



# AquaCrop을 이용한 기후변화에 따른 미래 논벼 물발자국 변화 분석

## Analysis of Paddy Rice Water Footprint under Climate Change Using AquaCrop

오부영\* · 이상현\*\*·† · 최진용\*\*\*

Oh, Bu-Yeong · Lee, Sang-Hyun · Choi, Jin-Yong

### Abstract

Climate change causes changes in rainfall patterns, temperature and drought frequency. Climate change impact influences on water management and crop production. It is critical issue in agricultural industry. Rice is a staple cereal crop in South Korea and Korea uses a ponding system for its paddy fields which requires a significant amount of water. In addition, water supply has inter-relationship with crop production which indicates water productivity. Therefore, it is important to assess overall impacts of climate change on water resource and crop production. A water footprint concept is an indicator which shows relationship between water use and crop yield. In addition, it generally composed of three components depending on water resources: green, blue, grey water. This study analyzed the change trend of water footprint of paddy rice under the climate change. The downscaled climate data from HadGEM3-RA based on RCP 8.5 scenario was applied as future periods (2020s, 2050s, 2080s), and historical climate data was set to base line (1990s). Depending on agro-climatic zones, Suwon and Jeonju were selected for study area. A yield of paddy rice was simulated by using FAO-AquaCrop 5.0, which is a water-driven crop model. Model was calibrated by adjusting parameters and was validated by Mann-Whitney U test statistically. The means of water footprint were projected increase by 55 % (2020s), 51 % (2050s) and 48 % (2080s), respectively, from the baseline value of 767 m<sup>3</sup>/ton in Suwon. In case of Jeonju, total water footprint was projected to increase by 46 % (2020s), 45 % (2050s), 12 % (2080s), respectively, from the baseline value of 765 m<sup>3</sup>/ton. The results are expected to be useful for paddy water management and operation of water supply system and apply in establishing long-term policies for agricultural water resources.

**Keywords:** AquaCrop; water footprint; green water; blue water; climate change

## 1. 서론

인간의 활동으로 인한 CO<sub>2</sub> 발생은 기후변화의 가장 큰 원인이며 온실가스배출량은 매년 증가하고 있다. 이로 인해 지구의 평균기온은 약 100년간(1906~2005년) 0.75 °C 상승하였다 (Solomon et al., 2007). 농업은 다른 산업에 비해 담수 (Fresh water)에 대한 최대의 소비자이며 기후 의존적 산업이다 (Kim et al., 2015). 기후변화에 따라 수자원 이용 가능량의 변동성이 증가하고 지역간 수자원 이용 가능성도 차이가 발생하여, 이러한 변화가 극심한 경우 식량수급 문제가 발생할 수 있다 (Lee, 2015). 이처럼 기후와 물, 식량은 서로 영향을

미치는 요인들이므로 상호간의 연계성을 고려한 분석이 필요하다 (Lee, 2015).

물발자국은 시·공간적 물 사용에 관한 정보를 제공해주기 때문에, 가뭄과 건조 등의 유동적인 농업시스템에서 지속가능하고 공평한 물 사용에 관한 지표로 활용이 가능하다 (Kim et al., 2015; Hoekstra et al., 2011). 농산물 생산을 위해서는 작물을 재배하기 위한 물이 사용되는데, Allen (1998)은 이 같은 물을 가상수 (Virtual water)란 개념으로 설명하였고 이는 작물 1 ton을 생산하는데 필요한 물의 양 (m<sup>3</sup>/ton)으로 정의된다. 이 가상수의 개념에서 확대된 물발자국은 물의 이력을 내포하기 때문에 가상수를 구분할 수 있으며, 단순히 제품 생산을 위해 사용된 물의 총량이 아닌 용수 공급원에 따라 유효수량인 녹색 물발자국 (Green water footprint), 관개수인 청색 물발자국 (Blue water footprint), 오염원 희석에 사용되는 물인 회색 물발자국 (Grey water footprint)으로 구분된다 (Lee, 2013). Kim et al. (2015)은 물발자국을 활용하여 유효강수량, 관개량 등 물 이용 효율을 평가함으로써 물 배분 정책에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단하였다.

기후변화를 고려한 미래 물발자국의 산정을 위해서는 작물의 소비수량뿐만 아니라 생산량 변화의 예측이 필요하다. 현재 기후변화에 따른 곡물생산성 예측 연구는 지역적, 전 세

\* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

\*\* Department of Biological and Agricultural Engineering, Texas A&M University

\*\*\* Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +1-737-346-4704 Fax: +1-979-862-3442

E-mail: sanghyun@tamu.edu

Received: August 10, 2016

Revised: November 10, 2016

Accepted: November 21, 2016

계적인 관점에서 많은 연구가 진행되어오고 있다. Lee et al. (2011)와 Yoon (2001)은 기후변화에 의해 작물 재배가능 기간은 길어지고 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하여 벼 생산성에 긍정적 영향을 미치나, 고온은 생육기간 단축 및 임실을 저하 등 수량저하의 원인이 된다고 보고하였다. Chung (2010)과 Nkomozepi et al. (2013, 2014)은 기후변화 시나리오를 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)가 작물생육 환경인자들이 작물의 생산량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2009년에 개발·배포한 AquaCrop 모델에 적용하여 기후변화가 옥수수, 벼의 수확량에 미치는 영향과 모델 예측값의 불확실성을 분석한 바가 있다.

기존 작물에 관한 물발자국 연구는 작물의 가상수량 산정방법의 설정 및 산정 연구 (Allen, 1998; Chapagain and Hoekstra, 2010)를 바탕으로 시작되었다. 최근에는 가상수 개념을 확대한 물발자국 산정방법 및 적용성 평가 연구 (Hoekstra and Chapagain, 2011; Yoo et al., 2014)와 물발자국을 수자원 부존량과 비교하여 물 스트레스를 평가한 연구 (Jeswani et al., 2011; Jefferies et al., 2012), 국가 및 지역간의 교역 분석까지 확장되고 있다 (Yoo et al., 2012; Lee, 2013; Lee et al., 2016).

그러나 기후변화의 영향을 고려한 수자원 이용 패턴변화와 작물생산 예측을 동시에 고려한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 작물의 생산량과 소비수량 상호간의 연계성을 고려한 기후변화 대응방안으로 물발자국 개념 활용하여 국내 논벼 재배환경을 대상으로 기후변화에 따른 논벼의 녹색 및 청색 물발자국을 각각 산정하고 미래 농업 수자원 이용 변화를 분석하였다. 미래 기후변화에 따른 수자원 이용

형태의 변화를 분석하기 위하여 기상청에서 제공하는 기후변화 시나리오를 적용하였으며 논벼 생산량 예측 및 AquaCrop 5.0 모델을 사용하였다. AquaCrop 모델은 물수지, 바이오매스 생산량 및 수확량으로 구성되고 작물의 물에 대한 반응을 잘 모의하여 작물의 물 이용효율과 관련된 연구에 적합하다 (Chung, 2010). AquaCrop 모델의 물수지 계산은 지표유출, 침투, 재분배, 심층침투, 증발 및 증산의 수분환경을 포함하고, 특히 논에서의 논둑높이 설정 및 배수물꼬를 설정하여 논환경을 잘 반영할 수 있다 (Steduto et al., 2009; Abedinpoura et al., 2012). 본 연구에서는 모델의 모의결과를 바탕으로 논벼의 녹색 및 청색 물발자국을 산정하고 미래 수자원 이용 효율의 변화를 평가하였다.

## II. 재료 및 방법

본 연구의 순서는 Fig. 1과 같다. 농업기후시대 구분에 따라 중부평야지역의 수원과 차령남부평야지역의 전주를 연구 대상으로 선정하였다. 수원과 전주축후소를 대상으로 기상청 (KMA, Korean Meteorological Administration)에서 제공하는 상세화된 RCP (Representative Concentration Pathway, 대표농도경로) 시나리오 기반의 미래 기후자료를 기후변화 시나리오로 적용하였다. 미래 기후자료와 작물 생육모델인 AquaCrop 5.0 모델의 입력자료를 기반으로 논벼 생산량을 모의하였고 단위 생산량 당 유효수량과 관개수량을 산정하여, 최종적으로 미래시기 논벼의 녹색 및 청색 물발자국을 산

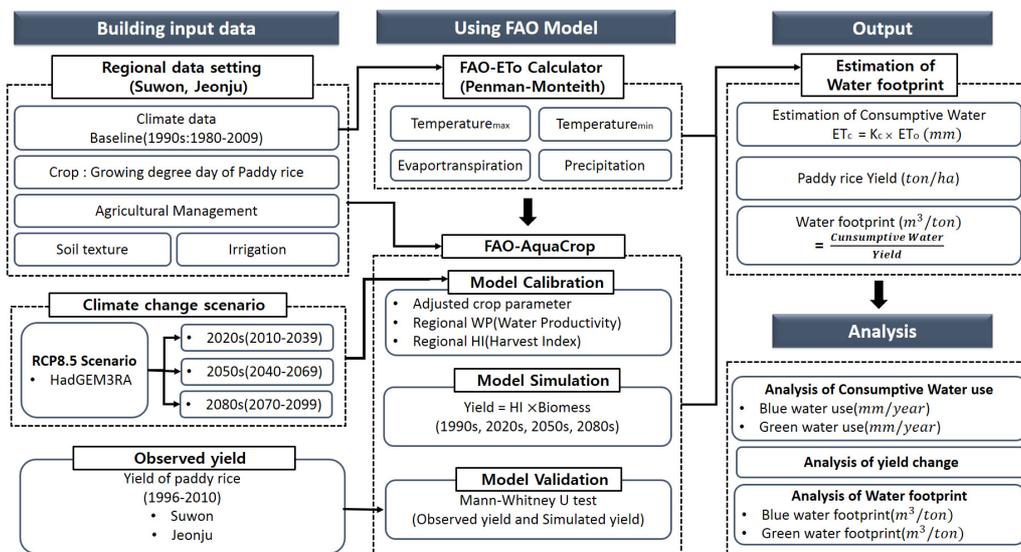


Fig. 1 A procedure diagram for analyzing water footprint of paddy rice according to climate change scenarios

정하여 기후변화가 미래 논벼의 생산량과 수자원 이용량에 미치는 영향을 물발자국을 통하여 분석하였다.

## 1. 녹색 및 청색 물발자국 산정방법

물발자국은 용수 공급원에 따라 이용되는 물을 구분하여, 농업부문에서는 작물 생육기간 동안 자연상태에서 공급된 유효수량인 녹색 물발자국, 작물 생육기간 동안 인위적으로 공급된 관개수량인 청색 물발자국으로 산정된다 (Chapagain and Hoekstra, 2010).

본 연구에서는 논벼의 일별 물수지 (Daily water balance method)를 통해 산정된 필요수량을 유효수량과 관개수량으로 구분하고, 논벼 생산량 모의 결과를 적용하여 녹색 물발자국 및 청색 물발자국을 산정하였다 (Yoo et al., 2012). 이때 표준영농방법을 기준으로 일별 담수심추적법을 적용하였고, 논의 물꼬높이는 60 mm로 설정하였다. 녹색 물발자국을 의미하는 유효수량은 담수심 내에서 활용되는 강수량을 의미하며 최대 담수심을 초과하지 않는 범위에서 일별 담수심에 따라 설정되고, 5 mm 이하의 강수량은 무효강우로 간주하였다. 청색 물발자국은 인위적으로 공급하는 관개수량으로 일별 담수심 및 증발산량의 변화, 유효수량의 공급 가능량을 적용하여 일별 관개수량을 산정하고 총 작물 생육기간동안의 관개수량을 합산하였다. 또한 논벼 물발자국은 기존의 가상수량 산정방법과 달리 실제 작물이 소비한 수량만을 고려하므로 용수공급 이후 토양 내 존재하는 잔여수분량 등은 물발자국에서 제외하였다 (Chapagain and Hoekstra, 2010). 논벼의 일별 담수심 ( $PD_t$ ) 산정식은 식 (2)와 같으며, 이를 기반으로 유효수량 ( $EFR_t$ )과 관개수량 ( $NIWR_t$ )을 각각 산정하였다.

$$PD_t = PD_{t-1} + IR_t + RF_t - ET_{c,t} - DP_t - SR_t \quad (2)$$

여기에서  $t$ 는 일 (day),  $PD$ 는 담수심 (mm),  $IR$ 은 관개수량 (mm),  $RF$ 는 강수량 (mm),  $ET_c$ 는 작물 증발산량 (mm),  $DP$ 는 침투량 (mm),  $SR$ 는 표면유출량 (mm)이다.

일별 유효수량 ( $EFR_t$ )은 다음 식 (3)으로 산정된다.

$$\begin{aligned} EFR_t &= RF_t & \text{if } SR_t &= 0, \\ EFR_t &= RF_t - SR_t & \text{if } SR_t > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

관개수량은 일별 담수심 및 증발산량의 변화, 유효수량의 공급 가능량을 적용해 식 (4)를 통해 산정하였다.

$$NIWR_t = ET_{c,t} + DP_t - EFR_t + LR_t + MR_t \quad (4)$$

여기에서,  $LR$ 은 용탈요구량 (mm),  $MR$ 은 기타요구량 (miscellaneous water requirements)으로 작물의 생육기간동안 밭아, 개화, 수분, 풍식해방지, 개화지연, 냉해대책 등에 필요한 요구량이며,  $NIWR$  산정 시  $LR$ 과  $MR$ 은 무시할 수 있다 (Yoo et al., 2014). 따라서 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$NIWR = ET_{c,t} + DP_t - EFR_t \quad (5)$$

녹색 물발자국 ( $WF_{Green}$ ,  $m^3/ton$ )은 식 (3)을 통해 산정된 유효수량 (mm 또는  $m^3/ha$ )을 생산량 ( $yield$ ,  $ton/ha$ )으로 나누어 산정하였고, 청색 물발자국 ( $WF_{Blue}$ ,  $m^3/ton$ )은 식 (5)를 통해 산정된 관개수량 (mm 또는  $m^3/ha$ )을 생산량 ( $yield$ ,  $ton/ha$ )으로 나누어 산정하였으며, 이는 식 (6)과 같다.

$$WF_{Green} = \frac{\sum_{t=1}^n EFR_t}{yield}, \quad WF_{Blue} = \frac{\sum_{t=1}^n NIWR_t}{yield} \quad (6)$$

여기에서,  $n$ 은 총 재배기간 (day) 이다.

## 2. 연구대상지역의 미래기후자료

본 연구의 대상지역은 Choi et al. (1989)이 제시한 농업기후시대 구분에 따라 중부평야지대의 수원과 차령남부평야지대의 전주를 연구대상지로 선정하였다. 수원 측후소와 전주 측후소의 기후자료를 1980~2099년 기간의 기상값을 30년 단위로 구분하였다. 1980년부터 2009년까지를 기준년대, 1990s (Base line)로 설정하여 기상청에서 실제 관측한 과거 기후자료를 적용하였다. 2010년부터 2099년까지의 미래 기간은 각각 2020s (2010~2039년), 2050s (2040~2069년), 2080s (2070~2099년)로 구분하여 분석하였다. 미래 기후자료로는 HeadGEM3-RA (Atmospheric Regional climate model of Hadley Center Global Environment Model version 3)를 바탕으로 작성된 시나리오를 이용하였다. 본 연구에서 사용된 HeadGEM3-RA 시나리오는 기상청에서 제공하는 남한상세 기후변화 시나리오로 영국 기상청 해들리센터의 기후변화 예측모델인 HadGEM2-AO GCM (General Circulation Model)을 기반으로 지역기후모형 (RCM, Regional Climate Model)과 통계적 상세화 기법 (MK-PRISM: Modified Korean Parameter-elevation Regressions and Independent Slopes Model)으로 상세화 (Downscaling)한 결과이다 (Kim et al., 2012; Kim et al., 2013). 대상지역의 시기별 평년 기온, 강수량 및 기준작물 증발산량은 Table 1과 같다.

Table 1 Climatic characteristics by study stations

Code	Region	Period	Annual average temperature (°C)	Annual total precipitation (mm/yr)	Annual total ET <sub>o</sub> * (mm/yr)	Annual rainy days (day/yr)
119	Suwon	1990s	12.0	1,303	908.7	107
		2020s	13.3	1,178	956.6	140
		2050s	15.0	1,271	1006.8	152
		2080s	16.8	1,365	1063.0	160
146	Jeonju	1990s	13.3	1,312	936.1	122
		2020s	14.8	1,280	1056.7	143
		2050s	16.4	1,295	1110.2	148
		2080s	18.2	1,409	1169.6	150

\* Potential evapotranspiration calculated by FAO-Penman Monteith equation.

### 3. FAO-AquaCrop 5.0 모델을 이용한 생산량 모의

본 연구에서는 기후변화의 영향으로 인한 논벼의 생산량 모의 및 물발자국 산정을 위하여 FAO에서 개발하여 배포하는 AquaCrop 5.0 모델을 이용하였다. 본 모델은 기상자료와 함께 수분환경, 비료, 관개방법 등이 여러 가지 작물의 생산량에 미치는 영향을 분석할 수 있다(Abedinpoura et al., 2012). AquaCrop 모델은 벼를 포함한 여러 작물에 적용할 수 있고 수년간에 걸쳐서 각 분야의 많은 연구자들에 의하여 공동으로 개발되어 FAO가 2009년 1월에 처음으로 버전 3.0을 배포하였고, 지속적인 개정 및 보정을 거쳐 2015년 10월에 버전 5.0을 배포하였다(Doorenbos and Kassam, 1979; Chung, 2010). AquaCrop 모델은 작물 생육엔진인 바이오메스와 물의 생산성 상수가 제대로 기능을 하기 위하여 토양-작물-대기 연속체를 포함하는 구조로 토양내의 물수지, 작물의 발달, 생육 및 결실 과정, 대기의 온도, 강수량, 증발요구량, CO<sub>2</sub> 농도 등을 포함한다(Raes et al., 2010). 본 모델은 매개변수의 수가 적으며 간단하고 정확하며 모의능력이 탁월한 특징이 있고, 작물의 물 이용효율과 관련된 연구에 적합하며 사용자의 편의를 고려하여 메뉴 작동방식으로 개발되었다(Kassam et al., 2001). AquaCrop 모델은 물수지, 바이오메스 생산량 및 수확량이 계산되고 입력자료는 기상, 작물, 토양자료와 관개 및 비료를 포함하는 영농관리 자료이다(Chung, 2010). 모델에 내장되어 있는 매개변수 값들은 필리핀 소재 국제미작연구소에서 다년간 수집한 자료로부터 도출된 값이기 때문에, 기후 및 영농환경이 필리핀과 다른 우리나라에 적용할 경우 이 값들을 보정해야 한다. 따라서 모델 구동을 위해 국내에 알맞은 작물 매개변수를 조정하여 설정하였다. AquaCrop 모델을 이용한 작물의 수확량 ( $Y$ , kg)은 바이오메스량 ( $B$ , kg)에 수확지수(Harvest Index, HI)를 곱하여 식(7)과 같이 산정된다.

$$Y = B \times HI \tag{7}$$

여기에서, 바이오메스량은 물의 생산성 상수(Water Productivity,  $WP^*$ )와 작물의 총 증산량( $Tr$ , mm)과 곱하여 계산되고, AquaCrop 모델은 증발산량보다는 증산량이 직접적으로 바이오메스량에 영향을 미치는 특징을 가진다.

$$B = WP^* \times \sum Tr \tag{8}$$

$WP^*$ 는 기준 CO<sub>2</sub> 농도인 369 ppm일 때 1 mm 증산량에 대한 단위면적당 지상부 바이오메스 생산량으로 논벼와 같은 C<sub>3</sub>작물은 15-20 g/m<sup>2</sup>의 사이의 값을 가진다. 보정된 생산성 상수(g/m<sup>2</sup>)  $WP^*_{adj}$ 는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 수정계수( $f_{CO_2}$ ), 토양 비옥도 스트레스 상수( $Ks_b$ ), 표준 생산성 상수( $WP^*$ , g/m<sup>2</sup>)에 따라 식(9)로 계산되어 나온 결과를 적용하였다.

$$WP^*_{adj} = f_{CO_2} \times f_{yield} \times Ks_b \times WP^* \tag{9}$$

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

여기에서,  $C_{a,i}$ 는 해당 년도의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도,  $C_{a,o}$ 는 기준년의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도이다. 수확지수(HI)는 개화기 및 수분(受粉)기 전·후의 수분 스트레스 및 온도 스트레스의 영향을 받고, 개화기 전의 수분스트레스 상수  $f_{ante}$ , 개화기 후의 수분 스트레스 상수  $f_{post}$ , 수정 수확지수  $HI_{adj}$ 의 곱으로 산정되며 식(10)과 같다. 이때 수분, 영양분, 기온, 일조량 등의 부족이 없고 수분 스트레스가 없을 경우의  $HI_{adj}$ 는 표준 수확지수( $HI_0$ )이다.

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

매개변수 조정 결과, 수원 16.0 g/m<sup>2</sup>, 전주 19.0 g/m<sup>2</sup>, 표준 수확지수(HI<sub>o</sub>)는 50 %로 하였다. 이는 본 연구에서 모델보정과 검증용 거쳤기 때문에 이 값들을 준용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 사용한 매개변수와 입력자료 중 작물계수 산정에 이용되는 식의 초기 K<sub>e</sub> 및 최대 K<sub>cb</sub>는 모두 1.10을 사용하였다. 생육일별로 K<sub>e</sub> 및 K<sub>cb</sub> 값은 잎덮음(Canopy cover), 기온, 수분 등에 따라서 모델이 일별로 산정한다. 각 입·출력 파일 및 연구에서 사용된 작물매개변수의 내용은 Table 2와 같다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 기후변화 시나리오에 따른 논벼 소비수량 및 관개수량 산정 결과

기준년도(1980~2009년)의 총 논벼의 소비수량은 수원은 기준년도 530 mm, 전주는 520 mm이다. 미래 논벼의 소비수

량 변화는 수원은 2020년대, 2050년대, 2080년대 각각 582 mm, 608 mm, 630 mm로 산정되었고, 전주는 기준년도 520 mm, 2020년대 606 mm, 2050년대 642 mm, 2080년대 646 mm로 산정되었다. 총 생육기간동안 작물의 소비수량을 산정 후 각 유효수량과 관개수량으로 구분하여, 이를 단위생산량과 연계하여 녹색 및 청색 물발자국을 각각 산정하게 된다.

소비수량 패턴을 유효수량과 관개수량으로 구분하여 분석하였고, 결과는 Table 3과 Fig. 2와 같다. 수원의 경우 유효수량은 기준년도에 189 mm, 2020년대 177 mm, 2050년대 193 mm, 2080년대 216 mm로 2020년대에는 7 % 정도 감소하였고 2050년대와 2080년대는 각각 2 %와 14 % 정도 다소 증가하였으나, 전반적으로 소비수량 변화는 일정한 경향을 보였다. 전주는 기준년도 192 mm 대비 2020년대 190 mm, 2050년대 178 mm, 2080년대 195 mm로 유효수량은 기준년도 대비 2020년대 1 %와 2050년대 7 % 정도 감소하였고, 2080년대 1 % 증가하였으며 유효수량 소비패턴 변화는 일정한 경향으로 예측되었다.

반면 관개수량의 경우 수원은 기준년도(341 mm)에 비해 2020년대 405 mm로 19 % 증가, 2050년대 415 mm로 22 %

Table 2 Adjusted parameter values in this study

Parameter	Description	Unit	Initial Value	Adjusted Value
WP*	Normalized water productivity	g/m <sup>2</sup>	19.0	16.0 (Suwon)
				19.0 (Jeonju)
HI <sub>o</sub>	Reference harvest index	%	43.0	50.0
T <sub>base</sub>	Minimum air temperature below which pollination starts to fail	°C	8.0	8.0
T <sub>upper</sub>	Maximum air temperature above which pollination starts to fail	°C	35.0	30.0
K <sub>e</sub>	Initial evaporation coefficient	-	1.10	1.10
K <sub>cb</sub>	Maximum transpiration coefficient	-	1.10	1.10

Table 3 Consumptive water use by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8.5)

Region	Scenario	Consumptive water use (mm)	Percentage change (%)	Effective rainfall (mm)	Percentage change (%)	Irrigation water requirement (mm)	Percentage change (%)
Suwon	Baseline	530	-	189	-	341	-
	2020s	582	+10	177	-7	405	+19
	2050s	608	+15	193	+2	415	+22
	2080s	630	+19	216	+14	414	+21
Jeonju	Baseline	520	-	192	-	328	-
	2020s	606	+17	190	-1	416	+27
	2050s	642	+23	178	-7	464	+41
	2080s	646	+24	194	+1	452	+38

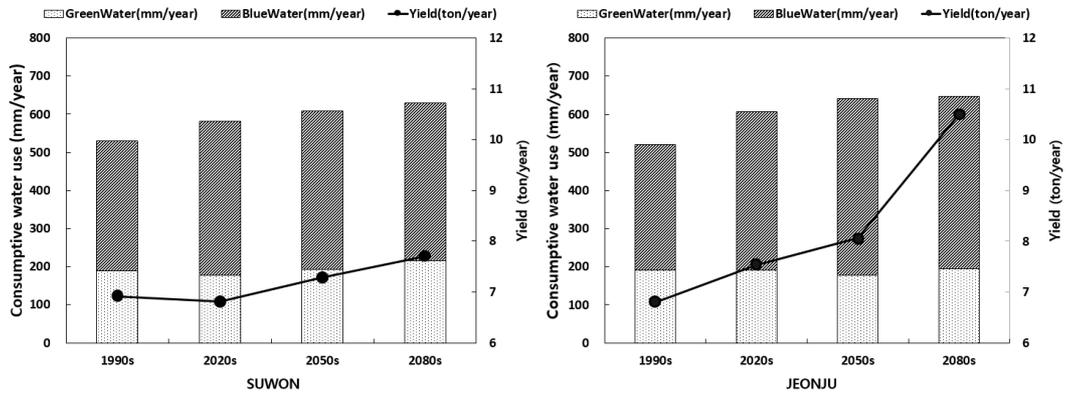


Fig. 2 Consumptive water use and yield by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8.5)

증가, 2080년대 414 mm까지 증가하여 21 % 증가할 것으로 예측되었다. 전주는 기준년도 328 mm 대비 2020년대에 27 % 증가한 416 mm, 2050년대 464 mm인 27 % 증가, 2080년대 452 mm로 38 % 증가할 것으로 예측되었다. 이는 논벼 1 ton을 생산하기 위해 미래 영농환경에서 기준년도 보다 많은 관개수량이 필요한 것으로 판단된다. 기후변화로 인해 기온이 상승하고, 증발산량도 증가하여 작물생산에 더 많은 소비수량을 공급해주어야 할 것으로 사료된다. 이는 기후변화가 농업생태계에 미치는 직접적 영향으로 작물의 광합성과 증산활동에 대한 영향이다(Lee, 2007). 미래 시기의 논벼 소비수량을 분석한 결과 유효수량 사용은 일정한 경향성을 보이고, 관개수량은 증가하는 경향을 보인다. 이는 미래기상 시나리오의 특징이 반영된 것으로 판단된다. Table 1의 대상지역별 HadGEM3-RA 시나리오 기후자료를 분석한 결과 기준년도 대비 미래 전체기간 동안 연평균 기온은 상승하고 잠재증발산량도 증가할 것으로 예측되었다. 기준년도 대비 미래 시기의 강우일수는 증가했지만 연간 총 강수량은 2020년대와 2050년대는 감소했고 2080년대에 증가한 것으로 예측되었다. 이 결과는 연간 강우일수는 증가하였지만 관개기간에 사용되는 유효수량의 부족으로 인해 공급해주어야 하는 관개수량이 증가한 원인으로 판단된다. 미래 시기에는 강우패턴의 변화가 발생하고 강우일수가 증가했음에도 강수량을 충분히 활용하지 못한 관개기간이 발생한 것이며 관개기간에 필요한 보충수로 관개요구량이 증가한 것이다. 미래에는 유효수량으로 쓰일 강우가 부족한 것으로 사료되므로 관개수량 확보 및 유효수량 활용을 증가시킬 방안을 고려할 필요가 있다. 이는 기후변화 영향에 따라 적정 이앙시기를 조정하여 관개기간에 필요한 수량을 미리 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 기후변화 시나리오에 따른 논벼의 생산량 변화 모의 결과

본 연구에서 AquaCrop 5.0 모델을 통해 기준년도 해당 기간 중 1996~2009년의 논벼 생산량 평균값은 모의결과 수원 6.21 ton/ha 와 전주 6.91 ton/ha로 예측되었다. 모델의 검증을 위해 비모수 검정 방법 (distribution-free test)인 Mann-Whitney U test를 실시하였다. 이는 표본이 작은 독립적인 두 집단간의 평균과 분산이 같은지에 대한 검정이 가능한 통계 방법이다. 수원과 전주의 논벼 생산량 관측값과 예측값을 각각 독립적인 두 집단으로 하였다. 논벼 생산량의 관측값은 국가통계포털 (<http://kosis.kr>)에서 제공된 자료를 사용하였고, AquaCrop 5.0 모델의 구동결과를 예측값으로 하였다. 논벼 생산량 통계자료의 제공이 1996년 이후인 것을 감안하여 기준년도 (1980~2009년)에 해당하는 연도인 1996~2009년간인 총 14개년도의 논벼 생산량의 관측값과 예측값을 표본으로 하였다. 검정을 위한 영가설 ( $H_0$ , null hypothesis)을 “논벼 생산량의 관측값과 예측값의 분포는 같다”로 설정하고 정확한 유의확률의 값 (p-value)이 유의수준 ( $\alpha=0.05$ )보다 크면 영가설을 채택하는 것으로 검정하였다. 관측값 및 예측값을 Mann-Whitney U 검정을 통해 정확 유의확률의 값이 0.603으로 유의수준보다 크므로 영가설을 채택하여 실제 관측값 및 모델 예측값이 통계적으로 차이가 없음을 검정하였다. 모델검정결과 관측값은 국가통계포털의 조곡 기준 논벼 생산량 수원 6.30 ton/ha, 전주 6.80 ton/ha이고 모델 구동값인 수원 6.21 ton/ha, 전주 6.91 ton/ha와 비교하였을 때 적절한 예측값으로 판단된다 (Table 4).

Table 5와 Fig. 3은 기후변화에 따른 미래 논벼 생산량의 모의 결과이다. 수원의 미래 시기별 논벼 생산량은 기준년도 대비 2020년대 6.8 ton/ha 으로 1 % 정도 감소하였고 기준년도와 비슷한 생산량 값으로 모의되었다. 2050년대와 2080년대

**Table 4** Result of model validation by Mann–Whitney U test during baseline period (1996~009)

Region	Observed yield * (ton/ha)	Simulated yield * (ton/ha)	Model validation	
			P-value **	Decision
Suwon	6,30	6,21	0,603	Accept $H_0$ ***
Jeonju	6,80	6,91		

\* Average yield during entire periods.

\*\* If p-value is upper than  $\alpha=0,05$ , the null hypothesis ( $H_0$ ) for this test is that the two groups have the same distribution.

\*\*\*  $H_0$  : The distribution of observed yield is the same across categories of simulated yield.

는 각각 7.3 ton/ha (5%), 7.7 ton/ha (11%)까지 증가할 것으로 예측되었다. 전주는 2020년대 7.5 ton/ha (11%), 2050년대 8.0 ton/ha (19%), 2080년대 10.5 ton/ha (54%)으로 지속적인 논벼 생산량 증가가 예측되었다. 각 시기별 미래 논벼 생산량 변화를 분석한 결과, 2020년대를 제외한 수원과 전주 두 지역 모두 2060년대와 2080년대의 생산량이 증가하고 2080년대 가장 많이 증가할 것으로 예측되었다. 2020년대에서 수원의 미래 논벼 생산량이 감소할 것으로 예측된 것은 농업기

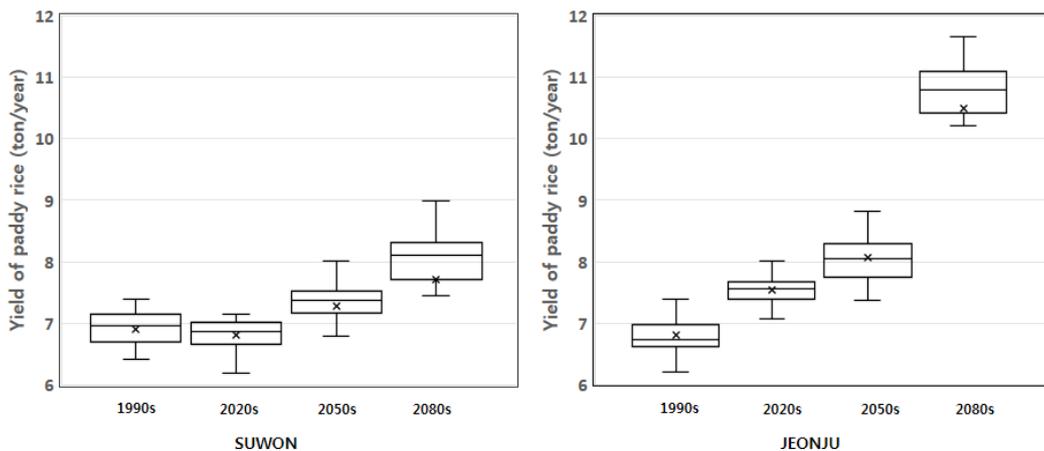
후시대가 중부지역에 속하는 수원이 남부지역에 비해 가까운 미래의 기후변화의 영향에 상대적으로 덜 민감하게 반응하고, 지역에 따른 기후변화 시나리오의 차이가 생산량 결과에 반영된 것으로 판단된다. 미래기간의 논벼 생산량 증가결과는 RCP 8.5 시나리오가 미래 논벼 생산량에 영향을 끼치는 것으로 사료된다. 이는 기후변화의 영향에 따라 미래로 갈수록 온도 및 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하게 되고, 이러한 현상이 생산량에 긍정적인 영향을 끼친 것으로 판단된다 (Nkomozepe and Chung, 2013). 기후변화로 인한 기온상승은 벼의 발육을 빠르게 하고 등숙기간 단축 및 고온으로 인한 임실을 저하, 야간고온에 의한 호흡손실로 인해 생산량을 감소시키는 원인이 되지만, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 탄소동화작용을 증가시켜 생산량을 증가시키는 원인이므로 미래 논벼 생산량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 AquaCrop 모델은 기온보다 CO<sub>2</sub> 농도에 더 민감하기 때문에 CO<sub>2</sub> 농도의 증가가 생산량 증가에 긍정적 영향으로 기여한 것으로 보인다 (Chung, 2010).

**Table 5** Yield of paddy rice by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8.5)

Region	Scenario	Yield of paddy rice (ton/ha)	Percentage change (%)
Suwon	Baseline	6.9	-
	2020s	6.8	-1
	2050s	7.3	+5
	2080s	7.7	+11
Jeonju	Baseline	6.8	-
	2020s	7.5	+11
	2050s	8.0	+19
	2080s	10.5	+54

### 3. 기후변화 시나리오에 따른 논벼의 녹색 및 청색 물발자국 모의 결과

Fig. 4와 Table 6은 미래 논벼의 물발자국 산정결과이다.



**Fig. 3** Yield of paddy rice by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8.5)

두 대상지역 모두 기준년도(1980-2009년)에 비해 미래 물발자국 값이 증가하는 것으로 나타났다. 수원의 논벼 물발자국은 기준년도에 767 m<sup>3</sup>/ton에서 2020년대, 2050년대, 2080대는 1,186 m<sup>3</sup>/ton (55%), 1,159 m<sup>3</sup>/ton (51%), 1,136 m<sup>3</sup>/ton (48%)로 증가할 것으로 예측되었다. 전주의 논벼 물발자국은 기준년도에 765 m<sup>3</sup>/ton 대비 2020년대 1,117 m<sup>3</sup>/ton (46%), 2050년대 1,105 m<sup>3</sup>/ton (45%), 2080년대 1,136 m<sup>3</sup>/ton (12%)로 예측되었다. 두 지역의 물발자국 변화를 분석한 결과, 수원 및 전주의 물발자국은 기준년도 보다 2020년대, 2050년대에 모두 증가하는 것으로 관측되었고 2080년대에는 이전 미래기간(2050년대) 대비 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 수원의 2080년대 물발자국은 전년대비인 2050년대의 1,159 m<sup>3</sup>/ton 보다 23 m<sup>3</sup>/ton 감소한 1,136 m<sup>3</sup>/ton로 약 2% 정도 감소하였으나, 전주의 경우 2080년대 물발자국은 전년대비 2050년대의 1,105 m<sup>3</sup>/ton 보다 250 m<sup>3</sup>/ton 감소한 855 m<sup>3</sup>/ton로 23%로 상당한 양이 감소되는 것으로 예측되었

다. 두 지역의 2080년대 물발자국의 감소량 차이가 큰 이유는 기후변화에 따라 지역별 기상조건이 각기 다르게 반영되었고, 또한 온도 증가로 인한 지역별 논벼의 생육기간 변화 및 CO<sub>2</sub> 농도 증가와 같은 기후변화의 영향으로 인한 생산량 변화가 반영된 것으로 판단된다.

산정된 물발자국을 용수공급원에 따라 유효수량인 녹색 물발자국과 관개용수인 청색 물발자국으로 분리하여 미래의 논벼 생산에 필요한 물 사용량을 분석하였다. 청색 및 녹색 물발자국을 기준년도, 미래시기로 분석한 결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 청색 및 녹색 물발자국은 기준년도 녹색 물발자국은 수원은 274 m<sup>3</sup>/ton, 전주 282 m<sup>3</sup>/ton로 산정되었다. 수원은 기준년도에 비해 2020년대 360 m<sup>3</sup>/ton (32%), 2050년대 368 m<sup>3</sup>/ton (35%), 2080년대 390 m<sup>3</sup>/ton (42%)로 증가하는 것으로 예측되었다. 전주는 기준년도 대비 2020년대 351 m<sup>3</sup>/ton (24%), 2050년대 306 m<sup>3</sup>/ton (9%)로 증가하였고 2080년대 257 m<sup>3</sup>/ton (-9%)으로 기준년도 대비 감소하였다.

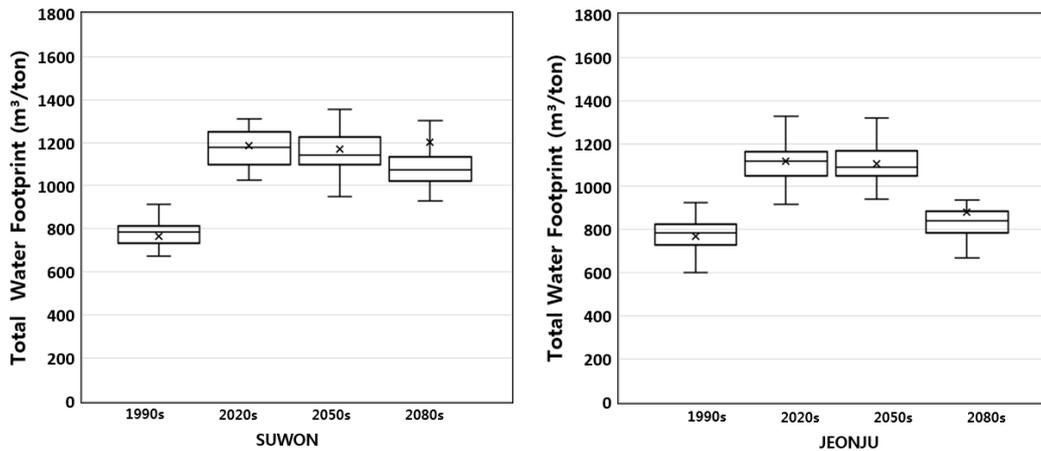


Fig. 4 Total water footprint by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8,5)

Table 6 Water footprint of paddy rice under climate change scenario (HadGEM3-RA, RCP 8,5)

Region	Period	Total water footprint and increase ratio		Green water footprint and increase ratio		Blue water footprint and increase ratio	
		m <sup>3</sup> /ton	%	m <sup>3</sup> /ton	%	m <sup>3</sup> /ton	%
Suwon	Baseline	767	-	274	-	493	-
	2020s	1,186	+55	360	+32	826	+67
	2050s	1,159	+51	368	+35	790	+60
	2080s	1,136	+48	390	+42	747	+51
Jeonju	Baseline	765	-	282	-	483	-
	2020s	1,117	+46	351	+24	766	+59
	2050s	1,105	+45	306	+9	799	+66
	2080s	855	+12	257	-9	598	+24

미래의 청색 물발자국은 기준년도 대비 수원의 2020년대는 67 % 증가한 826 m<sup>3</sup>/ton, 2050년대는 60 % 증가한 790 m<sup>3</sup>/ton, 2080년대는 51 % 증가한 747 m<sup>3</sup>/ton으로 예측되었다. 전주는 2020년대에 59 % 증가한 766 m<sup>3</sup>/ton, 2050년대 66 % 증가한 799 m<sup>3</sup>/ton, 2080년대는 24 % 증가한 598 m<sup>3</sup>/ton으로 예측되었다. 청색 물발자국 변화량은 두 지역 모두 기준년도보다 많은 양이 증가하는 것으로 나타났다. 수원의 경우 미래 전체기간동안의 청색 물발자국은 기준년도 보다 증가한 경향을 나타냈으나, 전주의 경우도 2080년대는 2020년대, 2050년대에 비해 청색 물발자국이 작게 산정되었지만 기준년도보다 증가하는 것으로 예측되었다. 청색 물발자국의 증가는 미래 논벼 생산에 보다 많은 관개용수가 필요할 것으로 판단된다. 결과에서 녹색 물발자국이 상대적으로 일정한 경향을 띄는 원인은 HadGEM3-RA 시나리오가 2020년대와

2050년대의 강수량을 적게 모의된 결과가 기후특성에 반영된 것으로 판단된다. 따라서 HadGEM3-RA 시나리오로 예측된 미래 환경에서는 작물생산에 있어 수자원 사용이 강수량보다 관개용수 사용에 더 의존할 것으로 사료되며, 미래에 작물생산에 있어 효율적인 물 사용을 위해서는 녹색 물발자국의 양을 늘리고 청색 물발자국 사용을 감소시키는 방안이 필요할 것으로 판단된다.

미래 논벼 생산량에 따른 물발자국 분석한 결과, 생산량과 물발자국은 전반적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 기후변화에 따라 논벼 1 ton을 생산하는데 기준년도에 비해 공급해 주어야 할 작물필요수량이 증가함을 의미하고, 생산량 역시 함께 증가함을 나타낸다. 이러한 결과는 미래의 식량 자급률 목표치를 달성하기 위해 요구되는 농업수자원을 산정하고 확보하는데 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

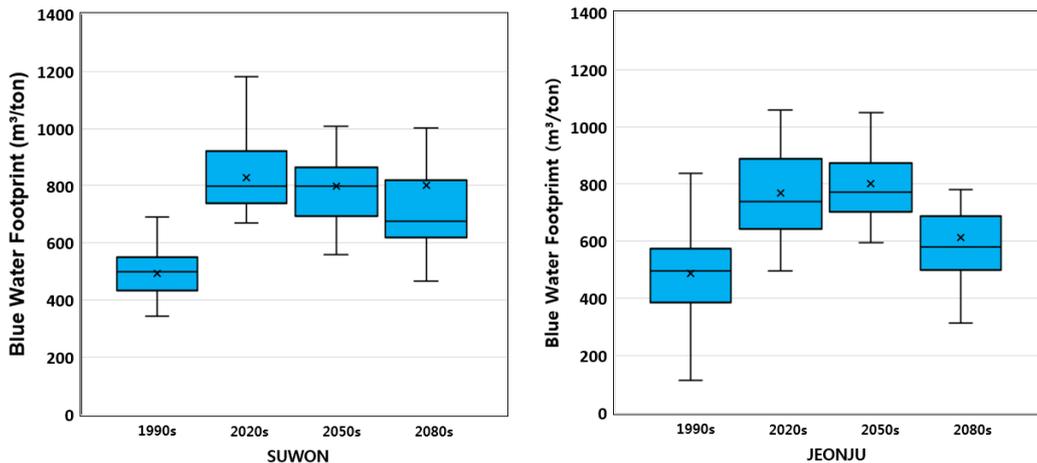


Fig. 5 Blue water footprint by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8,5)

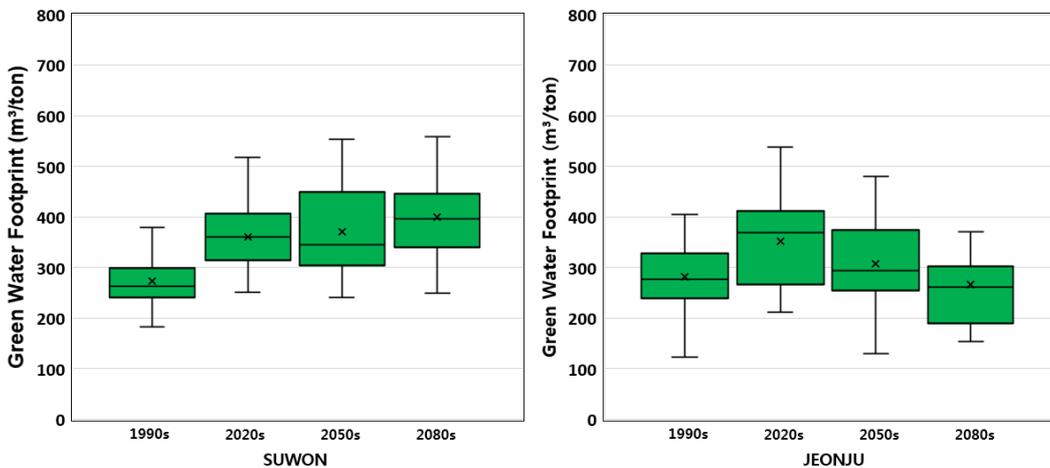


Fig. 6 Green water footprint by climate change scenarios (HadGEM3-RA, RCP 8,5)

#### IV. 결 론

본 연구는 AquaCrop 5.0 모델을 이용하여 기후변화의 영향에 따른 물발자국을 산정하고 녹색 및 청색 물발자국으로 분리하여 기후변화 시나리오에 따른 수자원 이용 패턴의 변화를 분석하고자 하였다.

연구 대상지인 수원과 전주의 논벼 물발자국의 변화는 기준년도 (1980~2009년)에 비해 2020년대, 2050년대에 모두 증가하는 경향으로 관측되었고, 2080년대에는 전 미래기간 (2050년대) 대비 다소 감소하는 것으로 분석되었다. 수원의 미래시기 평균 물발자국은 기준년도 대비 51 % 증가하였고, 전주는 기준년도 대비 34 % 증가하였다. 특히, 미래시기의 평균 청색 물발자국은 기준년도 대비 수원, 전주 모두 약 50 % 증가되는 것으로 예측되었다. 두 지역의 미래시기 물발자국의 증가 및 감소량의 차이가 발생하는 이유는 기후변화에 따라 지역별 기상조건이 각기 다르게 반영되고, 온도 증가로 인한 지역별 논벼의 생육기간 변화 및 CO<sub>2</sub> 농도 증가와 같은 영향으로 인해 생산량 변화가 함께 반영된 것으로 판단된다.

논벼 생산량 예측의 경우, AquaCrop 모델이 온도상승 보다는 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 민감한 작물생육모델의 특징이 반영되어 기후변화로 인한 CO<sub>2</sub> 농도 증가가 작물생산에 긍정적 영향을 끼치는 것으로 분석되었다. 기후변화 영향으로 인해 논벼 수량형성에 있어 Lee et al. (2011)의 연구에서 작물 생리학 측면에서 볼 때, 생육초기의 고온은 분얼과 잎의 생장을 촉진하고 양분흡수를 증가시켜 벼 수량형성에 긍정적 영향을 주지만, 벼 생육 후기에는 호흡량 증가로 탄수화물 축적이 저하되고, 일찍 노화가 일어나 등숙기간이 단축되어 수량형성에 부정적 효과를 준다고 하였으나 AquaCrop 모델 구동은 병충해 피해, 홍수, 가뭄의 극한 기상환경의 변화 없이 이상적인 환경에서 이루어 졌으므로 논벼 생산예측 값이 증가 한 것으로 예측되었다.

용수공급원별 물발자국 변화 분석결과, 녹색 물발자국 변화량을 일정한 경향을 띠고 청색 물발자국 변화량은 두 지역 모두 기준년도 대비 많은 양이 증가한 것으로 나타났다. 미래 시기에는 논벼 생산에 있어 유효수량 보다 관개용수 사용에 의존할 것으로 판단된다. 따라서 청색 물발자국의 감소를 위한 방안으로, 관개기간 내 유효수량을 확보하여 관개용수 사용을 절약 할 수 있는 물 관리 방법이 필요하다.

이를 위하여 미래 수자원 확보를 위해 기존에 확보된 농업 수자원에 대한 물 사용 효율 증대 및 대체 수자원 개발, 기존 용수시설물의 개발, 기존 수리시설물의 누수 방지 및 보수작업, 이양시기 조정 등의 새로운 패러다임의 농업수자원 확보를 도모해야 할 것이다.

본 연구에서는 논벼의 작부시기가 현행과 같다고 가정하

여 논벼의 생산량을 예측하고 소비수량을 산정하였으므로 향후 기후변화에 따른 달라질 작부시기를 고려할 필요가 있다. 따라서 향후 연구로는 미래 시기별 적정 이양시기를 기준으로 하였을 때의 논벼의 물발자국 변화 양상을 분석하고, 이양시기를 조정하였을 때 유효수량과 관개용수의 소비 패턴을 비교 분석할 필요가 있다.

본 연구는 앞서 제시한 연구방법의 한계점에도 불구하고 농업기후지대가 다른 중부 및 남부 평야지역에 대해 기후변화에 따른 미래의 논벼 생산량과 소비수량의 전반적인 변화 양상을 물발자국 개념을 바탕으로 제시하여, 향후 국가 차원의 수자원 정책 및 식량자급률 제고 정책의 수립을 위한 기초 자료 및 기준으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

1. Abedinpour, M., A. Sarangi, T. B. S. Rajput, M. Singh, H. Pathak, and T. Ahmad, 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 110: 55-56.
2. Allen, J. A., 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *Groundwater* 36(4): 545-546.
3. Chapagain, A. K. and A. Y. Hoekstra, 2010. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective. Value of Water Research Report Series No. 40, Delft, Netherlands: UNESCO-IHE.
4. Choi, D. H. and S. H. Yun, 1989. Agroclimatic zone and characters of the area subject to climatic disaster in Korea. *Journal of Korean Society of Crop Science* 34(2): 13-33 (in Korean).
5. Chung, S. O., 2010. Simulating evapotranspiration and yield response of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(3): 57-64 (in Korean).
6. Doorenbos, J. and A. H. Kassam, 1979. Yield response to water, 193. Irrigation and Drainger Paper NO. 33, Rome, Italy: FAO.
7. Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, and M. M. Mekonnen, 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London U.K.: Earthscan.
8. Jefferies, D. I. Muñoz, J. Hodges, V. J. King, M. Aldaya, A. E. Ercin, L. M. canals, and A. Y. Hoekstra, 2012. Water footprint and life cycle assessment as approach to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production* 33: 155-166.
9. Jeswani, H. K. and A. Azapagic, 2011. Water footprint:

- methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production* 19: 1288-1299.
10. Kassam, A. and M. Smith, 2001. FAO methodologies on crop water use and crop water productivity. In Proc. Expert meeting on crop water productivity, CWP-M07. Rome, Italy.
  11. Kim, M. K., M. S. Han, D. H. Jang, S. G. Baek, W. S. Lee, Y. H. Kim, and S. Kim, 2012. Production technique of observation grid data of 1 km resolution. *Journal of Climate research* 7(1): 55-68 (in Korean).
  12. Kim, M. K., D. H. Lee, and J. W. Kim, 2013. Production and validation of daily grid data with 1 km resolution in South Korea. *Journal of Climate research* 8(1): 13-25 (in Korean).
  13. Kim, M. K., S. K. Choi, G. B. Jung, S. C. Hong, M. Y. Kim, and K. H. So, 2015. An overview and applications in agriculture of water footprint in Korea and U.S. *The Korean Society of International Agriculture* 27(3): 303-310 (in Korean).
  14. Lee, C. K., K. S. Kwan, J. Kim, J. Shon, and W. Yang, 2011. Impacts of climate change and follow-up cropping season shift on growing period and temperature in different rice maturity types. *Journal of Crop Science* 56(3): 233-243 (in Korean).
  15. Lee, S. H., 2013. Potential vulnerabilities of crops virtual water trade using crops water requirement and network analysis. Ph.D. diss., Seoul: Seoul National University (in Korean).
  16. Lee, S. H., 2015. Water-Food-Energy nexus and agricultural drought. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(2): 49-55 (in Korean).
  17. Lee, S. H., J. Y. Choi, S. H. Yoo, and Y. H. Kim, 2016. Analyzing the contribution of regional water resource through the regional blue water flows of rice products. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58: 73-80 (in Korean).
  18. Lee, J. T., 2007. Climate change impacts on agriculture. *Korean Society Of Soil Sciences And Fertilizer* 32: 7-20 (in Korean).
  19. Nkomozepe, T. and S.-O. Chung, 2012. General circulation model derived climate change impact and uncertainty analysis of maize yield in Zimbabwe. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 83-92 (in English).
  20. Nkomozepe, T. and S.-O. Chung, 2013. Uncertainty of simulated paddy rice yield using LARS-WG derived climate data in the Geumho river basin. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 55-63 (in English).
  21. Nkomozepe, T. and S.-O. Chung, 2014. Modeling future yield and irrigation demand of rice paddy in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(1): 31-40 (in Korean).
  22. Rase, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres, 2010. AquaCrop reference manual, AquaCrop version 3.1, Rome, Italy: FAO, Land and Water Division.
  23. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, 2007. Climate change 2007: The physical science basis. IPCC AR4, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
  24. Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Rase, 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.
  25. Yoo, S. H., T. G. Kim, J. B. Im, and J. Y. Choi, 2012. Estimation of the international virtual water flow of grain crop products in Korea. *Paddy Water Environment* 10(2): 83-93.
  26. Yoo, S. H., J. Y. Choi, S. H. Lee, and T. G. Kim, 2014. Estimating water footprint of paddy rice in Korea. *Paddy and Water Environment* 12(1): 43-54.
  27. Yoon, S. H. and J. T. Lee, 2001. Climate change impacts on optimum ripening periods of rice plant and its countermeasure in rice cultivation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(1): 55-70 (in Korean).