

Research Article



CrossMark

Open Access

APEX 모형을 이용한 밭작물(콩, 배추) 물발자국 영향 평가

허승오*, 최순군, 홍성창

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Assessment & Estimation of Water Footprint on Soybean and Chinese Cabbage by APEX Model

Seung-Oh Hur*, Soonkun Choi and Seong-Chang Hong (Climate Change & Agroecology Division, Department of Agricultural Environment, National Academy of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 31 July 2019/ Revised: 27 August 2019/ Accepted: 3 September 2019

Copyright © 2019 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Seung-Oh Hur

<https://orcid.org/0000-0001-5388-9657>

Abstract

BACKGROUND: The water footprint (WF) is an indicator of freshwater use that appears not only at direct water use of a consumer or producer, but also at the indirect water use. As an indicator of 'water use', the water footprint includes the green, blue, and grey WF, and differs from the classical measure of 'water withdrawal' because of green and grey WF. This study was conducted to assess and estimate the water footprint of the soybean and Chinese cabbage.

METHODS AND RESULTS: APEX model with weather data, soil and water quality data from NAS (National Institute of Agricultural Sciences), and farming data from RDA (Rural Development Administration) was operated for analyzing the WF of the crops. As the result of comparing the yield estimated from APEX with the yield extracted from statistic data of each county, the coefficients of determination were 0.83 for soybean and 0.97 for Chinese cabbage and p-value was statistically significant. The WFs of the soybean and Chinese cabbage at production procedure were 1,985 L/Kg and 58 L/Kg, respectively. This difference may have originated from the cultivation

duration. The WF ratios of soybean were 91.1% for green WF and 8.9% for grey WF, but the WF ratios of Chinese cabbage were 41.5% for green WF and 58.5% for grey WF. **CONCLUSION:** These results mean that the efficiency of water use for soybean is better than that for Chinese cabbage. The results could also be useful as an information to assess environmental impact of water use and agricultural farming on soybean and Chinese cabbage.

Key words: APEX model, Chinese cabbage, Soybean, Water footprint

서론

발자국(Footprint)은 인간이 발자국을 디딤으로서 발생되는 환경파괴 정도를 나타내기 위한 지표로 개발되었으며, 생태 발자국이나 탄소발자국 등의 개념이 일반적으로 사용되고 있다(Rees, 1996). 생태발자국은 토지자원을 표현한 개념으로서 생태생산 공간 이용을 나타내는 지표로 사용되었으며, 탄소발자국은 대기자원을 표현한 개념으로서 이산화탄소의 양으로 나타낸 온실가스의 양을 나타내는 지표이다. 물발자국(Water Footprint, WF)은 수자원을 표현하는 개념으로서 생산물 생산에 사용되는 총체적인 물의 양을 나타내는 지표로서(Vanham *et al.*, 2013; Mekonnen and Hoekstra, 2014) 물의 소비량과 오염되는 양을 측정해 환경영향을 평가할 수 있는 최선의 방법으로 평가되고 있다. UNESCO-IHE는 그러한 수단의 하

*Corresponding author: Seung-Oh Hur
Phone: +82-63-238-2500; Fax: +82-63-238-3823;
E-mail: soilssohur@korea.kr

나로서 직접수와 간접수를 적용한 물발자국 산정이론을 제시하였으며, 이것이 물발자국네트워크(Water Footprint Network, WFN)의 녹색·청색·회색 물발자국 산정이론으로까지 발전하게 되었다(Aldaya and Hoekstra, 2010; Hoekstra et al., 2011).

물발자국은 시간·공간적으로 물 사용에 관한 정확한 정보 제공이 가능하기 때문에 효율적인 수자원 관리를 위한 평가지표로 사용할 수 있고, 그를 바탕으로 하여 지속 가능한 평가지표로도 활용이 가능하다(Hoekstra et al., 2011; Wang et al., 2019). 농업부분의 물 발자국은 기후나 지역적 특성에 따라 많은 차이를 보이고 있으며, 작물종류나 품종, 토양, 관개, 영농형태 등에 따라서도 물사용에 따른 물발자국이 다양해지고 복잡해질 수 있다(Yoo et al., 2014(a)). 그렇지만, 농업용수 사용에 따른 농업분야 영향평가 및 지속성 판별 지표로서, 또한 농업용수 정책 및 수자원 관리의 효율성을 판별하는 지표로서 물발자국이 가지는 효과적인 기능을 활용할 수 있도록 하는 연구가 필요한 것이 우리의 현실이다. 따라서, 본 연구는 작물 재배에 따른 농업용수 효율성 및 영향평가 지표의 하나로서 녹색·청색·회색 물발자국을 활용하고자 수행 되었다.

재료 및 방법

물발자국 산정이론

WFN은 물발자국을 '작물 1 kg을 생산하는데 소비되는 물(L)의 양'으로 정의하고 환경영역별로 녹색(Green)·청색(Blue)·회색(Grey) 물발자국으로 구분을 하였다(Hoekstra et al., 2011). 녹색 물발자국은 강우를 통하여 자연적으로 공급되는 물을 나타내고 청색 물발자국은 관개와 같이 에너지를 투입해야만 사용할 수 있는 물을 의미하며, 회색 물발자국은 오염원을 자연 농도와 주변 수질기준에 맞게 정화하기 위해 필요한 물을 정의하고 있다. 이러한 물발자국은 다음의 식 (1)과 같이 계산한다.

$$WF_{crop} = WF_{crop, green} + WF_{crop, blue} + WF_{crop, grey} \quad [\text{volume/mass}] \quad (1)$$

여기서, WF_{crop} 은 작물의 총 물발자국을 나타내며, $WF_{crop, green}$ 은 작물의 녹색 물발자국, $WF_{crop, blue}$ 은 청색물발자국, $WF_{crop, grey}$ 는 회색물발자국을 나타낸다.

환경영역별 물발자국은 각 작물의 생산량과 증발산량 및 수질농도로 계산하도록 되어 있으며, 이것을 각각의 물발자국 계산식으로 표현하면 다음의 식 (2)~(4)로 나타낼 수 있다.

$$WF_{crop, green} = \frac{CWU_{green} [\text{volume/area}]}{Yield [\text{mass/area}]} \quad (2)$$

$$WF_{crop, blue} = \frac{CWU_{blue} [\text{volume/area}]}{Yield [\text{mass/area}]} \quad (3)$$

$$WF_{crop, grey} = \frac{L_{C_{nat}} [\text{volume/area}]}{Yield [\text{mass/area}]} = \frac{V_{effl} \times (C_{effl} - C_{nat}) [\text{volume/area}]}{Yield [\text{mass/area}]} \quad (4)$$

여기서, CWU_{green} 은 작물이 생산과정에서 소비하는 녹색의 물 소비량을 나타내며, CWU_{blue} 은 청색의 물소비량을 나타낸다. Yield는 각 작물의 생산량을 나타낸다. L은 배출수의 오염물질 부하량(mass/area), C_{nat} 은 해당 수체 수질에 대한 자연농도 또는 배경농도를 의미하며, C_{effl} 은 배출수 농도, V_{effl} 은 유출수량을 나타낸다.

녹색 물소비량과 청색 물소비량은 해당영역별 작물의 생산과정에서 소비되는 증발산량과 작물의 생육일수와의 함수관계로 표현하며, 다음의 식 (5), (6)과 같이 나타낸다.

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} [\text{volume/area}] \quad (5)$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{blue} [\text{volume/area}] \quad (6)$$

여기서, l_{gp} 는 작물 생육기간을 포함하는 영농기간을 나타내며, $d=1$ 은 영농기의 첫 날을 의미한다. ET_{green} 은 녹색수의 영농기간 동안의 증발산량을 모두 합한 것을 의미하며, ET_{blue} 는 청색수의 영농기간 동안의 증발산량을 모두 합한 것을 나타낸다.

물발자국 산정

물발자국 산정을 위해 APEX(Agricultural Policy/Environmental eXtender) 모형(Gassmann et al., 2009)을 이용하였다. APEX 모형은 작물의 생육 및 소비수량뿐만 아니라 관개량, 배수량 등 농경지의 물순환 요소를 분석할 수 있고(Choi et al., 2017(b)), 물순환 요소를 기반으로 하여 양분 관리, 영농방법 등의 자료를 이용해 수질을 예측할 수 있다. 또한, 수계로의 오염유출 저감을 위한 최적영농관리(BMP, Best Management Practice) 효과도 분석 가능하다(Gassmann et al., 2009). APEX 구동을 위하여 다음과 같은 작업을 수행하였다.

가. 대상지역 선정 및 생산량 자료

콩과 배추의 생산단계에서의 물 발자국 산정을 위해서는 우선 분석지역을 선정하여야 하는데, 밭작물 대상지역 선정에서의 난점은 쌀과는 달리 통계청의 통계포탈에 시·군 단위 통계자료가 부재해 일일이 시군의 통계자료를 찾고, 자료 품질을 검정하고 필요한 형태로 자료를 작성하는 것이었다. 콩은 재배면적이 많은 것으로 알려진 파주, 홍천, 단양, 서산, 군산, 무안, 상주 김해를 대상지역으로 선정하였으며, 배추는 고창, 나주, 당진과 제천을 대상지역으로 하였다. 작물 생산량 및 재배면적 자료는 2002-2015년까지의 대상 시군별 통계연보를 활용하여 재배면적, 생산량 및 단위면적당 생산량(kg/10a) 자료를 작성하였다.

나. 작물 증발산량 산정

콩, 배추가 소비하는 물의 양을 산정하기 위해서는 증발산량을 산정해야 하는데, APEX 모형은 Penman-Monteith (Monteith,

1965), Hargreves (Hargreaves and Samani, 1985) 등 5가지 증발산량 산정 수식을 포함하고 있다(Choi *et al.*, 2017(a, b)). 증발산량 산정 시 Penman-Monteith 공식을 사용할 경우 CO₂와 포화수증기압(e_s)과 실제수증기압(e_a) 차이의 영향을 고려하여 증발량 및 증산량을 산정 할 수 있다(Stockle *et al.*, 1992).

Williams 등(2015)은 작물의 엽면적지수와 작물의 생육을 반영한 수정 Penman-Monteith 공식을 제시하고 있다(식 7).

$$E_p = \frac{\Delta R_n + \frac{86.66 \rho_a (e_s - e_a) U_{10}}{6.25 \left(\ln \left(\frac{10 - 0.702 CH^{0.979}}{0.131 CH^{0.997}} \right) \right)^2}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{\sum LAI g_1 e^{\frac{p_1}{0.00155(330 - CO_2)}} U_{10}}{6.25 \left(\ln \left(\frac{10 - 0.702 CH^{0.979}}{0.131 CH^{0.997}} \right) \right)^2} \right) \right]} \quad (7) \quad (CH < 8m)$$

여기서, E_p는 잠재증발산량(mm/day), Δ는 수증기압곡선의 온도에 따른 기울기(kPa/°C), λ는 잠열계수(MJ/kg), R_n은 순복사량(MJ/m²·day¹)이며, γ는 psychrometric 상수(kPa/°C)로서 대기압(P)의 함수로(0.665×10⁻³×P) 표현된다. ρ_a는 공기밀도(kg/m³), U₁₀는 10 m 상공의 풍속(m/s), e_s는 포화수증기압(kPa)이고 e_a는 실제수증기압(kPa)이다. p₁은 1.0~2.0 사이의 값을 갖는 매개변수, LAI는 작물의 엽면적지수, g₁는 잎의 공기유통성 (m/s)으로서 증기압차의 함수이며 작물에 따라 다른 값을 가진다. CH는 작물 캐노피까지의 높이(m)이고, CO₂는 이산화탄소농도(g/m³)이다.

증발산량 산정에 이용되는 기상자료는 기상청의 각 지역 측후소를 기준으로 30년(1976-2005년) 평년자료를 기준으로 하여 최고기온, 최저기온, 강수량, 일사량, 풍속, 상대습도를 구축·적용하되, 해당지역에 측후소 기상자료가 없는 경우에는 가장 인접한 지역의 기상자료를 사용하였다.

다. 영농활동자료, 토양자료 및 수질자료

콩과 배추에 대한 파종시기, 정식시기, 수확시기, 시비량, 재식거리 등의 영농자료는 농촌진흥청에서 제공하고 있는 '농사료(www.nongsaro.go.kr)'의 자료를 활용하였다. 질소 추비의 경우 3회 분시 하는 것으로 하였다. 토양자료는 국립농업과학원의 토양정보시스템인 '흙토람(soil.rda.go.kr)' 자료를 이용해 구축하였다. 대상지역에 분포하고 있는 토양통의

층위별 깊이, 토성, 유기물함량, 포장용수량, 위조점 등의 정보를 포함한다. 회색물발자국 산정에 중요한 인자인 하천수 수질은 국립농업과학원의 도별 및 시군별 하천수 수질 평균 농도(NAS, '12~'14) 자료 중 총질소(T-N)를 활용하였다. 시·군단위 자료가 없는 파주는 경기도의 하천수 수질 평균자료를 적용하였고, 단양과 무안은 인근 시·군인 체천과 나주의 자료를 활용하였다.

라. 엽면적지수

비교적 쉽게 측정할 수 있는 엽면적지수(LAI)는 APEX에서 작물 생장량과 증발산량 모의에 주요한 인자로 작용한다(Choi *et al.*, 2017(a, b)). APEX에서 엽면적지수는 출현으로부터 잎의 쇠락 전까지를 산정하며(Williams *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2017(b)), 그 식은 다음과 같다(식 8, 9).

$$LAI = LAI_0 + \delta HUF \cdot XLAI \cdot \sqrt{REG} \cdot \frac{LAI_0}{TLAI} \quad (8)$$

$$HUF = \frac{\sum_j \frac{T_{max,j} - T_{min,j}}{2} - T_b}{PHU} \quad (9)$$

$$\frac{\sum_j \frac{T_{max,j} - T_{min,j}}{2} - T_b}{PHU} + e^{\left(\alpha - \beta \cdot \frac{\sum_j \frac{T_{max,j} - T_{min,j}}{2} - T_b}{PHU} \right)}$$

여기서, LAI₀는 작물의 초기 일 엽면적지수, XLAI는 작물 최대 엽면적지수, TLAI는 생육기간 중 총 엽면적지수, HUF는 열단위(Heat Unit Factor), δHUF는 열단위의 일 변화량이다. REG는 작물 스트레스인자 최소값, j는 재배일, PHU는 작물이 출현하여 생리적 성숙에 도달하기까지의 열단위 총량, T_{max}는 일 최고기온(°C), T_{min}는 일 최저기온(°C)이며, T_b는 작물 생육 기저온도(°C)로서 이 온도 이하에서는 작물이 생육하지 않는다.

APEX에서 기본으로 제공하고 있는 콩과 배추의 엽면적지수 추정곡선 계수(DLAP 1, DLAP 2)는 우리나라의 기상 및 생육상황과 맞지 않아 국립농업과학원 구내포장(콩) 및 농가포장(배추)에서 조사한 자료를 이용해 보정하였다(Fig. 1). 콩은 DLAP 1이 15.05에서 13.05, DLAP 2는 50.95에서 38.95로, 배추는 DLAP 1이 25.23에서 20.23으로 DLAP 2는 40.86을 그대로 적용하였다.

Table 1. Data on farming management for crops

Crops	Seedling	Trans-planting (Month/Day)	Harvest	Fertilization (kg/10a) (N-P-K)	Planting Distance (cm)	County
Soybean	5/5	-	10/5	6.5-32.5-9	60×15	8 counties (Paju etc.)
Chinese cabbage	8/16	9/5	11/4	11-7.8-11 (Basal)	75×45	Jechon, Dangjin
	8/31	9/15	11/14	21-0-8.8 (Additional)		Gochang, Naju

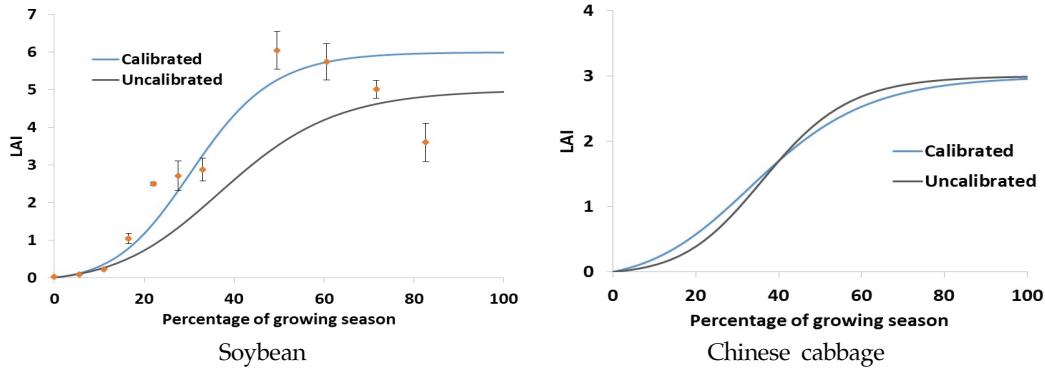


Fig. 1. Calibrated LAI estimation curve for each crops.

결과 및 고찰

작물생산량 모의

APEX 모형은 바이오매스 일단위잠재증가량을 기반으로 하여 작물별 생산량을 모의하고 있다(Choi *et al.*, 2017(a, b)). 콩과 배추에 대한 지역별·연도별 생산량 통계자료와 APEX 모의결과를 비교한 결과 콩의 결정계수는 0.83, 배추는 0.97로 높은 값을 보였고, RMSE는 지역별 생산량 통계자료의 표준편차보다 아주 작게 나타나 APEX 모형이 연간 생산량 변화를 잘 모의하고 있다고 판단된다. 콩은 p값이 0.01보다 작고, 배추는 0.05보다 작은 값을 나타내고 있어 통계적으로도 유의하다는 것을 알 수 있다. 다만, 배추의 결정계수가 콩보다 크면서도 p값이 95% 수준에서 유의성을 나타내는 것은 통계분석 표본수가 작기 때문인 것으로 사료된다. 결과적으로 LAI 계수 보정에 따른 생산량 모의가 비교적 잘 이루어졌다고 판단할 수 있다.

물수지

물수지(water balance)는 어떤 유역이나 지역에서 물 유입과 유출의 균형관계를 말하며, 주로 강우, 증발산, 유출 및 침투로 구분한다. 우리나라의 경우 밭에서의 관개는 가물의 경우를 제외하고는 잘 실시되지 않기에 본 연구에서는 관개의 요소는 생략하였다. APEX 모형을 이용하여 콩과 배추를 대상으로 한 지역별 물수지 모의 결과는 다음의 Table 3에 나타나 있다. 물수지는 앞에서 언급한 것처럼 강우량, 증발산량, 유출량 및 침투량(mm)으로 구성하였다.

물수지를 살펴보면 콩의 경우 평균 강우량이 859.5 mm, 증발산량은 295.3 mm, 유출량은 391.5 mm, 침투량은 172.6 mm를 나타냈으며, 배추는 평균 강우량, 증발산량, 유출량, 침투량이 각각 370.8 mm, 161.6 mm, 159.6 mm를 보여주고 있다. 콩이 배추보다 강우량, 증발산량, 유출량, 침투량이 크게 나타난 것은 영농기간 및 생장기간이 배추에 비해 길었기 때문이며, 콩은 유출량이 증발산량에 비해 96.2 mm가 많았으나 배추는 증발산량이 2.0 mm가 많은 것으로 나타났다. 지역별로 살펴보면 평균적인 결과와 다른 지역들이 있는데, 특히 콩에서 서산지역은

다른 지역과 달리 증발산량이 유출량보다 높게 나타났는데, 이는 기상적 요인이 작용한 것으로 판단된다. 배추는 콩과는 달리 증발산량이 유출량보다 약간 크게 나타났지만 제천의 경우에는 유출량이 증발산량보다 크게 나타났다. 이것은 제천의 경우 경사도가 다른 지역보다 크게 작용한 것으로 판단된다.

물발자국

콩과 배추에 대한 물수지와 생산량이 모의가 되면 이 자료를 기반으로 하여 환경영역별 물발자국을 산정할 수 있다. 콩, 배추에 대한 녹색·회색 물발자국은 다음의 Table 4에 나타나 있다. 청색 물발자국은 물수지 산정에서 관개가 없는 것으로 하였기에 물발자국 산정에서 생략하였다.

콩의 경우 녹색 WF는 1,805.7 L/kg, 회색 WF는 179.3 L/kg으로 산정되었으며, WF_{crop} 은 1,985.0 L/kg을 나타내고 있다. Yoo 등(2014(b))에서 산정한 콩의 WF는 관개가 없고 수질을 고려하지 않아 청색과 회색은 없고 녹색 WF만 있으며, 그 값은 3,346.7 L/kg으로 본 연구결과보다 1,361.7 L/kg 크게 산정된 결과를 보인다. Huang 등(2012)은 중국에서 콩의 WF_{crop} 은 1,816.4 L/kg이며, 녹색·청색·회색 WF가 각각 1,195.6, 354.3, 266.4 L/kg이라고 하였으며, Ercin 등(2012)은 캐나다에서 콩의 WF_{crop} 은 1,772 L/kg이며, 녹색·회색 WF가 각각 1,753.5, 18.5 L/kg이라고 하였다. 이들의(Ercin *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2012) 연구는 본 연구와 비슷한 WF_{crop} 을 나타내고 있다. 비율로 보면 본 연구는 녹색·회색 WF가 각각 91, 9%를 나타내는 반면, Huang 등(2012)은 녹색·청색·회색 WF가 각각 65.8, 19.5, 14.7%였으며, Ercin 등(2012)은 녹색·회색 WF가 각각 99, 1%였다. 지역별로는 서산이 가장 큰 물발자국을, 단양이 가장 작은 WF 값을 보여주고 있다. 홍천, 김해, 무안은 다른 지역과 달리 회색 WF 비율이 높게 나타나 있다. 이것은 배경농도와 농경지로부터 유출되어 발생하는 유출수의 농도차가 다른 지역에 비해 상당히 크게 나타난 것이 원인으로 분석되었다.

배추는 WF_{crop} 이 58.0 L/kg로 녹색·회색 WF가 각각 24.0, 34.0 L/kg으로 산정되었다. Yoo 등(2014(b))의 연구

Table 2. Statistical analysis data on average yield of crops

Crops	Average Yield (ton/ha)				RMSE	R ²	p value
	Statistics	STD	Simulated	STD			
Soybean	1.61	0.28	1.59	0.18	3.96×10 ⁻³	0.83	p<0.01
Chinese cabbage	68.4	22.1	69.5	16.3	1.47	0.97	p<0.05

Table 3. Water balance data by APEX on crops of each county

Crop	County	Rainfall (mm)	Evapotranspiration (mm)	Runoff (mm)	Percolation (mm)
Soybean	Pajoo	1,020.2	376.1	478.0	166.1
	Hongcheon	931.5	243.8	494.1	193.6
	Danyang	878	242.7	447.2	188.1
	Seosan	885.3	384.2	320.1	180.9
	Gunsan	827	287	337.8	202.1
	Muan	708.8	262.4	286.5	159.9
	Sangju	794.7	292.6	351	151.1
	Kimhae	830.4	273.9	417.4	139.0
	Average	859.5	295.3	391.5	172.6
Chinese Cabbage	Gochang	312.6	135.7	125.9	51
	Naju	294.3	142.7	125.7	25.9
	Dangjin	454.2	214.5	188.8	50.9
	Jecheon	422.1	153.6	198	70.5
	Average	370.8	161.6	159.6	49.6

Table 4. Green & grey WF by APEX on crops of each county

Crop	County	Green WF		Grey WF		Total WF (L/kg)
		(L/kg)	Ratio (%)	(L/kg)	Ratio (%)	
Soybean	Pajoo	2,130.4	100	0.0	0	2,130
	Hongcheon	1,566.1	76	491.0	24	2,057
	Danyang	1,412.2	98	26.4	2	1,439
	Seosan	2,684.6	99	18.3	1	2,703
	Gunsan	1,636.6	95	94.9	5	1,732
	Muan	1,579.9	85	286.6	15	1,867
	Sangju	1,843.8	99.9	2.5	0.1	1,846
	Kimhae	1,591.8	76	514.7	24	2,107
	Average	1,805.7	91.1	179.3	8.9	1985.0
Chinese Cabbage	Gochang	18.2	39	28.3	61	47.0
	Naju	24.5	35	45.4	65	70.0
	Dangjin	30.5	51	29.6	49	60.0
	Jecheon	22.9	41	32.5	59	55.0
	Average	24.0	41.5	34.0	58.5	58.0

에 따르면 배추는 WF_{crop} 이 42.4 L/kg으로 녹색·청색 WF가 각각 39.5, 2.9 L/kg을 차지하며, Son 등(2013)은 가을배추의 경우에 WF_{crop} 은 21.6 L/kg으로 녹색·청색 WF가 각각 9.0, 12.6 L/kg을 차지한다고 하였다. Huang 등(2012)은 중국에서 채소의 WF는 녹색·청색·회색 WF가 각각 22.1, 67.6, 290.2 L/kg이라고 하였다. 비율로 살펴보면 본 연구의 녹색·회색 WF는 각각 41.5, 58.5 %였고, Huang 등(2012)의 연구에서는 회색 WF가 76 %를 차지한다고 하였다. 이러한 수치는 콩에 비해 아주 높은데, 우리나라에서는 배추의 재배형태가 농경지가 많이 드러나도록 되어 있고, 재배지역도 평지보다는 경사지에서 재배가 이루어져 유출량이 발생할 때 토양유실과 함께 다량의 양분이 유실된 때문인 것으로 분석된다. 이러한 결과는 배추 재배에 있어 유출량 및 비배 관리가 필요함을 의미하며, 유출량 관리를 위한 재배방법 및 영농방법에 대한 고민이 필요한 것으로 생각된다.

콩과 배추에 대한 WF를 보면 연구마다 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 각 연구마다 사용하는 모형이 다르며 국내의 기존 연구는 논 위주이거나(Kim *et al.*, 2013; Yoo *et al.*, 2014(a); Oh *et al.*, 2017) 회색 WF를 제시하지 않는 산정방법을(Son *et al.*, 2013; Yoo *et al.*, 2014(b)) 택하였기 때문으로 여겨진다. 또한, 콩과 배추의 WF 차이가 크게 나타난 건 앞에서 서술했듯이 작물생육기간의 차이와 배추의 재배시기(가을)가 강우량이 많지 않은 시기이기에 발생한 결과로 분석된다. 환경영역별 WF 비율로 평가할 때는 콩보다는 배추가 회색 WF에 취약한 것으로 나타났는데, 이는 배추 재배시 물 유출이 발생함에 따른 양분유실이 수계에 영향을 미쳤기 때문으로 판단되며, 수질을 포함하여 물 사용의 효율성 측면에서 살펴보면 배추보다는 콩을 재배하는 것이 더 낫다고 판단할 수 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was supported by the Rural Development Administration under the “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development” (Project No. PJ010890).

References

- Aldaya, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The water needed for Italians to eat pasta and pizza. *Agricultural Systems*, 103, 351-360.
- Choi, S. K., Jeong, J. H., & Kim, M. K. (2017, a). Simulating the effects of agricultural management on water quality dynamics in rice paddies for sustainable rice production - model development and validation. *Water*, 9(11), 869.
- Choi, S. K., Kim, M. K., Jeong, J. H., Choi, D. H., & Hur, S. O. (2017, b). Estimation of crop yield and evapotranspiration in paddy rice with climate change using APEX-paddy model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering*, 59(4), 27-42.
- Ercin, A. E., Aldaya, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The water footprint of soy milk and soy burger and equivalent animal products. *Ecological Indicators*, 18, 392-402.
- Gassman, P. W., Williams, J. R., Wang, X., Saleh, A., Osei E., Hauck, L. M., Izaurralde C., & Flowers, J. D. (2009). The agricultural policy environmental extender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses. Iowa State University, Ames, Iowa, 50011-1070.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, 1(2), 96-99.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. pp. 2-45, Earthscan Ltd., United Kingdom.
- Huang, J., Zhang, H. L., Tong, W. J., & Chen, Fu. (2012). The impact of local crops consumption on the water resources in Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 21, 45-50.
- Kim, J. B., Kang, H., & Shin, S. M. (2013). A study about regional water footprint of rice production in agriculture industry. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(11), 827-834.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214-223.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Oh, B. Y., Lee, S. H., & Choi, J. Y. (2017). Analysis of paddy rice water footprint under climate change using AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(1), 45-55.
- Rees, W. E. (1996). 'Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability'. *Population and Environment*, 17(3), 195-215.
- Son, M. J., Kim, I., & Cha, K. H. (2013). Water footprint assessment on major agricultural products - A case of water footprint assessment on cabbages. *The Korean Society of Life Cycle Assessment*, 14(2), 98-109.

- Stockle, C. O., Williams, J. R., Rosenberg, N. J., & Jones, C. A. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I—Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems*, 38(3), 225-238.
- Vanham, D., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2013). The water footprint of the EU for different diets. *Ecological Indicators*, 32, 1-8.
- Wang, F., Wang, S., Li, Z., You H., Aviso, K. B., Tan, R. R., & Jia, X. (2019). Water footprint sustainability assessment for the chemical sector at the regional level. *Resources, Conservation & Recycling*, 142, 69-77.
- Williams, J. R., Izaurralde, R. C., & Steglich, E. M. (2015). *Agricultural policy/environmental extender model theoretical documentation version 0806*. Texas A&M Blackland Research Center Temple, 28-61.
- Yoo, S. H., Choi, J. Y., Lee, S. H., & Kim, T. G. (2014, a). Estimating water footprint of paddy rice in Korea. *Paddy and Water Environment*, 12(1), 43-54.
- Yoo, S. H., Lee, S. H., & Choi, J. Y. (2014, b). Estimation of water footprint for upland crop production in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(3), 65-74.