

한국의 농산물 가상수 산정

Estimation of Crop Virtual Water in Korea

유 승 환* / 최 진 용** / 김 태 곤*** / 임 정 빈**** / 전 창 후*****

Yoo, Seung-Hwan / Choi, Jin-Yong / Kim, Taegon / Im, Jeong-Bin / Chun, Changhoo

Abstract

Virtual water is defined as the volume of water required to produce a commodity or service. The degree of food self-sufficiency is currently about 27 % in South Korea, so that Korea is one of the largest net virtual water import countries for agricultural product, thus it is necessary to estimate suitable virtual water for South Korea. The objective of this paper is to quantify the agricultural virtual water use (AWU) and virtual water content (VWC) using the method suggested by Chapagain and Hoekstra during the period 1991-2007. To calculate the virtual water content, 44 different crop production quantity and harvested area data were collected for 17 years and FAO Penman-Monteith equation was adapted for computing crop consumptive use of water. As the results, AWU has been estimated at 15.1 billion m³ in average showing a tendency to decrease. Rice has the largest share in the AWU, consuming about 10.1 billion m³/yr which is about 75 % of gross AWU, and the VWC is 1600.1 m³/ton for paddy rice. The largest VWCs of crops are oilseed and tuber crop, and the smallest are leaf and root vegetables. The primary crop production VWC can be used for calculating the VWC of various secondary products using the contribution ratio, therefore the results of this study are expected to be used as basic data for national agricultural water footprint.

Keywords : Agricultural virtual water, water footprint, consumptive use of water

요 지

가상수는 농산물, 가공식품 또는 제품을 만들기 위해서 필요한 물의 총량을 의미한다. 우리나라의 곡물자급율은 27 %에 불과하며, 농산물 수입에 의한 가상수 수입이 다른 나라들에 비해 매우 큰 편에 속하며, 우리나라에 적합한 가상수를 산정할 필요가 있다. 본 논문은 Chapagain과 Hoekstra가 제안한 방법을 이용하여, 1991년부터 2007년까지의 연간 농업 가상수 사용량(agricultural virtual water use, AWU)과 작물 1 톤을 생산하기 위하여 필요한 가상수량(virtual water content, VWC)을 산정하는 데 목적을 두고 있다. 가상수 사용량을 산정하기 위하여 44가지 작물에

* 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원
Researcher, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-921, Korea

** 교신저자, 서울대학교 조경·지역시스템공학부 & 농업생명과학연구원, 부교수
Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engrg. & Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-921, Korea
(e-mail: iamchoi@snu.ac.kr)

*** 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 박사과정
Graduated Student, Dept. of Landscape Architecture and Rural Systems Engrg., Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-921, Korea

**** 서울대학교 농경제사회학부 부교수
Associate Prof., Dept. of Agricultural Economics and Rural Development, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-921, Korea

***** 서울대학교 식물생산과학부 부교수
Associate Prof., Dept. of Plant Science, Seoul Nat'l Univ., Seoul 151-921, Korea

대해 17년간의 작물 생산량과 재배면적 데이터를 수집하고, FAO Penman-Monteith식을 이용하여 작물소비수량을 산정하였다. 산정 결과를 살펴보면, 농업 가상수 사용량은 151억 m³으로 산정되었고, 점차 그 양이 줄어드는 경향을 보였다. 작물 중 논벼가 가장 많은 양의 농업 가상수를 사용하였고, 전체 농업 가상수 사용량 중 75 %에 해당하는 연간 101억 m³을 사용하였으며, 논벼를 1톤을 생산하기 위해 필요한 가상수량은 1600.1 m³/ton으로 산정되었다. 작물을 생산하는 데 있어 필요한 가상수량이 큰 작물 종류는 채유종실이 가장 큰 값을 나타내었고, 엽채류 및 근채류가 가장 작은 것으로 나타났다. 산정된 원료 작물의 가상수량은 원료 작물과 가공 생산물의 중량비를 이용하여 농산물 가공품이나 축산물 등 2차 생산물의 가상수를 산정할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서 산정된 결과는 우리나라의 농업 분야의 물발자국을 산정하는 데 있어서 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 농업 가상수, 물 발자국, 작물 소비수량, 농업용수

1. 서 론

2007년 기준 한국의 곡물자급율은 27.2 %에 불과하다. 이는 높은 인구밀도에 비하여 경지면적이 작고 경제 발전에 따라 식량 소비가 증가한 결과로 판단된다. 낮은 식량자급율로 인하여 한국은 매년 곡물을 포함하여 소고기와 돼지고기, 과일과 같은 다양한 농업생산을 수입하고 있다. 이와 같은 농산물의 생산을 위해서는 기본적으로 물을 필요로 하며, 2004년에 나온 UNESCO-IHE 보고서에 의하면 우리나라는 1 ha당 약 6,700 kg의 쌀을 생산하였는데, 쌀 1 톤을 생산하기 위해서는 약 1,301 m³정도의 물을 사용되는 것으로 조사되었다 (Chapagain and Hoekstra, 2004). 이와 같이 어떠한 농작물, 가공식품 또는 제품을 만들기 위해서 사용된 물의 총량을 가상수라고 하는데, Allan *et al.* (1998)에 의해 처음 제안된 이론이다. 농산물 또는 공산품을 수입 또는 수출 하는 것은 실질적으로 물을 교역하는 것과 같은 효과가 있다고 할 수 있고, 우리가 수출입하는 많은 농산물은 사실상 그 농산물을 생산하기 위하여 소비된 물을 수출입한 효과가 있는 것이다.

한 국가에서 사용되는 물의 이력, 즉 물이 어떻게 사용되고, 어디로 이동하는지에 대하여 살펴볼 필요가 있는데, 이러한 개념을 나타낸 것이 물발자국 (water footprint)이다. 물발자국 개념은 Wackernagel and Rees (1996)가 개발한 생태발자국 (ecological footprint) 개념에서부터 발전되었다. 생태발자국이란 인간이 지구에서 삶을 영위하는 데 필요한 의식주 등을 제공하기 위한 자원의 생산과 폐기에 드는 비용을 토지로 환산한 지수를 말하는 것으로서 인간이 자연에 남긴 영향을 발자국으로 표현하였다. 생태발자국에서는 인간의 삶을 유지하기 위하여 필요한 재화를 토지 개념으로 나타내었다면, 물발자국은 한 국가에서 재화를 생산하는데 필요한 물 사용량을 가상수로 표현한 것이다. Hoekstra

and Hung (2002)는 각 국가별 물발자국을 가장 먼저 산정하였는데, 이 연구에서는 1995~1999년의 국가별 작물 생산량 및 수출입량을 이용한 국가별 물발자국을 산정하였다. 이후 Chapagain and Hoekstra (2003)는 각 국가별 축산 및 축산가공품에 대한 가상수 산정을 하였는데, 가공품에 대해서는 생산 비율 (product fraction)이라는 개념을 도입하여 가상수를 산정하였다. 이들 연구에 의하면 미국, 캐나다, 태국, 아르헨티나 등이 가장 많은 가상수를 수출하고, 스리랑카, 일본, 네덜란드 및 대한민국 등이 가장 많은 가상수를 수입하는 것으로 나타났다. Chapagain and Hoekstra (2004)는 위 두 연구를 종합하여 1997~2001년의 통계 자료를 바탕으로 농축산물 및 그 가공품 및 공산품에 대하여 가상수를 산정하였고, 그 결과를 이용하여 국가별 물발자국을 추정하였다. 이를 바탕으로 국가별 물발자국과 수자원부존량을 비교하여 물 희소성, 국가 물 자급률 및 물 수입 의존도를 산정하였다. 이 연구에 의하면 우리나라는 일본, 이탈리아, 영국, 독일에 이어 세계에서 다섯 번째로 많은 물을 순수입하는 국가로 보고하였다. 또한 우리나라는 물 희소성이 79 %, 국가 물 자급율이 38 %, 물 수입 의존도가 62 %로써, 물 수입 의존도가 전 세계 나라 중 16위로 나타나 물 수입 의존도가 비교적 높은 것으로 나타났다.

물 수입 의존도가 높은 우리나라의 경우, 만약 전 세계적인 가뭄·홍수 등과 같은 재해 등으로 인하여 국제적인 무역에 문제가 발생하여 농축산물을 적절한 시기에 수입하지 못할 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 농작물 생산에 필요한 농경지나 기술의 여력이 충분하더라도 수자원 부족으로 필요한 양의 농작물 생산에 어려움을 겪을 수도 있다. 이는 한정된 수자원에 대하여 농업, 생활 및 공업용수 등의 이용에 대한 갈등으로 이어져 극심한 사회혼란이 야기될 수 있으므로, 국가적 차원에서 본다면 가상수는 각 국가별로 물과 관련된 정책을

세우는 데 중요한 고려 사항이 될 수 있다.

농업 가상수는 작물 재배 조건인 기상 조건, 영농 방식 등의 조건에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따라 각 국가는 국가별 농업생산물에 대한 가상수를 산정하여 농업분야의 용수사용에 대한 물발자국 추적이나 국가적인 농업용수 정책에 활용하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에 적합한 가상수를 산정하기 위하여 1991년부터 2007년까지 작물통계연보와 기상자료를 이용하여 우리나라에서 44개의 농작물을 생산에 필요한 연간 가상수 사용량 (VWU, virtual water use, m³/yr)을 산정하고, 이를 바탕으로 작물 1톤을 생산하기 위하여 필요한 가상수량 (VWC, virtual water content, m³/ton)을 추정하여 우리나라의 농업 분야에서 물발자국 산정하기 위한 기초 자료로 제공하고 하였다.

2. 연구 방법

2.1 물발자국 산정 방법

물발자국 (WFP, water footprint)이라는 개념은 사람들의 소비와 관련된 물이용을 나타내기 위한 지표를 개발하기 위해 도입되었다 (Hoekstra and Hung, 2002). 한 나라의 물발자국은 한 국가에 거주하는 사람들이 소비하는 상품과 서비스를 생산하는 필요한 물의 양으로 정의된다 (수자원공사, 2006). 물발자국을 산정하기 위해서는 가상수 (virtual water)라는 개념이 필요한데, 가상수란 Allan *et al.* (1998)에 의해 제안된 이론으로써 어떤 제품이나 서비스를 공급하기 위해 사용되는 물의 양을 의미한다. 즉, 어떤 나라에서 생산품이 생산되기 위해서는 물이 사용되는데, 이 생산품이 다른 나라로 수출 또는 수입되면서 실질적으로 물이 이동되는 것이다. 따라서 한 국가의 물발자국은 국내 수자원의 이용량에서 다른 나라로 이동하는 가상수를 제외하고, 국내로 유입되는 가상수를 합하여 산정한다. 일반적으로 한 국가의 물 이용경로 산정식은 다음과 같은데, Fig. 1은 WFP의 산정 과정을 그림으로 나타낸 것이다 (Chapagain and Hoekstra, 2004).

$$WFP = IWFP + EWFP \quad (1)$$

여기서, IWFP (internal water footprint)는 한 국가의 내부적인 물발자국인데, 그 나라의 거주자에 의해 소비되는 상품과 서비스를 생산하기 위해 사용되는 국내 수자원의 양을 의미한다. EWFP (external water

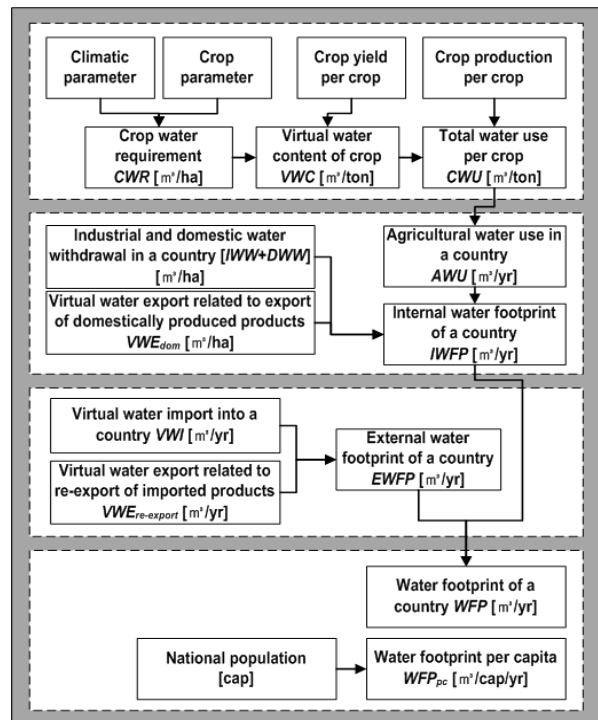


Fig. 1. Steps in the Calculation of the Water Footprint of a Nation (Chapagain and Hoekstra, 2004)

footprint)는 한 국가의 외부적인 물발자국으로 그 나라의 거주자들이 소비를 위해서 수입되는 상품과 서비스를 생산하기 위해서 다른 나라에서 사용된 물의 양이다. IWFP와 EWFP는 Eqs. (2) and (3)과 같이 산정된다.

$$IWFP = AWU + IWW + DWW - VWE_{dom} \quad (2)$$

여기서, AWU (agricultural water use)는 농업분야에서의 가상수 사용량으로 작물소비수량을 의미한다. AWU에는 유효수량을 포함하지만, 관개 또는 재배를 위한 관리수량은 거시적인 측면에서 회귀수량으로 간주한다. IWW (industrial water withdrawals)와 DWW (domestic water withdrawals)는 공업용수와 생활용수를 각각 의미한다. VWE_{dom} (virtual water export)는 국내에서 생산되어 다른 나라로 수출된 재화의 가상수의 사용량을 의미한다.

$$EWFP = VWI - VWE_{re-export} \quad (3)$$

여기서, VWI (virtual water import)는 국외에서 생산되어 국내로 수입된 재화의 가상수를 의미하고, VWE_{re-export} (virtual water export)는 수입된 재화 중 최종적으로 다시 수출된 재화의 가상수를 의미한다.

2.2 농업분야 가상수사용량 산정

한 해 동안 농업분야에서 사용된 가상수 사용량 AWU (agricultural (virtual) water use, m^3/yr)는 다음과 같이 계산된다.

$$AWU = \sum_1^n CWU[c] \quad (4)$$

여기서, CWU (crop water use, m^3/yr)는 작물을 생산하기 위하여 사용되는 물의 양으로써, 특정 작물을 생산하기 위한 물 사용량이고, c 는 작물을 의미한다.

$$CWU = CWR \times \frac{\text{production}}{\text{yield}} \quad (5)$$

여기서, CWR (crop water requirement, m^3/ha 또는 mm)는 필지 단위에서 작물필요수량이고, production 은 작물의 전체 생산량 (ton/yr)이고, yield (ton/ha)는 단위면적 당 작물의 생산량을 의미한다.

CWR 은 작물 생육기간(lp , length of growing period in days) 동안의 일별 작물증발산량(ET_c , crop evapotranspiration)을 누적한 값으로 계산되는데, 산정식은 Eq. (6)과 같다. 논벼의 경우, 담수재배를 하기 때문에 작물필요수량을 산정하기 위해서는 논벼의 작물증발산량과 함께 침투량을 고려할 필요가 있다. 침투량은 토양 종류 및 지하수위에 따라 달라질 수 있는데 본 연구에서는 전체 작물생육기간 동안 300 mm로 가정하였다 (Chapagain and Hoekstra, 2004).

$$CWR = \sum_{d=1}^{lp} ET_c[d] \quad (6)$$

2.3 기초통계자료 구축

본 연구에서 작물통계연보에서 제공하고 있는 식량작물, 채소류, 특·약용 작물 및 과수 작물에 대하여 1991~2007년까지의 시도별 작물 재배 면적, 10 a당 수량, 작물 생산량을 조사하였다. 본 연구의 대상 작물을 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- 식량작물: 미곡 (벼), 맥류 (보리, 호밀, 밀), 두류 (콩, 팥, 녹두, 기타두류), 잡곡 (조, 수수, 옥수수, 메밀, 기타잡곡), 서류 (고구마, 감자)
- 채소류: 엽채류 (배추, 양배추, 시금치, 상추), 조미채소 (고추, 파, 양파, 생강, 마늘), 과채류 (수박,

참외, 딸기, 오이, 호박, 토마토), 근채류 (무, 당근)

- 과수: 사과, 배, 복숭아, 포도, 감귤, 자두, 감, 기타과수
- 특용 (채유종실): 유채, 참깨, 들깨, 땅콩. 이상 총 44작물

각 작물의 생육 기간, 과중 시기 및 수확 시기는 농촌진흥청 품목별 관리 매뉴얼 (농촌진흥청, 2009)을 참조하였다.

2.4 작물증발산량 산정

작물증발산량은 Eq. (7)과 같이 먼저 기상자료를 바탕으로 기준증발산량을 산정하고, 작물의 생육시기별 작물계수를 곱하여 산정한다.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (7)$$

여기서, ET_c 는 작물증발산량, K_c 는 작물계수, ET_0 는 기준증발산량이다.

2.4.1 기준증발산량

본 연구에서는 국제식량농업기구에서 1998년에 추천한 FAO Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준증발산량을 산정하였다. 이 방법은 1965년에 제안된 Penman 공식을 보완한 방법으로 공기동역학 조건에 작물 종류에 따른 기공저항 (stomatal resistance)을 포함하여 수정한 방법이다. 이 공식은 다음과 같다 (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

여기서, ET_0 = 기준증발산량 (mm/day), Δ = 증기압 곡선의 기울기 ($kPa/^\circ C$), R_n = 순일사량 (MJ/m^2day), G = 토양 열 유속 밀도 (MJ/m^2day), γ = 건습계 상수 ($kPa/^\circ C$), T = 2 m 높이에서 일평균기온 ($^\circ C$), u_2 = 2 m 높이에서 풍속 (m/s), e_s = 포화증기압(kPa), e_a = 실제증기압 (kPa)이다.

68개 측후소의 평균기온, 평균풍속, 평균습도 및 일조시간을 이용하여 기준증발산량을 계산하였다. 작물증발산량의 경우 지역 또는 기상 조건에 따라 차이가 발생하기 때문에 티센망 (thiessen network)을 이용하여 각 시도별 작물증발산량을 추정하였다.

2.4.2 작물계수

작물계수는 작물의 성장단계에 따라 변하여 초기에는 작으나 중기에 증가했다가 말기에 감소하는 경향이 있다. 또한 작물계수는 일반적으로 기온이 높거나 건조하고 바람이 있는 기후에서는 높고, 기온이 낮거나 습윤한 기후에서는 낮다. 본 연구에서는 ‘Water footprints of nations (Chapagain and Hoekstra, 2004)’에서 제공하고 있는 작물계수를 이용하였다.

2.5 가상수량(virtual water content) 산정

가상수량 (VWC , virtual water content)은 작물 1 톤을 생산하기 위하여 사용된 물의 양 (m^3/ton)으로, 작물을 생산하기 위한 물 사용량과 전체 작물 생산량의 비로 산정할 수 있다. 그 공식은 Eq. (9)와 같다. 각 작물별 가상수량을 바탕으로 농산물 가공품이나 축산물의 가상수량 산정에 기초자료로 쓰이게 되는데, 이렇게 산정된 농축산물 및 그 가공품의 가상수량 결과는 수출입에 의한 물의 이용경로를 산정함에 있어서 기준값으로 사용된다.

$$VWC[c] = \frac{CWU[c]}{production[c]} \quad (9)$$

여기서, CWU 는 작물을 생산하기 위하여 사용되는 물의 양이고, $production$ 은 한 해 동안의 생산된 작물 생산량이다. 가상수량은 기후조건 또는 지역마다 많은 차이가 나게 되는데 본 연구에서는 각 시도별 물 사용량과 작물생산량을 각각 산정하고, 이를 작물생산량에 따른 가중치를 두어 Eq. (10)과 같은 전국 단위의 가상수량을 추정하였다.

$$VWC[c] = \sum_{i=1}^n w[c_i] VWC[c_i] \quad (10)$$

여기서, VWC_i 는 각 도별 가상수량이고, w_i 는 작물의 전체 생산량과 도별 작물 생산량의 비이다.

3. 작물 재배 면적, 생산량 및 필요수량

본 연구에서는 농작물 생산을 위한 가상수 사용량

Table 1. Average of Crop Harvested Area, Production, Yield and Crop Water Requirement (CWR) (2003~2007)

Crop	Area (10 ³ ha)	Pro- duction (10 ³ ton)	Yield (kg/10a)	CWR (mm)	Crop	Area (10 ³ ha)	Pro- duction (10 ³ ton)	Yield (kg/10a)	CWR (mm)		
Cereals	Rice, Paddy	980.5	6318.1	644.5	1045.5	Vegetables	Cabbage&Brassica	5.4	294.4	5431.0	339.3
	Barley	57.9	237.5	411.0	345.0		Spinach	6.5	104.9	1618.4	150.8
	Wheat	2.6	8.7	337.7	365.2		Lettuce	6.0	175.4	2921.3	319.9
	Rye	0.001	0.001	200.0	573.9		Radish	31.0	1447.6	4679.6	333.6
	Soybean	87.5	139.5	158.0	527.1		Carrot	2.8	105.8	3791.3	361.0
	Red Bean	5.6	6.1	109.7	345.2		Hot Pepper	62.4	333.8	527.6	688.4
	Mung Bean	1.5	1.7	109.5	426.8		Garlic	30.1	358.1	1190.8	259.3
	Pulses, n.e.s.	5.7	7.5	131.0	331.0		Spring Onion	20.9	556.0	2657.8	694.0
	Millet	1.8	2.1	116.5	350.5		Onions	15.5	963.9	6176.3	581.7
	Sorghum	1.8	2.6	149.3	385.2		Ginger	1.9	23.5	1220.1	591.2
	Maize	16.2	73.9	457.8	480.4		Apple	27.5	386.7	1402.5	741.6
	Buckwheat	2.4	2.5	103.8	273.3		Pear	21.9	422.1	1950.7	745.4
	Miscellaneous Cereals, n.e.s.	3.9	5.7	146.5	270.4		Peach	14.6	198.4	1363.6	716.6
	Vegetables	Sweet Potato	17.1	306.9	1802.2		663.7	Grape	21.6	356.9	1662.4
Potato		24.5	648.1	2640.1	365.2	Mandarin	22.2	650.4	2940.2	634.8	
Watermelon		21.6	806.4	3745.1	414.1	Persimmon	27.8	332.1	1192.3	743.5	
Other Melons		7.1	221.5	3125.7	318.4	Plum & Sloe	6.3	70.9	1123.2	723.7	
Strawberry		7.1	203.7	2892.4	302.7	Fruit Fresh, n.e.s.	14.3	89.2	622.7	733.6	
Cucumber		5.9	395.1	6752.9	376.7	Oil Crop	Rapeseed	0.9	1.1	117.9	389.9
Pumpkin		9.5	313.5	3292.0	437.0		Sesame Seed	32.6	17.9	54.9	401.5
Tomato		6.1	403.3	6573.7	381.0		Perilla Seed	26.4	21.9	82.6	413.5
Chinese Cabbage		41.2	2567.1	6259.9	282.7		Ground Nut	3.4	7.1	207.1	510.4

산정을 위하여 1991년부터 2007년까지의 작물통계연보에서 제공하고 있는 작물 재배 면적 (ha), 총 생산량 (kg), 10 a당 작물 생산량 (kg/10a)을 조사하였다. Table 1은 최근 5년 (2003~2007)동안의 작물별 재배 면적, 전체 생산량 및 단위 면적(10a) 당 수량의 평균을 산정한 결과이다. 작물 재배 면적의 경우 벼 (57.3 %), 대두 (5.1 %), 고추 (3.7 %) 순으로 많은 것으로 나타났다. 작물재배면적이 논과 밭의 비율과 다른 것은 밭의 경우 이모작을 하기 때문에 밭작물의 재배면적이 증가한 것이기 때문으로 판단된다. 전체 생산량의 경우도 벼가 전체 생산량의 기 때3 %로 가장 큰 비율을 차지하였고, 그 다음으로 배추 (13.1 %), 무 (7.4 %)가 많은 생산량을 나타내었다. 단위 면적 당 수량의 경우 오이, 토마토, 배추, 양파가 6,000 kg 이상으로 높은 생산량을 보였지만, 들깨와 참깨는 각각 딸3 kg, 55 kg으로 생산량이 매우 낮은 것으로 나타났다. 또한 Table 1에는 각 작물별 필요수량을 같이 나타내었는데, 이는 2003년부터 2007년까지의 필요수량을 평균한 값이다. 벼의 필요수량은 1,045.5 mm로 산정되었는데 이는 논에서의 침투량 300 mm를 포함 한 것으로, 전체 작물 중 가장 많은 값을 나타내었다. 과수의 경우 대부분 700 mm 이상으로 많은 값을 나타내었는데, 이는 대부분의 과수가 수목 형태로 재배되기 때문인 것으로 판단된다. 시금치의 경우 150.8 mm로 가장 적은 필요수량을 나타내었다.

4. 농산물 가상수 사용량

1991년~2007년의 작물별 재배면적과 필요수량을 바탕으로 농산물 가상수 사용량을 산정하였다. 우리나라에서의 농산물 생산을 위한 총 가상수 사용량은 식량작물, 채소류, 과수 및 채유종실 등 3가지 구분하여 그 결과를 분석하였는데, Fig. 2는 1991년부터 2007년의 가상

수량 결과를 나타낸 것이다. 17년 동안의 총 가상수 사용량의 평균은 150.7억 m³로써, 최대치는 169.4억 m³, 최소치는 128.3억 m³으로 추정되었다. 우리나라의 가장 많은 총 가상수 사용량을 나타낸 연도는 1994년 (169.4억 m³), 1991년 (167.7억 m³), 1992년 (165.5억 m³) 순으로 추정되었다. 반면에 가장 적은 총 가상수 사용량을 보인 연도는 2007년 (128.3억 m³), 2006년 (133.3억 m³), 2003년 (135.8억 m³) 순으로 나타났다. 총 가상수 사용량의 연도별 경향을 살펴보면, 1990년 초반에는 약 163.8억 m³, 1990년 중반 이후에는 약 152.3억 m³, 2000년 초반에는 약 149.7억 m³, 2000년대 중반 이후에는 약 137.0억 m³으로 산정되어, 전반적으로 감소하였다.

작물종류별로 살펴보면, 전체 가상수 사용량 중 식량작물의 가상수 사용량이 평균적으로 81.2 %의 비율을 나타내었고, 채소류와 과수 및 채유종실은 각각 9.5 %, 9.3 %를 차지하는 것으로 나타났다. 즉 우리나라는 여러 농작물 유형 중 식량작물을 생산하기 위해 가장 많은 물을 사용하고 있다는 것을 의미한다. 식량작물의 재배 면적이 다른 작물과 비교하여 월등히 많은 것으로 조사되었는데, 이는 우리나라가 토지뿐만 아니라 수자원에서 있어서도 식량작물 생산에 집중되어 있음을 알 수 있다.

1991년부터 2007년까지의 농작물을 생산하기 위한 총 가상수 사용량은 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었는데, 총 가상수 사용량의 감소 원인은 재배면적 감소, 생산량 감소, 영농방식 변화 및 기상에 따른 수확량 변화 등으로 유추할 수 있다. Fig. 3은 총 가상수 사용량의 감소 원인을 판단하기 위하여 논, 밭의 면적과 총 가상수 사용량의 연도별 변화 추이를 함께 나타낸 것이다. 논, 밭의 면적과 총 가상수 사용량 모두 평균적으로 21.4 %, 25.1 %, 23.5 % 각각 감소하는 것으로 나

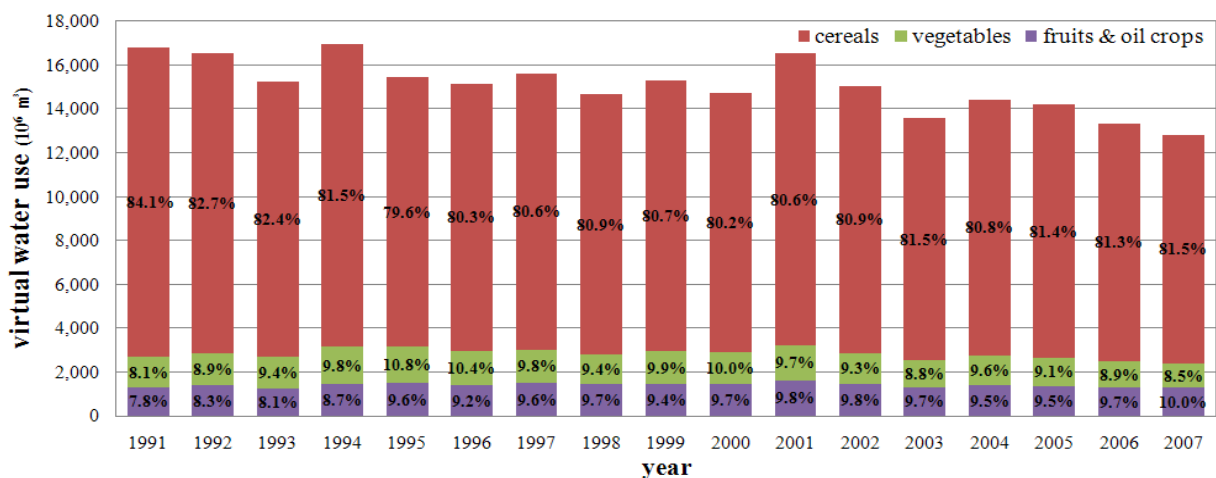


Fig. 2. The Results of Agricultural Virtual Water Use (1991~2007)

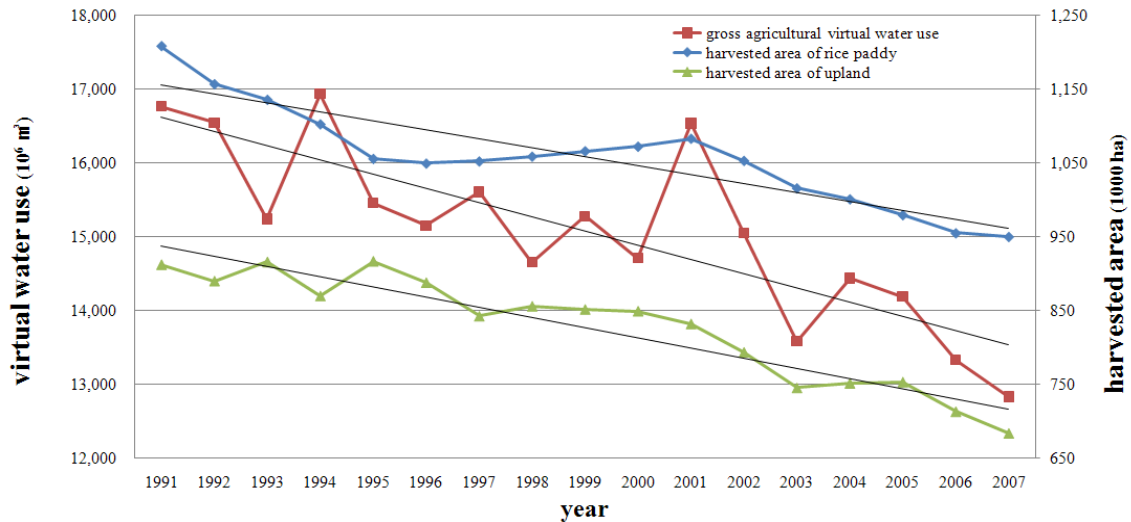


Fig. 3. Trends of Paddy, Upland Area and Agricultural Virtual Water Use (1991~2007)

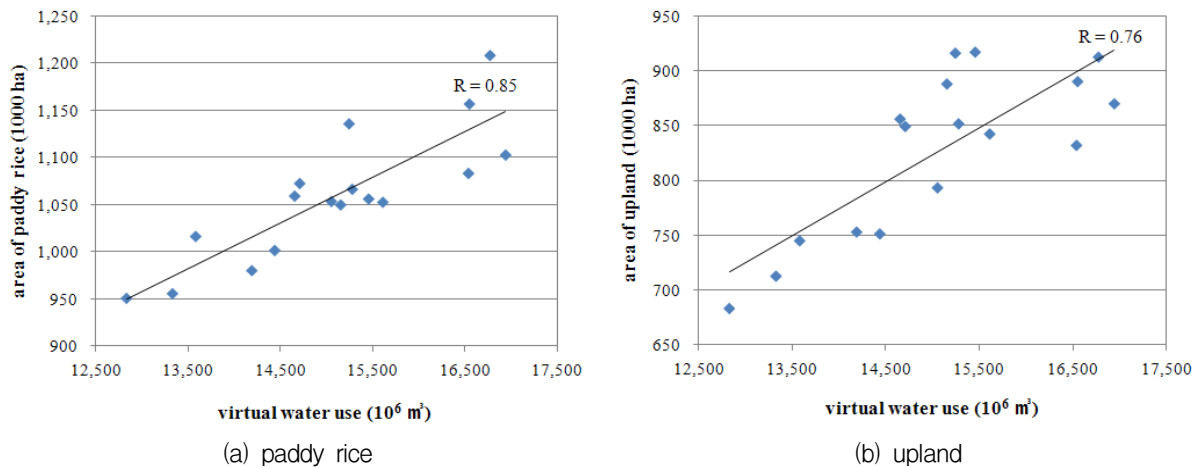


Fig. 4. Correlation among Agricultural Virtual Water Use (AWU), Harvested Area of Paddy and Upland

타났다. 따라서 총 가상수 사용량 감소 원인은 1차적으로 작물재배 면적 감소로 판단할 수 있다. 이를 자세히 살펴보기 위하여 논과 밭에 대해서 총 가상수 사용량과 재배면적 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. 논과 밭의 상관계수는 0.851, 밭의 상관계수는 0.756으로 비교적 높게 나타났다. 따라서 총 가상수 사용량의 감소 원인은 논벼 및 밭의 재배면적 축소로 인한 생산량 감소인 것으로 판단된다.

5. 작물별 가상수 사용량

작물별 가상수 사용량을 비교하기 위해 최근 5개년(2003~2007년)동안의 평균 가상수 사용량을 정리하여 Fig. 5와 같이 도시하였다. 전체 작물 중 식량작물이 약 81% 가량으로 큰 비중을 차지 있으며, 그 중에도 특히 논벼의 가상수 사용량이 101.1억 m^3 로 식량작물 중 91

%에 해당하는 지배적인 사용량을 나타내고 있다. 그 외에 대두가 46억 m^3 , 보리가 1.9억 m^3 , 고구마, 감자, 옥수수가 각각 1.1억 m^3 , 0.9억 m^3 , 0.8억 m^3 의 가상수를 작물 생산에 사용하고 있다. 채소류에서는 고추가 4.2억 m^3 로 가장 많은 가상수를 이용하고 있는데, 이는 채소류 전체 가상수 사용량 중 34%에 해당하는 양이다. 고추 다음으로, 파, 배추, 무가 각각 1.4억 m^3 , 1.1억 m^3 , 1.0억 m^3 이상을 사용하고 있으며, 양파, 수박, 마늘이 채소류의 전체 가상수 사용량 중 6~7%에 해당되는 비교적 많은 가상수 사용량을 보이고 있다. 과수 및 채유종실 중에서는 8가지 정도의 작물이 1.0억 m^3 에서 2.0억 m^3 사이의 비슷한 양의 가상수 이용 양상을 보여주고 있다. 감과 사과가 가장 많은 가상수 사용량을 보이며, 배, 귤, 참깨, 들깨, 복숭아, 포도가 각각 과수 및 채유종실의 전체 가상수 사용량 중 8~12% 정도의 가상수를 사용하고 있는 것으로 나타났다.

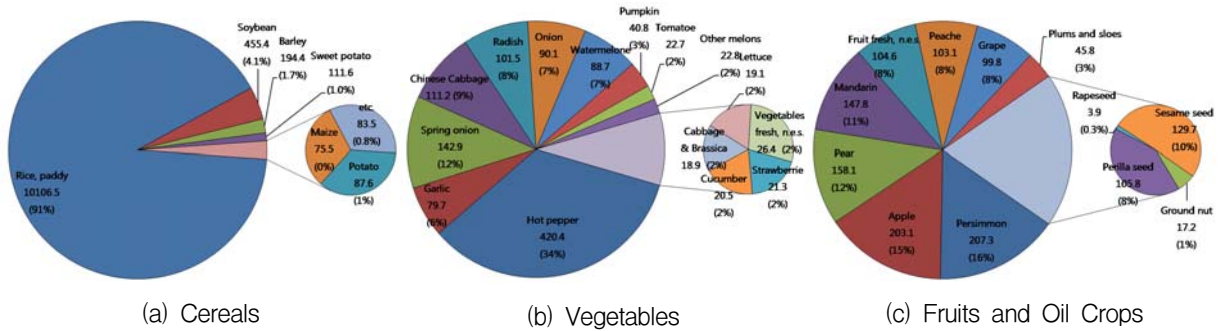


Fig. 5. Average of Crop Virtual Water Use (2003~2007) (unit: 10^6 m^3)

6. 작물별 가상수량(virtual water content)

작물별 가상수량은 국가의 농축산업 분야의 물발자국을 추적하는데 있어서 기준이 되는 값이다. 이는 영농방식, 기상조건 등의 이유로 연도별로 차이를 발생하게 되는데, 본 연구에서는 최근 5개년 (2003~2007년) 동안의 작물별 가상수 사용량과 생산량을 바탕으로 가상수량을 각각 산정하고 그 평균값을 각 작물의 가상수량으로 결정하였다. 본 연구에서 산정된 가상수량과 기존 보고서 (Chapagain and Hoekstra, 2004)에서 산정된 전세계 평균 가상수량 결과를 Table 2와 같이 나타내었다.

식량작물 중 주요작물의 가상수량을 살펴보면, 벼는 1600.1, 콩은 3308.5, 옥수수는 1021.8, 감자는 134.8 m^3/ton 로 산정되었다. 두류 작물은 평균적으로 3192.7 m^3/ton 를 나타내어 가상수량이 가장 큰 것으로 나타났다. 반면에 서류 작물은 평균적으로 249.5 m^3/ton 로 가장 작은 값을 보였다.

채소류의 가상수량은 작물종류에 따라서 평균적으로 과채류는 92.7, 엽채류는 64.1, 근채류는 87.5, 조미채소는 484.5 m^3/ton 로 산정되었다. 조미채소류의 경우 다른 채소류와 비교하여 5.8배 정도의 높은 값을 나타내었는데, 특히 고추의 경우 1,368.0 m^3/ton 으로 채소류 중 가장 많은 값을 나타내었다. 과수 중 주요 작물의 결과를 살펴보면 사과는 527.0 m^3/ton , 배는 383.9 m^3/ton , 감귤은 229.3 m^3/ton 으로 산정되었다. 감귤은 가장 작은 값을 보여 물 사용량이 가장 적은 것으로 나타났다. 채유종실의 가상수량은 평균적으로 4709.4 m^3/ton 로 벼의 2.9배, 과채류의 50.8배, 과수의 8.5배로 다른 작물과 비교하여 가상수량이 매우 큰 값을 나타내었다. 특히 참깨는 7633.4 m^3/ton 으로 모든 작물 중에 가장 큰 가상수량을 나타내었다.

Table 2에서 나타낸 본 연구에서 산정된 한국의 가상수량과 전세계 평균 가상수량 결과가 작물별로 일부

차이가 나는 것으로 나타났다. 대두, 옥수수 등 8개 작물을 제외한 대부분의 작물에서 한국의 가상수량 산정 결과가 전세계 평균보다 작은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 각 국가별 작물의 필요수량, 품종 및 영농방식에 따른 수량 (단위 면적 당 생산량)에 따라 발생하게 된다. 우리나라에서 가장 많은 가상수를 사용하고 있는 논벼는 전세계 평균과 비교하여 690.5 m^3/ton , 30.1% 작게 나타났으며, 이는 기상조건, 물관리와 영농방식의 차이에 의한 것으로 판단된다. 전 세계 평균보다 작은 가상수량을 나타낸 작물 중 전세계 평균과 비교하여 차이가 가장 큰 농산물은 조 (millet)이고, 비율상으로 가장 큰 차이를 나타낸 농산물은 배추이었다. 반대로 전세계 평균보다 큰 값을 보인 작물 중 가장 큰 차이를 보인 작물은 고추이었다. 고추는 전세계 평균과 비교하여 323.8% 차이를 나타내었는데, 이는 고추가 열대지방에서는 다년생 작물이지만, 우리나라에서 품종이 다르고 일년생 작물로 재배되어 외국과 비교하여 물소비기간이 작기 때문인 것으로 판단된다.

위와 같이 산정된 가상수량은 농산물 가공식품의 가상수량 산정에 기초자료로 쓰이게 되는데, 원료 작물과 가공 후의 생산물의 중량비인 생산비율 (product fraction)을 이용하여 가공식품의 가상수량을 산정한다. Chapagain and Hoekstra (2004)는 각 농산물 가공식품의 생산비율을 제시하였는데, 논벼에 대해서 살펴보면, 논벼를 이용한 가공식품은 현미, 백미, 파쇄미, 쌀가루 등이 있는데, 각각의 생산비율은 다음과 같다.

- 현미의 생산비: 현미/논벼 = 0.77
- 백미의 생산비 : 백미/현미 = 0.90
- 파쇄미의 생산비: 파쇄미/논벼 = 0.67
- 쌀가루의 생산비: 쌀가루/파쇄미 = 0.95

따라서 본 연구에서 산정된 논벼의 가상수량인 1600.1 m^3/ton 을 이용하여, 산정된 현미, 백미, 파쇄미, 쌀가루의 가상수량은 각각 2078.1, 2308.9, 2388.2, 2513.9 m^3/ton 이다. 즉 백미 한 가마(80 kg)를 생산하기

Table 2. Virtual Water Content of Primary Crops

Crop			VWC (m ³ /ton)		Crop			VWC (m ³ /ton)	
			Korea	Global ¹⁾ Average				Korea	Global ¹⁾ Average
Cereals	Rice	Rice, Paddy	1600.1	2290.6	Vegetables	Leaf Vegetables	Chinese Cabbage	43.1	211.3
	Barley & Wheat	Barley	823.0	1387.7			Cabbage&Brassica	64.2	
		Wheat	1071.6	1333.5			Spinach	92.9	
		Rye	2869.4	901.4			Lettuce	108.5	
		Pulses	Soybean	3308.5		1788.8	Root Vegetables	Radish	70.0
	Red Bean		3069.0	4252.9		Carrot		105.1	
	Mung Bean		3889.5	-		Seasoning Vegetables	Hot Pepper	1368.0	322.8
	Pulses, n.e.s.	2503.7	3929.3	Garlic			222.5	518.3	
	Miscellaneous Grain Crop	Millet	3023.3	4596.3			Spring Onion	256.8	214.3
		Sorghum	2546.7	2852.8			Onions	93.9	346.2
		Maize	1021.8	909.2		Ginger	481.2	1792.3	
		Buckwheat	2639.6	2360.0		Fruits	Apple	527.5	697.5
	Tuber Crop	Miscellaneous Cereals, n.e.s.	1912.6	-			Pear	383.9	727.5
		Sweet potato	364.3	302.8			Peach	519.5	1193.8
Vegetables	Fruits Vegetables	Potato	134.8	255.0	Grape		278.9	654.5	
		Watermelon	109.9	159.9	Mandarin		229.3	577.8	
		Other Melons	103.5	183.4	Persimmon		640.2	-	
		Strawberry	104.6	275.8	Plum & Sloe		646.6	1612.4	
		Cucumber	52.0	242.2	Fruit Fresh, n.e.s.		1188.2	-	
		Pumpkin	130.4	234.5	Oil Crops		Rapeseed	3817.7	1610.6
	Tomato	56.0	183.8	Sesame Seed			7633.4	8888.6	
				Perilla Seed		4941.5	-		
				Ground Nut		2444.8	3145.0		

1) Chapagain and Hoekstra, 2004

위하여 필요한 물의 양은 184.6 m³이다. 이처럼 농산물 및 그 가공식품의 가상수량을 이용하여 국내 생산량 및 수출입량을 파악한다면 한 국가에서의 물 이용경로를 산정할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과는 물 이용경로를 산정하기에 위한 중요한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 우리나라에 적합한 가상수를 산정하기 위하여 1991년부터 2007년까지 작물통계연보와 기상 자료를 이용하여 44개의 농작물에 대한 사용된 총 가상수 사용량 (gross virtual water use)을 산정하고, 이를 바탕으로 작물 1톤을 생산하기 위하여 필요한 가상수량 (virtual water content)을 추정하였다.

우리나라의 1991년부터 2007년까지 농작물을 생산을 위해 사용된 연간 총 가상수 사용량을 살펴보면, 식량

작물 생산에 전체 가상수 사용량의 81.3 %가 사용되어 대부분의 수자원이 식량 자원을 생산하기 위하여 사용되는 것으로 나타났다. 또한 17년간의 연간 총 가상수 사용량의 추이를 살펴보면 지속적으로 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났는데, 이는 감소 주요 원인은 논벼 및 밭의 재배면적 축소로 인한 생산량 감소인 것으로 판단된다.

한편 작물별 가상수 사용량을 살펴보면, 논벼의 가상수 사용량은 101.1억 m³로써 전체의 약 74 %를 차지하여 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 대두와 고추가 각각 4.5억 m³, 4.2억 m³으로 논벼를 제외하고 가장 많은 가상수 사용량을 보이며, 보리, 고구마, 파, 배추, 무, 감, 사과, 배, 귤, 참깨, 들깨, 복숭아가 1.0억 m³ 이상의 가상수를 사용하고 있는 것으로 분석되었다.

가상수량 산정 결과, 식량 자원 중 미곡은 1600.1, 맥류는 1588.0, 두류는 3192.7, 잡곡은 2228.8, 서류는 249.5 m³/ton이고, 채소류 중 과채류는 92.7, 엽채류는

64.1, 근채류는 87.5, 조미채소는 484.5 m³/ton이었다. 또한 과수는 551.8 m³/ton이고, 채유종실은 4709.4 m³/ton로 산정되었다.

본 연구에서 산정된 원료 작물의 가상수량은 농산물 가공품이나 축산물의 가상수 산정에 기초자료로 쓰이게 되는데, 이렇게 산정된 농축산물 및 그 가공품의 가상수량은 수출입에 의한 물의 이용경로를 산정함에 있어서 기준값으로 사용된다. 따라서 본 연구에서 나온 결과와 국내 농산물 생산량 및 수출입량을 이용하면 우리나라의 농업 분야에서 물발자국을 산정할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 산정된 각 농산물의 가상수량은 재배 시기, 재배 기간, 시설 및 노지 재배 여부, 품종, 영농방식 등에 따라서 가상수량 산정 결과는 차이가 발생할 수 있으므로 이에 대한 면밀한 검토 및 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

농촌진흥청 (2009). 품목별 관리메뉴얼, <http://www.rda.go.kr/jsp/rda/index.jsp>, Accessed 2009. 04. 07.

수자원공사 (2006). 수자원장기종합계획(2006-2020). 건설교통부.

통계청 (2007). 작물통계, 1991-2007.

통계청 (2009). 농업통계정보 (작물생산량), [http:// 211.34.86.72/statisticsInfo/statisticsInfo_03_1_1.jsp?](http://211.34.86.72/statisticsInfo/statisticsInfo_03_1_1.jsp?)

num=3, Accessed 2009. 04. 07.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. (2003). *Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products*, Value of Water Research Report Series No. 13, UNESCO-IHE.

Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. (2004). *Water footprints of nations*, Value of Water Research Report Series No. 16, UNESCO-IHE.

Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. (2002). *Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*, Value of Water Research Report Series No. 11, UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Wackernagel, M. and Rees, W. (1996). *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth*, New Society Publishers.

논문번호: 09-052	접수: 2009.05.11
수정일자: 2009.07.29/09.02	심사완료: 2009.09.02