

국내 옥수수 재배적지 예측을 위한 R 기반의 기후적합도 모델 병렬화

현신우¹ · 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농림기상협동과정
(2017년 8월 8일 접수; 2017년 9월 21일 수정; 2017년 9월 22일 수락)

R Based Parallelization of a Climate Suitability Model to Predict Suitable Area of Maize in Korea

Shinwoo Hyun¹ and Kwang Soo Kim^{1,2*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul, Korea

²Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received August 8, 2017; Revised September 21, 2017; Accepted September 22, 2017)

ABSTRACT

Alternative cropping systems would be one of climate change adaptation options. Suitable areas for a crop could be identified using a climate suitability model. The EcoCrop model has been used to assess climate suitability of crops using monthly climate surfaces, e.g., the digital climate map at high spatial resolution. Still, a high-performance computing approach would be needed for assessment of climate suitability to take into account a complex terrain in Korea, which requires considerably large climate data sets. The objectives of this study were to implement a script for R, which is an open source statistics analysis platform, in order to use the EcoCrop model under a parallel computing environment and to assess climate suitability of maize using digital climate maps at high spatial resolution, e.g., 1 km. The total running time reduced as the number of CPU (Central Processing Unit) core increased although the speedup with increasing number of CPU cores was not linear. For example, the wall clock time for assessing climate suitability index at 1 km spatial resolution reduced by 90% with 16 CPU cores. However, it took about 1.5 time to compute climate suitability index compared with a theoretical time for the given number of CPU. Implementation of climate suitability assessment system based on the MPI (Message Passing Interface) would allow support for the digital climate map at ultra-high spatial resolution, e.g., 30m, which would help site-specific design of cropping system for climate change adaptation.

Key words: Climate change, Suitability, EcoCrop, High resolution, Parallel computing, Maize

I. 서 론

대기 중 온실가스 농도 증가에 따른 기후변화로 농업생태계의 변화가 예상되며, 이러한 기후변화에 따른 작물의 영향을 평가하기 위해 여러 작물 생육 모델들이 사용되고 있다(Lee *et al.*, 2012; Griffin *et al.*,

1993, Boote *et al.*, 1998, Kim *et al.*, 2015). 예를 들어, Jones and Thornton(2003)은 CERES-Maize(Crop-Environment Resource Synthesis-Maize)모델을 이용하여 아프리카와 라틴아메리카에서 2055년까지 옥수수의 생산성이 약 10% 가량 감소할 것으로 전망하였다. Ludwig and Asseng(2006)은 기온 및 CO₂ 농도



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

증가, 강수량 변화에 대한 시나리오 조건에서 APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 모델을 사용하여 호주에서 밀의 생산성이 감소할 것으로 예상하였다.

국내에서도 기후변화에 따른 주요 작물의 생산성 변동을 예측하기 위해 작물 생육 모델을 활용하여 왔다. 국내에서는 주로 DSSAT 모델 및 ORYZA2000 모델을 사용하여 작물 생육을 예측하여 왔다(Kim *et al.*, 2015). Lee *et al.*(2012)은 ORYZA2000 모델을 이용하여 기후변화에 따른 벼 생산성 변화에 영향을 미치는 요인은 기후온난화, 재배시기, 시비효과 및 벼 생태형이 각각 60%, 12%, 10%, 2% 일 것으로 분석하였다. Shim *et al.*(2010)은 DSSAT 모델의 CERES-Rice 모델을 이용하여 CO₂가 배증되어 전지구 연평균 기온이 5°C 상승하는 UKMO(United Kingdom Meteorological Office) 시나리오 조건에서 벼의 출수기간이 16~18일 단축되고, 수량이 평균적으로 15% 감소할 것으로 전망하였다. Kim *et al.*(2012) 역시 CERES-Rice 모델을 이용하여 RCP 8.5(Representative Concentration Pathways 8.5) 시나리오에서 현재 대비 2090년대에 벼의 출수기가 평균 17일이 단축되고, 수량은 13% 감소할 것으로 예측하였다.

기후 조건에 따른 작물의 반응을 예측할 수 있는 모델을 활용하면 작물 재배와 관련한 단기적인 의사 결정을 지원할 수 있다. 최근, 국내에서 문제되고 있는 쌀 과잉생산을 해결하기 위해, 벼 대체 작물을 재배하려는 노력이 진행되고 있으나, 이들 대체 작물들을 재배하기 위해서는 일반 농가들이 사용할 수 있는 재배 지원 정보를 생산하여야 한다. 특히, 해당 작물의 기후적인 재배적합지를 파악하여 최적의 생산지역에서 작물을 재배할 수 있도록 정보를 지원하여야 한다. 예를 들어, 국내 자급률이 1%에 못 미치는 옥수수를 벼의 대체작물로 재배할 경우, 곡물자급률을 상당히 제고할 수 있는 효과를 기대할 수 있다. 특히, 옥수수는 고온 조건에서도 비교적 잘 성장하는 C4 작물 중 하나이기 때문에 기온상승이 예상되는 기후변화의 조건 하에도 다른 작물에 비해 잘 적응할 수 있을 것으로 기대된다(Yamori *et al.*, 2014). 반면, 국내에서는 옥수수의 재배적지 판별을 위한 연구보다는 특정 기후 조건에서의 생리반응이나 재배관리와 관련한 연구들이 대부분이었다(Song *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2013).

지형이 복잡하고 농가당 경지규모가 작은 우리나라에서 재배적지를 판별하기 위해 주곡작물의 생육과정

을 모의할 수 있는 모델들을 사용하는 것은 기술적인 어려움이 따른다. 개별 농가에서 활용 가능한 정보를 생산하기 위해 비교적 상세한 기후자료를 사용한 재배적지 예측이 바람직하다. 기상청에서는 1km 수준의 공간해상도를 가진 기후자료를 제공하고 있으나 우리나라 농경지를 상세하게 모의하기 위해서는 좀 더 높은 해상도를 가진 기후자료가 필요하다. 이를 위해, 농촌진흥청에서 2013년에 공간해상도가 30m에 이르는 초고해상도의 농업용 미래 상세 전자기후도를 개발하였다(<http://www.agdcm.kr>). 그러나 고해상도 기후 자료를 사용할 경우 처리해야 할 자료의 크기가 급격하게 커지게 되어 단순 계산 작업에도 상당한 처리시간이 요구된다. 또한, 품종별 특성을 고려하여 생산성을 예측하기 위해 품종모수를 적용하여야 하나 재배 품종의 분포에 대한 정보가 전무하며, 특정 지점의 토양을 모의하기 위해 토양의 물리화학적 특성을 나타내는 토양모수가 필요하나 토양분포와 관련한 자료들의 불확실성이 크다.

개별 농가 수준에서 옥수수의 재배 적합지역을 파악하기 위해 작물 생육 모델의 대안으로 비교적 단순한 형태의 기후적합도를 산정할 수 있는 모델들이 사용될 수 있다. 예를 들어, Hijmans *et al.*(2001)은 기존의 지식과 월별 기후자료를 사용하여 작물의 재배적합도를 예측할 수 있는 EcoCrop 모델을 개발하였다. Ramirez-Villegas *et al.*(2013)와 Kim *et al.*(2014)은 EcoCrop 모델을 사용하여 기후변화 조건에서 수수와 이탈리아인 라이그라스의 기후적합도를 예측하였다. 또한, 농촌진흥청에서 운영하고 있는 토양환경정보시스템인 흙토람(<http://soil.rda.go.kr>)에서도 다양한 작물들에 대한 토양 및 기후적합도를 계산하여 재배적지를 추정할 자료를 제공하고 있다. 이러한 기후적합도 예측 체계를 활용한다면, 미래 기후조건에서도 특정 작물에 대해 재배가 가능한 지역을 파악하여 기후변화 적응을 위한 작부체계 설계를 지원할 수 있다.

국내에서는 작물의 재배적합도 예측을 위해 고해상도 기후자료 처리를 지원할 수 있는 병렬처리 기술에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 통계 분석 도구 중의 하나인 R을 기반으로 병렬처리 패키지들을 활용하여 작물의 재배적지를 예측할 수 있는 체계를 구축하고자 하였다. 특히, 국내 곡물 자급률을 향상시킬 수 있고 기존 연구에서 재배적합도 예측을 위해 다루어 지지 않은 옥수수를 대상으로 기후적합도 예측 모델 활용 기술 개발에 중점을 두었다.

이러한 재배적합도 예측 체계 구축을 통해 벼와 콩 이외의 기타 작물에 대한 기후변화 영향평가를 지원할 수 있을 것이다.

II. 재료 및 방법

2.1. EcoCrop 모델

EcoCrop 모델은 월별 온도와 연간 강수량을 사용하여 작물의 재배적합도를 계산한다(Hijmans and Graham, 2006). 특정 지점의 재배적합도를 계산하기 위해, 우선 해당 지점의 월별 온도 및 연간 강수량을 사용하여 온도 적합도(T)와 강수 적합도(P)가 계산된다(Fig. 1). 온도

Table 1. The parameter values of the EcoCrop model for maize

Parameter	Description	Value
G_{min}	Minimum length of growing season	65
G_{max}	Maximum length of growing season	365
$K_{T_{mp}}$	Killing temperature	0
T_{min}	Absolute minimum temperature	10
T_{opmin}	Optimal minimum temperature	18
T_{opmax}	Optimal maximum temperature	33
T_{max}	Absolute maximum temperature	47
R_{min}	Absolute minimum annual rainfall	400
R_{opmin}	Optimal minimum annual rainfall	600
R_{opmax}	Optimal maximum annual rainfall	1200
R_{max}	Absolute maximum annual rainfall	1800

와 강수 재배적합도를 계산하기 위해 사용되는 모수들은 식물이 동사하는 최저 온도($K_{T_{mp}}$), 식물이 성장할 수 있는 최고 및 최저 한계온도(T_{min} , T_{max}), 식물이 성장하기에 최적인 최저와 최고의 온도(T_{opmin} , T_{opmax}), 식물이 생장이 가능한 최소 및 최대 한계 강수량(R_{min} , R_{max}), 식물이 성장하기에 최적인 최소와 최대의 강수량(R_{opmin} , R_{opmax}) 등이 포함되어 있다(Table 1). 이들 모수값들은 FAO(Food and Agriculture Organization)에서 운영하고 있는 EcoCrop database에 수록되어있는 정보들을 활용하였다(<http://ecocrop.fao.org>).

특정지점에서의 기후적합도는 작물의 파종시기와 연계되어 결정되어야 한다. 그러나, 격자형식으로 기후적합도를 예측할 때, 작물 파종시기를 특정할 수 없기 때문에, 1월부터 12까지 매월 재배기간이 시작된다고 가정된다. 특정 재배기간 동안의 재배적합도(F)는 다음과 같이 계산된다:

$$F = \min(T(m) \mid m = 1, 2, \dots, g) \times P \quad (1)$$

g 는 재배기간을 나타내며 G_{max} 와 G_{min} 값의 평균값으로 결정된다. m 은 해당 재배 기간 내에 포함되어 있는 특정 월을 나타낸다. 예를 들어, 3월부터 시작된 재배시기의 경우, m 값이 1과 2인 경우 각각 3월과 4월을 나타낸다. 12번에 걸쳐 개별 재배기간별로 얻어진 F 값의 최대값으로 해당지점의 최종 재배적합도(F_x)가 결정된다. EcoCrop 모델을 구동하기 위해 공개소스 데이터 베이스인 GitHub로부터 R 스크립트를 수집하였다(<https://github.com>).

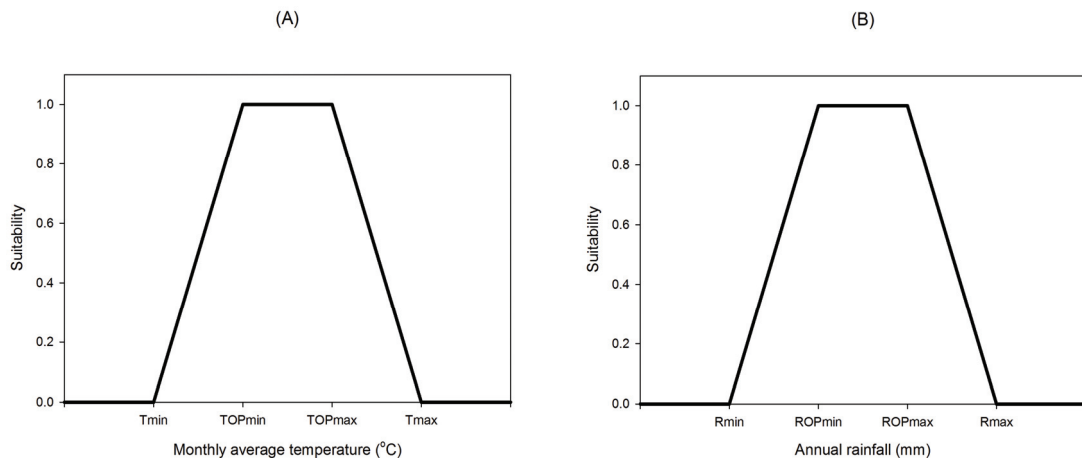


Fig. 1. Suitability functions of temperature (A) and rainfall (B) for the EcoCrop model.

2.2. 기후자료

재배적지 예측을 위한 병렬처리 기술의 적합성을 판단하기 위해, 기상청으로부터 1km 해상도의 격자형 기후자료를 수집하였다(http://climate.go.kr). 수집한 자료는 EcoCrop 모델의 입력자료로 활용되는 월별 평균기온, 월별 최저기온 및 월별 강수량이다. 미래 기후 자료는 RCP8.5 시나리오에 근거한 자료로 2011년부터 2100년에 대한 자료들을 수집하였고, 과거자료는 1979년부터 2005년까지의 자료를 수집하였다. 이들 자료는 전지구 기후모델(HadGEM2-AO)를 사용하여 얻어진 135km 수준의 저해상도 자료를 지역 기후모델(HadGEM3-RA)를 사용하여 12.5km 수준으로 규모 축소되고, 이 자료를 다시 지형효과를 고려하여 1km 수준으로 상세화된 기후변화 시나리오 자료이다.

2.3. R 병렬처리 패키지

통계 분석을 위한 R은 자료의 통계 처리뿐만 아니라 자료 분석의 효율성을 높이기 위한 다양한 패키지들도 활용된다. 특히 R 환경에서 사용될 수 있는 스크립트를 작성하여 보다 복잡한 자료처리가 가능하다.

스クリプト들을 사용하여 C, C++ 및 Fortran과 같은 다른 컴퓨터 프로그래밍 언어로 개발된 도구들과도 연동이 가능하다. 또한, 다양한 특수기능을 가진 R 패키지를 활용할 경우, GIS 자료 처리와 같은 보다 전문적인 자료처리 및 분석이 가능하다. 예를 들면, 래스터 자료의 입출력 및 투영법 전환과 같은 격자형 자료를 처리하기 위한 다양한 기능들이 구현된 raster 패키지를 활용할 수 있다(Kobal *et al.*, 2013).

R 환경에서 병렬처리를 지원하기 위한 다양한 패키지들이 사용될 수 있다. 병렬처리 기법을 활용할 경우, 1 km 해상도 또는 30 m 수준의 고해상도 격자형 기후 자료를 입력자료로 사용하여 신속하게 작물의 재배적합도 예측을 수행할 수 있다. 특히, 격자형 기후자료나 재배적지 모델의 모수에 존재하는 불확실성을 낮추기 위해 일부 모수값을 변경하면서 반복적으로 재배적지 예측을 수행하는 앙상블 기법을 활용하기 위해서는 병렬처리 기술은 필수적이다. 본 연구에서는 고해상도 격자형 기후자료를 활용하여 EcoCrop 모델을 구동하기 위해 snow(Simple Network of Workstation)를 기

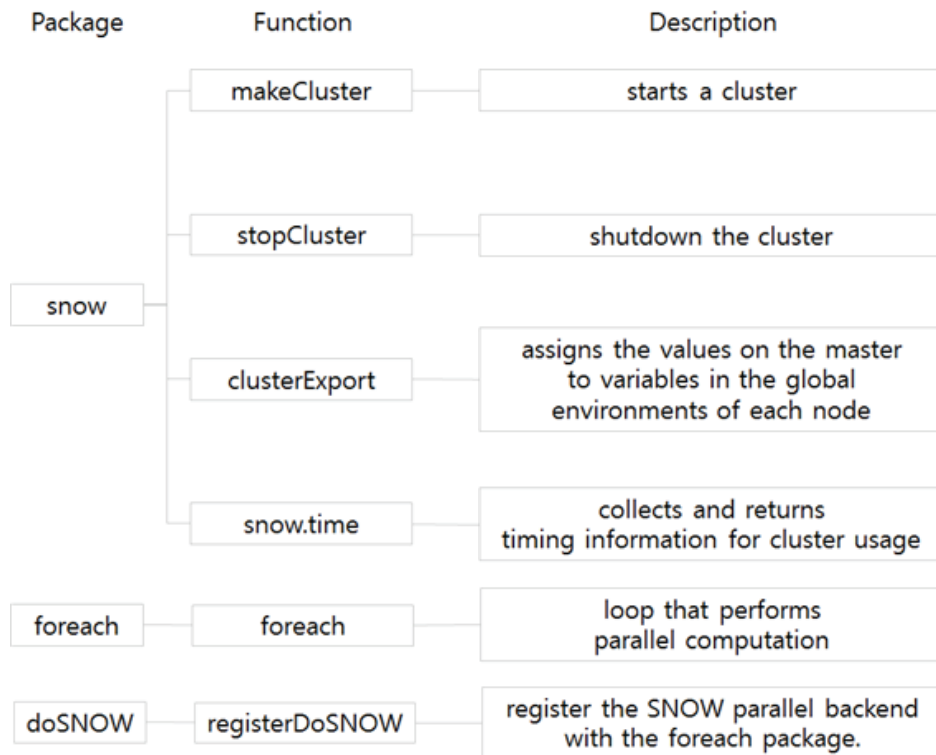


Fig. 2. Description of functions included in R packages associated with high performance computing.

반으로 한 병렬처리 패키지들을 사용하였다(Tierney *et al.*, 2016). snow 패키지는 개별 워크스테이션에서 네트워크를 통해 간단한 병렬처리를 할 수 있는 함수들을 제공한다. 또한, 반복문을 병렬처리할 수 있도록 하는 foreach 패키지와, snow 패키지에 포함되어 있는 함수를 R에서 사용하기 편리하도록 지원하는 doSNOW 패키지를 사용하였다(Revolution Analytics and Weston, 2015a; 2015b).

2.4. 병렬처리 스크립트 구현

재배적합도를 계산하기 위한 스크립트에는 병렬처리 및 격자형 자료 패키지 초기화, 격자형 기후자료 입력, EcoCrop 모델 구동 및 재배적합도 결과자료 출력 과정을 구현하였다. 우선, library 명령어를 사용하여 raster와 doSNOW 패키지들을 등록하였다(Fig. 3). snow와 foreach 패키지는 doSNOW 패키지에 의해 자동으로 등록이 되었다. 그리고 병렬처리를 위한 클러스터를 구성하기 위해 makeCluster 함수를 사용하였다. 클러스터에 사용될 CPU(Central Processing Unit) 코어의 개수와, 클러스터에 포함되어 있는 CPU 사이에서 통신을 하는 방법을 선택하여야 한다. 본 연구에서는 CPU 코어 개수에 따른 처리 속도를 비교하기 위해 1, 2, 4, 8, 16 개의 CPU 코어를 사용하였다. 통신 방법으로는 추가적인 소프트웨어가 필요하지 않아 비교적 손쉽게 병렬처리를 수행할 수 있는 SOCK(SOCKet) 방식으로 설정하였다. Socket 방식은 통신하고자 하는 워크스테이션에서 각각 소켓을 생성하고, 이들 소켓을 통해 데이터를 송수신하게 된다. 또한,

registerDoSNOW 함수를 사용하여 생성된 클러스터에서 foreach 기능을 사용할 수 있도록 하였다.

```
library(raster)
library(doSNOW)
library(Rgrads)
ncpu=16
cl <- makeCluster(ncpu, type="SOCK")
registerDoSNOW(cl)
```

Fig. 3. Implementation of library registration and cluster configuration.

고해상도 격자자료를 읽기 위해선 상당한 시간이 소요되기 때문에 기후자료를 읽는 과정을 병렬화 하였다(Fig. 4). 우선 Rgrads 패키지(Yoo and Kim, 2017)에 포함되어있는 makelist 함수를 사용하여 처리될 기후변수에 따라 변수 이름들을 할당하였다. 또한, readGrid 함수를 사용하여 월별 자료를 불러오고, 해당 월 정보를 climset 변수에 할당하였다. 이 과정이 foreach로 통해 설정된 모든 CPU 코어에서 동시에 수행되었다. 특히, %dopar% 옵션이 선택되었을 경우에 병렬처리가 수행되기 때문에, 기존의 소스 코드를 최소한으로 수정하여 병렬처리를 지원하는 기능을 구현할 수 있다.

```
allClimdata <- foreach(m=0:35, .packages=c("Rgrads")) %dopar%
{
  ...
  if(floor(m / 12) == 0) { climvar<-"tavg" }
  if(floor(m / 12) == 1) { climvar<-"tmin" }
  if(floor(m / 12) == 2) { climvar<-"prcp" }

  filename<-paste(climvar, "_monthly_", year, ".ctl", sep="")
  month <- (m - floor(m / 12) * 12 + 1)
  filelist <- makelist(filepath, filename,
                      year, year,
                      month, month+1,
                      1, 0)
  climset <- t(readGrid(filelist)[,1])
  ...
}
```

Fig. 4. Implementation of reading gridded climate data using 16 CPU cores.

격자자료를 CPU 코어의 사용 개수를 고려한 일정한 크기로 분할하여 재배적지 계산과정을 병렬처리 하였다(Fig. 5). 특히, CPU 코어별로 할당된 배열형태의 격자자료를 한번에 처리할 수 있는 apply 함수를 사용하였다. 재배적지를 계산하기 위한 suitFun 함수와 입력자료로 사용되는 기후자료가 apply 함수의 매개변수로 사용되었다. 또한, suitFun 함수에 필수적인 모수값을 저장하는 Parameters 변수도 역시 매개변수로 사용되었다. apply 함수가 개별 CPU 코어별로 호출되어 얻어진 Values 변수가 foreach 함수로부터 리턴되어 모든 격자점에 대한 재배적지 계산 결과값을 저장하는 allValues 변수로 모아졌다.

```
allValues <- foreach (b = 1:nblock) %dopar%
{
  ...
  Values <- apply (Climdata, 1, suitFun, Parameters)
  ...
}
```

Fig. 5. Calculation of climate suitability using 16 CPU cores.

계산된 재배적합도 자료를 격자형 자료로 출력하기 위해 raster 패키지를 사용하였다. 우선, 재배적지 지도의 공간적인 범위를 설정하기 위해 extent 함수를 사용하였다. 본 연구에서 입력자료에 사용된 투영법은 위도와 경도를 사용하는 WGS 84(World Geodetic System 1984)이기 때문에 raster 패키지에서 기본적으로 지원하는 투영법을 따로 설정하지 않았다. 격자형 재배적지 자료를 출력하기 위해선 raster 패키지에 포함되어 있는 writeRaster 함수를 사용하였다. 기후적합도가 2000년대, 2030년대, 2050년대에 걸쳐 연도별로 예측되었기 때문에, 매년 자료를 GeoTIFF(Georeferenced Tagged Image File Format) 형식으로 출력하였다. 이들 자료를 각 격자점 별로 10년 기간 동안의 평균값을 구하였다. 격자자료가 출력된 후, 병렬처리에 사용된 전산 자원을 해제하기 위해 doSNOW 패키지의 stopCluster 함수를 사용하였다.

2.5. 병렬처리 시간의 분석

병렬처리에 따른 처리시간 단축 정도를 분석하기 위해, 사용된 CPU 코어 개수에 따른 처리시간을 측정하였다. 자료 처리과정별로 병렬처리에 따른 효율을

분석하기 위해, 실제 계산에 사용된 시간, 데이터 전송을 위한 대기 시간, 데이터 자료 교환에 사용된 시간 등을 구분하여 분석하였다. 병렬처리를 위해 소요되는 시간을 각각의 CPU 코어별로 측정하기 위해 snow.time 함수를 사용하였다(Fig. 6). CPU 코어가 증가함에 따라 이에 비례하여 처리시간이 단축된다는 가정 하에 이상적인 처리 시간을 계산하고 이를 실제로 측정된 처리시간과 비교하였다. 다양한 CPU 코어 개수에 따른 자료처리를 위해, 총 24개의 CPU 코어를 사용할 수 있는 듀얼 CPU 워크스테이션(KFT46-S8230G50-230, Tyan, Seoul, Korea)이 사용되었다. 이 워크스테이션에는 12개 코어를 사용할 수 있는 AMD(Advanced Micro Devices, Sunnyvale, CA) Opteron CPU 가 설치되어 있다.

```
time <- snow.time
(
  foreach (...) %dopar%
  {
    ...
  }
)
```

Fig. 6. Measurement of time usage for each clusters during parallel computation using snow.time function.

III. 결과 및 고찰

3.1. 병렬처리 시간 분석

사용된 CPU 코어의 수가 늘어날수록 모델 구동에 걸리는 시간이 단축되었지만, 이상적인 시간보다는 더 많은 처리시간이 소요되었다(Fig. 7). 예를 들어, 해상도가 1km인 자료를 처리하기 위해 사용된 CPU의 수가 16개일 때는 병렬처리를 하지 않았을 때에 비해 시간이 약 9.5%로 줄어들었으나, 이상적인 속도에 비해 약 1.5배의 시간이 더 걸렸다.

CPU 코어수가 증가함에 따라 감소되는 처리시간은 대부분은 재배적지 계산과정에서 발생하였다(Fig. 8). 그러나, CPU 코어가 증가함에 따라 이에 비례하여 처리시간이 감소하는 것은 아니었다. Lee et al.(2013)의 경우에도 최대 18개의 CPU로 병렬처리를 적용한 결과, 병렬처리를 하지 않았을 때에 비해 6%정도의 시간만 소요되었으나, 이상적인 시간에 비해서는 약 80% 정도의 시간이 추가로 요구되었다. Tierney et al.

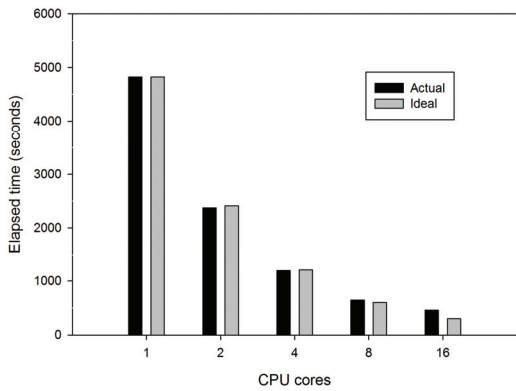


Fig. 7. Performance of parallel computing for calculating suitability using 1km data. Actual and ideal represent observed and theoretical scaling with increasing number of CPU cores, respectively.

(2009)은 최대 10개의 CPU로 병렬처리를 하여 약 7배의 시간을 단축하였으나, 이상적인 처리시간보다는 약 35%정도의 추가적인 처리시간이 소요되었다.

이상적인 처리시간과 실제 처리시간과의 차이는 대개 CPU 코어 사이에서 데이터를 교환하기 위해 요구되는 추가적인 시간에서 생겨난다. 본 연구에서 최적 개수 이상의 CPU 코어가 사용될 경우, 실제 계산을 하는 부분 외에도 자료 통신을 위한 대기 시간이 길어지게 되어, 전체적인 처리시간이 지연되는 결과가 나타났다. 데이터 통신을 위한 시간을 제외하더라도 각각의 CPU 코어에 할당된 데이터 처리량이 달라 자료

처리의 동기화를 위해 처리시간이 지연되었다. 예를 들어, CPU 코어마다 동일한 양의 자료가 처리된다면 모든 CPU 코어의 처리의 시작과 종료시점이 유사하여야 한다. 그러나, 실제 자료 처리의 경우, 개별 코어에 할당된 자료값이 달라 계산과정에서 처리 속도의 차이가 발생한다. 이로 인해, 자료 처리 동기화를 위한 CPU 코어의 대기 시간이 추가된다.

재배적지 계산을 위한 모든 과정이 병렬화 될 수는 없기 때문에 이상적인 처리시간 안에 모든 계산을 마칠 수 없다. 예를 들어, 본 연구에서 작성된 스크립트는 기후자료를 읽어오는 부분과 그 자료를 사용해 적합도를 계산하는 부분만이 병렬화되었기 때문에 나머지 처리과정에서 처리시간 단축을 기대할 수 없다. 또한, 재배적지 계산을 수행하는 EcoCrop 함수의 경우에도 병렬화를 위해 최적화하여 구현된 것이 아니기 때문에, 실제 처리시간이 이상적인 처리시간보다 더 소요되었을 것으로 예상된다.

3.2. 옥수수의 재배 적합도 분석

EcoCrop 모델로 예측한 재배적합도는 현재의 재배 적합지역이 미래조건에서 확대되는 공간적 분포를 가졌다(Fig. 9). 현재 조건에서는 경상도 지방과 경기도 지방에서 0.4 이상의 재배적합도 예측값(F_x)이 나타났다. 기후변화가 진행되는 2030년대와 2050 년대에는 F_x 값이 증가하여 각각 0.5 와 0.7 이상의 값이 나타났으며, 현재조건에서 0.2 이하였던 곳에서도 0.4 이상의

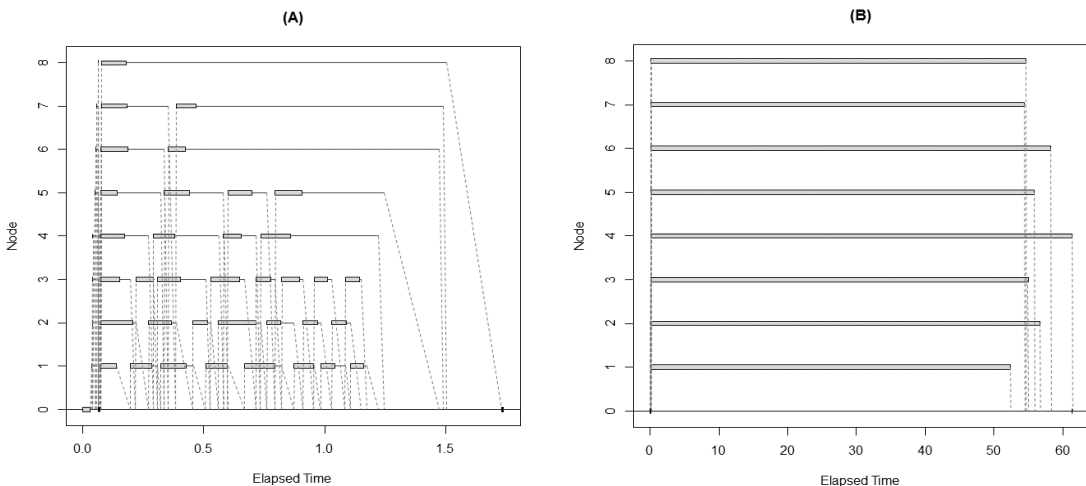


Fig. 8. Time usage for reading climate data (A) and calculating suitability (B). Rectangle, solid line, and dashed line indicate time for computation, waiting between computation, communication between CPU cores, respectively.

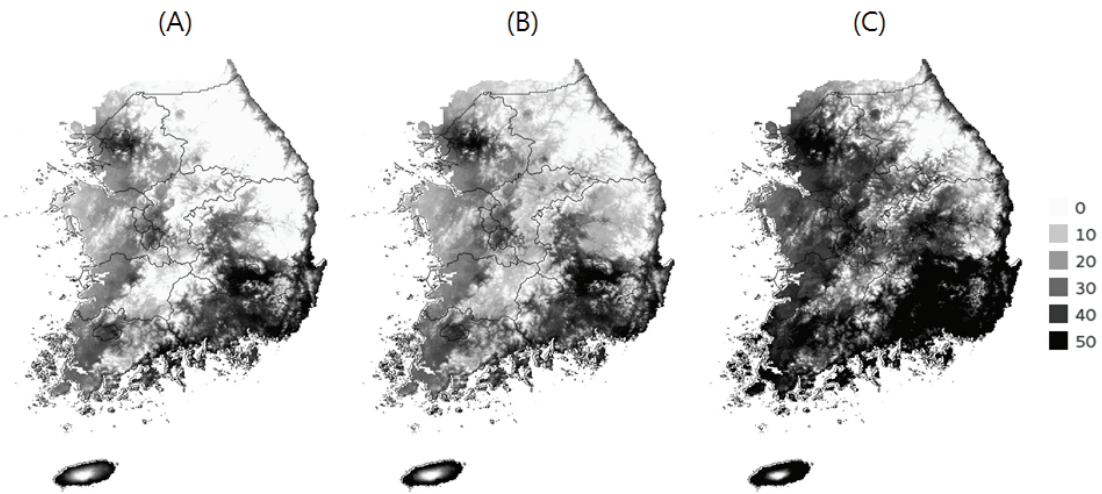


Fig. 9. Climate suitability map of maize for 2000s (A), 2030s (B), 2050s (C), respectively.

값이 나타나는 경향이 있었다. 특히 해안가를 따라 경상남도, 전라남도, 충청북도, 경기도 지역에서 F_x 값이 크게 증가하였다. 반면, 산간지방에서는 F_x 값의 증가가 상대적으로 적었다. F_x 값은 2030년대에 비해 2050년대에 상대적으로 크게 증가하는 경향을 보였다.

국내에서 옥수수의 재배의 대부분이 중부지방에서 이루어지는 것을 고려한다면, EcoCrop 모델로 예측된 재배적합도의 공간적 분포는 실제의 옥수수 재배적합도 지역의 분포와 차이가 있었다. 특히, 국내 옥수수 전체 재배면적의 60% 이상을 차지하고 있는 강원도와 충청남도에서 다른 지역에 비해 F_x 값이 낮은 경향을 보였다. EcoCrop 모델의 모의 결과가 실제 국내 옥수수 재배지역 분포와 상이했던 것은 입력자료와 모델 알고리즘에서 기인한 것으로 보인다.

하지만, EcoCrop 모델은 월별 기후자료만을 입력자료로 사용하기 때문에, 전자기후도를 활용하여 기후변화 영향평가를 수행할 수 있는 장점이 있다. 특히, EcoCrop 모델은 최적의 기후적합도를 얻을 수 있는 파종시기를 자동으로 선택하기 때문에, 기후변화에 적응에 활용될 수 있는 정보를 생산할 수 있다. Challinor *et al.*(2014)은 메타 데이터 분석을 통해, 기후변화에 대한 적응대책이 시행될 경우 미래기후조건에서도 옥수수의 생산성이 상승할 수 있을 것으로 전망하였다. 본 연구에서도 2050년대뿐만 아니라 2080년대에도 지속적으로 높은 기후적합도 값을 가진 지역이 증가하였다(data not shown). 따라서, EcoCrop 모델로 예측된 기후적합도는 주어진 기후조건에서의 잠재적 생산

성을 나타내는 지표로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 국내 지역별로 알려진 재배시기를 고려하여 기후적합도 정보를 생산할 수 있다. 이 경우, 단기적인 대체작물의 재배지역 선정에 관한 정보를 생산하기 위해 사용될 수 있을 것이다. 본 연구에서 사용한 EcoCrop 모델은 기온과 강수량만을 사용하여 기후적합도를 예측하여 잠재적인 재배적합지역을 예측하지만, 실제 재배 지역은 기후뿐만 아니라 토양 조건에 영향을 받는다. 예를 들어, Song *et al.*(2013)은 기온과 토양온도를 이용하여 민감도 및 적응성을 계산하고 옥수수의 기온 변화에 대한 취약성을 평가하였다. 흙토람에서는 토성, 배수등급, 유효토심 등을 이용하여 작물의 토양적합도를 계산한다. 비록, EcoCrop 모델을 사용하여 얻어진 옥수수의 재배적지 분포는 현재의 재배지역 분포와 차이를 보이는 결과를 가져왔으나, 기후적인 재배적합도를 기준으로 분석되는 재배적지는 실제 옥수수의 재배지역을 나타내기 보다는, 벼의 대체작물로 옥수수가 고려될 경우, 재배가 가능한 지역으로 해석되어야 할 것이다. 따라서, EcoCrop 모델로 예측된 재배적지는 추후 연구에서의 토양 및 토지이용 자료를 활용한 재배적지 예측 모델과의 비교 분석 자료로 사용될 수 있을 것이다.

또한, 본 연구에서 사용된 EcoCrop 모델의 모수는 EcoCrop database로부터 얻어졌기 때문에, 국내에서 재배되는 다양한 품종들의 특성들을 반영하기에 부족하였을 것으로 판단된다. 예를 들어, Ramirez-Villegas *et al.*(2013)과 Kim *et al.*(2014)은 EcoCrop 모델을

사용하여 각각 수수와 이탈리아 라이그라스의 적지를 예측하고 모수의 개선이 필요하다고 보고하였다. 그러나, 모수 추정을 위해 상당한 자료축적과 노력이 필요하기 때문에, 작물의 기본적인 생육특성을 나타내는 자료들을 수록하고 있는 EcoCrop database 자료의 활용도를 높일 필요가 있다. 특히, EcoCrop database에는 2500종의 작물들에 대한 모수가 수록되어 있어, 작물 생육 모델이 개발되지 않은 채소와 과수들에 대한 기후 변화 영향평가에 활용될 수 있다. 따라서, 후속연구에서 작물의 생육에 요구되는 기본적인 기후 정보를 활용할 수 있는 알고리즘 개발이 진행되어야 할 것이다.

적 요

기후변화에 대응하기 위해 다양한 작부체계 구축이 시도될 수 있다. 변화하는 기후조건에서 작물들이 최적의 재배지에 배치될 수 있도록 기후적합도를 평가하는 것이 중요하다. EcoCrop 모델과 같은 월별 기후자료를 사용하여 여러 작물의 재배적합도를 계산하는 모델을 사용할 경우, 고해상도의 전자기후도를 사용하여 우리나라의 복잡한 지형을 고려한 재배 적합도 계산이 가능하다. 그러나, 방대한 기후자료의 처리를 위해 여러 전산자원들을 동시에 사용할 수 있는 병렬처리 기술 개발이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 공개용 통계분석 도구인 R을 기반으로 EcoCrop 모델을 병렬로 구동할 수 있는 스크립트를 개발하고, 이를 격자형 기후자료에 적용하여 옥수수의 재배적지를 예측하였다. 병렬 처리를 시도한 결과 CPU 코어 개수 증가에 따른 처리 시간 단축이 선형적으로 이루어지지 않는 것으로 처리시간의 상당부분을 단축할 수 있었다. 예를 들어 16개의 CPU를 사용하였을 때 이상적인 시간보다 1.5배가 넘는 시간이 소모되었으나 총 시간이 90%정도 단축되었다. 이러한 기술들을 작물 생육 모델들이 개발되지 않은 작물들에 적용할 경우, 기후변화 조건에 적용할 수 있는 작부체계 설계를 지원할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구에서 사용한 기술들은 CPU 코어가 많은 워크스테이션에서 작동이 가능하나, 여러 컴퓨터를 연결한 중형 컴퓨터에 사용할 수 있는 MPI 기술을 적용할 수 있는 기술개발이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호:

PJ010115022017)의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료정리에 도움을 준 홍광석 학생에게 감사를 표합니다.

REFERENCES

- Boote, K. J., J. W. Jones, and G. Hoogenboom, 1998: Simulation of crop growth: CROPGRO model.
- Challinor, A.J., J. Watson, D.B. Lobell, S.M. Howden, D.R. Smith, and N. Chhetri, 2014: A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* **4**(4), 287.
- Ecocrop, 2016: <http://ecocrop.fao.org> (2016. 9. 7)
- Github, 2016: <https://github.com/CIAT-DAPA/dapa-climate-change/blob/master/EcoCrop/src/EcoCrop.R> (2016. 9. 7)
- Griffin, T. S., B. S. Johnson, and J. T. Ritchie, 1993: A simulation model for potato growth and development: Substor-potato Version 2.0. Michigan State University, Department of Crop and Soil Sciences.
- Hijmans, R.J., L. Guarino, M. Cruz, and E. Rojas, 2001: Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genetic Resources Newsletter*, 15-19.
- Hijmans, R. J., and C. H. Graham, 2006: The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology* **12**(12), 2272-2281.
- Hijmans, R. J., 2016: raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 2.5-8, <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Jones, J. W., G. Hoogenboom, C. H. Porter, K. J. Boote, W. D. Batchelor, L. A. 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), 235-265.
- Jones, P. G., and P. K. Thornton, 2003: The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global environmental change* **13**(1), 51-59.
- 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 RCP 8.5 climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **14**(3), 132-141. (in Korean with English abstract)
- Kim, H., S. Hyun, and K. S. Kim, 2014: A study on the prediction of suitability change of forage crop Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) using spatial distribution model. *Korean Journal of Agricultural*

- and Forest Meteorology* **16**(2), 103-113. (in Korean with English abstract)
- 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. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.J., S. Seo, K.C. Choi, J.G. Kim, S.H. Lee, J.S. Jung, S.H. Yoon, H.C. Ji, and M.H. Kim, 2013: The studies on growth characteristics and dry matter yield of hybrid corn varieties in Daegwallyeong region. *Journal of The Korean Society of Grassland and Forage Science* **33**(2), 123-130.
- KMA, 2016: Climate Information Portal. <http://climate.go.kr> (2016. 9. 7)
- Kobal, M., A. Ceglar, K. Eler, B. Medved-Cvikič, L. Honzak, P. Simončič, and D. Hladnik, 2013: On the use of R programming language in the analyses of spatial data. *Acta Silvae et Ligni* **102**, 55-62.
- Lee, C. K., J. Kim, J. Shon, W. H. 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, K. J., S. Lee, B. W. Lee, and K. S. Kim, 2013: Implementation of GrADS and R Scripts for Processing Future Climate Data to Produce Agricultural Climate Information. *Atmosphere*, **23**(2), 237-243. (in Korean with English abstract)
- Ludwig, F., and S. Asseng, 2006: Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems* **90**(1), 159-179.
- Ramirez-Villegas, J., A. Jarvis, and P. Läderach, 2013: Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: the EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology* **170**, 67-78.
- RDA, 2016: Digital Agro-Climate Map Database for Impact Assessment of Climate Change on Agriculture System. <http://www.agdcm.kr> (2016. 9. 7)
- RDA, 2016: Korean Soil Information System. <http://soil.rda.go.kr> (2016. 9. 7)
- Revolution Analytics and S., Weston, 2015a: doSNOW: Foreach Parallel Adaptor for the 'snow' Package. R package version 1.0.14, <https://CRAN.R-project.org/package=doSNOW>
- Revolution Analytics and S., Weston, 2015b: foreach: Provides Foreach Looping Construct for R. R package version 1.4.3, <https://CRAN.R-project.org/package=foreach>
- Shim, K. M., K. A. Roh, K. H. So, G. Y. Kim, H. C. Jeong, and D. B. Lee, 2010: Assessing impacts of global warming on rice growth and production in Korea. *Climate Change Research* **1**(2), 121-131. (in Korean with English abstract)
- Song, Y., W.K. Lee, H. Kwak, M. Kim, and S.R. Yang, 2013: Vulnerability Assessment of Maize and Wheat Production to Temperature Change - In Case of USA and China -. *Journal of Climate Change Research* **4**(4), 371-384.
- Tierney, L., A. J. Rossini, and N. Li, 2009: Snow: A parallel computing framework for the R system. *International Journal of Parallel Programming* **37**(1), 78-90.
- Tierney, L., A. J. Rossini, N. Li, and H. Sevcikova, 2016: snow: Simple Network of Workstations. R package version 0.4-2, <https://CRAN.R-project.org/package=snow>
- Yamori, W., K. Hikosaka, and D.A. Way, 2014: Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis research* **119**(1-2), 101-117.
- 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.