작물별로 특정값을 가지는 모수이다.

Steduto *et al.*(2009)는 잠재 물 생산성 모수를 사용하여 생체중을 추정할 수 있는 모델을 개발하였다. 특히, 작물의 일별 생체중 증가량  $B(\text{kg ha}^{-1})$  추정을 위해 다음과 같은 식을 제안하였다:

$$B = RWC \cdot 10 \cdot TTr/ET_0 \quad (4)$$

여기서  $RWC$ 와  $TTr$  ( $\text{mm d}^{-1}$ )은 각각 잠재 물 생산성과 지표의 피복 정도에 따른 총 증산량값을 나타낸다.

Plant 클래스에서는 지표피복정도에 따른 수분 흡수량 보다는 작물의 생육 정도에 따른 수분 흡수량을 고려하여 작물의 생육을 모의하도록 설계하였다. 토양의 수분이 부족할 경우, 증산량이 제한될 수 있으므로 작물이 흡수할 수 있는 수분량은 수분요구량보다 적을 수 있다. 작물이 실제 흡수할 수 있는 수분량인  $Wup$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ )은 다음과 같이 계산하였다:

$$Wup = \min(pWup, Tr \cdot 10000) \quad (5)$$

여기서  $Tr$  값의 단위가  $mm d^{-1}$  이므로 이를  $kg ha^{-1}$ 로 전환하기 위해 10000을 곱하여  $Wup$ 값을 계산하였다.

Plant 클래스에서는 일별 생체중 증가량을 계산하기 위해 흡수된 수분량이 광합성 산물로 전환되어 각 기관으로 배분된다는 가정하에 작물 생육을 모의하였다. 이삭, 엽 및 엽신, 뿌리의 생체중 증가량은 다음과 같이 계산되었다.

$$B_g = P_g \cdot Wup \cdot RWC \cdot Tr / ET_0 \quad (6)$$

$$B_s = P_s \cdot Wup \cdot RWC \cdot Tr / ET_0 \quad (7)$$

$$B_r = P_r \cdot Wup \cdot RWC \cdot Tr / ET_0 \quad (8)$$

광합성산물이 이삭, 잎 및 뿌리별로 배분되는 계수인  $P_g, P_s, P_r$  값은 Li *et al.*(1994)이 제시한 기관별 분배계수를 사용하였다(Table 1). 특정일의 생체중 증가량  $B$ 는 다음과 같이 정의되었다.

$$B = B_g + B_s + B_r \quad (9)$$

재배관리 시나리오에 따라 작물의 생산성을 모의할 수 있도록 Grower 클래스를 설계하였다. Grower 클래스에서는 약제 살포, 비료 시비 및 관개를 모의하기 위한 spray\_application 클래스, fertilizer\_application 클래스 및 irrigation\_application 클래스의 개체들을 멤버변수로 가지도록 설계되었다. 따라서, 모델 사용자 필요에 따라 다양한 형태의 재배관리 시나리오를 구성할 수 있다. 특히, 관개 설정의 경우, 수자원 여건에 따라 식물체에서 요구되는 수분량의 일부로 제한될 수 있다. 따라서, 관개수량과 시기를 조절하기 위한 멤버변수들을 가지도록 설계하였다.

### 2.3. OpenMI 를 사용한 통합시스템 구현

토양-작물-대기 연속체 모의 시스템을 구축하기 위해, 개별 생태계 요소별로 정의된 클래스들로부터 얻어진 객체들을 연계하여 하나의 시스템으로 통합하였다. 토양, 작물, 및 대기를 나타내는 개별 객체별로 Wrapper 클래스를 구현하였다(Fig. 2). 예를 들어, 간작으로 재배되는 두 작물을 나타내기 위해 Plant

클래스의 객체들을 연결하는 MasterPlant 클래스와 SlavePlant 클래스를 구현하였다. Wrapper 클래스의 멤버함수 중 객체 사이에서 특정 변수값을 교환하기 위해 사용되는 EngineUpdateFromTargets 함수와 EngineUpdateSources 함수를 구현하였다. 예를 들어, Soil 클래스에서 계산된 토양에서 공급 가능한 수분량을 Plant 클래스의 객체와 연결된 Wrapper 클래스에 전달할 수 있도록 EngineUpdateSources 함수를 정의하였다.

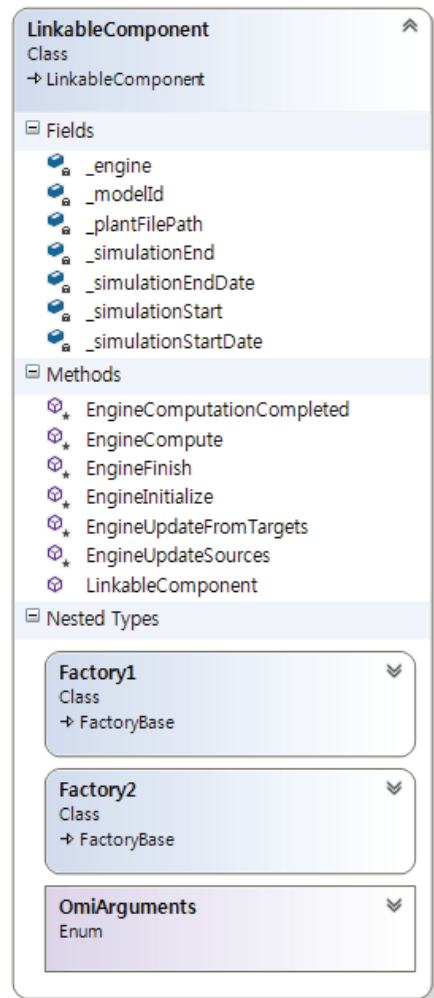
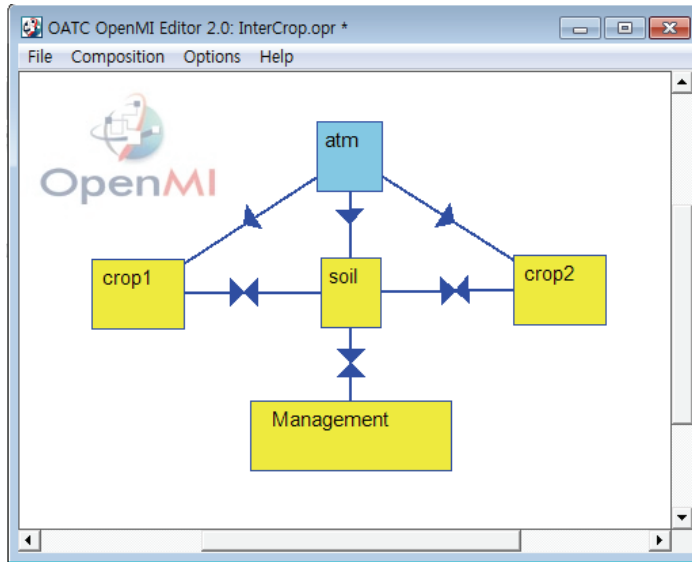


Fig 2. Class diagram of a wrapper class for individual models.



**Fig 3.** Overview of an integrated system to simulate crop growth under intercropping condition. Each box represent objects of wrapper classes for individual models.

The configuration window shows the following details:

- Sources:** srcTMAX, id 0, srcTMIN, id 1, srcTMEAN, id 2, srcSRAD.
- Targets:** tgtTMAX, id 0, tgtTMIN, id 1, tgtSRAD, id 2, tgtRAIN.
- Available Adaptors For Current Selection:**
  - $y = 1 * x + 0$
  - $y = 1 * x + 0$
- Connections:**
  - $\{ srcTMAX, field \} \Rightarrow \{ tgtTMAX, field \}$
  - $\{ srcTMIN, field \} \Rightarrow \{ tgtTMIN, field \}$
  - $\{ srcSRAD, field \} \Rightarrow \{ tgtSRAD, field \}$
  - $\{ srcRAIN, field \} \Rightarrow \{ tgtRAIN, field \}$
  - $\{ srcETO, field \} \Rightarrow \{ tgtETO, field \}$
- Selected Object's:**
  - AdaptedC: [ ]
  - Adaptee: [ ]
  - Argument: [ ]
  - Caption:  $y = 1 * x + 0$
  - Compon: [ ]
  - Consum: [ ]
  - Decorat: [ ]
  - Descript: OATC Modr
  - ElementS: [ ]
  - Exchange: [ ]
  - Factory: atm, Factor
  - Id: Oatc, OpenMI
- AdaptedOutputs:** [ ]

**Fig 4.** Configuration of data exchange between models using a graphical user interface provided by the OATC OpenMI Editor

구현된 Wrapper 클래스들의 객체들을 연결하여 하나의 통합시스템으로 구성하였다(Fig. 3). 예를 들어, 옥수수와 콩의 간작조건에서 작물 생육을 모의하기 위해 사용되는 MastetPlant 클래스와 SlavePlant 클래스로부터 각각 Crop1 객체와 Crop2 객체를 설정하였다. Wrapper 클래스의 객체를 설정할 때 XML형식의 OMI 파일이 사용되었다. Crop1 객체와 Crop2 객체를 다른 Wrapper 클래스의 객체와 연결하기 위해 OpenMI에서 제공되는 GUI(Graphic User Interface)인 OATC OpenMI Editor(v2.0)를 사용하였다. 또한, Wrapper 클래스의 객체 사이에서 요구되는 자료교환 설정을 위해 OATC OpenMI Editor의 자료교환 설정 메뉴를 사용하였다(Fig. 4).

농업생태계의 개별 모델들을 연결하기 위한 Wrapper 클래스를 구현하기 위해 C#을 사용하였다. 객체지향형 컴퓨터 프로그래밍 언어인 C#은 OpenMI를 기반으로 통합시스템을 구축하기 위한 SDK를 개발하기 위해 사용되었다. 따라서 C#을 사용하여 개별 모델들을 구현하였을 때 보다 편리하게 OpenMI 라이브러리 함수들을 활용할 수 있다. 예를 들어, OpenMI는 C나 Fortran 과 같이 다른 컴퓨터 프로그래밍 언어로 구현된 모델들을 지원하는 다양한 함수들을 제공한다(Bulatewicz *et al.*, 2012). 그러나, 객체지향형 모델의 경우 C#과 다른 컴퓨터 프로그래밍 언어가 사용될 때, PInvoke 나 Common Language Infrastructure (CLI)와 같은 추가적인 과정을 거쳐 C#과 호환되는 모듈들을 구현하여야 한다.

#### 2.4. 사례 연구

통합시스템을 사용하여 콩과 옥수수를 동시에 재배하는 간작조건에서 각각의 작물 생육 양상을 모의하였다. Lee *et al.*(1987)은 사료의 품질 제고를 위해 옥수수와 콩을 간작하여 얻어진 수량을 보고하였다. 수원에 위치한 농촌진흥청의 전작시험 포장에서 1985년부터 1986년까지 수행된 실험에서 옥수수와 콩을 간작하였을 때 각각 4975 kg 10a<sup>-1</sup> 와 1598 kg 10a<sup>-1</sup>의 청예수량을 얻었다(Lee *et al.*, 1987). Lee *et al.* (1987)에서 보고된 것과 같이 옥수수와 콩의 수분함량을 62%와 67%로 가정하여 건물중으로 환산하면 1822 kg 10a<sup>-1</sup> 와 527 kg 10a<sup>-1</sup>의 수량이 얻어졌다. 같은 기간 동안 얻어진 옥수수의 종실수량이 849 kg 10a<sup>-1</sup>이었기 때문에 옥수수의 지상부 건물중은 2671 kg 10a<sup>-1</sup> 이었다.

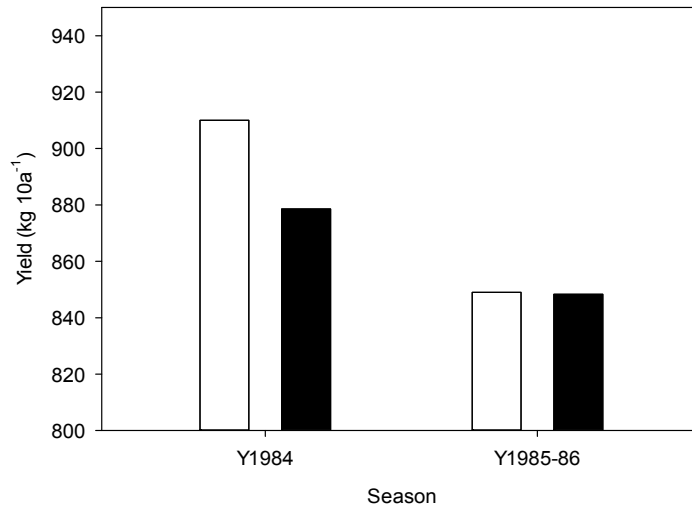
본 연구에서는 동일한 조건에서 옥수수와 콩을 간작으로 재배하였을 때 얻을 수 있는 옥수수와 콩의 수량을 추정하였다. 또한, 관개조건에 따른 수량의 변화를 모의할 수 있도록 작물의 생육에 필요한 수분량을 제한하는 시나리오를 설정하였다. 농업용수 공급이 충분할 경우와 공급량이 부족한 경우를 상정하여 증산량의 100% 와 50% 를 제공하는 시나리오를 설정하였다. 또한, 증산량의 50%에 해당하는 수분을 일주일에만 한번씩 관개하는 시나리오를 설정하였다.

통합시스템에 사용된 모델들의 입력모수들을 문헌으로 보고된 결과들을 활용하여 설정하였다(Table 1). 예를 들어, 농촌진흥청 신품종 보고서에서 보고된 평균적인 수량을 활용하여 작물별 PMWU값을 결정하였다. PMWU 값의 해당 작물의 수량값을 P<sub>g</sub> 값과 RWC

**Table 1.** List of parameters used for simulation of crop growth using water use efficiency

Full name	Parameter	Unit	Corn	Soybean	Soil	reference
Water productivity	RWC	kg ha <sup>-1</sup>	33.7	15		Li <i>et al.</i> , 1994
Allocation rate for grain	P <sub>g</sub>	-	0.3	0.28		Li <i>et al.</i> , 1994
Allocation rate for straw	P <sub>s</sub>	-	0.44	0.44		Li <i>et al.</i> , 1994
Allocation rate for root	P <sub>r</sub>	-	0.26	0.28		Li <i>et al.</i> , 1994
Base temperature	BT	°C	8	6		Raes <i>et al.</i> , 2017
drainage coefficient	DDC	-			0.55	Woli <i>et al.</i> (2012)
water holding capacity	AWC	mm mm <sup>-1</sup>			0.13	Woli <i>et al.</i> (2012)
runoff curve number	RCN	-			65	Woli <i>et al.</i> (2012)
rootzone depth	RZD	mm			400	Woli <i>et al.</i> (2012)
water uptake coefficient	WUC	-			0.096	Woli <i>et al.</i> (2012)





**Fig 5.** Observed and estimated yield of maize. Monoculture of maize was performed in 1984. In 1985 and 1986, maize and soybean were intercropped. Yield in 1985 and 1986 represents the average of maize yield in these two seasons. Empty and solid bars indicate observed and estimated yields of maize, respectively. The observed yield data were obtained from Lee *et al.* (1987).

값으로 나누어 결정할 수 있다. Lee *et al.*(1987)가 사용한 옥수수와 콩 품종은 각각 수원19호와 단엽콩이었으나, 이들 품종에 대한 수량자료가 없어 옥수수의 지역적응 시험의 표준 품종으로 사용되는 단옥 3호의 수량을 사용하였다. 콩의 경우에도 콩 지역적응 시험의 표준품종으로 사용되는 대원콩의 수량자료를 사용하였다. 2010년부터 2012년까지의 평균수량을 사용하여 옥수수와 콩의 최대 수량값을 각각 829 kg 10a<sup>-1</sup>와 249 kg 10a<sup>-1</sup>으로 결정하였다. 또한, 이들 작물의 최대 수량값으로부터 옥수수와 콩의 PMWU값을 각각 820 kg ha<sup>-1</sup>과 593 kg ha<sup>-1</sup>으로 결정하였다.

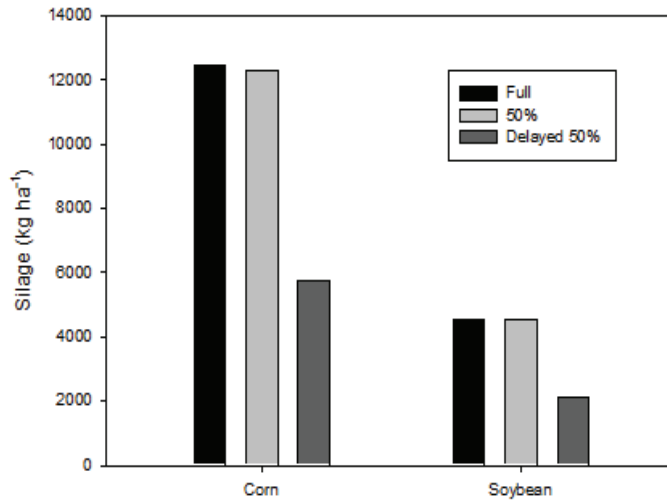
토양 수분 변화를 모의하기 위한 모수들은 Woli *et al.*(2012)가 제안한 모수를 1986년까지의 측정된 일별 기상자료를 수집하였다. 기상자료는 Lee *et al.*(2015)이 보고한 WiseDownloader를 사용하여 DSSAT 모델과 호환되는 기상입력자료를 자동으로 생성하였다. 작물 생육 모의를 위해 사용되는 재식밀도와 파종일과 같은 재배조건은 Lee *et al.*(1987)에서 사용된 설정이 사용되었다. 예를 들어, 옥수수와 콩의 재식밀도는 각각 60x30 cm 및 60x15 cm로 설정되었다.

### III. 결과 및 고찰

통합시스템을 사용하여 옥수수와 콩의 간작조건에서 생산성을 모의한 결과, 관개조건에서 옥수수의 수량 관측값과 유사한 모의값을 얻었다(Fig. 5). 옥수수가 단작으로 재배된 1984년의 경우, 모델로 예측된 수량의 오차율은 3.5% 이었다. 1984년에 옥수수가 간작으로 재배되었을 경우를 가정하여 예측된 수량은 단작에서 얻어진 수량보다 2%가량 적게 추정되었다. 옥수수와 콩이 간작으로 재배된 1985년과 1986년 동안 모델로 예측된 옥수수의 평균 수량 오차는 0.1% 이내였다.

이삭중을 제외한 지상부 건물중의 경우, 관측값보다 과소추정되었다. 특히, 옥수수의 경우 잎과 줄기의 생체중 모의값은 관측값에 비해 약 31% 적게 추정되었다. 옥수수가 수확된 시점에서 같이 수확이 된 콩의 경우, 옥수수 보다는 비교적 작은 과소추정 오차(14%)를 가졌다.

간작조건에서 수분 스트레스에 의한 수량의 변화를 모의하였을 때, 관개 조건에 따라 상당한 지상부 생체중 변이가 모의되었다(Fig. 6). 증산량의 50%을



**Fig 6.** Comparison of silage yield simulated under different irrigation regime. Full and 50% indicate full and partial irrigation condition under which 100% and 50% of evaporated water was supplied daily, respectively. The delayed 50% indicate an irrigation scheme under which 50% of irrigation water was provided once a week.

매일 관개하였을 때, 증산량만큼 관개한 시나리오에 비해 1% 이내의 생체중 감소가 모의되었다. 미미하기는 하였으나 옥수수의 수량이 콩에 비해 더 많이 감소하였다. 반면, 증산량의 50%에 해당하는 수분을 7일에 한번씩 관개하였을 경우에는 상당한 수량 감소가 모의되었다. 옥수수의 경우 56% 이상의 생체중 감소가 모의되었으며, 콩의 경우에는 생체중이 60% 이상 감소하였다. 이러한 생체중 감소 양상은 발조건에서 수분공급이 원활하지 않아 기공 저항이 증가하고, 광합성이 저해되는 현상들이 경험식을 통해 모의되었기 때문으로 판단된다. 비록 대기-작물-토양 연속체에서 발생하는 수분의 이동 및 광합성 과정이 상세하게 모의되지 않았으나, 일반적인 추세를 반영한 생육 모의가 이루어진 것으로 보인다. 후속연구에서 보다 정확한 생육 모의를 위해, 수분조건에 따른 생육 실험 결과들을 반영하여 경험식의 모수들을 개선해야 할 것이다.

본 연구에서 객체 중심의 대기, 토양, 및 작물모델을 사용하여 두 작물 사이의 경합을 모의할 수 있는 통합 시스템을 구축할 수 있다는 것을 보여주었다. 대개 객체 중심의 모델을 사용할 경우, 온톨로지를 기반으로 개발된 모델과 마찬가지로 복잡한 생태계 상호작용을

모의할 수 있는 모델을 구축하기에 유리하다(Volk *et al.*, 2008; Myers *et al.*, 2010; Sui and Maggio, 1999). 본 연구에서 개발된 통합시스템은 단순한 형태의 모델들로 구성되어 있으나, 대기와 토양 및 작물 사이의 상호작용뿐만 아니라, 작물 사이에서의 수분 경합을 모의할 수 있었다. 단순한 모델 대신에 보다 실제적인 작물 생육을 모의할 수 있는 과정 중심의 모델들을 OpenMI를 통해 통합할 경우, 농업 생태계의 상호작용을 고려한 작물 생육 모의를 보다 정밀하게 수행할 수 있을 것이다.

작물 모델 중 간작조건과 같은 하나의 농경지에서 여러 작물들의 생육을 동시에 고려할 수 있는 작물 모델들은 비교적 적은 수에 불과하다. APSIM 모델의 경우, 최대 10개의 작물로 구성된 간작조건에서 작물 생육모의가 가능하다(McCown *et al.*, 1996; Keeting *et al.*, 2003; Chimonyo *et al.*, 2016). Tsubo *et al.*(2005)은 옥수수와 두과류 작물을 동시에 재배하는 간작조건에서 작물 생육 모의가 가능한 모델을 개발하였다. 이들 모델들은 개별적인 작물 생육 모의 시스템 내부에서 간작조건에 따른 작물 생육을 모의하도록 개발되었다. 따라서, 병해충과 같은 다양한 상호작용을 고려한 작물 생육 모의를

하기 위해 추가적인 모듈들이 해당 작물 모델 내에 구현되어야 한다(Whish *et al.*, 2015). 반면, 본 연구에서 개발된 통합 시스템은 독립적으로 구현된 작물 모델들이 OpenMI를 통해 연계된 형태로 구축되었다. 따라서, 병해충 모델과 이를 위한 Wrapper가 구현된다면, 추가적인 작물 모델 모의 시스템의 수정 없이 다양한 병해충과 작물의 상호작용을 고려한 작물 생육 모의가 가능하다.

간작조건에서 작물 생육을 모의할 때 주로 광경합에 따른 작물 성장 양상을 모의한다(Tsubo *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008). 본 연구에서 개발된 모의 시스템은 수분 경합만을 고려하여 작물의 생산성을 모의하였다. 간작조건에서 재식밀도가 높을 경우, 뿌리의 공간적인 분포에 따라 수분의 경합은 광경합 조건보다 상대적으로 낮을 수 있다. 또한, 수광상태가 주요 생육 결정 요인이기 때문에, 광경합을 고려한 모의 체계를 갖출 경우, 보다 신뢰성 높은 작물 생육 모의가 가능하다. 광경합의 경우 두 작물의 간장의 차이에 의해 설명될 수 있다. 후속연구에서 Plant 클래스가 간장과 같은 작물의 생육관련 변수를 Atmosphere 클래스에 전달하여 작물의 수광상태를 계산하는 방식으로 광경합에 따른 작물 생육 모의를 수행할 수 있는 함수가 추가되어야 할 것이다. 또한, 줄기신장과 관련한 모수를 결정하기 위해, 유전적 조건과 환경조건에 따른 간장의 증가율에 관련한 관측자료가 수집되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발된 통합시스템은 옥수수과 콩을 간작 하는 조건에서 작물 생육을 모의한 것이나, 잡초와 작물과의 경합에 따른 생산성의 피해를 모의할 수 있을 것이다. 지금까지 개발된 잡초 경합 모델들은 특정 함수에 잡초의 경합에 따른 효과를 나타내기 위해 경험적인 계수들을 찾는 방식으로 모델들이 개발되어왔다(Kropff and Spitters, 1991). 공간적으로 랜덤하게 분포하고 있다는 점이 다르기는 하나 잡초와 작물과의 경합은 한 경작지 내에서 발생하는 상호작용이다. 따라서, 잡초의 생육을 대표할 수 있도록 작물모델의 모수를 설정한다면, Plant 클래스로부터 잡초 객체를 생성하여 작물과 잡초 사이의 경합을 모의할 수 있을 것이다.

기존에 개발된 과정중심의 작물모델들은 주어진

환경조건에서 보다 세밀한 작물 생육을 모의할 수 있다. 이들 모델을 OpenMI를 통해 다른 농업 생태계 모델과 연계된 통합시스템을 구축하기 위해 객체지향적 컴퓨터 프로그래밍 언어를 사용하여 재구축하는 것이 유리할 것이다. 본 연구에서 개발된 객체지향적 작물 모델은 통합시스템 구축을 염두에 둔 간단한 형태의 모델이기 때문에 추가적인 검증이 필요하다. 특히, 개발된 모델을 검증하기 위해 고품질의 생육자료가 필수적이다. 이러한 생육자료를 확보하기 위해 상당한 기간동안의 생육조사가 필요하다. 반면, 우리나라의 경우, 장기간에 걸쳐 얻어진 작물 생육 자료들이 데이터베이스의 형태로 구축되어 있는 사례가 드물기 때문에 새로운 작물모델을 개발하는 것에 상당한 제약이 따른다. 기존에 개발되었던 작물모델들은 비교적 많은 작물에 대한 모수들이 결정되었기 때문에, 추가적인 관측자료에 대한 요구도가 상대적으로 낮다. 반면, 대부분의 작물모델들이 Fortran으로 구현되어 있어, 객체 중심으로 설계가 되어있지 않다. 이들 소스 코드를 분석하여 C++과 같은 객체지향적 언어를 사용하여 작물모델을 구축하는 역설계 기법을 활용할 경우 추가 검증없이 작물모델을 구현할 수 있으며, OpenMI와 호환될 수 있는 작물모델들을 구축할 수 있을 것이다.

작물의 성장을 보다 현실적으로 모의하기 위해, Plant 클래스를 식물체의 형태적 단위인 phytomer 단위로 모의할 수 있도록 설계하는 것이 유리할 것으로 보인다. 예를 들어, 개별 기관의 기능과 구조의 원형을 대표하기 위해 Organ 클래스를 우선 설계한 후, Organ 클래스로부터 Leaf, Stem, Root, 및 Seed 클래스들을 파생시켜 잎, 줄기, 뿌리 및 종자를 대표하는 클래스를 설계할 수 있다. Phytomer 클래스에는 이들 각기관별 클래스를 멤버변수로 포함하고 Phytomer 클래스를 linked list 형태로 정의된 Plant 클래스의 멤버변수로 정의한다면 기존의 Plant 클래스를 최소한으로 변경하면서, 식물체의 성장을 상세히 모의할 수 있는 클래스를 설계할 수 있을 것이다. 추후 연구에서는, Plant 클래스에 생육이 진행됨에 따라 Phytomer 클래스의 인스턴스가 증가하는 방식으로 생육을 모의할 수 있도록 개선되어야 할 것이다.

## 적 요

농업생태계의 복잡한 상호작용을 고려하여 작물생육을 모의하기 위해 객체지향형 작물모델을 개발하였다. 대기, 작물, 토양 및 재배관리를 대표하는 Atmosphere 클래스, Plant 클래스, Soil 클래스, Grower 클래스가 설계되었다. 또한, 이들 클래스들이 구현된 객체들을 하나의 시스템으로 연계하여 통합시스템을 구축하였다. 사례연구로써, 농촌진흥청 본원의 전작시험포장에서 1985년부터 1986년까지 수행된 실험에서 얻어진 옥수수과 콩의 수량 관측자료와 통합시스템으로 모의된 결과값을 비교하였다. 단작과 간작조건에서 통합시스템으로 예측된 옥수수의 수량은 4% 이내의 낮은 오차율로 모의되었다. 이삭중을 제외한 지상부 건물중의 경우, 옥수수과 콩의 관측값보다 과소추정되는 경향이 있었다. 예를 들어, 옥수수의 경우 잎과 줄기의 생체중 모의값은 관측값에 비해 약 31% 적게 추정되었다. 옥수수가 수확된 시점에서 같이 수확이 된 콩의 경우, 옥수수 보다는 비교적 작은 과소추정 오차를 가졌다. 비록 간단한 형태의 모델들로 구성되었으나, 이러한 모델을 활용하여 복잡한 상호작용을 모의할 수 있는 통합시스템이 개발될 수 있다는 것을 보여주었다. 추후 연구에서, 보다 상세한 작물 생육 모의를 위해 기존의 과정중심의 작물 모델을 역설계하여 통합시스템을 구축하는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료되었다.

## 감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호 PJ010865052016)의 지원에 의해 이루어진 것임

## REFERENCES

- Basso, B., J. T. Ritchie, F. J. Pierce, R. P. Braga, and J. W. Jones, 2001: Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems* **68**(2), 97-112.
- Bouman, B. A. M., and H. H. van Laar, 2006: Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems* **87**(3), 249-273.
- 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.
- 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.
- Chimonyo, V. G. P., A. T. Modi, and T. Mabhaudhi, 2016: Simulating yield and water use of a sorghum-cowpea intercrop using APSIM. *Agricultural Water Management* **177**, 317-328.
- Gregersen, J. B., P. J. A. Gijsbers, and S. J. P. Westen, 2007: OpenMI: Open modelling interface. *Journal of Hydroinformatics* **9**(3), 175pp.
- 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.
- Irmak, A., J. W. Jones, W. D. Batchelor, and J. O. Paz, 2001: Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. *Transactions of the ASAE* **44**(5), 1343-1353.
- 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.
- 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.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, D. Holzworth, N. I. Huth, J. N. G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J. P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K. L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R. L. McCown, D. M. Freebairn, and C. J. Smith, 2003: An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* **18**(3-4), 267-288.
- 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 condition. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141. (in Korean with English abstract)
- 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, K. S., H. Kim, B. Y. Lee, C. K. Lee, and J. Kim. 2015: 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, M. Seo, B. Yoo, and K. S. 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**(4), 257-264.
- Kropff, M. J., and C. J. T. Spitters, 1991: A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research* **31**(2), 97-105.
- 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, 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, S. Y., C. K. Hong, H. B. Lee, D. Y. Kim, S. K. Ha, S. K. Han, B. L. Huh, and S. B. Kim, 1987: Intercropping with soybean and cowpea for increasing feed value of corn stover. *Journal of Korean Society of Crop Science* **32**(2), 144-150. (in Korean with English abstract)
- Li, C., S. Frolking, and R. Harriss, 1994: Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles* **8**(3), 237-254.
- Lobov, A., J. L. M. Lastra, and R. Tuokko, 2005: Application of UML in plant modeling for model-based verification: UML translation to TNCES. *3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics(INDIN)*, Perth, WA, Australia, 495-501.
- McCown, R. L., G. L. Hammer, J. N. G. Hargreaves, D. P. Holzworth, and D. M. Freebairn, 1996: APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems* **50**(3), 255-271.
- Monteith, J. L., 1965: Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany* **29**(1), 17-37.
- 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.
- Myers, T. S., I. Atkinson, and R. Johnstone, 2010: Supporting coral reef ecosystems research through modelling a reusable ontology framework. *Applied Artificial Intelligence* **24**, 77-101.
- Peckham, S. D., E. W. H. Hutton, and B. Norris, 2013: A component-based approach to integrated modeling in the geosciences: The design of CSDMS. *Computers & Geosciences* **53**, 3-12.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres, 2017: AquaCrop, Version 6.0. Reference Manual. FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, 2009: AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal* **101**(3), 426-437.
- Sui, D. Z., and R. C. Maggio, 1999: Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems* **23**(1), 33-51.
- 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.
- Tsubo, M., S. Walker, and H. O. Ogindo, 2005: A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions. *Field Crops Research* **93**(1), 10-22.
- Volk, M., J. Hirschfeld, A. Dehnhardt, G. Schmidt, C. Bohn, S. Liersch, and P. W. Gassman, 2008: Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Ecological Economics* **66**(1), 66-76.
- White, J. W., G. Hoogenboom, B. A. Kimball, and G. W. Wall, 2011: Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research* **124**(3), 357-368.
- Woli, P., J. W. Jones, K. T. Ingram, and C. W. Fraisse, 2012: Agricultural reference index for drought (ARID). *Agronomy Journal* **104**, 287-300.

- Whish, J. P. M., N. I. Herrmann, N. A. White, A. D. Moore, and D. J. Kriticos, 2015: Integrating pest population models with biophysical crop models to better represent the farming system. *Environmental Modelling & Software* **72**, 418-425.
- 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.
- Zhang, L., W. van der Werf, L. Bastiaans, S. Zhang, B. Li, J. H. J. Spiertz, 2008: Light interception and utilization in relay intercrops of wheat and cotton. *Field Crops Research* **107**(1), 29-42.