

## ORYZA2000 모델에 기반한 격자형 벼 생육 모의 지원 시스템 개발

현신우<sup>1</sup> · 유병현<sup>1</sup> · 박진유<sup>3</sup> · 김광수<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 식물생산과학부, <sup>2</sup>서울대학교 농림기상협동과정, <sup>3</sup>서울대학교 농업생명과학연구원  
(2017년 10월 30일 접수; 2017년 11월 16일 수정; 2017년 11월 20일 수락)

### Development of a Gridded Simulation Support System for Rice Growth Based on the ORYZA2000 Model

Shinwoo Hyun<sup>1</sup>, Byoung Hyun Yoo<sup>1</sup>, Jinyu Park<sup>3</sup> and Kwang Soo Kim<sup>1,2,3\*</sup>

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

<sup>2</sup>Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>3</sup>Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received October 30, 2017; Revised November 16, 2017; Accepted November 20, 2017)

#### ABSTRACT

Regional assessment of crop productivity using a gridded simulation approach could aid policy making and crop management. Still, little effort has been made to develop the systems that allows gridded simulations of crop growth using ORYZA 2000 model, which has been used for predicting rice yield in Korea. The objectives of this study were to develop a series of data processing modules for creating input data files, running the crop model, and aggregating output files in a region of interest using gridded data files. These modules were implemented using C++ and R to make the best use of the features provided by these programming languages. In a case study, 13000 input files in a plain text format were prepared using daily gridded weather data that had spatial resolution of 1km and 12.5 km for the period of 2001-2010. Using the text files as inputs to ORYZA2000 model, crop yield simulations were performed for each grid cell using a scenario of crop management practices. After output files were created for grid cells that represent a paddy rice field in South Korea, each output file was aggregated into an output file in the netCDF format. It was found that the spatial pattern of crop yield was relatively similar to actual distribution of yields in Korea, although there were biases of crop yield depending on regions. It seemed that those differences resulted from uncertainties incurred in input data, e.g., transplanting date, cultivar in an area, as well as weather data. Our results indicated that a set of tools developed in this study would be useful for gridded simulation of different crop models. In the further study, it would be worthwhile to take into account compatibility to a modeling interface library for integrated simulation of an agricultural ecosystem.

**Key words:** Rice yield, ORYZA2000, Gridded simulation, Input data, Output data



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

## I. 서 언

작물 생육 모델들은 주어진 기상 및 토양조건에 따른 작물 생산성을 예측하기 위해 사용되어 왔다(Kim *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2010; Xiong *et al.*, 2008). 예를 들어, Basso *et al.*(2001)은 콩의 생육모델인 CROPGRO 모델을 활용한 정밀농업기술에 대해 제안하였다. 또한, van Oort *et al.*(2015)는 벼 재배 시 발생할 수 있는 기후위험도 분석을 위해 ORYZA2000 모델을 사용하였다. 또한, 예측된 작물 생산성의 변동양상을 파악하여 실제 포장실험을 거치지 않고도 해당 지역에서의 최적의 재배관리 방식을 파악할 수 있다(Royce *et al.*, 2001).

작물 모델은 대개 지역단위보다는 지점단위에서 작물 생산성을 예측할 수 있도록 개발되었다. 반면, 작물 생산성의 시공간적 변동성을 예측하기 위해 지역내의 모든 격자점을 대상으로 작물 모델들이 사용될 수 있다(Angulo *et al.*, 2013; Xiong *et al.*, 2008). 이러한 경우, 작물 모델의 입력자료와 출력자료를 격자단위로 처리하기 위한 도구가 필요하다. 예를 들어, Elliott *et al.*(2014)은 격자단위에서 기존의 작물 모델을 구동하기 위해 격자 형식의 기상 및 토양 자료로부터 입력자료를 지점별로 생성하는 시스템을 구축하였다. 또한, 이 시스템에는 지점단위의 출력자료를 격자 형식으로 취합하는 모듈이 탑재되었다. 결국, 기존 모델을 변형시키지 않고 지점단위의 예측을 반복적으로 수행하여 공간적 작물 생산성 예측 자료를 생산하였다.

국내에서 작물 모델을 사용하여 공간적인 생산성 예측을 수행한 연구에서는 대개 특정 지점에서의 예측값을 공간내삽하여 계산하는 것이 일반적이다(Lee *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015). 그러나, 공간내삽을 활용한 지역적인 작물 생산성 예측은 한계가 있다. 특히, 작물 생산성의 분포는 품종과 재배관리 조건의 공간적 변화가 큰 지역 내에서는 공간내삽의 기본적인 가정인 생산성이 공간적 연속성을 가진다는 가정을 충족시키는 어렵다. 반면, 격자형식의 벼 생육을 예측할 경우, 단순히 수량의 변화를 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 농가별 최적의 재배관리 방식을 탐색할 수 있다. 또한, 이러한 정보를 활용하여 토지 이용의 최적화를 가능하게 한다.

국내를 대상으로 비교적 많은 종류의 격자형 기상자료와 토양자료가 사용되고 있기 때문에, 이들 자료를 사용하여 격자별 작물 생산성을 예측할 수 있다.

예를 들어, 고해상도의 토양자료를 제공하는 흙토람과 연계되어 공간적인 벼 생산성 예측이 사용될 수 있다. 그러나, 국내에서 지점별로 구동되는 작물 모델들을 사용하여 격자단위에서 작물 생육을 모의할 수 있도록 지원하는 격자형 자료 처리 체계가 보고된 바 없다. 특히, 우리나라 주요 작물인 벼의 공간적 생산성 예측은 정책 결정 및 재배관리에 활용도가 높을 수 있으나 이를 위한 ORYZA 모델 기반의 작물 생육 모의 체계가 개발되지 않았다.

본 연구에서는 격자형식의 입력자료를 사용하여 ORYZA 모델을 구동할 수 있는 모듈들을 개발하고, 이를 활용하여 지역단위에서 벼 생산성을 추정할 수 있는 시스템을 개발하고자 하였다. 이러한 시스템이 사용될 경우, 특정 지점에서의 기상자료와 토양자료를 활용하여 해당 지점에 적절한 시비관리 방식을 추정할 수 있다. 특히, 시비관리가 어려운 유기물 사용의 최적 시나리오를 찾기 위해, 격자형 벼 생산성 예측시스템이 활용될 수 있다.

## II. 격자형 구동시스템의 설계 및 구현

### 2.1. ORYZA2000 모델의 입출력 자료 분석

ORYZA2000 모델은 기상, 토양, 품종 및 재배관리를 설정한 입력파일들이 사용된다. 기상입력자료로는 기상관측소의 위치 정보와 일사량 추정을 위한 모수가 포함된다(Table 1). 예를 들어, 일사량자료 대신 일조 시간 자료를 사용하게 되면 Angstrom-Prescott 계수를 사용하여 일사량을 자동으로 계산이 된다(Hyun and Kim, 2016). 만약, 일사량 자료를 사용하게 되면 Angstrom-Prescott 계수가 0으로 설정된다. 또한, 벼 생육 모의가 될 수 있는 기간 동안의 일별 기상자료가 기상입력파일에 포함된다.

ORYZA2000 모델을 구동하기 위해 토양, 재배관리 및 품종 설정을 위해 각각 독립적인 설정파일이 사용된다(Bouman *et al.*, 2001). 토양파일의 경우, 토양수분이 제한적일 경우에만 토양파일에 수록된 토양모수들이 사용된다. 예를 들어, 수분제한조건 옵션이 선택되면 토양층별 깊이, 최대용수량, 투수 계수와 같은 토양수분과 관련된 모수들이 사용되어 토양-작물대기 연속체 내에서의 수분이동이 모의된다. 재배관리 설정파일에서는 우선 수분 제한조건 또는 질소 제한조건을 설정하게 된다. 또한, 파종일, 육묘기간, 재식밀도 등 기본적인 재배관리에 대한 정보가 사용이 되고,

**Table 1.** Parameters and variables of weather input data for ORYZA2000 model

Category	Variable	Unit
Header	Longitude	°
	Latitude	°
	Altitude	m
	Anga*	-
	Angb*	-
Data	Station number	-
	Year	-
	Day	-
	Irradiance or Sunshine duration	KJ /m <sup>2</sup> or h
	Minimum temperature	°C
	Maximum temperature	°C
	Vapor pressure	kPa
	Mean wind speed	m/s
	Precipitation	mm

\* Anga and Angb indicate the Angstrom-Prescott coefficient A and B, respectively.

수분 제한조건에서 사용되는 관개관리에 대한 정보, 질소 제한조건에서 사용되는 시비관리에 대한 정보가 사용이 된다. 벼 생육의 특성을 나타내기 위한 품종모수는 독립적인 설정파일에 저장된다. 예를 들어, 기관별 동화산물 분배계수, 생육단계별 성장속도 등 품종별로 달라지는 특성들이 모수로 사용된다.

ORYZA2000 모델의 출력자료는 2개의 파일로 나뉘어 저장된다. 이 중 하나의 파일에는 모의 결과가 요약된 자료가 저장되며, 수량, 등숙률, 기관별 최대 무게, 출수기, 수확일 등에 대한 변수가 포함된다. 다른 파일에는 모의를 하는 동안의 일별 모의 결과 자료가 저장된다. 저장이 되는 변수로는 일별 생육량, 질소 동태, 증발산량, 생육단계 등이 포함된다. 또한, 사용자가 출력 변수의 종류나 출력자료의 시간해상도를 설정할 수 있다.

## 2.2. 격자별 입력자료 생성 모듈 설계

격자단위에서 ORYZA2000 모델의 구동을 위해 필요한 입력자료를 생성할 수 있는 모듈을 설계하였다 (Fig. 1A). 고해상도 격자자료를 사용할 경우, 농경지에 해당하는 격자를 대상으로 입력자료를 생성하는 것이 효율적이다. 또한, 주어진 위도와 경도에 해당하는

격자들을 대상으로 입력자료를 생성하는 기능이 추가된다면 효율적으로 사용될 수 있다. 이러한 입력자료 생성을 위한 요구도를 만족할 수 있도록 격자형 입력자료 처리 모듈을 설계하였다. 우선, 토지 피복자료를 사용하여 특정 격자들만을 대상으로 입력자료를 생성하도록 설계하였다. 또한, 토지 피복자료 대신 관심 지점들을 모아 생성된 피복자료를 사용하여 특정 위치에서 입력자료를 생성하는 기능을 지원한다.

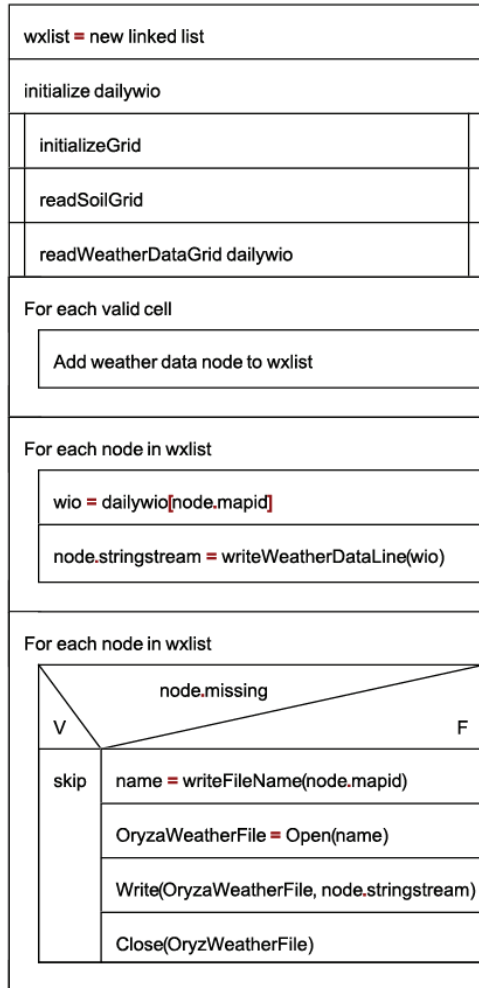
격자형식의 자료들은 대개 일정한 투영법에 따라 자료가 저장된다(Yoo and Kim, 2017). 다양한 형식의 투영법을 가진 격자자료를 지원하기 위해, 독립적인 투영법 처리 기능을 구현하기 보다 기존의 격자자료 처리 도구를 활용하여 ORYZA2000 모델을 위한 격자형 입력자료 처리 모듈을 설계하였다. 예를 들어, Yoo and Kim(2017)은 지역단위의 기후변화 시나리오 자료인 CORDEX 자료를 처리할 수 있도록 CDSL (CORDEX Data Support Library)을 개발하였다. CDSL의 경우 수치기상모델에서 널리 사용되는 NetCDF나 binary grid 파일 형식 자료를 읽을 수 있어, 다양한 격자자료 처리를 위해 범용적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 CDSL을 기반으로 격자형 기상자료를 처리할 수 있도록 설계하였다.

일정 지역 내에 다수의 입력파일들이 생성되어야 하므로, 구동 대상 지점을 나타낼 수 있는 코드체계가 구축되어야 한다. 이러한 코드 체계들이 격자별 ORYZA2000 모델 구동 모듈과 연계되어야 하기 때문에, 간단한 형식의 코드체계를 사용하는 것이 유리하다. 토지 피복자료를 사용하여 구동대상 격자만이 처리되므로 유효한 격자들의 순서를 해당 격자점의 코드로 지정하는 단순한 코드체계를 설계하였다. 또한, 이러한 코드들이 생성된 입력파일의 파일이름에 포함되도록 설계하였다.

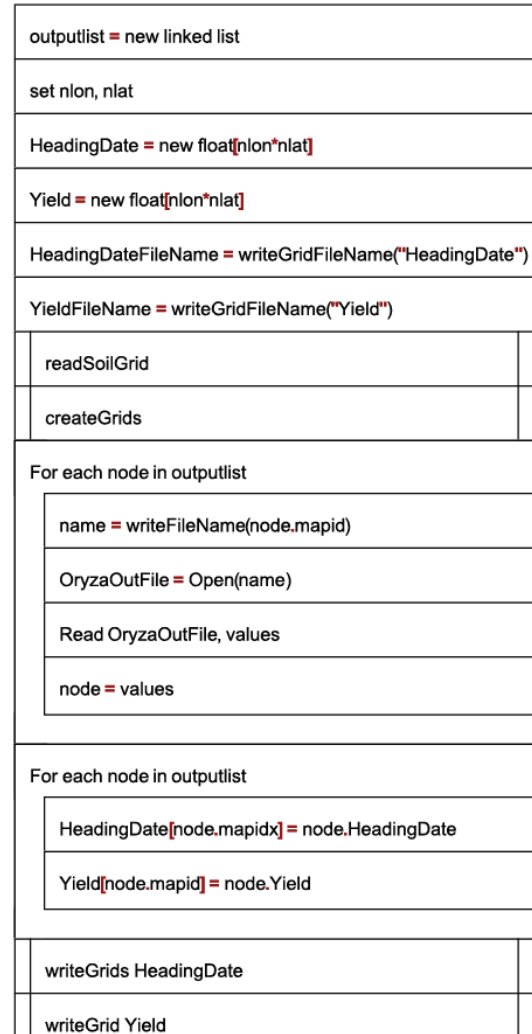
ORYZA2000 모델의 입력자료는 일사량을 포함하고 있으나 고해상도 격자자료에는 대개 일별 일사량이 포함되지 않는다. 일사량 자료가 사용될 수 없을 경우에는 Samani(2000)이 제안한 방식에 따라 최고온도와 최저온도 자료를 사용하여 일사량을 추정할 수 있는 함수를 격자형 입력자료 처리 모듈에 포함시켰다. 만일, 격자형 일사량 자료가 사용 가능할 경우, 이들 자료를 활용할 수 있도록 설계되었다.

기상자료의 경우, 격자별 시계열 자료가 생성되어야 한다. 따라서, 모델의 구동 대상 기간 동안 격자자료를 처리할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 고해

(A) prepareOryzaWeatherFile



(B) aggregateOutputs



**Fig. 1.** Nassi-Shneiderman diagram of functions to prepare weather input files for Oryza 2000 model from gridded weather files (A) and to aggregate outputs of Oryza 2000 model into gridded outputs (B).

상도 기상 격자자료의 경우, 대개 일단위로 일정한 형식의 파일에 저장된다. 이들 파일들을 주어진 규칙에 따라 파일이름을 만들어낼 수 있는 함수를 정의하였다. 또한, 일별 기상자료 생성을 위해 ORYZA2000 모델의 모든 기상입력변수를 저장할 수 있는 자료형을 가진 구조체 변수를 사용하는 것이 유리하다. 특히, 이러한 구조체 변수를 사용할 경우, 개별 변수들을 처리하는 것보다 모듈 간의 자료 교환을 쉽게 할 수 있다. 또한, 모든 격자에 대한 정보를 저장하기 위해 배열 형식의 자료구조를 사용하였다.

모든 격자를 대상으로 기상입력파일을 생성하기 위해 파일의 입출력 과정을 분리하여 처리기능을 수행할 수 있도록 설계하였다. 우선, 각 격자별로 메모리상에 파일 내용을 저장할 수 있는 문자열 스트림(string stream)을 사용하였다. 문자열 스트림에는 개별적인 기상변수값들이 기상입력자료 형식에 맞추어 메모리에 저장되도록 하였다. 모든 격자를 대상으로 전체 모의대상 기간 동안 기상입력자료의 내용이 메모리에 저장되면 각 격자별로 텍스트 형식의 입력파일을 출력시키도록 알고리즘을 구성하였다.

### 2.3. 격자단위의 ORYZA2000 모델 구동 모듈의 설계

격자별 입력자료 생성 모듈을 통해 얻어진 입력자료를 이용하여 ORYZA 모델을 구동할 수 있는 모듈을 설계하였다. ORYZA2000 모델을 구동하기 위해 여러 종류의 설정파일들이 필요하다. 특히, control.dat 파일의 경우, 여러 입력파일들의 경로를 지정하기 위해 사용된다. 특별히 지정된 디렉토리에서 ORYZA2000 모델을 구동할 경우, 이러한 설정파일을 변경할 필요가 없어, 간단한 형태의 격자형 모델 구동 시스템을 구축할 수 있다.

ORYZA2000 모델에서 지정할 수 있는 파일이름의 글자수가 제한적이기 때문에, 파일 경로가 복잡한 구조를 가진 컴퓨터에서는 효율적이지 못하다. 따라서, 비교적 단순한 형태의 디렉토리 구조를 가진 조건에서 ORYZA2000 모델을 구동할 수 있도록 설계하였다. 우선, ORYZA2000 모델이 모델 구동 전용 디렉토리에서 사용될 수 있도록 하였다. 작업공간으로 사용되는 디렉토리의 이름크기를 최소화 하기 위해, 작물모델 구동에 필요한 파일들이 저장되는 디렉토리를 상위에 위치하도록 하였다.

격자별로 생성되는 기상입력파일과 출력파일을 작업 디렉토리와 저장용 디렉토리 사이에서 이동시켜 작물 모델을 구동시키는 알고리즘을 설정하였다. 기상자료와 출력자료의 파일이름은 설정파일에 지정되어 있다. 따라서, 격자별로 생성된 기상자료가 저장되어 있는 디렉토리로부터 작업 디렉토리로 기상입력파일을 복사하였다. 모델 구동으로 생성되는 출력자료의 이름이 항상 동일하기 때문에, 매번 모델 구동 후 출력자료를 이동시켜 따로 정리하도록 설계하였다. 이 과정들의 편의성을 위해 기상입력자료를 위한 위치, 모델구동을 위한 위치, 및 출력자료를 위한 위치를 따로 설정하였다.

### 2.4. 격자형 출력자료 생성 모듈의 설계

격자단위로 얻어진 ORYZA2000모델의 출력자료를 하나의 격자형 파일로 변환하기 위한 모듈을 설계하였다. 격자형 파일로 저장될 ORYZA 모델의 출력변수들은 연구자의 필요에 의해 다르게 선택될 수 있다. 따라서, 출력파일을 생성하는 함수들이 변수별로 처리가 가능하도록 설계하였다. 예를 들어, 출력파일을 생성하고, 격자별로 모아진 자료를 해당 파일에 저장하는 함수를 각각 정의하고 이들 함수를 사용하여 격자형식

의 출수기 및 수량파일을 생성할 수 있도록 하였다.

격자 형식의 출력자료를 생성하기 위해 격자 단위에서 얻어진 출력자료들을 처리하기 위한 함수들을 정의하였다(Fig. 1B). ORYZA 모델을 격자단위로 구동하여 얻어진 출력자료들은 입력자료를 생성할 때 사용되었던 격자 코드별로 파일이름이 지정된다. 따라서, 이들 텍스트 파일을 차례로 읽어 배열 자료형을 가진 변수에 저장한 후, 격자형 파일로 출력하는 알고리즘을 사용하였다. 또한, 격자 단위로 입력자료를 생성하기 위해 사용된 피복자료를 출력모듈에서도 읽어 격자별로 얻어진 파일들의 위치를 구분하는 기능을 갖도록 하였다. 출력파일의 형식은 기상분야에서 주로 사용되는 격자 파일 형식인 NetCDF 파일형식을 지원할 수 있도록 설계되었다.

### 2.5. 격자별 구동 시스템의 구현

효율적인 격자별 구동시스템을 구현하기 위해 입력자료 처리, 출력자료 처리 및 구동 모듈별로 각각 구현하였다. 특히, 모듈의 기능에 따라 각각의 프로그래밍 언어를 사용하여 구현하였다. 격자별 입력자료 처리 모듈과 출력자료 처리 모듈의 경우, 자료를 처리하는데도 상당한 시간이 소요되며, 복잡한 자료형을 가진 자료를 처리하여야 한다. 따라서, 고도의 최적화를 통해 처리속도를 높일 수 있을 뿐만 아니라, 복잡하고 대용량을 가진 자료를 신속하게 처리할 수 있는 프로그래밍 언어를 사용하는 것이 유리하다.

격자별 입력 및 출력자료 처리 모듈의 구현을 위해 C++을 사용하였다(Fig. 2). C++의 경우, 개발자가 복잡한 형식을 가진 구조체 변수를 선언하고 동적인 메모리를 할당하는 것이 가능하다. 또한, Standard Library Template을 활용하여 linked list와 같이 동적인 자료구조를 손쉽게 구현할 수 있도록 지원하기 때문에, 격자자료와 같이 자료의 크기가 정해지지 않은 경우에 효율적인 자료처리 모듈을 구현할 수 있다.

지점단위로 ORYZA2000 모델을 구동하였을 때, 구동상의 오류가 발생하였을 경우, 모델을 사용하는 연구자가 관리를 할 수 있다. 반면, 격자단위로 모델을 구동하였을 때 오류가 발생하였을 경우, 전체적인 구동시스템에 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 특정 기상입력자료가 사용되었을 때, ORYZA2000 모델이 무한반복에 빠져드는 경우가 종종 발생한다. 이러한 특별한 경우를 처리하지 않으면, 격자형 작물모델 구동을 위해 상당한 시간이 소요되더라도 정상적인 결과

(A)

```
// write buffer
fiter = filelist.begin();
for (; fiter != filelist.end(); fiter++)
{
    wio = &dailywio[fiter->id];
    if (wio->tmax < -999 || wio->tmin < -999)
        fiter->missing = 1;
    *(fiter->printer) << getOryzaWxLine(fiter->mapidx
                                        , yrday - nAverage*1000
                                        , wio
                                        , delim)
                                << endl;
}
wio = NULL;
```

(B)

```
void extractBaseline(oz_ecoset_type* ecoset
                    , int nlat, int nlon
                    , list<ipwx_node>& filelist)
{
    int npad = nlat * nlon;
    loadOZOut(ecoset);
    createGrids(ecoset, nlat, nlon);
    transfer(ecoset);
    writeGrids(ecoset, npad, nlon);
    searchNotSuitable(ecoset, filelist);
    writeNotSuitableCells(ecoset);
    deleteGrids(ecoset);
}
```

**Fig. 2.** Implementation of input data processing modules (A) and output data processing modules (B).

를 얻을 수 없다. 따라서, 독립적인 쓰레드에 ORYZA2000 모델을 구동시키고, 이 쓰레드의 사용시간을 관리할 수 있는 프로그래밍 언어를 사용하는 것이 필요하다.

ORYZA2000 모델의 격자별 구동 시스템을 구현하기 위해 쓰레드의 관리를 지원하는 함수들을 제공하고 있는 스크립트 기반의 통계 분석용 프로그래밍 언어인 R(v3.3.1)을 사용하였다. 격자별 구동 시스템은 다음과 같이 모델 구동을 위한 준비과정, 기상자료 복사 및 모델 구동, 출력자료 정리의 순서를 거치게 된다 (Fig. 3). 우선, 파일들이 위치할 경로를 설정하였다. 각각의 폴더 경로를 변수에 저장하고, 모델구동을 위해 작업위치를 ORYZA 실행파일이 있는 곳으로 설정을 하였다. `list.files` 함수를 사용하여 얻어진 모든 기상자료에 대해 `for` 반복문을 사용하여 모델을 구동하였다. 기상자료를 모델 구동 위치로 복사하기 위해 `file.copy` 함수를 사용하였으며, 기상자료의 이름은 재배관리 자료에 설정되어 있는 이름으로 변경하였다. 이미 존재하고 있는 파일을 덮어쓰기 위해 `overwrite=T` 옵션을 추가하였다.

ORYZA를 구동하기 위해서는 `system` 함수를 사용하였다. `system` 함수는 모델이 정상적으로 구동이 될

경우에만 0값을 반환한다. 따라서, 모델 구동 이후 얻어진 반환값을 얻어, 특정 지점에 오류가 발생했는지의 여부를 전체적인 시스템 구동 흐름에 영향을 주지 않고 확인할 수 있다. 또한, 모델 내에서 무한반복에 빠져들게 되면 이 역시 모델 구동이 종료되지 않아 격자자료 처리에 상당한 시간이 소요될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 일정 시간을 초과할 경우 자동적으로 프로세스를 종료하도록 구현하였다. 이러한 기능들을 위해 R에 기본적으로 내장되어 있는 `tryCatch` 함수, R.utils 패키지(v2.4.0)에 내장되어 있는 `evalWithTimeout` 함수, 그리고 `tools` 패키지(v3.3.1)에 내장되어 있는 `pskill` 함수를 사용하였다.

모델이 정상적으로 구동되었을 때와 오류가 발생하여 정상적인 구동이 되지 않았을 때를 구분하여 출력자료를 달리 처리하였다. 모델이 정상적으로 구동되었을 경우 생성된 출력자료를 결과폴더에 복사하도록 하였고, 정상적으로 구동이 되지 않은 경우 기본 출력자료와 형식은 동일하지만, 모든 결과 값이 NA로 설정되어 있는 파일을 결과파일 디렉토리로 복사하도록 하였다. 이때, 기상입력자료와 동일한 이름을 가지도록 격자형 출력자료의 이름을 변경하였다.

```

library(tools)
library(R.utils)

wth_dir<-"weather directory"
mod_dir<-"model directory"
out_dir<-"output directory"

setwd(mod_dir)
wth_list<-list.files(wth_dir)

for(i in 1:length(wth_list)){
  # copy weather file
  from<-paste(wth_dir, wth_list[i], sep="")
  to<-paste(mod_dir, "wth_filename", sep="")
  file.copy(from, to, overwrite=T)

  # run model
  err<-tryCatch(expr=
    evalWithTimeout(
      system("ORYZA2000.exe"),
      timeout=10),
    TimeoutException=
      function(ex){
        strsplit(
          grep("ORYZA2000|oryza2000",
            system("tasklist", intern=T),
            value=T),
          " +")[[1]][2]->pid;
        pskill(as.integer(pid));
      }
  )

  # copy output file
  if(is.na(a)){
    from<-"na.dat"
  } else if(err == 0) {
    from<-"op.dat"
  } else {
    from<-"na.dat"
  }
  to <-paste(out_dir, wth_list[i], sep="")
  file.copy(from, to, overwrite=T)
}

```

Fig. 3. Script for gridded model running.

## 2.6 격자형 모의 설정 및 구동

격자형 모델 구동 시스템 구축 및 검증을 위해 다양한 형식의 격자자료를 사용하여 공간적 벼 생육모의를 수행하였다. 또한, 후처리 기능을 적용하여 격자형 자료의 추가 분석의 용이성을 검토하였다. 격자형 기상 자료는 각각 1 km 해상도와 12.5 km 해상도를 가진

기상청 기후변화 시나리오자료와 CORDEX-EAST ASIA 자료를 사용하였다. 벼 생육 모의를 위한 재배 관리 조건을 설정하기 위해 관행적 사용 조건을 사용하였다. 예를 들어, 시비조건을 설정하기 위해 표준시비량인 9 kg N/10a을 사용하였다. 격자형식으로 얻어진 출력자료의 추가적인 분석을 위해 평지에서의 벼 생산성 자료를 추출하는 과정을 거쳤다. 평지의 기준은 Kim *et al.*(2014)에서 분류한 해발고도 200 m 이하를 기준으로 하였다. 고도자료는 the GLOBE project에서 제공하는 자료를 사용하여(GLOBE Task Team *et al.*, 1999) 평지조건에서의 벼 생산성 격자자료를 추출하였다.

## III. 결과 및 고찰

남한 지역에서 벼 생산성을 모의하기 위해 설정된 격자파일들이 격자형 입력자료 처리모듈을 사용하여 성공적으로 생성되었다. 토지피복자료에 나타난 논지역에 해당하는 위치에서 총 13120 여개의 격자 자료가 생성되었다. 이들 중 98%의 자료에서 모델 구동 후 오류가 나지 않고 정상적으로 결과가 얻어졌다.

격자별 출력자료를 모아 얻어진 벼 생산성의 공간적 분포는 Fig. 4와 같았다. 남쪽 지방으로 갈수록 생산성이 좋아지는 경향을 보였다. 그 중에서도 전라남도와 경상남도 지역이 가장 높은 생산성을 보였으며, 전라북도가 그 다음으로 높은 생산성을 보였다. 그러나 서울에서도 이들과 비슷한 정도의 생산성을 나타내었다. 절대적인 수량의 경우 우리나라에서 얻어지는 값보다는 높게 모의되었는데, 이는 사용되는 품종의 종류와 이앙일에 있어 실제와 차이가 있고, 사용한 기상자료에 불확실성이 있기 때문이다.

모델 구동 중 일정 시간을 초과할 시 모델을 강제로 종료하는 과정에서 모델의 process id가 요구된다. 이를 위해 system('tasklist') 명령어를 사용하여 현재 실행되고 있는 프로세스를 나열 하고, 모델의 process id를 검색하였다. 그러나 'tasklist' 명령어는 windows에만 존재하기 때문에 linux 등의 다른 운영체제에서는 실행이 되지 않는다. 다른 운영체제에서 사용하기 위해서는 같은 기능을 하는 명령어를 찾고, 그에 맞추어 수정을 해야 한다.

일사량 관측자료는 다른 기상자료보다 상대적으로 매우 적게 관측이 이루어지기 때문에 모델 내부적으로 일조시간 자료와 AP 계수를 활용하여 일사량을 예측



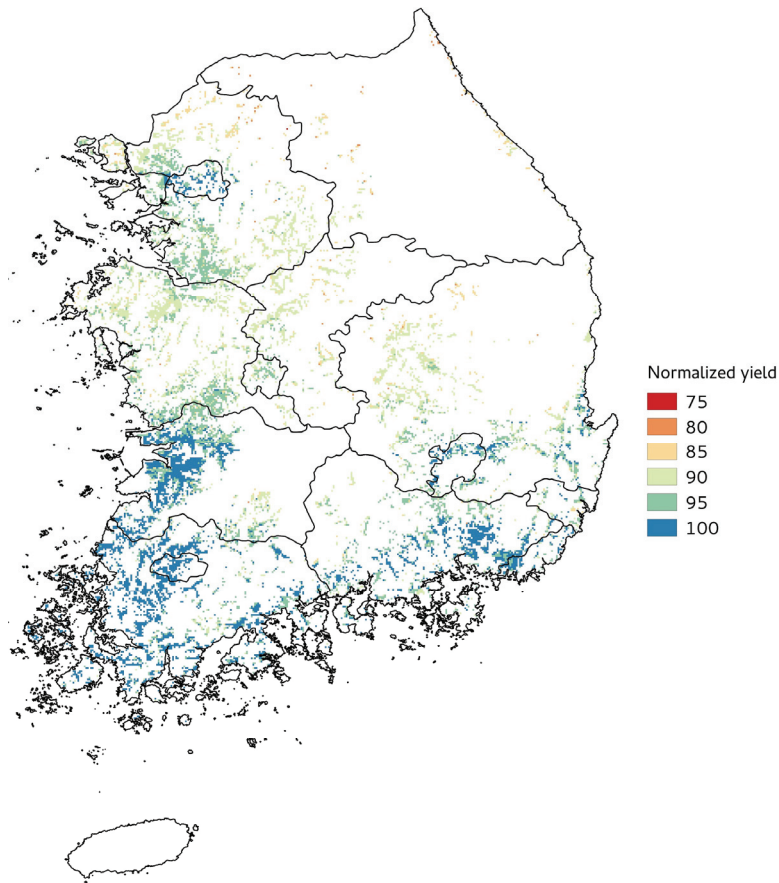


Fig. 4. Spatial distribution of yield normalized by the maximum simulated yield.

할 수 있게 되어있다(Bouman *et al.*, 2001). 그러나 일조시간 자료 역시 온도나 강수량 자료보다 상대적으로 적게 관측이 이루어지고 있기 때문에(Hyun and Kim, 2016), 기온과 같이 좀 더 일반적으로 관측되는 기상변수를 이용한 일사량 예측이 필요하다. Besharat *et al.*(2013)은 여러 일사량 예측 모델을 소개하고, 이를 이용하여 월별 일사량 예측값의 정확도를 비교하였다. 그러나 작물모델에서 일반적으로 요구하는 일 단위 일사량에 대한 예측값의 정확도 비교가 필요하다.

격자형 출력자료를 생산한 후 추가적인 분석을 위해 다양한 후처리 알고리즘이 적용될 수 있다. 특히, 공간자료의 효과적인 분석을 위해 다양한 분석도구가 사용될 수 있다. 본 연구에서 개발된 출력자료 처리 모듈은 netCDF 형식만을 지원하도록 개발되었다. 추 후 연구에서 TIFF 와 같은 범용성 GIS 파일 형식을 지원하도록 개선된다면, 격자자료 분석도구들과의 호환성을 높일 수 있을 것이다.

공간적인 작물 생산성 예측 수행하기 위해 대량의 입출력 자료처리가 요구된다. 이러한 작업을 위해 분산처리 시스템을 활용하는 것이 유리하다. 예를 들어, Elliott *et al.*(2014)은 슈퍼컴퓨터에서 사용될 수 있는 Swift 스크립트 언어를 사용하여 격자형 작물 모델 시스템을 구축하였다. 그러나, 이러한 격자형 구동 시스템들은 농업 생태계에 영향을 미치는 생물학적 및 비 생물학적 요인과의 피드백을 고려한 생산성 예측에 한계가 있다. 예를 들어, 벼 생육에 따른 병해충의 피해 정도를 예측하기 위해 일단위로 ORYZA2000 모델의 출력자료를 읽어 병해충 모델의 입력자료로 사용할 수 있다. 그러나, 이러한 모델로 예측된 병해충의 개체수는 벼 생육 모의에 영향을 미칠 수 없다. 추가적인 입력자료를 사용하여 이러한 피드백 관계를 모의할 수는 있으나, 격자 수준에서 이러한 상호작용을 모의하기 위해 상당한 전산자원이 요구될 것이다.

작물과 병해충과의 상호작용을 연계하여 공간적인



생산성을 모의하기 위해 모델 인터페이스들이 사용될 수 있다. 추후, 연구에서 이러한 모델 인터페이스를 활용하여 비생물적 요인뿐만 아니라 생물적 요인들과의 상호작용을 지역단위에서 모의할 수 있는 시스템이 개발된다면 보다 복잡한 농업생태계 내에서 생산성을 효율적으로 높일 수 있는 관리 방식을 탐색할 수 있을 것이다. 예를 들어, 국내에서는 지역별로 자원순환 단지가 조성되고 있는 추세이다. 공간적 모의 시스템을 활용하여, 장소의 생육 양상에 따른 분뇨의 생산과 이를 처리하기 위한 인위적인 과정 및 벼의 생육과정을 하나로 통합하여 지역 내 자원 순환 구조를 최적화할 수 있는 방안을 모색할 수 있을 것이다. 이를 위해, 벼 생육 모델의 격자형 구동 체계뿐만 아니라, 가축의 생육 양상을 모의할 수 있는 모델링 체계와 이를 통합할 수 있는 모델 인터페이스에 대한 개발이 시도되어야 할 것이다.

## 적 요

최적의 재배관리나 식량생산 관련 정책 수립의 위해 지역적인 작물 생산성 모의 정보들이 사용될 수 있다. 국내 주요 작물인 벼의 생산성 예측을 위해 ORYZA2000 모델이 널리 사용되어 왔지만, 지역 규모에서 생산성을 예측하기 위한 격자별 작물 모델 구동 체계는 보고되어 있지 않다. 본 연구에서는 격자형식의 입력자료를 사용하여 작물 모델을 구동하고 공간적인 생산성 예측자료를 생산할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이를 위해 입출력 처리 모듈과 격자별 모델 구동 모듈을 개발하였으며, 각각의 모듈은 C++와 R을 이용하여 구현되었다. 사례 연구를 위해 남한의 논 지역을 대상으로 2000년대에 대한 생산성을 모의하였다. 1km 및 12.5km 해상도의 격자형 기상자료로부터 13000여개의 기상입력자료가 생성되었다. 관행적인 재배관리 설정을 사용하여 격자별로 구동을 하였으며, 출력자료는 다시 netCDF 형태의 격자형 자료로 취합하였다. 모의된 벼 생산성의 공간적 분포는 실제 분포와 비슷한 경향을 보였으나, 실제 생산성과는 차이가 있었다. 이러한 차이는 이앙시기, 품종 등의 재배관리의 차이 또는 기상자료의 불확실성에 의해 생기게 된다. 본 연구에서 개발된 격자별 모델 구동 시스템을 통해 다른 작물 모델을 이용한 격자별 모의가 가능할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010865052017)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Angulo, C., R. Rötter, R. Lock, A. Enders, S. Fronzek, and F. Ewert, 2013: Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* **170**, 32-46.
- 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.
- Besharat, F., A. A. Dehghan, and A. R. Faghieh, 2013: Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **21**, 798-821.
- 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 (Vol. 1)*. IRRI.
- Elliott, J., D. Kelly, J. Chryssanthacopoulos, M. Glotter, K. Jhunjhnuwala, N. Best, M. Wilde, and I. Foster, 2014: The parallel system for integrating impact models and sectors (pSIMS). *Environmental Modelling & Software* **62**, 509-516.
- GLOBE Task Team and others (Hastings, D. A., P. K., Dunbar, G. M. Elphinstone, M. Bootz, H. Murakami, H. Maruyama, H. Masaharu, P. Holland, J. Payne, N. A. Bryant, T. L. Logan, J.-P. Muller, G. Schreier, and J. S. MacDonald), eds., 1999: *The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305-3328, U.S.A. Digital data base on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>) and CD-ROMs.
- Hyun, S., and K. Kim, 2016: Assessment of the angstrom-prescott coefficients for estimation of solar radiation in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **18**(4), 221-232.
- Kim, H. J., B. K. Shin, and W. Kim, 2014: A study on hydromorphology and vegetation features depending on typology of natural streams in Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* **28**(2), 215-234.
- Kim, J., C. K. Lee, H. Kim, B. W. Lee, and K. S. 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.
- 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, 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.
- Royce, F. S., J. W. Jones, and J. W. Hansen, 2001: Model-based optimization of crop management for climate forecast applications. *Transactions of the ASAE* **44**(5), 1319pp.
- Samani, Z., 2000: Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **126**(4), 265-267.
- van Oort, P. A. J., M. E. de Vries, H. Yoshida, and K. Saito, 2015: Improved climate risk simulations for rice in arid environments. *PLoS ONE* **10**(3): e0118114. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118114>.
- Xiong, W., I. Holman, D. Conway, E. Lin, and Y. Li, 2008: A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecological Modelling* **213**, 365-380.
- Yoo, B. H., and K. S. Kim, 2017: Development of a gridded climate data tool for the coordinated regional climate downscaling experiment data. *Computers and Electronics in Agriculture* **133**, 128-140.