



FAO-AquaCrop을 이용한 기후변화가 벼 증발산량 및 수확량에 미치는 영향 모의 Simulating Evapotranspiration and Yield Responses of Rice to Climate Change using FAO-AquaCrop

정상옥^{*,†}

Chung, Sang-Ok^{*,†}

ABSTRACT

The impacts of climate change on yield and evapotranspiration of rice have been modeled using AquaCrop model developed by Food and Agriculture Organization (FAO). Climate change scenario downscaled by Mesoscale Model 5 (MM5) regional model from ECHO-G General Circulation Model (GCM) outputs by Korea Meteorological Research Institute (METRI) was used in this study. Monthly average climate data for baseline (1971-2000) and three time periods (2020s, 2050s and 2080s) were used as inputs to the AquaCrop model. The results showed that the evapotranspiration after transplanting was projected to increase by 4 % (2020s), 8 % (2050s) and 14 % (2080s), respectively, from the baseline value of 464 mm. The potential rice yield was 6.4 t/ha and water productivity was 1.4 kg/m³ for the baseline. The potential rice yield was projected to increase by 23 % (2020s), 55 % (2050s), and 98 % (2080s), respectively, by the increased photosynthesis along with the CO₂ concentration increases. The water productivity was projected to increase by 19 % (2020s), 44 % (2050s), and 75 % (2080s), respectively.

Keywords: AquaCrop; Biomass; Climate change; Evapotranspiration; Rice yield

1. 서 론

요즘 저탄소 녹색성장이 큰 관심을 받고 있다. 인간의 활동으로 인한 온실가스의 증가로 기온의 상승 등 기후변화가 예상되고 있으며, 우리나라는 2100년까지 대기 중 탄산가스 농도와 기온은 상승하고 강우량은 증가할 것으로 예측되었다 (METRI, 2004). 이러한 기후 변화는 수자원 환경과 작물생육환경에도 영향을 미칠 것이며 따라서 작물의 증발산량이나 수확량에도 영향을 미칠 것이다.

기후변화가 작물에 미치는 영향은 복잡하다. 기온의 상승은 증발산량을 증가시켜 생산량 증가요인이 되는 한편, 생육기간의 단축, 잎실율의 감소, 호흡량의 증가 등으로 생산량 감소요인이 되기도 한다. 대기 중 CO₂ 농도가 증가하면 탄소동화작용은 증가하여 생산량이 증가한다. (Kim et al., 2000). 열대지방 식물인 목초, 옥수수, 사탕수수, 수수 등 C4 식물은 현재의 대기 중 CO₂ 농도에서 탄소를 충분히 이용하므로 CO₂ 농도가 증가하여도 작물생산량은 크게 증가하지 않는 반면, 벼, 보리,

콩, 감자, 채소와 같은 C3 식물은 CO₂ 농도가 증가하면 탄소동화작용이 증가하게 되어 작물생산량이 크게 증가할 것으로 예상된다.

Hong et al. (2009)은 미래 기후자료를 이용하여 우리나라 논벼의 10년 빈도 증발산량 변화를 예측하였으며, 2011년부터 2100년까지를 30년 단위로 구분하였을 때 각각 1.56 %, 5.99 % 및 10.68 % 증가할 것으로 예측하였다. 벼 작물모형을 이용한 연구는 별로 많지 않다. Matthews et al. (1997)은 ORYZA1 과 SIMRI 두개의 벼 작물모형을 이용하여 아세아의 벼 생산량을 모의하였다. Shim et al. (2008)과 Han (2007)은 CERES-Rice 모형을 이용하여 우리나라의 장래 벼 생산량을 모의하였다. 이들은 기상연구소의 SRES (Special Report on Emissions Scenarios, IPCC, 2000) A2 시나리오 결과를 이용하여 벼 생산량 변화를 추정하였으며 장래에는 우리나라 벼 생산량이 감소할 것으로 예측하였다. 그러나 이들은 CO₂ 농도 증가를 고려하지 않고 기온상승만 고려한 결과 생산량이 감소하는 것으로 예측한 것으로 판단된다. Timsina and Humphreys (2006)는 CERES-Rice 모형을 이용하여 기후변화가 아세아 여러 나라의 벼 생산량에 미치는 영향을 조사하였는데 기온상승은 생산량을 감소시키고 CO₂ 농도 증가는 생산량을 증가시켜서 전체적으로는 생산량을 증가시킨다고 하였다. 중국, 인도 등에서 CERES-Rice 모형을 이용하여 장차 기후변화가 벼 생산량에 미치는 영향을 분석한 결과는 대체적으로 생산량이 증가하는 것으로 예

* 경북대학교 농업토목공학과

† Corresponding author. Tel.: 82-53-950-5734

Fax: 82-53-950-6752

E-mail address: sochung@knu.ac.kr

2010년 2월 23일 투고

2010년 4월 30일 심사완료

2010년 5월 10일 게재확정

측되었다 (Yao et al., 2007; Saseendran et al., 2000). 기후 변화가 논 관개요구량에 미치는 영향에 대하여는 Chung et al. (2010)이 SRES A2 및 B2 시나리오를 선정하여 논 용수량 변화를 추정하였으며, 전체적으로 논 용수량이 감소할 것이며 시간적 공간적 변동성이 클 것으로 예측하였다.

FAO는 최근 AquaCrop 3.1 모형을 배포하였다 (Raes, et al, 2010). 이는 벼를 포함하여 여러 작물에 적용할 수 있으며 수년간에 걸쳐서 각 분야의 많은 연구자들에 의하여 공동으로 개발되었으며 보정 및 검증되었다.

AquaCrop 모형을 이용한 연구를 보면, Farahani et al. (2009)은 시리아에서 목화 재배 관측자료와 본 모형이 예측한 작물생육과 수확량이 잘 일치하였다고 보고하였고, Hsiao et al. (2009)은 미국 캘리포니아 데이비스 지방에서 6년간 옥수수 생육을 관측한 자료를 이용하여 AquaCrop의 주요 매개변수 값을 구하여 모형을 실행한 결과 포장 관측치와 모형 예측치가 잘 일치하는 것으로 보고하였다. Todorovic et al. (2009)은 남부 이태리의 해바라기를 대상작물로 하여 AquaCrop, CropSyst 및 WOFOST 작물모형을 비교하였으며, 이 중 AquaCrop이 입력 매개변수는 가장 적으면서 작물생육과 수확량은 비슷하게 잘 모의하였으므로 단순한 모형인 AquaCrop의 사용을 권장한다고 하였다.

본 연구에서는 AquaCrop 3.1을 이용하여 기후변화가 벼의 증발산량과 수확량에 미치는 영향을 조사하였다. 기후변화 시나리오는 METRI (2002, 2003, 2004)의 연구결과를 이용하여 우리나라 전역에서 SRES A2 시나리오에 대하여 2020년대 (2010-2039), 2050년대 (2040-2069), 2080년대 (2070-2099)에 대하여 분석하였다. 본 연구의 목적은 기후변화가 벼의 증발산량 및 수확량에 미치는 영향을 분석하여 장래의 농업계획 수립에 필요한 기초자료를 제공하는 데 있다.

II. AquaCrop 모형

1. 모형의 개요

AquaCrop는 FAO가 2009년 1월에 처음으로 버전 3.0을 개발하여 배포하였으며 2010년 1월에 버전 3.1을 배포하였다. 이 모형은 수분환경, 비료, 관개방법 등이 여러 가지 작물의 생산량에 미치는 영향을 분석한다. 이 모형은 작물의 물 생산성 추정 모형으로 작물의 물에 대한 반응을 잘 모의하도록 만들어졌으며, FAO Irrigation and Drainage paper No. 33 (Doorenbos and Kassam, 1979) 작물모형 기능을 향상시킨 개정판으로 볼 수 있다. 본 모형의 특성은 매개변수의 수가 적으며, 간단하고 정확하며, 모의능력이 탁월하다는 것이다. AquaCrop의 특징은

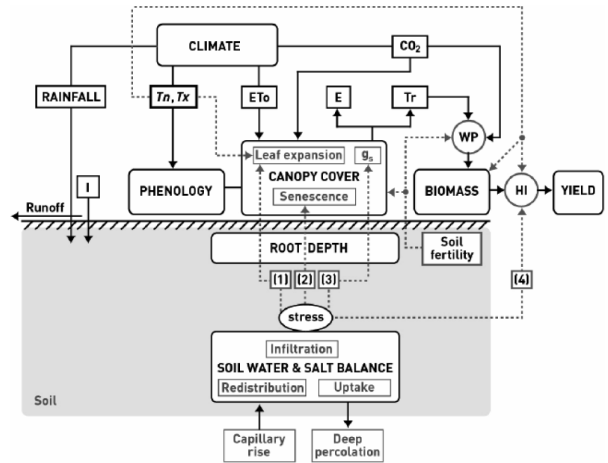


Fig. 1 Schematics of AquaCrop showing the soil-plant-atmosphere continuum (after Raes et al., 2010)

작물의 물 이용효율과 관련된 연구에 적합하며 사용자의 편의를 고려하여 메뉴 작동방식으로 만들어졌다.

AquaCrop은 물수지, 바이오매스 생산량 및 수확량 계산으로 구성된다. Fig. 1은 AquaCrop의 항목간의 기능적인 상호관계를 설명하는 흐름도이다. 벼에 대한 모형 보정은 주로 국제미작연구소 (International Rice Research Institute) 연구진들에 의하여 수행되었다.

가. 물 수지

AquaCrop은 물수지 계산은 지표유출, 침투, 재분배, 심층침투, 증발 및 증산 등을 포함한다. 지표유출은 미국 농부성 토양보전국의 CN법으로 산정한다. 논에서는 논둑의 높이를 설정할 수 있으며, 강우가 많은 경우에는 배수몰로를 통하여 지표유출이 발생한다. 논에서의 물 수지식은 다음과 같으며 계산 시간간격은 1일로 하였다.

$$\Delta S = R + I - (ET + DP + RO) \quad (1)$$

여기서, ΔS 는 저류량의 변화량, R은 강우량, I는 관개량, ET는 증발산량, DP는 심층침투량, RO는 지표배수량이다.

작물 증발산량은 증발량과 증산량으로 구성된다. 충분한 토양수분이 공급될 때 최대 작물 증발산량은 식 (2)로 계산하고, 물이 불충분 할 때 작물 증발산량은 식 (3)으로 계산하며 증발과 증산을 구분하여 계산한다.

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (2)$$

$$ET = (K_{s_{sto}} K_{cb} + K_r K_e) ET_o \quad (3)$$

여기서, ET_c 는 물 공급이 충분할 때의 작물 증발산량, ET 는 물 공급이 불충분할 때의 작물 증발산량, K_{cb} 는 증산계수, K_e 는 증발계수, ET_o 는 기준작물 증발산량, K_{Ssto} 는 수분스트레스에 기인한 기공폐쇄상수, K_r 는 증발감소계수이다.

나. 작물 수확량

작물의 생육 및 수확량의 수분환경에 대한 반응은 매우 복잡하며 보통 경험식을 이용한다. Doorenbos and Kassam (1979)은 곡물과 채소 등의 작물 수확량은 증발산량에 의해 결정된다고 보고 수확량 감소비율을 다음 식으로 산정하였다.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = k_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (4)$$

여기서, Y_x 및 Y_a 는 작물의 가능 최대 및 실제 수확량 (kg), ET_x 및 ET_a 는 작물의 가능 최대 및 실제 증발산량 (mm), k_y 는 비례상수이다.

AquaCrop 모형은 식 (4)의 증발산량보다는 증산량이 직접적으로 바이오메스량에 영향을 미친다고 보았다. 즉, 바이오메스량은 총 증산량에 물의 생산성 상수 (Water Productivity, WP)를 곱하여 계산한다.

$$B = WP \times \sum Tr_i \quad (5)$$

여기서, B 는 바이오메스량 (kg), WP 는 물의 생산성 상수(g/m^2)이고 Tr 은 작물 증산량 (mm)이다. WP 는 식 (6)으로 계산되는 일별로 보정된 생산성 상수 (WP^*_{adj})를 생육기간동안 평균한 값이며, 증산량이 바이오메스량으로 전환되는 비율을 나타낸다.

표준 생산성 상수 (WP^*)는 대기 중 탄산가스 농도 및 토양 비옥도 등에 따라서 식 (6)과 같이 보정해 주어야 한다. 식 (7)은 탄산가스 농도에 따른 수정계수 계산식이다.

$$WP^*_{adj} = f_{CO_2} \times f_{yield} \times K_{s_{wp}} \times WP^* \quad (6)$$

$$f_{CO_2} = \frac{(C_{a,i} / C_{a,o})}{1 + 0.000138(C_{a,i} / C_{a,o})} \quad (7)$$

여기서, WP^*_{adj} 는 보정된 생산성 상수(g/m^2), WP^* 는 표준 생산성 상수(g/m^2), f_{CO_2} 는 대기 중 탄산가스 농도에 따른 수정계수, $C_{a,i}$ 는 해당 년도의 대기중 CO_2 농도, $C_{a,o}$ 는 기준년의 대기 중 탄산가스 농도이다. f_{yield} 는 수확 보정계수로 열매에 지방이나 단백질이 많은 경우에는 탄수화물 보다 많은 에너지가

필요하므로 수확량이 감소하게 되는 것을 보정한다. $K_{S_{wp}}$ 는 토양비옥도 스트레스 상수이다.

WP^* 는 기준 CO_2 농도인 369 ppm인 때 1mm 증산량에 대한 단위면적당 지상부 바이오메스 생산량으로 C_3 식물은 $15-20 g/m^2$, C_4 식물은 $30-35 g/m^2$ 이다. 식 (7)에서 분모는 1에 가까우므로 f_{CO_2} 는 거의 CO_2 농도 비에 비례하는 것을 알 수 있다. 일별 바이오메스 형성량은 기온 스트레스 상수와 보정된 생산성 상수로부터 계산한다.

$$B_i = K_{s_b} \times WP^*_{adj} \times Tr_i \quad (8)$$

여기서, B_i 는 i 일의 바이오메스 형성량, K_{s_b} 는 기온 스트레스 상수, WP^*_{adj} 는 보정된 생산성 상수, Tr_i 는 i 일의 증산량 (mm)이다. 작물의 수확량은 바이오메스량에 수확지수 (Harvest Index, HI)를 곱하여 계산한다.

$$Y = B \times HI \quad (9)$$

여기서, Y 는 수확량 (kg), B 는 지상부 바이오메스량 (kg), HI 는 바이오메스량에서 수확량이 차지하는 비율을 나타내는 수확지수이다.

수확지수 (HI)는 개화 및 수분(受粉)과 밀접한 관계가 있다. 개화 및 수분은 토양수분 스트레스나 기온 스트레스에 크게 영향을 받는다. 수확지수 (HI)는 다음 식으로 계산한다.

$$HI = f_{ante} \times f_{post} \times HI_{adj} \quad (10)$$

여기서, f_{ante} 는 개화기 전의 수분 스트레스 상수, f_{post} 는 개화기 후의 수분 스트레스 상수, HI_{adj} 는 수정 수확지수로 표준 수확지수 (HI_o)를 불임율과 부족한 탄소동화작용에 대해 수정한 값이다. HI_o 는 수분, 영양분, 기온, 일조량 등이 부족하지 않아 스트레스가 없을 때의 표준 수확지수이다.

AquaCrop은 작물 생육엔진인 식 (5)와 (9)가 제대로 기능을 하기 위하여 토양-작물-대기 연속체를 포함하는 구조를 가지고 있다. 즉, 토양내의 물수지, 작물의 발달, 생육 및 결실 과정, 대기의 온도, 강수량, 증발요구량, CO_2 농도 등을 포함한다. 또한 영농관리가 작물 생육에 미치는 영향을 모의하기 위하여 관개와 시비를 포함한다. 그러나 병해충이나 잡초 등의 영향은 포함하지 않는다 (Raes et al., 2010).

2. 매개변수 및 입출력 자료

AquaCrop 모형의 매개변수는 작물과 토양 및 영농관리에

대한 것들이 있다. 작물과 관련된 주요 매개변수로는 작물 생육기간, 개화시기, 뿌리 성장속도, 표준 생산성 상수, 표준 수확지수 등이 있다. 또한 물 부족, 비료 부족 및 고온 등에 따른 여러 가지 스트레스 상수 (잎 성장 감소계수, 잎의 노화촉진계수, 수확지수 수정계수 등)가 있다. 이들 매개변수 값은 연구대상 지역의 대상작물에 대한 값을 사용하여야 하나, 구하기 어려운 경우에는 모형이 제공하는 값들을 사용하도록 권장하고 있다. 모형이 제공하는 매개변수 값은 작물 종류별로 모형 보정을 거쳤기 때문에 오차는 크지 않을 것으로 판단된다.

AquaCrop 모형의 입력자료는 기상, 작물, 토양자료와 관개 및 비료를 포함하는 영농관리 자료가 필요하다. 기상자료는 일별, 순별, 월별 모두 가능하며 순별 및 월별 값은 모형 실행 때 일별 값으로 전환된다. 이 때 월별 및 순별 강우량은 일 평균 강우량으로 환산하며, 기온 및 잠재증발산량은 전후기간의 값을 포함한 회귀분석을 하여 일별 값을 산정한다. 각 입력과 일의 내용은 다음과 같다.

- 기상 파일 - 최고 및 최저 기온, 강우량, 잠재증발산량 및 CO₂ 농도
- 작물 파일 - 작물의 종류 및 특성, 파종방법 및 밀도, 생육기간, 개화시기, 뿌리성장, 수분 스트레스 계수, 영양분 스트레스 계수, 및 기온 스트레스 계수
- 토양 파일 - 토층의 개수, 토성, 토양수분특성, 투수계수, 지표면 CN, 불투수층 유무 및 깊이
- 관개 파일 - 관개 유무, 관개 방법, 관개 일정 등
- 영농관리 파일 - 지표멀칭 유무, 논둑 높이, 비료 부족정도 등.

출력자료는 다음과 같다.

- 작물 생육 및 토양수분 등 - 일별 증발산량, 잎 덮음 (canopy cover), 토양수분 등.
- 수확량 - 바이오메스 생산량, 수확량, 물의 생산성 등.
- 물 수지 - 토층별 토양함수량, 강우량, 관개요구량, 증발량, 증산량, 지표유출량, 심층침투량 등

본 연구에서 사용한 대표적인 매개변수와 입력자료의 값은 Table 1과 같다. 표준 생산성 상수 (WP*)는 19.0 g/m², 표준 수확지수 (HIo)는 43 % 를 사용하였으며, 작물계수산정에 이용되는 식 (2)의 초기 K_e 및 최대 K_{cb}는 모두 1.10을 사용하였다. 이 값들은 필리핀 소재 국제미작연구소에서 다년간 수집한 자료로부터 도출된 값이며, 모형 보정과 검증을 거쳤기 때문에 따로 자료가 없는 우리나라의 경우 이 값들을 준용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 생육일별로 K_e 및 K_{cb} 값은 잎 덮음 (canopy cover), 기온, 수분 등에 따라서 모형이 일별로 산정한다.

Table 1 Basic parameter values used in this study

Parameter	Description	Unit	Value	Remarks
WP*	Normalized water productivity	g/m ²	19.0	Eq. (6)
HIo	Reference harvest index	%	43.0	Eq. (10)
T _{base}	Minimum air temperature below which pollination starts to fail	°C	8.0	
T _{upper}	Maximum air temperature above which pollination starts to fail	°C	35.0	
K _e	Initial evaporation coefficient	-	1.10	Eq. (2)
K _{cb}	Maximum transpiration coefficient	-	1.10	Eq. (2)

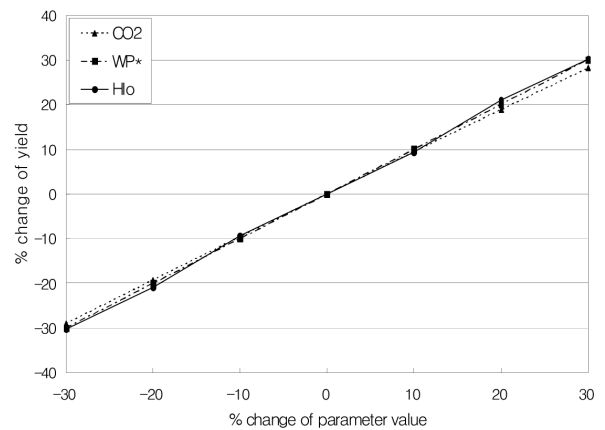


Fig. 2 Sensitivity of the main parameters

3. 민감도 분석

모형의 매개변수와 입력자료 값들이 출력 값에 미치는 영향을 분석하기 위하여 주요 값들의 수확량에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 민감도는 기준년도 (1971-2000) 입력자료를 이용하여 표준 생산성 상수, 표준 수확지수, CO₂ 농도 등을 30 % 까지 증감시켰을 때 수확량의 변화를 분석하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. 물과 비료 등이 충분한 경우에 식 (6)-(10)에서 알 수 있는 바와 같이 표준 생산성 상수, 표준 수확지수 및 CO₂ 농도는 수확량에 거의 직선적으로 영향을 미치게 된다. 민감도 분석결과도 이들이 수확량에 거의 1:1로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 충분한 물과 비료가 공급되는 경우에 대하여 분석하였으므로 물, 비료 및 기온 등에 따른 여러 가지 스트레스 상수에 대한 민감도 분석은 하지 않았다.

III. 모형의 실행

1. 기후 입력자료

본 연구에서 기후 시나리오는 기상연구소에서 ECHO-G GCM

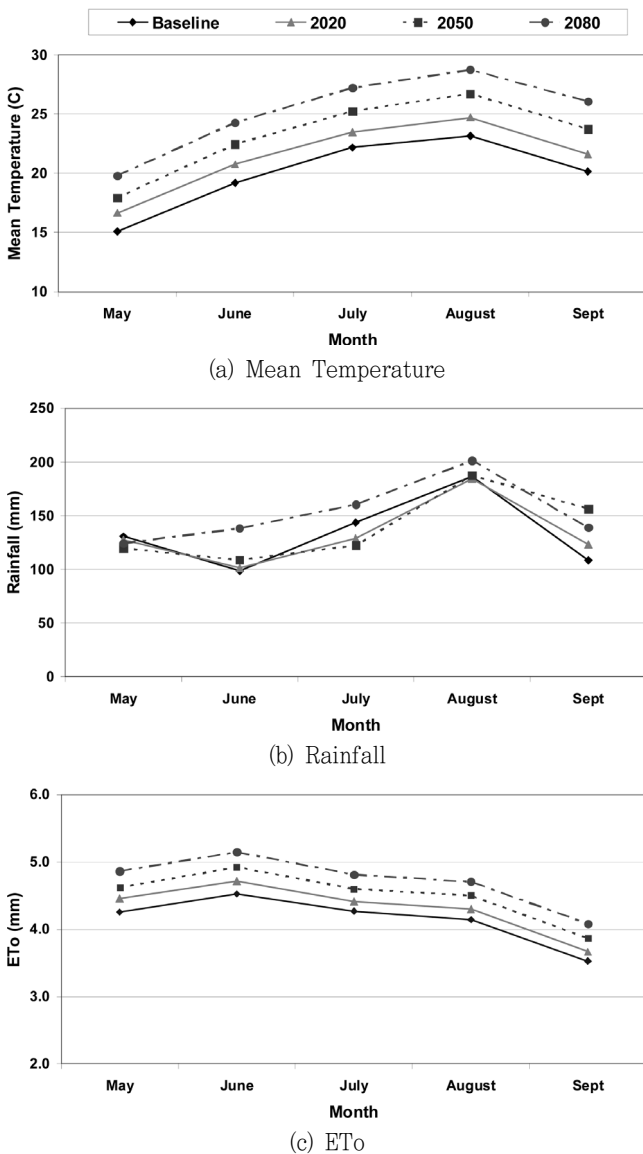


Fig. 3 Projected monthly mean temperature, rainfall and ET0

모형 결과를 MM5 지역기후모형을 이용하여 역학적으로 상세화한 결과를 이용하였다 (METRI, 2002, 2003, 2004). 이는 SRES A2 시나리오에 대하여 동아시아 지역의 27 km × 27 km 격자망에 대하여 2001-2100 기간의 월 평균 값을 제공한다. 본 연구에서는 우리나라에 해당하는 199개 격자점의 기상 값을 30년 단위로 나누어 2020년대 (2010-2039), 2050년대 (2040-2069) 및 2080년대 (2070-2099)의 월 평균 값을 산정하였다.

본 연구에서 사용된 기상자료는 월 평균 최고기온, 최저기온,

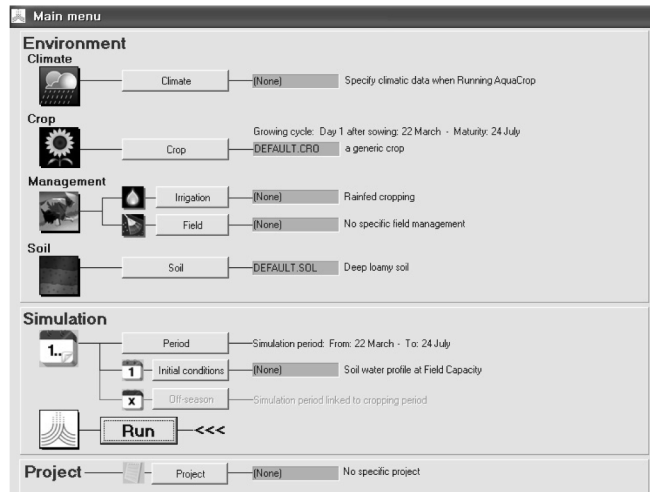


Fig. 4 Screen at the starting of AquaCrop model run

월평균 강우량 및 월평균 잠재증발산량이다. 월평균 잠재증발산량은 기상연구소 자료의 제한으로 인하여 기온자료만 이용하였으며 Chung (2009)에서와 같이 Hargreaves식을 이용하여 계산하였다 (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = 0.0023 (T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a \quad (11)$$

여기서, ET₀는 잠재증발산량 (mm/day), T_{mean}, T_{max}, T_{min} 은 평균, 최고, 최저 기온 (°C), R_a는 수심으로 환산한 대기경계층의 태양복사량 (extraterrestrial radiation, mm/day)이다.

Fig. 3은 기간별 월평균 기온, 강우량 및 잠재증발산량을 보여주고 있다. 2080년대가 가장 높은 기온을 나타내고 있으며, 또한 5월과 6월에는 가장 큰 ET₀를 나타내고 있다. 대기 중 CO₂ 농도는 SRES 시나리오별로 다르며, 2100년의 예측치는 A2는 836 ppm이고 B2는 611 ppm이다 (IPCC, 2000).

2. 모형실행

AquaCrop 모형은 이양일로부터 일별로 실행한다. 본 연구에서는 5월 31일에 모를 이양하는 것으로 가정하였다. 모형은 이양한 비가 누적 기온에 의하여 9월 12일까지 자라는 것으로 모의하였다. 낙수구의 높이를 10 cm로 설정하여 강우시 답수심 10 cm를 초과하는 부분은 유출되도록 하였다. 관개는 지표 답수심이 0이 되면 7 cm 깊이로 관개하는 것으로 설정하였다. Fig. 4는 모형의 초기화면을 보여주고 있다.

Table 2 Comparison of crop water use during the growing season (June 1 to Sept. 12) for the baseline (1971–2000) and future periods (unit: mm)

Year	Mean CO ₂ (ppm)	Mean Temp. (°C)	Rainfall	Irrigation	Evaporation	Transpiration	ET	Deep percolation
Baseline	345	21.4	477	147	107	357	464	130
2020s	429	22.9	468	217	111	371	482	170
2050s	545	24.7	483	217	116	387	503	156
2080s	718	26.7	559	144	122	405	527	142

IV. 결과 및 고찰

1. 물 수지

Table 2는 벼 생육기간의 물 수지를 보여주고 있다. 기준년도에 비하여 2080년대의 벼 생육기간의 강우량이 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 후기로 갈수록 기온이 증가하므로 증발량과 증산량도 증가하는 것으로 나타났다. 각 기간별 이양후의 증발산량은 기준년도에 464 mm에서 2020년대, 2050년대, 2080년대에는 각각 482 mm, 503 mm 및 527 mm로 4 %, 8 %, 및 14 % 증가할 것으로 예측되었다. 각 기간별 이양후의 관개요구량은 기준년도에 147 mm, 2020년대, 2050년대, 2080년대에 각각 217 mm, 217 mm 및 144 mm로 예측되었다. 기준년도에 비하여 2020년대와 2050년대에는 강우량은 약간 증가하였으나 기온이 크게 증가하여 증발산량도 크게 증가하였기 때문에 관개요구량은 크게 증가하였다. 2080년대에는 증발산량과 함께 강우량도 크게 증가하여서 관개요구량은 기준년도와 비슷한 값을 나타내었다. 월 강우량 입력자료는 일 평균값으로 환산하여 모형을 실행하기 때문에 지표유출은 0으로 산출되었다. 따라서 모형이 추정한 관개요구량은 주어진 가정하에서 추정된 값이며 또한 관리손실과 수로손실 등은 고려되지 않은 값이다.

2. 작물수확량

AquaCrop 모형은 병충해나 잡초의 피해를 고려하지 않았으며, 주어진 기후 시나리오에서 수분이나 비료분의 부족없이 최적의 작물생육환경이 조성되는 것으로 가정하고 바이오메스나 수확량을 산정하였다. 따라서 이 생산량은 가능 최대값인 잠재생산량으로 부르는 것이 타당할 것으로 사료된다. Table 3은 시나리오별 잠재 작물생산량과 물의 생산성을 보여주고 있다. 기준년도에 벼 조곡(粗穀) 잠재생산량은 6.4 t/ha로 나타났다.

모형의 검증은 실측치와 예측치 수확량을 비교하여 유사한 값을 나타내는지 검토하여야 한다. 그러나 실제 벼 생산량은 기온, 비료, 병충해, 잡초 등의 조건에 따라 모형에서와 같이 최상의 조건이 될 수 없으므로 모형 예측치 보다 작을 것으로 예

Table 3 Comparison of potential crop yield and water productivity for the baseline (1971–2000) and future periods

Year	Mean CO ₂ (ppm)	Biomass (t/ha)	Yield (t/ha)	Change ratio	Water productivity (kg/m ³ ET)		Change ratio
					Biomass	Yield	
Baseline	345	14.9	6.4	-	3.2	1.4	-
2020s	429	18.4	7.9	1.23	3.8	1.7	1.19
2050s	545	23.0	9.9	1.55	4.6	2.0	1.44
2080s	718	29.6	12.7	1.98	5.6	2.4	1.75

상된다. 과거의 농업통계자료와 비교하면 기준년도의 모형 예측 값인 벼 조곡 잠재생산량 6.4 t/ha은 적절한 예측 값으로 판단된다.

모형이 예측한 물의 생산성은 1.4 kg/m³로 나타났다. 여기서 물의 생산성은 단위 증발산량에 대한 수확량을 뜻한다. 벼 잠재생산량은 2020년대, 2050년대, 2080년대에서는 기준년도보다 23 %, 55 %, 및 98 % 증가하는 것으로 예측되었으며, 물의 생산성은 19 %, 44 %, 및 75 % 증가하는 것으로 예측되었다. CO₂ 농도가 높을수록 탄소동화작용이 활발해져서 식 (5), (6), 및 (7)에서와 같이 생산량과 물의 생산성이 증가하는 것으로 나타났다. 우리나라의 작물 통계를 보면 2008년도 단위 면적당 논벼 조곡 생산량은 전국 평균 6.94 t/ha이고 도별 최고는 충청남도 7.34 t/ha이었으며 (MFAFF, 2009), 2004년도 호주 NSW 지방의 벼 생산량은 12.8 t/ha (NSW Department of Primary Industries, 2004)이었다는 것을 고려하면 2080년대의 벼 잠재생산량 12.7 t/ha는 충분히 가능한 숫자라고 하겠다. 본 연구에서 사용한 미래의 CO₂ 농도 예측치는 SRES 시나리오 중 가장 큰 값인 A2 시나리오를 사용하였다. 따라서 2080년대의 CO₂ 농도는 기준년도 345 ppm보다 2배 이상 큰 718 ppm이었으며 그로 인하여 생산량이 크게 증가한 것으로 판단되며, 물의 생산성 증가도 CO₂ 농도 증가가 중요한 요인으로 판단된다.

탄소동화작용에 대하여 AquaCrop과 다른 벼 모형과 비교하면 AquaCrop은 식 (6)–(10)에서와 같이 생산량이 CO₂ 농도에 직접적으로 영향을 받는데 비하여 다른 모형은 빛과 CO₂ 농도

등에 영향을 받는 것으로 차이가 나며, 이 점이 AquaCrop이 CO₂ 농도에 더 민감한 원인으로 판단된다.

Table 2의 대기중 CO₂ 농도, 기온 및 증산량과 Table 3의 벼 수확량과 물의 생산성의 전반적인 변화경향을 보면 AquaCrop 모형이 CO₂ 농도 증가와 기온 및 증산량의 증가에 따라서 작물 생산량이나 물의 생산성의 변화를 잘 모의한 것으로 판단된다.

본 연구는 한 가지 시나리오에 대한 한 개의 GCM 모형결과를 MM5 지역기후모형을 이용하여 상세화한 결과를 이용하였다. 또한 30년 월 평균 기상값을 입력자료로 이용하였다. 따라서 여러 가지 불확실성을 많이 내포하고 있다고 하겠다. 이러한 불확실성을 줄이기 위하여 기상연구소에서는 여러 모형과 시나리오를 사용하는 앙상블 모형연구를 진행하고 있으며, 앞으로 더 많은 시나리오에 대하여 다양한 GCM 모형결과와 상세화 기법에 따른 기상자료는 물론이며 일별 기상값을 이용한 연구를 수행하여야 보다 나은 모형 예측 값을 얻을 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구는 AquaCrop 3.1 작물모형을 이용하여 대기 중 CO₂ 농도, 기온, 강수량 등의 기후변화가 논 용수환경과 작물의 증발산량 및 수확량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 기상연구소에서 SRES A2 시나리오에 대하여 ECHO-G GCM 결과를 MM5 지역기후모형으로 상세화한 기후예측결과를 이용하였으며 물 수지, 작물생육 및 수확량을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 증발산량은 기온 상승과 함께 후기로 갈수록 증가하는 것으로 예측되었다. 이양후의 증발산량은 기준년도(1971-2000)에 464 mm에서 2020년대, 2050년대, 2080년대에 각각 4 %, 8 % 및 14 % 증가할 것으로 예측되었다.

2. 벼 이양후의 관개요구량은 기준년도에 147 mm, 2020년대, 2050년대, 2080년대에 각각 217 mm, 217 mm 및 144 mm로 추정되었다.

3. 기준년도에 벼 잠재생산량은 6.4 t/ha로, 물의 생산성은 1.4 kg/m³ (ET)로 나타났으며, 벼 잠재생산량은 2020년대, 2050년대, 2080년대에서는 기준년도보다 23 %, 55 %, 및 98 %, 물의 생산성은 19 %, 44 %, 및 75 % 증가하는 것으로 예측되었다.

4. 모형의 매개변수와 입력자료인 표준 생산성 상수, 표준 수확지수, CO₂ 농도 등의 변화는 벼 잠재생산량에 거의 직선적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 모형이 예측한 미래 벼 잠재수확량의 증가는 주로 기온과 CO₂ 농도 증가에 기인한 것

으로 판단된다.

이 논문은 2009년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage paper 56, Rome, Italy, 296pp.
2. Chung, S.O., 2009. Prediction of paddy irrigation demand in Nakdong river basin using regional climate model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 7-13 (in Korean).
3. Chung, S.O., J.A. Rodriguez-Diaz, E. K. Weatherhead and J.W. Knox, 2010. Climate change impacts on water for irrigating paddy rice in South Korea, *Irrigation and Drainage* 59. DOI 10.1002/ird.559
4. Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper No. 33*, FAO, Rome, Italy, 193pp.
5. Farahani, H.J., G. Izzi and T.Y. Oweis, 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton, *Agronomy Journal* 101: 469-476.
6. Han, H.J., 2007. Climate change impact assessment and development of adaptation strategies in Korea (III). Korean Environment Institute Report 2007/RE-01, 432pp (in Korean).
7. Hong, E.M., J.Y. Choi, S.H. Lee, S.H. Yoo and M.S. Kang, 2009. Estimation of paddy rice evapotranspiration considering climate change using LARS-WG, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
8. Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes and E. Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize, *Agronomy Journal* 101: 469-476.
9. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000. Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge

- University Press, Cambridge, UK, 570pp.
10. Kim, M.G., S.W. Nam, W.M. Suh, Y.C. Yoon, S.G. Lee and H.W. Lee, 2000. Agricultural Structure Engineering, Hyangmoonsa, Seoul, Korea, p203 (in Korean).
 11. Matthews, R.B., M.J. Kropff, T. Horie and D. Bachelet, 1997. Simulating the impacts of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adoption, *Agricultural Systems* 54(3): 399-425.
 12. METRI (Korea Meteorological Research Institute), 2002, 2003, 2004. The Development of Regional Climate Change Scenario for the National Climate Change Report (I, II, III), Seoul, Korea (in Korean).
 13. MFAFF(Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries), 2009. Food, Agriculture, Forestry and Fisheries Statistical yearbook. p98 (in Korean).
 14. NSW Department of Primary Industries, Australia, 2004. 2004 Ricecheck recommendations. 20pp.
 15. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres, 2010. AquaCrop reference manual, AquaCrop version 3.1, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
 16. Saseendran, S.A., K.K. Singh, L.S. Rathore, S.V. Singh and S.K. Sinha. 2000. Effects of climate change on rice production in the tropical humid climate of Kerala, India, *Climate Change* 44(4): 495-514.
 17. Shim, K.M., D.B. Lee, K.A. Noh, K.Y. Kim, H.C. Chung, and J.T. Lee, 2008. The impacts of climate change on agricultural production environment. Proceedings of the 21st symposium for Kangwon Agriculture development, Kangwondo Agricultural research and extension services, pp.43-71 (in Korean).
 18. Timsina, J. and E. Humphreys, 2006. Applications of CERES-Rice and CERES-Wheat in research, policy and climate change studies in Asia: A review, *International Journal of Agricultural research* 1(3): 202-225.
 19. Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivitic, M. Abi Saab, C. Stockle and P. Steduto, 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes, *Agronomy Journal* 101: 509-521.
 20. Yao, F.M., Y.L. Xu, E.D. Yin, M. Yokozawa and J.H. Zhang, 2007. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China, *Climate Change* 80: 395-409.