

격자형 기후변화 시나리오 자료를 활용한 한반도의 증발산량 전자 기후도 생산 및 분석

유병현¹ · 이규종³ · 이변우¹ · 김광수^{1,2*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농림기상협동과정, ³서울대학교 농업생명과학연구원
(2017년 4월 7일 접수; 2017년 5월 23일 수정; 2017년 5월 24일 수락)

Production and Analysis of Digital Climate Maps of Evapotranspiration Using Gridded Climate Scenario Data in Korean Peninsula

Byoung Hyun Yoo¹, Kyu Jong Lee³, Byun Woo Lee¹ 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

³Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received April 7, 2017; Revised May 23, 2017; Accepted May 24, 2017)

ABSTRACT

Spatio-temporal projection of evapotranspiration over croplands would be useful for assessment of climate change impact and development of adaptation strategies in agriculture. Potential evapotranspiration (*PET*) and dryness index (*DI*) during rice growing seasons were calculated using climate change scenario data provided by the National Institute of Meteorological Research (NIMR). A data processing tool for gridded climate data files, readGrADSWrapper, was used to calculate *PET* and *DI* during the current (1986-2005) and future (2006-2100) periods. Scripts were written to implement the formulas of *PET* and *DI* in R, which is an open source statistical data analysis tool. Evapotranspiration in rice fields (*PET_{Rice}*) was also determined using R scripts. The Spatio-temporal patterns of *PET* differed by regions in Korean Peninsula under current and future climate conditions. Overall, *PET* and *PET_{Rice}* tended to increase throughout the 21st century. Those results suggested that region-specific water resource managements would be needed to minimize the risk of water loss in the regions where considerable increases in *PET* would occur under the future climate conditions. For example, a number of provinces classified as a humid region were projected to become a sub-humid region in the future. The Spatio-temporal assessment of water resources based on *PET* and *DI* would help the development of climate change adaptation strategies for rice production in the 21st century. In addition, the studies on climate change impact would be facilitated using specialized data tools, e.g., readGrADSWrapper, for geospatial analysis of climate data.

Key words: Gridded binary, Climate data, Water resource, R extension package, GIS



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

I. 서론

기후변화에 따른 영향을 파악하기 위해 다양한 분야에서 시공간 정보가 생산되고 있다(Lee *et al.*, 2013). 농업 분야에서는 기후변화에 따른 공간적인 변화 양상을 표출할 수 있는 전자기후도 형태의 농업 응용기후 정보 생산이 이루어져 왔다(Yun, 2007). 특히, 우리나라의 복잡한 지형을 고려하여 작물 생산에 영향을 줄 수 있는 상해 및 동해 일수 등 위험 기상 요소들에 대한 고해상도 전자기후도들이 생산되었다.

증발산량은 농업용 수자원 요구도와 작물의 생산성을 나타낼 수 있는 중요한 농업 응용기후 정보 중의 하나이다. 농경지에서 발생할 수 있는 증발산량에 대한 시공간 자료를 생산하여 미래 기후조건에서 작물 생산과정 중에 발생할 수 있는 가뭄 위험도를 전망하고 이에 따른 수자원 요구도를 산정할 수 있다. 증발산량을 추정하기 위해 다양한 방식들이 사용될 수 있다. 예를 들어, Allen *et al.*, (1998) 이 제안한 FAO-56 공식을 사용하여 일별 잠재증발산량을 계산할 수 있다. 또한, Noah MP 모델과 같이 지표 모형을 사용하여 현열과 잠열을 포함하는 대기과 지표 사이의 에너지 및 물질 교환을 모의하여 증발산량을 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2013).

기존의 농업용 전자기후도는 증발산량 정보를 생산하기에 충분한 기상변수를 제공하지 않는다. 국내에서는 주로 복잡지형을 고려한 온도와 강수량의 상세 기후자료가 제공되고 있다. 반면, 증발산량을 추정하기 위해 요구되는 일사량, 풍속 및 습도와 같은 주요 기상변수는 전자 기후도 생산에서 제외되어 왔다. 증발산량을 계산하기 위해 주로 일별 기상자료들이 입력자료로 사용되거나 대부분의 전자기후도는 월 단위로 제공되고 있어, 특정 기간 동안의 증발산량 계산에는 제한적이다.

미래 기후조건에서 증발산량을 계산하기 위해 국가 표준 기후변화 시나리오 자료가 활용될 수 있다. 이들 자료에는 증발산량 정보 생산에 필수적인 기상요인들이 포함되어 있다. 반면, 국가 표준 시나리오 자료들은 수치 모형의 출력자료들로 구성되어 있어 시공간적 정보를 저장할 수 있는 gridded binary나 시공간적 정보와 더불어 자료의 메타 정보가 포함된 network common Data Form (NetCDF) 등의 파일 형태로 제공되고 있다. 이로 인해, 농업용 전자기후도 생산을 위해 보편적으로 사용되는 GIS (Geographic Information System) 도구들을 활용할 경우, 보다 복잡한 자료 처리 과정이 필요하다. 또한, 생산된 증발산량 전자기후도의 시공간적인 분석을

위해서는 통계 분석 도구 활용이 유리할 것이다.

본 연구에서는 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 사용한 국내 증발산량 전자기후도 제작 및 분석을 목표로 하였다. 특히, 격자형 자료에 기반한 한반도 증발산량 자료 생산 및 분석을 통해, 기후변화에 따른 수자원 변동 양상과 작물 생산성에 대한 시공간적 파급효과를 파악할 수 있는 기반을 구축하고자 하였다. 국내에서 널리 재배되고 있는 벼의 경우, 다른 작물에 비해 물사용 효율이 다른 작물에 비해 낮아 재배기간 동안 상대적으로 많은 수자원을 요구한다. 따라서, 잠재증발산량과 함께 벼 재배지역의 증발산량 정보와 수자원 변동 추이를 나타낼 수 있는 건조지수 생산에 중점을 두었다. 또한, 격자형 응용기후정보를 생산을 위해 최근 통계 분석을 위해 널리 사용되고 있는 통계 분석 패키지 R을 활용하는 방식에 대해 기술하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 격자형 국가 표준 기후변화 시나리오 자료

국립기상연구소에서는 기후변화 영향평가를 위한 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 생산하였다(NIMR, 2011). 4종의 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways; RCP)가 적용된 이들 자료는 전지구 대기 해양 결합 모델인 HadGEM2-AO 모델을 사용하여 생산된 미래 기후자료를 바탕으로 생산되었다. 전지구 모델에서 생산된 기후자료를 중규모 기상모델인 HadGEM3-RA를 활용하여 한반도 지역을 중심으로 한 역학적 규모 축소 과정을 거친 고해상도 자료가 생산되었다. 국가 표준 기후변화 시나리오 자료는 1979년부터 2100년까지 12.5km의 공간 해상도와 다양한 시간 해상도를 가진 자료를 포함하고 있으며, 기상청 기후변화 정보센터 (<http://www.climate.go.kr>)와 COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX) East Asia 웹사이트(<http://cordex-ea.climate.go.kr>)에서 제공되고 있다.

역학적 규모 축소 자료인 12.5 km 해상도 자료로부터 지형 효과를 고려한 1 km 해상도의 상세 기후변화 시나리오 자료가 생산되었다(Seo *et al.*, 2013). 상세화된 기후변화 시나리오 자료의 경우, 일별 및 월별 자료가 제공되고 있다. 12.5 km 해상도 자료의 경우 수치기상모형에서 생산된 다양한 기상변수들에 대한 자료가 제공되고 있는 반면, 1 km 해상도 자료는 온도와 강수에 대한 자료가 제공된다. 이들 시나리오 자료는 기후변화 정보센터 (<http://www.climate.go.kr>)를 통해 제공되고 있다.

Table 1. The change in major climate variables during rice growing season (DOYs of 145 - 265) at South and North Korea between baseline and future time periods. Baseline was set to be from 1996 to 2005

Nation	Year	Tmax* (°C)	Tmin (°C)	Prpc (%)	Rdsd (%)
South Korea	2026-2035	0.71	0.61	4.34	-0.05
	2056-2065	2.60	2.68	-6.18	1.76
	2086-2095	4.62	4.80	25.30	-0.45
North Korea	2026-2035	1.13	0.76	-2.53	2.30
	2056-2065	2.91	2.78	1.65	2.91
	2086-2095	4.86	4.77	10.99	3.22

* Tmax, Tmin, Prpc, and Rdsd indicate decadal averages of maximum temperature, minimum temperature, precipitation, and surface downwelling shortwave radiation, respectively.

Table 2. Representative growth stages and the corresponding crop coefficient for calculation of rice evapotranspiration (Allen *et al.*, 1998)

Length of rice development stage ¹	Init.	Dev.	Mid.	Late
		30	30	60
crop coefficient by development stage ²	K _{cini}	K _{cmid}	K _{cend}	
	1.05	1.20	0.90-0.60	

1. Init., Dev, Mid., and Late indicate initial stage, developmental stage, mid-season, and late-season, respectively.

2. K_{cini}, K_{cmid}, K_{cend} represent crop coefficients for the initial stage, mid-season, and late-season stages, respectively.

국가 표준 기후변화 시나리오 자료는 특정 지점뿐만 아니라 남한 및 한반도에 대한 격자형 자료 형식의 파일들로 제공되고 있다. 12.5 km 및 1 km의 공간해상도를 가진 월별 및 일별 온도와 강수량 자료는 gridded binary 나 ASCII 형식으로 제공되고 있으며, 12.5 km의 기압, 풍속, 습도 및 일사량 등의 다양한 기후자료들은 시간별 자료부터 계절별 자료까지 다양한 시간해상도를 가진 NetCDF 형식의 자료로 제공되고 있다. 이들 자료 파일의 입출력을 위해 해당 파일의 메타정보가 저장된 CTL 파일이 사용된다. 예를 들어, CTL 파일에는 격자자료 처리에 필요한 파일의 경로와 자료의 공간적 범위를 나타내는 위도와 경도의 범위, 시계열의 특성, 투영법, 그리고 변수 정보가 포함된다.

2.2. 잠재증발산량과 벼 증발산량 계산

국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 활용하여 격자자료 형태의 잠재증발산량 (Potential Evapotranspiration; PET)과 벼 재배에 따른 증발산량 (Potential Evapotrans-

piration from rice paddy fields; PET_{rice}) 정보를 생산하였다. PET를 계산하기 위해 국제 식량 농업 기구 (Food and Agriculture Organization of the United Nations; FAO)가 제시한 FAO-56 공식을 사용하였다 (Allen *et al.*, 1998).

$$PET = 0.408 \Delta \frac{(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

여기서, R_n 은 작물 표면에서의 순복사량, G 는 지중열 플럭스, T 는 지표 위 2 m 높이의 일평균 기온, U_2 는 지표 위 2 m 높이의 풍속, e_s 는 기온에 따른 포화수증기압, e_a 는 수증기압, Δ 는 증기압 곡선 기울기, γ 는 건습계상수이다.

FAO-56 공식에 사용된 변수들을 계산하기 위해 기후변화 시나리오 자료에 포함되어 있는 기상 변수들을 사용하였다. 순복사량을 계산하기 위해 필요한 상향복사량 (R_i ; MJ m⁻² d⁻¹)을 온도와 습도 및 일사량 자료를 사용하여 다음과 같이 계산하였다 (Allen *et al.*, 1998).

$$R_t = 4.903 \times 10^{-3} \frac{T_x^4 + T_n^4}{2} (0.34 - 0.14\sqrt{e_s}) (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (2)$$

T_x 와 T_n 은 일 최대 및 최저 온도이다(°C). R_s/R_{so} 는 실제 일사량과 이론적 최대 일사량의 비율로 다음과 같이 계산되고 1보다 작은 값으로 제한되었다.

$$R_s/R_{so} = R_s / [(a_s + b_s)R_a] \quad (3)$$

a_s 와 b_s 는 태양복사가 구름이 없는 날에 대기권을 통과하는 정도를 나타내기 위한 경험적인 계수이다. Allen *et al.* (1998)은 해당 지역에서 얻어진 값이 존재하지 않는다면 a_s 와 b_s 의 값으로 0.25와 0.5를 사용할 것을 제안하였다. R_a 는 대기권 밖에서의 일사량으로 다음과 같이 계산되었다(Allen *et al.*, 1998).

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r (w_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(w_s)) \quad (4)$$

여기서, G_{sc} , d_r , 그리고 w_s 는 각각 태양상수 ($\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$), 지구와 태양 사이의 실제 거리에 대한 평균 거리 비율의 제곱 값인 지구 공전궤도의 eccentricity correction factor, 그리고 일몰 시간각이다. ϕ 와 δ 는 각 격자점의 위도와 태양 적위이다.

개별 작물을 재배하는 기간 동안의 증발산량은 작물 계수를 활용하여 추정할 수 있다. 예를 들어, 벼의 증발산량은 잠재증발산량에 벼의 작물계수(Crop Coefficient; K_c)를 고려하여 다음과 같이 계산하였다(Allen *et al.*, 1998).

$$PET_{rice} = PET \times K_c \quad (5)$$

작물계수는 PET 대비 각 작물이 가지는 증발산량을 나타낸 값으로, 작물의 생육 단계에 따라 다른 값을 가진다. 작물이 재배되는 시점과 수확까지의 기간을 벼가 중부지방에서 주로 이앙되기 시작하는 5월 25일과 벼의 대체적인 생육기간인 120일로 가정하여 증발산량을 계산하였다. 작물의 발달 단계 기간 및 발달 단계를 고려한 작물계수를 적용하여 일별 작물계수를 다음과 같이 계산하였다(Table 2).

$$\begin{aligned} K_c &= K_{cini} + \frac{K_{cmid} - K_{cini}}{30} \times Day & (0 \leq Day < 30) \\ &= K_{cmid} & (30 \leq Day < 90) \\ &= K_{cmid} - \frac{K_{cmid} - K_{cend}}{30} \times (Day - 90) & (90 \leq Day < 120) \end{aligned} \quad (6)$$

이 때 Day는 5월 25일부터의 경과일수이다.

2.3. 건조지수

미래 기후조건에서 가뭄 발생과 관련된 건조 기후 지역을 구분할 수 있는 건조지수 전자기후도를 생산하였다. Budyko (1974)는 강수량(P)과 잠재증발산량을 사용한 건조지수(Dryness Index; DI)를 다음과 같이 제안하였다.

$$DI = PET_{mean} / P_{mean} \quad (7)$$

여기서, PET_{mean} 과 P_{mean} 은 각각 벼 생육기간 동안의 연평균 PET 와 강수량이다. DI 가 증가할 수록 가뭄의 위험성이 높아지며 DI 의 범위에 따라 건조(arid; $5 \leq DI < 12$), 반건조(semi-arid; $2 \leq DI < 5$), 아습윤(sub-humid; $0.75 \leq DI < 2$), 및 습윤(humid; $0.365 \leq DI < 0.75$) 지역으로 구분할 수 있다(Ponce *et al.*, 2000).

2.4. 격자형 증발산량 자료 생산을 위한 R 스크립트 구현

격자형 기상자료를 사용하여 얻어진 PET 의 시공간적인 변화를 분석하였다. 1986-2100년까지의 기상자료가 PET 계산을 위한 입력자료로 사용되었다(Table 1). 우선, CORDEX-East Asia 자료를 입력자료로 사용하여 현재 기후(1986-2005년) 조건에서의 일별 잠재증발산량을 계산하였다. 1996년에서 2005년 동안의 평균 PET 값을 격자 별로 계산하여 미래 PET 변화 양상 분석을 위한 기준값(baseline)으로 설정하였다. 또한, RCP 8.5기후변화 시나리오에 따른 미래 기후(2006-2100년) 조건에서의 일별 PET 자료를 추가로 생산하였다.

각 10년 기간 동안의 평균 증발산량 정보를 전자기후도의 형태로 생산하였다. 증발산량을 격자 단위로 계산하기 위해 공개 통계분석 패키지인 R을 활용하였다. R은 다양한 통계분석 기능과 자료처리 기능을 가지고 있으며, 전세계 사용자들이 개발한 확장 패키지 형태로 시계열 및 공간 분석 기능 등 다양한 통계분석이 지원된다.

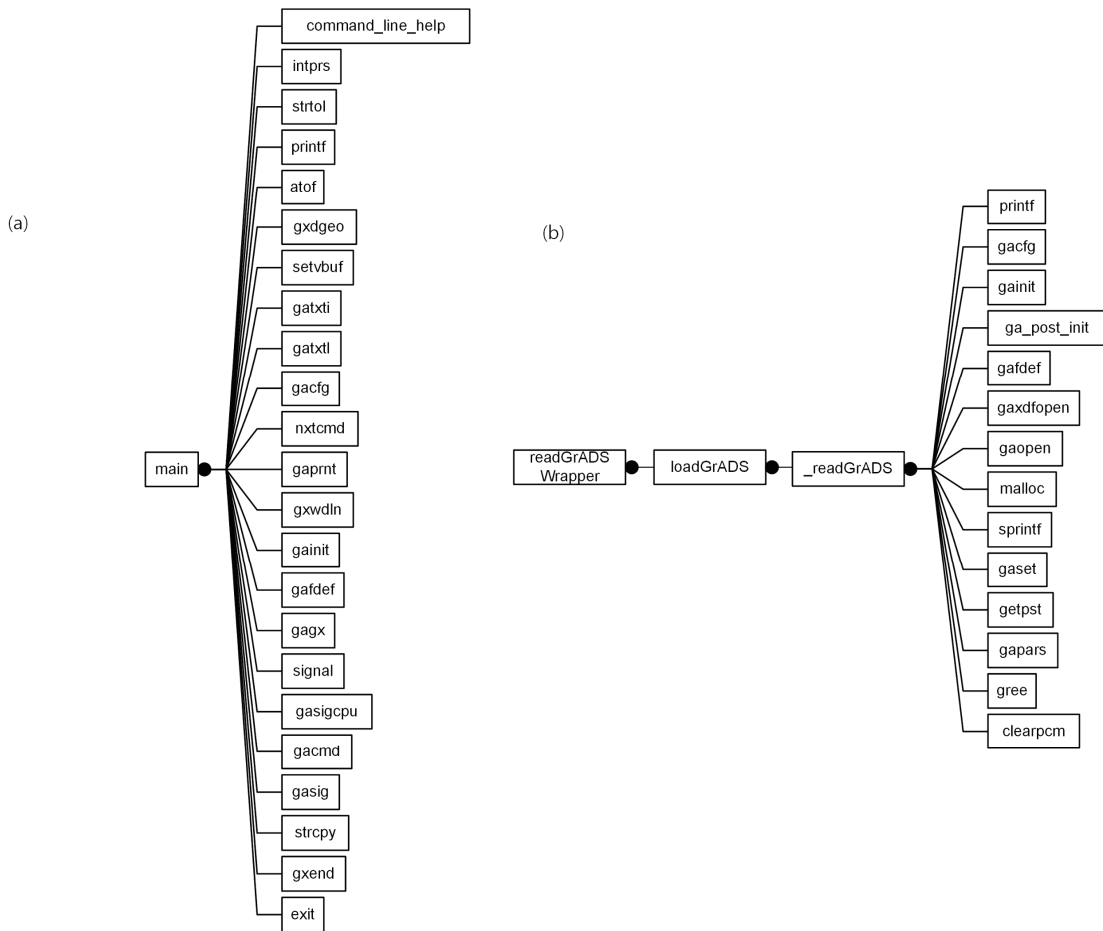


Fig. 1. Internal call structures implemented in a user interface module (gause.c) of Grid Analysis Display System (GrADS; a) and readGrADSWrapper (b). GrADS depends on gacmd to provide an interface to users. In readGrADSWrapper, gacmd was replaced by _readGrADS, which is used for input and output of data.

따라서, 농업분야 기후변화 영향평가를 위해 공간 자료의 분석과 시계열 자료의 분석 기능을 갖춘 R과 같은 통계 프로그램을 사용하는 것이 유리하다. 또한, R은 대용량 자료 처리를 위한 병렬처리 기능을 지원하여 농업분야뿐만 아니라 다른 분야에서의 응용 기후변화 정보의 생산과 분석에 효과적이다 (Lee *et al.*, 2013).

PET를 계산하기 위해 R 자료구조와 함수를 기반으로 기상자료 입력 모듈, 증발산량 계산 모듈, 그리고 응용자료 출력 모듈을 구현하였다. 증발산량을 계산하기 위해 12.5km 해상도의 일별 최고기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 하향단파 복사량 자료를 입력자료로 사용하였다. 기온 및 상대습도 자료는 gridded binary 형식의 파일들이 수집되었고 그 외 변수들은 NetCDF 형식의 CORDEX- East Asia 자료들을 사용하였다.

격자형 기상자료들을 사용하여 특정 함수의 입력 자료를 사용하기 위해 GrADS (Gridded Analysis and Display System)이 사용된다 (Berman *et al.*, 2001). 본 연구에서는 GrADS의 주요 함수 중 격자형 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 처리하기 위해 필요한 함수들로 구성된 readGrADSWrapper R 확장 패키지를 제작하였다 (Fig. 1). 예를 들어 GrADS에서 사용자 입력을 통해 격자형 자료 처리 함수들을 호출하는 gacmd 함수를 기반으로 메타데이터를 처리하는 gaxdfopen, gaopen 함수, 파일로부터 격자자료를 처리하는 gapars 함수를 연속적으로 호출하는 _readGrADS 함수가 구성되었다. readGrADSWrapper는 gridded binary와 netCDF 형식의 격자형 기후변화 시나리오 자료를 R 변수에 저장하기 위해 활용되었다. 또한, 격자형 기상자료를 R 환경에

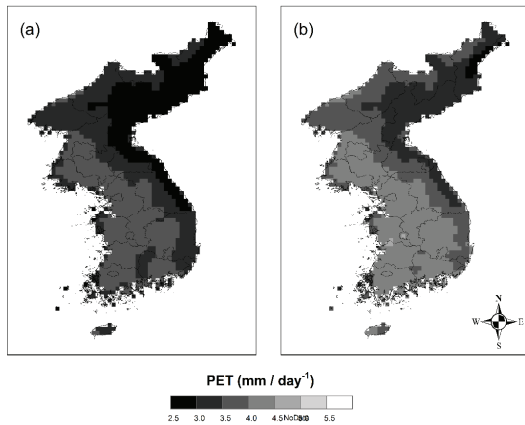


Fig. 2. Potential evapotranspiration (PET; a, mm day⁻¹) and rice potential evapotranspiration (b, mm day⁻¹) during a rice growing season (DOYs of 145-265) under current (1996-2005) climate conditions.

서 사용하기 위해 격자 자료의 메타데이터를 저장할 수 있는 list 형식의 자료 구조가 사용되었다:

```
ctl <- list(filepath, xllcorner, yllcorner, isiz, jsiz,
           stime, etime, Ystart, Yend, cellsize, nodata,
           ncfile) (Code 1)
```

filepath는 파일 경로, xllcorner, yllcorner, isiz, jsiz는 불러올 격자자료의 공간 범위, Ystart, Yend, stime, etime은 시간 범위를 지정하며, cellsize는 격자의 크기, nodata는 nodata 격자의 값, ncfile은 파일 형식 정보를 저장한다. 이러한 *ctl* 변수를 입력변수로 하여 다음과 같은 readGrADSWrapper 함수가 사용된다.

```
griddata <- readGrADSWrapper(ctl) (Code 2)
```

격자형 잠재증발산량 계산을 위해 R 함수인 calcPET를 구현하였다. 이 함수는 R 변수에 저장된 격자형 기상 자료의 메타데이터를 입력자료로 사용하여 격자형 자료를 얻고, 이를 FAO-56 공식에 입력하여 120일 간의 일별 증발산량을 계산한다:

```
valueptr <- calcPET(tavg, tmax, tmin, rhum,
                  rds, wind) (Code 3)
```

calcPET 함수에서는 작물 재배기간의 잠재증발산량 이 모든 격자점에 대해 계산되므로, 개별 격자점 별로 평

균 PET를 계산하였다. 또한, PET의 시계열적 변화를 나타내기 위해 2006년부터 매 10년간 평균 잠재증발산량과 기준년대 값과의 비율을 계산하였다. 국가 표준 기후 변화 시나리오 자료는 2100년까지 제공 되고 있어 2096-2100년 기간은 5년간의 평균으로 계산하였다.

생산된 격자형 응용기후 정보들을 지리정보 시스템 (Geographic Information System; GIS)과 호환 가능한 형식의 자료로 출력하기 위해 격자형 자료 처리기능을 가지는 R 확장 패키지인 raster를 사용하였다 (Hijmans and Eten, 2014). 우선, 10년간 평균 잠재증발산량 및 기준년 대비 증발산량 자료는 ESRI ASCII 격자 형식의 전자기후도로 출력하기 위해 matrix.to.asc 함수를 다음과 같이 구현하였다:

```
void matrix.to.asc(real PET, string output_filename,
                  real resolution)
```

```
library("raster")
```

```
set myRaster = raster(PET);
```

```
if resolution == 12.5 then
```

```
  set extent(myRaster, [123,133.125,32,44.125]);
```

```
else if resolution == 1 then
```

```
  set extent(myRaster, [124.5, 132.01, 33.0, 39.01]);
```

```
write raster(myRaster, output_filename); (Code 4)
```

matrix.to.asc 함수는 잠재증발산량을 저장하고 있는 변수와 출력대상 파일이름을 입력자료로 하여 다음과 같이 사용된다:

```
matrix.to.asc(PET_10YR_AVG, paste(outpath, pet_
filename, sep=""), 12.5) (Code 5)
```

증발산량 전자기후도로부터 시도 단위의 행정구역별 증발산량 분석을 위해 rgdal 확장 패키지가 추가로 사용되었다 (Bivand *et al.*, 2013). rgdal 패키지는 GIS 형식 자료의 입출력 기능을 지원한다. 예를 들어, rgdal에 내장된 readOGR 함수를 사용하여 벡터형 GIS 자료인 shape 파일을 R 변수에 저장할 수 있다. 특히, 격자형 자료에서 행정구역별 자료를 추출하기 위해 raster 패키지의 extract 함수와 함께 사용하는 것이 유리하다. 이들 확장 패키지들을 사용하여 남북한 행정구역별 평균값을 다음과 같이 계산하였다:

```
ex_mean <- extract(raster("PET_avg_1981_2005.
```

```
asc"), readOGR("KOR1.shp", layer="KOR1"),
fun=mean) (Code 6)
```

III. 결 과

3.1. 잠재증발산량 및 벼 증발산량의 시공간적 변화

현재 (1996-2005) 기후조건에서 계산된 벼 재배기간 동안의 *PET*는 지역적으로 비교적 큰 편차를 보였다 (Fig. 3a). 한반도 서쪽 지역과 남해안 지역에서 *PET*가 높은 것으로 나타난 반면 북한의 함경북도 지역에서는 한반도 최고 *PET*의 60% 수준의 상당히 낮은 값을 보였다. 서해안의 해안가 일부 지역은 내륙에 비해 낮은 *PET*를 가지는 것으로 나타났다. *PET_{rice}*의 경우에는 전반적으로 *PET* 값에 비해 13~15% 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 벼를 재배할 경우 기준 식물보다 연간 52 t/10a~60 t/10a의 수자원을 더 사용하게 되는 것이다 (Fig. 3b).

미래 조건에서도 *PET*는 시공간적인 변이를 보일 것으로 예측되었다 (Fig. 3a-c). 예를 들어, 2026-2035년 기간에 제주도 및 남해안 지역에서는 *PET*가 감소하는 경향이 예측되었다. 반면, 기준 연대에서 *PET* 값이 낮았던 북부 지역 및 서해안 일부 지역이 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. *PET_{rice}* 변화를 역시 *PET*와 유사한 지역적 분포를 보였다 (Fig. 3d-f). 특히, *PET_{rice}*의 값이 *PET*에 비해 높기 때문에, 절대량은 더 큰 폭으로 증가하였다. 예를 들어, 전라북도내 한 지역의 경우 2086-2095년의 *PET*와 *PET_{rice}*는 기준 연도에 비해 19%가 증가하였으나 증발산량의 증가 정도는 각각 0.67 mm day⁻¹와 0.77 mm day⁻¹로 *PET_{rice}*가 *PET*보다 15% 정도 많았다.

남북한 지역에서의 *PET*는 미래 기후조건에서 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 2006-2025년을 제외한 모든 기간에서 기준연대 값에 비해 높은 값이 나타났고, 2075-2085년에 일부 감소하는 것 외에는 계속 증가하는

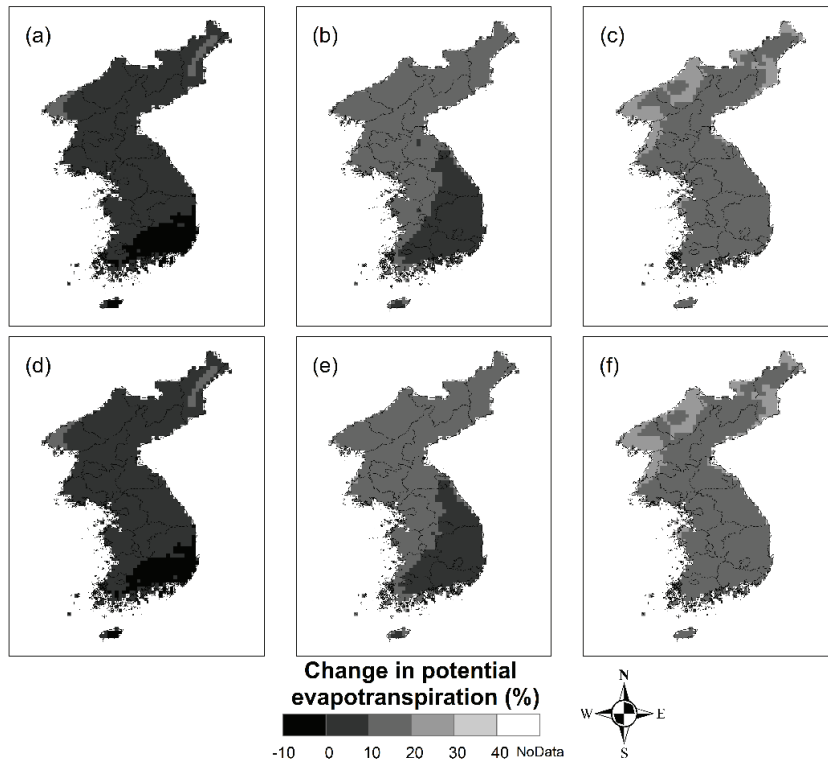


Fig. 3. The percentage of change in potential evapotranspiration during a rice growing season (DOYs of 145-265) under future climate conditions in 2030s (a, d), 2060s (b, e), and 2090s (c, f). The period of baseline was from 1996 to 2005. Potential evapotranspiration (a, b, c) was calculated using Allen *et al.* (1998). Potential evapotranspiration in rice fields was determined using crop coefficients during a growing season.

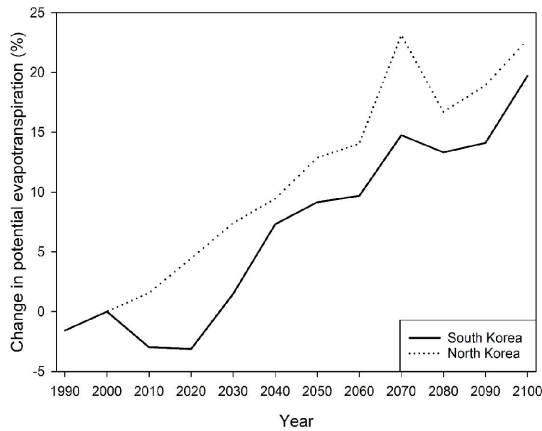


Fig. 4. The percentage of change in potential evapotranspiration by South and North Korea. Potential evapotranspiration was estimated from 1986 to 2100. The period of baseline was from 1996 to 2005.

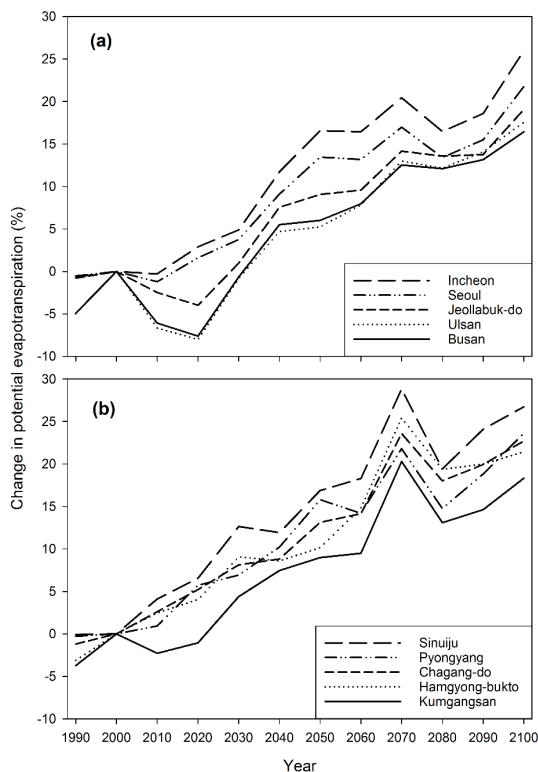


Fig. 5. The percentage of change in potential evapotranspiration by province in (a) South and (b) North Korea. The values for each province represent 0th, 1st, 2nd, 3rd, and 4th quantiles for the rate of change in South and North Korea, respectively.

추세를 보였다. 미래 기후에서 북한이 남한에 비해 *PET*가 상대적으로 높게 증가하는 것으로 나타났다. 북한의 경우 기준년도인 1996-2005년 이후로 계속 증가하여 2086-2095년에는 약 1.25배로 증가하였다. 특히, 2066년부터 2075년 기간 동안에 북한 지역에서 *PET*가 특이적으로 증가할 것으로 전망되었다.

일부 지역을 제외하고 남북한의 대부분의 지역에서 *PET*의 변화율은 유사한 경향을 보였다. 남한과 북한의 중간값, 1사분위, 3사분위에 해당하는 시도들의 경우 기준 연도 대비 2096-2100년의 *PET*가 서로 각각 4%와 3%의 차이를 보였다. 반면, 최저와 최대 변화율을 나타내는 지역에서는 상대적으로 큰 차이를 보였다. 남한의 경우, 1996-2005년 대비 2096-2100년의 *PET* 비율은 부산과 인천에서 각각 6%와 26%가 증가하였다. 같은 기간 동안 북한의 경우에는 금강산과 신의주 지역에서 *PET*가 18% 및 27% 증가하였다 (Fig. 5).

3.2. 건조지수의 시공간적 변화

미래 기후조건에서 지역별 수분 평형을 알려 줄 수 있는 *DI*는 남북한 지역에 따라 변화의 차이를 보였다 (Fig. 6-7). 기준년도 기간에는 경상북도, 전라북도 일부 지역 및 북한의 황해도 지역을 제외하고 모든 지역에서 습윤 지역으로 분류되었다. 충청남도의 경우, 기준년도 기간 동안에는 습윤지역으로 분류되었으나 기후변화가 진행됨에 따라, 2046-2055년 이후에는 지속적으로 아습윤 지역으로 분류될 것으로 전망되었다. 황해남도의 경우에는 해안가임에도 불구하고 적은 강수량으로 인해 모든 기간에서 아습윤 지역으로 분류되었다. 예를 들어, 황해남도의 기준년도에 *PET*는 북한 평균에 비해 0.4 mm day^{-1} 높았으나 강수량이 북한 전역 평균보다 0.9 mm day^{-1} 낮았다.

한반도에서 아습윤 지역의 변동 양상은 시기에 따라 차이를 보였다. 2016-2025년에는 남한 대부분의 지역에서 *DI* 값이 0.75 값 이하인 습윤 지역으로 분류되었으나 북한의 경우에는 상대적으로 많은 습윤 지역이 아습윤 지역으로 변화하는 경향이 있었다 (Fig. 6-7). 반면, 2066-2075 기간에는 남한 대부분 지역에서 *DI* 값이 감소하여 아습윤 지역이 감소될 것으로 예측되었으나 북한에서는 아습윤 지역이 증가하는 경향을 보였다. 21세기 후반인 2086-2095 기간에는 남북한 모두 아습윤 지역이 다시 줄어들고 2095년부터 2100 기간 사이에는 다시 증가하는 경향을 보였다.

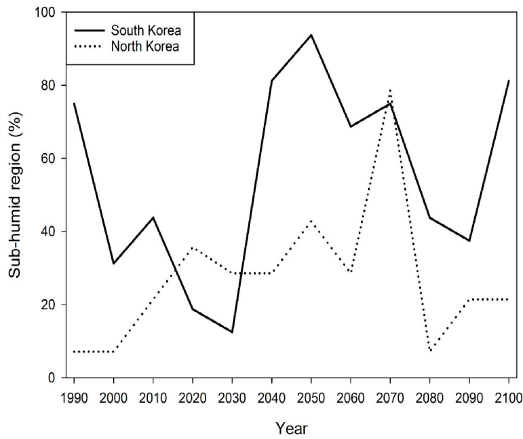


Fig. 6. The percentage of provinces classified as a sub-humid region in South and North Korea based on dryness index (*DI*) averaged for 10 year periods during 1986-2100. The *DI* at the end of 21st century was calculated for 5 years from 2096-2100.

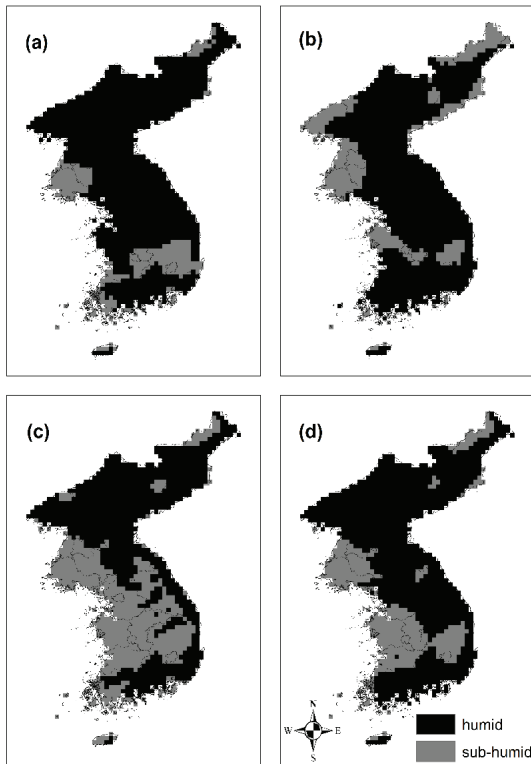


Fig. 7. Humid and sub-humid regions classified based on dryness index under current (a, 1996-2005) and future (b, 2026-2035; c, 2056-2065; d, 2086-2095) climate conditions.

IV. 고 찰

본 연구결과에 따르면, 한반도에서 잠재증발산량 및 비의 증발산량은 미래 기후 조건에서 다양한 시공간적인 특성을 보일 것으로 전망되었다. 특히, 한반도 북부 지역과 서해안 지역에서 상당한 증가가 예상되었다(Fig. 3). 이러한 경향을 볼 때, 미래기후조건에서 해당지역에서 수자원 관리에 대한 중요성이 증가할 것으로 예상되었다. 특히, 북한지역의 *PET*의 증가는 관개시설과 수자원 관리시설이 구축될 경우, 작물 생산성 증가로 이어질 가능성이 있으나, 현재의 열악한 조건을 고려한다면, 오히려 가뭄의 피해가 증가될 것으로 예상되었다. *DI* 값을 기준으로 보더라도 북한은 남한에 비해 미래 기후에 아습윤 지역으로 바뀌는 지역은 적었으나 *DI* 값이 현재에 비해 전반적으로 증가하여 건조기후 및 가뭄의 위험성이 늘어날 것으로 전망되었다(Fig. 6-7). 따라서 이러한 증발산량 전자기후도의 공간적인 분석 결과를 활용하면 관개시설 및 저수 시설과 같은 인프라 구축 등의 적응 대책 수립에 있어 지역적인 우선순위를 결정할 수 있을 것이다.

*DI*는 *PET*에 비해 변화의 양상이 복잡하게 나타났다. 남한의 경우, 아습윤 지역에 해당하는 시도가 2030년대와 2040년대 사이에 13%에서 81%로 증가하였으나, 2070년대와 2080년대 사이에는 75%에서 44%로 감소하는 등의 연대별 변이가 크게 나타났다(Fig. 6). 이는 온도나 일사에 비해 강우량의 변동성이 *DI* 값에 더 큰 영향을 주었기 때문으로 보인다(Table 1). 따라서, *PET*가 증가될 것으로 예상되는 지역에 대해 강수량에 의존하지 않고도 농업용 수자원을 확보할 수 있는 적응 대책을 수립하고, 10년 이상의 장기간의 수자원을 고려한 관리가 필요할 것으로 보인다.

남부와 북부 지역 *PET*의 경우 중부 지방의 이양기에 맞추어 계산되어 나타나는 편이가 고려되어야 한다. 예를 들어 일반적으로 중부에 비해 늦게 이양하는 남부 지역의 경우에는 *PET*가 과대 추정 되었을 수 있다. 이러한 지역별 차이를 고려하기 위해 각 지역별 이양기에 맞추어 *PET*를 계산하는 추가적인 연구가 진행될 수 있다. 하지만 이양기가 20일 차이 나더라도 총 기간인 120일의 16.7%에 해당하므로 그 영향이 크지 않을 것으로 보인다.

격자형 기후변화 시나리오 자료를 다양한 농업 생태계 모형의 입력자료로 사용하여 공간적인 기후변화 영향평가를 수행할 수 있다. 그러나, 격자형 시나리오 자료와 모델 예측 값의 불확도 분석 및 신뢰도를 높이는 것이

우선해야 한다. *PET*의 경우, 미래 기후조건에서 지속적으로 증가하는 경향을 보였으나, 특정 기간 동안 급격한 변동이 나타났다. 특히, 북한의 경우, 2070년대에 *PET*가 9% 증가한 후 2080년대에는 6% 감소하는 것으로 전망되었다(Fig. 4). 이러한 급격한 변동이 기후변화 시나리오 자료가 생산된 수치기상모형의 불확실성에 의해 발생되었는지, 또는 특정 기상요인의 변화에 의한 것인지에 대한 확인이 필요할 것으로 판단되었다. 이를 위해, 추가적인 자료 분석과 기후변화 시나리오 자료의 불확도 분석이 후속 연구에서 수행되어야 할 것이다.

Glotter *et al.* (2014)은 동적 규모축소 자료를 생산하기 위해 수치기상모형들이 사용될 경우, 편이보정이 필요하다는 것을 보고하였다. 또한, 모델 예측 값의 신뢰도를 높이기 위한 방법으로 여러 모델의 결과를 종합하여 각 모델의 결과보다 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있는 앙상블 기법이 적용될 수 있다(Martre *et al.*, 2015). 본 연구에서는 HadGem2-AO 전지구 기후 모델 및 HadGEM3-RA 지역 기후 모델 등 동일한 수치모델로부터 생산된 기후변화 시나리오 자료가 사용되었다. 단일 종의 수치 기상 모델로부터 생산된 자료를 사용할 경우 해당 모델 고유의 불확실성을 가질 수 있다. 이러한 불확도를 최소화하기 위해 여러 모델로부터 출력된 자료를 통합하여 사용할 수 있다. 특히, 기상청에서는 5개의 지역규모 모델자료를 고려한 앙상블 시나리오 자료를 제공하고 있다. 추후 연구에서 개별 지역기후모델로부터 생성된 기상자료를 입력자료로 사용하여 *PET*를 계산하고 각 수치 기상 모델을 사용하였을 때 발생할 수 있는 불확도를 정량적으로 분석이 수행되어야 할 것이다. 이러한 불확도 자료를 활용하여 *PET* 전망자료의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

잠재적인 증발산량을 나타내는 *PET*는 재배 방식에 따른 증발산량 변동을 예측하기 어렵다. 본 연구에서는 벼 재배에 따른 증발산량을 계산하기 위해 작물 생육 단계에 따른 작물 계수를 사용하였다. 그러나 이러한 작물 계수는 시간에 따라 고정되어 있어 실제 농경지에서 발생할 수 있는 증발산량을 계산하기는 어렵다. 또한, 미래 기후조건에서 현재 조건과 상이한 작물의 반응에 따른 증발산량을 계산하는 것에 한계가 있다. 반면, 작물 생육 모델은 기상요소에 따라 작물의 생육이 모의되며, 이에 따라 작물의 수량뿐 아니라 여러 환경 요소들도 함께 모의된다. 특히, 작물 모델의 출력 변수 중 하나인 실제 증발산량 자료를 이용하여 특정 지역의 수자원 요구량을 추정할 수 있다. 따라서, 추후 연구에서 작물 모델을 활용

하여 얻어진 지역 내 증발산량과 강수량 자료를 통합하여 미래기후조건에서의 수자원 변화를 예측할 수 있을 것이다.

일반적인 GIS 도구에서 지원하지 않는 gridded binary 형식의 국가 표준 기후변화 시나리오 자료들을 활용하기 위해 readGrADSWrapper를 사용할 수 있다. 본 연구에서는 12.5 km 공간해상도의 잠재증발산량과 같은 단순한 응용기후 정보를 생산하였으나, readGrADSWrapper를 활용하여 초고해상도의 기상 자료를 이용하거나 여러 기후 정보를 종합한 복잡한 응용기후정보를 생산할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나, 현재 버전에서의 readGrADSWrapper는 윈도우 운영체제(Microsoft, Seattle)에서 지원되지 않는다. 사용자 편의성을 위해 윈도우를 지원한다면 GIS 자료를 처리하는 ArcGIS(ESRI, California)와 같은 다른 도구들과 연계할 수 있다. 따라서, readGrADSWrapper가 다양한 운영체제들을 지원할 수 있도록 추가적인 개발 노력이 필요할 것이다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ010115022017)의 지원에 의해 이루어진 것임.

적 요

농경지에서의 증발산량 예측은 농업 분야에서의 기후변화 영향 평가 및 적응 계획 수립에 도움을 줄 수 있다. 본 연구에서는 격자형 국가 표준 기후변화 시나리오 자료를 이용해 잠재 증발산량(*PET*)과 가뭄지수(*DI*) 전자 기후도의 생산 및 분석을 수행하였다. 특히, 격자형 기상 자료의 처리를 지원하는 도구인 readGrADSWrapper를 기반으로 격자형 기후변화 시나리오 자료를 통계 분석 도구인 R에서 활용하는 기술에 중점을 두었다. FAO-56 공식을 R 스크립트에 구현하여 현재와 미래 조건에서 벼 재배기간 동안의 *PET*를 계산하였다. 또한, 이를 활용하여 벼 재배에 따른 증발산량(*PET_{rice}*)과 *DI* 자료를 생산하고 시공간적 분석을 수행하기 위한 R 스크립트를 구현하였다. 한반도에서 *PET*의 시공간적 변화 양상은 현재와 미래 조건에서 지역에 따라 차이를 보였다. 전반적으로 한반도에서는 *PET*와 *PET_{rice}*가 21세기 후반으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 예측 결과들은 지역과 시기에 따라 증발산량 증가에 대응

하기 위한 수자원 관리가 필요하다는 것을 암시하였다. 예를 들어, 현재 조건에서 습윤 지역으로 분류되던 충청남도 지역이 21세기 중반 이후에는 아습윤 지역으로 바뀔 것으로 전망되었다. 이러한 결과들은 PET와 DI 등 수자원과 관련된 변수 값들의 시공간적인 계산과 분석을 통해 미래 기후조건에서 작물 생산성을 증진시키기 위한 적응 대책 수립을 지원할 수 있을 것이다. 또한, readGrADSWrapper와 같은 격자형 기상 자료의 처리도구의 활용을 통해 보다 다양한 응용기후 변수에 대한 전자기후도 생산 및 분석을 원활히 수행할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Allen., G. R., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Berman, F., K. Kennedy, A. Chien, C. Kesselman, K. Cooper, J. Mellor-Crummey, J. Dongarra, D. Reed, I. Foster, L. Torczon, D. Gannon, R. Wolski, L. Johnson, 2001: The GrADS project: Software support for high-level grid application development. *International Journal High Performance Computing Applications* **15**, 327-344.
- Bivand, R. S., E. Pebesma, and V. Gomez-Rubio, 2013: Spatial data import and export. *Applied Spatial Data Analysis with R* (2nd ed.), Gentleman R., K Hornik, and G. G. Parmigiani (Eds.), Springer New York, 83-125.
- Budyko, M. I., 1974: *Climate and Life*, Academic, San Diego, Calif., 508pp.
- Kim K., M. Kang, H. Jeong, and J. Kim, 2013: Comparison of crop growth and evapotranspiration simulations between Noah Multi Physics Model and CERES-Rice Model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**, 282-290
- Hijmans, R. J., and J. V. Etten, 2014: Raster: Geographic data analysis and modeling, <http://cran.r-project.org/package=raster> (2017. 3. 1).
- 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.
- NIMR, 2011: Report on climate change scenarios for IPCC AR5 National Institute of Meteorological Research, Seoul, 117pp.
- Ponce, V. M., R. P. Pandey, and S. Eracan, 2000: Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal Hydrologic Engineering* **5**, 222-224.
- Seo, J., C. Shim, J. Hong, S. Kang, N. Moon, and Y. S. Hwang, 2013: Application of the WRF model for dynamical downscaling of climate projections from the Community Earth System Model (CESM). *Atmosphere* **23**(3), 347-356.
- Yun, J. I., 2007: Applications of "High Definition Digital Climate Maps" in restructuring of Korean agriculture. *Korean Journal Agriculture Forest Meteorology* **9**, 1-16.