

쌀 농업에 대한 지역별 물 발자국 산정에 관한 연구

A Study about Regional Water Footprint of Rice Production in Agriculture Industry

김준범 · 강 헌* · 신상민*

Junbeum Kim · Hun Kang* · Sang Min Shin*

프랑스 트루아공대 환경 및 지속가능센터 · *수원대학교 환경에너지공학부

CREIDD Research Centre on Environmental Studies & Sustainability, University of Troyes, France

*Department of Environmental and Energy Engineering, University of Suwon

(2013년 3월 18일 접수, 2013년 11월 15일 채택)

Abstract : The water footprint of product and service is the total volume of freshwater consumed, directly and indirectly, in the life cycle of a product and service. Up to date, water consumption data for industries and products were not well quantified and developed. Especially it is important to construct for agriculture industry which consumes lots of water. In this study, by using Cropwat 8.0 model, we tried to evaluate regionalized water consumption related with rice production in agriculture industry in eight regions (Gangwon, Gyeonggi, Gyeongbuk, Gyeongnam, Jeonnam, Jeonbuk, Chungnam, Chungbuk). As a result, Gyeongbuk region has the lowest water consumption in rice production, which is 1,356.68 m³/ton, on the other hand, Jeonnam region has the highest water consumption (1,669.54 m³/ton). By using the average indirect water consumption (1,487.87 m³/ton) of eight regions and direct water consumption, the total water footprint for the rice amount of rice bowl size (130 g), which is 193.6 L was calculated. Based on this research approach, we should develop water footprint database of all agriculture products and expand to other industrial sectors.

Key Words : Water Footprint, Rice Product, Direct Water Consumption, Indirect Water Consumption, Cropwat 8.0

요약 : 물 발자국(Water footprint)은 단위 제품 및 단위 서비스 생산 전과정(life cycle) 동안 직접 및 간접적으로 이용되는 물의 총량지표를 나타내는 것을 의미한다. 현재까지 산업별 및 제품에 대한 물 사용량과 관련된 자료가 잘 구축되어 있지 않으며 특히 많은 물이 사용되어지는 농업 생산 제품에 대한 물 사용량에 대한 자료는 전무하다고 할 수 있기 때문에 각 제품에 대한 물 사용량 자료 구축은 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 우리나라의 수자원 이용 형태 중에서 가장 큰 부분을 차지하는 산업 분야인 농업 산업에서 쌀 생산을 중심으로 8개 지자체(강원, 경기, 경북, 경남, 전남, 전북, 충북, 충남)를 범위로 하였으며, Cropwat 8.0 모델을 이용하여 물 사용량을 산정하였다. 본 연구의 결과로 쌀 제품의 간접적인 물 사용량은 경북 지역이 1,356.68 m³/ton으로 가장 적은 물 사용량을 가졌으며, 전남지역이 1,669.54 m³/ton로 가장 많은 물이 사용되는 것으로 산정되었다. 8개 지자체의 평균적인 물 사용량은 1,487.87 m³/ton으로 산정되었으며, 쌀 밥 한 그릇 양의 밥(130 g)을 지을 때 쓰이는 직접 물의 사용량 및 간접 물 사용량을 고려한 총 물 발자국 산정 값은 193.61L로 산정되었다. 본 연구결과를 바탕으로 농업 분야 및 전 산업 분야로 확장하여 제품별 물발자국 산정이 필요하며 데이터베이스 구축이 필요하리라 사료된다.

주제어 : 물 발자국, 쌀 제품, 직접 물 사용, 간접 물 사용, Cropwat 8.0

1. 서론

United Nations (UN)에서 2003년 3월 발간한 세계 수자원 개발 보고서¹⁾에 따르면 지구의 1인당 담수공급량은 앞으로 20년 안에 1/3으로 줄어들고 2050년까지 인구는 93억명으로 늘어나며, 오염된 담수원 면적은 현재 관개용 수자원면적의 9배에 달할 것이며, 전 세계 20%의 인구가 심각한 물 부족을 겪을 것이라고 발표하였다. 이에 EU등 물 부족 상황에 직면한 각국은 수자원의 효율적인 사용을 위해 농산물 또는 공산품의 가상수(Virtual water) 및 물 발자국(Water footprint)을 산정 및 발표하고 있으며, 많은 연구들이 이루어지고 있다.²⁻⁵⁾ 우리나라에서도 전 세계적인 물 부족 현상과 국내의 4대강 사업 등 국내·외의 다양한 현상에 따라 효율적인 수자원 사용에 대한 관심은 그 어느 때보다 높아진 상황이다. 환경부 지표에 의하면 우리나라는 연평균 강수량의 70%가 6~9월 사이에 집중되고 그 중 42%는 증발 등

으로 손실되며, 31%는 바다로 흘러 들어간다. 특히 국토의 약 65%가 산악지형인 우리나라는 지형의 영향으로 빗물이 바다로 빠른 속도로 흘러가기 때문에 우리나라에 맞는 적절한 물 환경정책이 수립되어야 할 것이다.⁶⁾

물 환경정책에 있어서 특히 농업 분야는 국내 전체 산업 분야의 물 사용 중에서 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 현재 사용되는 물의 전체량 중 약 54%는 농업용수, 20%가 유지용수, 17%가 생활용수, 공업용수로 약 9%가 사용되어지고 있다.^{7,8)} 통계에서 나타낸 바와 같이 가장 많은 양을 차지하고 있는 농업용수로 사용되는 물 관리에 대한 적절한 정책을 수립하는 것이 우리나라 전체 수자원 사용에 대한 정책을 수립하는데 있어서 가장 중요한 부분이 될 수 있다고 할 수 있다. 우리나라 농업에서 벼농사가 차지하는 비중은 전체 농업생산액 중 약 30%, 농업 조수입(농가가 당해년도 농업경영결과로 얻은 총수입) 중 47%를 차지하고 있으며, 우리나라 전체 농가의 77%에 해당하는 약 91만호가 쌀

† Corresponding author E-mail: cantique@daum.net Tel: 031-220-2146 Fax: 031-220-2533

농업에 종사하고 있는데,⁹⁾ 이는 벼농사가 우리나라 농업에서 차지하는 비중이 얼마나 큰 것인지를 나타낸다. 또한 쌀은 2009년 기준으로 공급량은 578만 7천톤(이월, 생산, 수입), 수요량은 479만 2천톤(식량, 가공, 종자, 기타)으로 재고량은 99만 5천톤으로 나타나 있다.¹⁰⁾ 공급량 578만 7천톤 중 수입에 의한 양은 전체의 약 4.4% 정도로 25만 7천톤 정도만을 수입에 의존하고 있어서 국내 소비되어지는 쌀의 대부분이 국내에서 생산 및 소비되어지고 있다.

본 연구의 목적으로는 우리나라의 수자원 이용 형태 중에서 가장 큰 부분을 차지하는 산업 분야인 농업, 그 중에서도 대부분 국내에서 자급자족이 이루어지며 가장 많은 농가가 연관되어 있는 쌀의 생산과 관련된 물 사용량(한 사람의 한 끼 식사에 들어가는 쌀에 소요되는 물의 양)을 물 발자국 방법을 이용하여 산정하여 제시하고자 하였다. 현재까지 물 사용량에 대한 자료가 잘 구축되어져 있지 않으며 특히 농업 생산 제품에 대한 물 사용량과 지역별 물 사용량에 대한 자료는 전무하다고 할 수 있기 때문에 각 제품에 대한 물 사용량 자료 구축은 중요하다고 할 수 있다. 또한 본 연구의 산정방법과 연구 결과는 향후 관련 분야 및 정책과 관련하여 기초자료로 잘 활용되어질 수 있을 것이다.

본 연구의 산정 범위는 벼의 종자를 심는 시기부터 수확을 하고, 판매된 쌀을 소비자가 섭취하는 과정까지를 시간적 범위로 설정하였으며, 공간적 범위는 우리나라 전체 16개의 시·도 중 벼농사가 거의 이루어지지 않는 서울특별시와 6개 광역시(인천광역시, 대전광역시, 대구광역시, 광주광역시, 부산광역시, 울산광역시), 제주도 지역을 제외한 8개 시·도(충청남북도, 경상남북도, 전라남북도, 경기도, 강원도)를 대상으로 진행하였다. 이 해당 지역은 우리나라 쌀 생산량의 약 96%를 차지하며 재배 면적은 전체 면적의 약 96%에 해당한다.

2. 연구방법

2.1. 이론적 고찰

2.1.1. 물 발자국(Water footprint)의 개요

제품이나 서비스를 생산하는 과정에서는 일반적으로 많은 양의 물이 소요되어진다. 농업이나 산업 분야의 제조 공정상에서 사용되는 물을 가상수(virtual water)¹¹⁾라고 나타낸다. 일반적으로 축산 농가에서 생산하는 제품에 가장 많은 양의 가상수가 포함 되는데 실제적인 제품의 예를 들어 보면 치즈 1 kg을 생산하는 데에는 5,000~5,500 kg의 가상수가 사용 된다. 또한, 우리가 가장 흔하게 알고 있는 커피 1잔을 마시는 데에는 직접적으로 물 200 mL만이 투입되지만 간접적인 공정상 포함되는 가상수의 양을 모두 더하면 약 140 L의 물이 사용된다.^{12,13)} 농·축산물과 관련된 제품뿐만 아니라 가상수의 개념은 공업 생산품에도 적용될 수 있는데 예를 들면 32 메가 컴퓨터 칩 2 g을 만드는 데에는 32 kg의 물이 소요된다.¹⁴⁾ 이러한 소비자들이 직접적으로 느끼지는

못하지만 제품 생산 공정상에서 소요되는 물의 양을 가상수라고 나타내고 있다. 가상수의 개념은 1990년대 초반 토니 앨런(Tony Allan)에 의해 처음으로 소개되었지만, 소개된 당시에는 전 세계적으로 큰 주목을 받지 못하였다. 그리고 약 10년이 지난 후 지구촌의 물 부족 관련 문제가 점차 심각해지고, 효율적인 물 사용에 관한 주제가 점차 이슈화되기 시작하면서 가상수의 개념이 점차 널리 알려지기 시작하였다.

이것과는 조금 다른 방향으로 ISO (International Standard Organization)에서는 지난 2009년 6월 이집트 카이로에서 개최된 환경경영 국제표준화회의에서 좀 더 적합한 기준을 만들어야 한다는 이유로 참가국 중 26개 국가의 찬성, 6개국의 반대로 ISO 신규 인증을 진행하게 되었다.¹⁵⁾ ISO의 신규 인증은 빗물의 재사용, 농업용수, 오염정화용수 등 모든 타입의 물을 포함하게 되며 영향평가 방법 개발이 목표가 아닌 방법이나 보고를 위한 지침의 표준 제정을 목적으로 하고 있다. 물 발자국(Water footprint)은 소비자가 제품을 사용하기 위해 제품 구입 후 사용단계에서 투입되는 물의 양인 직접 물 사용량(direct water)과 제품을 생산하는 과정에서 소요되지만 최종 제품상에서는 보이지 않는 물의 양인 간접 물 사용량(indirect water)으로 구분하여 나타내고 있다. 한 예로 설명하면, 가정에서 음식을 조리 시 사용되는 물 사용량을 직접 물 사용량이라 할 수 있으며, 사용되는 재료들을 재배하고 수확하는데 사용되는 물을 간접 사용량이라고 할 수 있다. 물 발자국 산정 시 사용되는 물은 세 가지로 구분하여 나타내었는데 이는 blue water footprint, green water footprint, grey water footprint이다.¹⁶⁾ Blue water footprint는 제품 생산 단계에서 사용하게 되는 지표수나 지하수의 양, 또는 관개수로와 같이 정해진 양이 투입이 되는 물의 사용량을 나타내는 것이고, green water footprint는 토양이 함유하는 빗물의 양인 토양 함유 수분 함량을 나타내게 된다. 또한 grey water footprint는 제품을 제조하는 공정에서 나타나는 오염 물질로 인한 수질 오염을 정화하는데 필요한 물의 양으로 정의된다.

2.1.2. 물 발자국(Water footprint) 산정방법

물 발자국을 평가하기 위해서는 해당 제품에 대한 해당 국가의 수출·입에 대한 정보가 선행되어야 한다. 선행된 정보를 이용하여 국내와 국외 지역을 나누어 각각 해당 지역의 물 발자국 산정을 진행한다. 국내·외의 물 발자국 산정은 각각의 구성요소인 blue, green, grey footprint를 산정하여 진행하고 최종적으로 소비자에 의한 직접 사용량에 대한 정보를 추가하여 계산이 이루어진다. Hoekstra는 물 발자국 산정 평가를 다음 Table 1의 3가지 단계로 구분하여 나타내었다.¹⁶⁾

본 연구에서는 연구 범위를 우리나라 한 사람이 한 끼 식사에서 섭취하는 쌀에 대해서 소비되어지는 물의 양을 산정하는 것이며, 또한, 해당 지역은 우리나라 국가 전체에 대한 물 발자국 산정이며, 해당 기간은 2009년을 기준으로 한

Table 1. Time, spatial concept in water footprint calculation⁹⁾

	Spatial explication	Temporal explication	Source of required data on water use	Typical use of the accounts
Level A	Global average	Annual	Available literature and databases on typical water consumption and pollution by product or process	Awareness-raising; rough identification of components contributing most to the overall water footprint; development of global projections of water consumption
Level B	National, regional or catchmentspecific	Annual or monthly	As above, but use of nationally, regionally or catchment specific data	Rough identification of spatial spreading and variability; knowledge base for hotspot identification and water allocation decisions
Level C	Small catchment or field specific	Monthly or daily	Empirical data or (if not directly measurable) best estimates on water consumption and pollution, specified by location and over the year	Knowledge base for carrying out a water footprint sustainability assessment; formulation of a strategy to reduce water footprints and associated local impacts

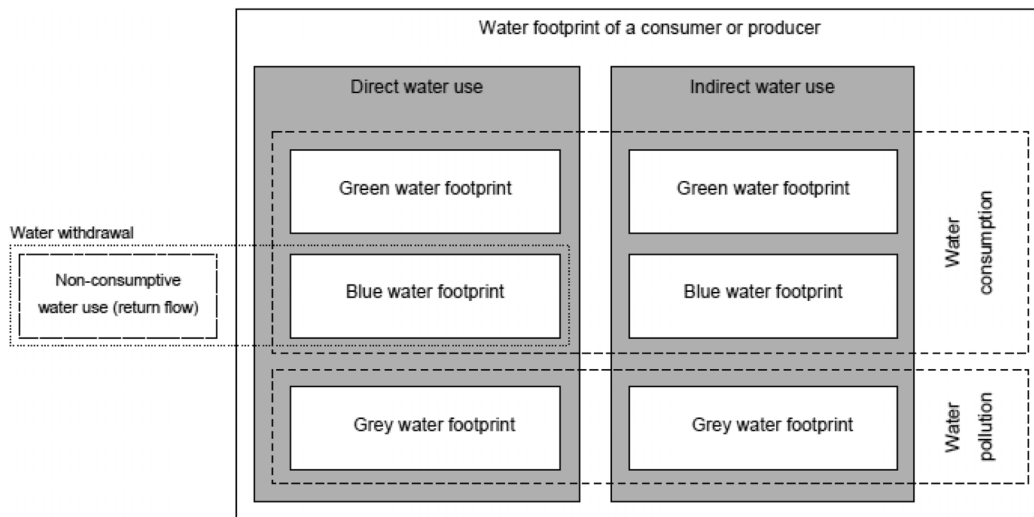


Fig. 1. The diagram of water footprint constitutional factor.⁸⁾

1년을 바탕으로 진행하였으므로 국가나 해당 지역의 데이터, 연간 또는 월간 사용량을 바탕으로 산정하는 Level B에 해당하게 된다.

2.1.3. Cropwat 모델

Cropwat 모델은 1992년 FAO (Food and Agriculture Organization)의 Land and Water Development Division에서 처음으로 개발되었다.¹⁷⁾ 1992년 처음으로 개발된 Cropwat 모델에는 농작물 경작에 따른 간단한 수분 밸런스만을 포함한 내용을 담고 있었다. 이 모델은 현재 물 발자국 산정뿐만 아니라 다른 분야에서도 사용되고 있으며 본 연구에서도 사용한 모델은 cropwat 8.0 버전으로 이는 2009년에 만들어진 프로그램이다.¹⁸⁾ Cropwat 8.0 모델을 통해 얻게 되는 결과는 물 발자국 산정의 세 가지 구성 요소 중 두 가지 요소인 blue, green water footprint의 산정 결과이다. 현재 사용 중인 Cropwat 8.0 model을 구성하는 요소는 기상데이터를 입력해주는 climate/ETo, 강수량에 대한 정보와 해당 지역의 강수 효율에 따른 물 사용량을 나타내주는 rain, 해당 작물에 대한 정보를 입력해주는 crop부분, 해당 작물을 재배하는 토양에 대한 정보를 입력해 주는 soil, 이에 따르는 결과를 나타내 주는 CWR (crop water requirement) 등으로 구성되어

있다. 기상 데이터를 입력해 주는 항목인 climate/ETo의 결과로 Rad (MJ/m²/day) 값과 ETo (mm/day) 값이 산출되는데 Rad 값은 해당 지역의 복사량을 나타내는 수치가 되고, ETo 값은 토양 등 기타 여건을 고려하지 않고 해당 기상 수치만을 고려할 때의 기준 증발산량이 된다. 또한 강수량을 입력해주는 Rain 값은 해당 지역의 실제 강수 자료를 이용해서 실제적으로 사용될 수 있는 빗물의 양을 계산해 주게 된다. Cropwat 8.0 모델의 각 항목에 필요한 요소들에 대해서는 다음의 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Cropwat 8.0 model's item

Item	Data used
Climate/ ETo	East longitude, north latitude, altitude, lowest temperature, highest temperature, relative humidity, average wind velocity, the duration of sunshine in related region
Rain	annual, monthly, daily rainfall and efficiency of precipitation in related region
Crop	Crop Information (Cultivation date, coefficient, depth of sowing, coefficient of production)
Soil	Soil information related with crop (Possible quantity of containable moisture, possible quantity of containable daily maximum rainfall, maximum sowing depth, permeability)

Table 3. Production area (ha), production volume (ton) and corresponding ratio(%) in the eight regions

	Production area (ha)	%	Production volume (ton)	%
Chungnam	160,952	17.53	914,388	18.67
Jeonnam	183,359	19.97	902,089	18.41
Jeonbuk	138,445	15.08	797,338	16.28
Gyeongbuk	122,441	13.34	679,872	13.88
Gyeonggi	98,934	10.78	501,849	10.24
Gyeongnam	89,181	9.71	464,661	9.49
Chungbuk	48,257	5.26	253,910	5.18
Gangwon	40,420	4.40	209,299	4.27
Total	881,989	96.07	4,723,406	96.42

2.2. 물 발자국(Water footprint) 산정

2.2.1. 범위설정

본 연구에서는 2009년을 기준으로 우리나라 전체 지역의 쌀 생산량과 비교해 생산량이 미미한 지역인 서울특별시와 6개 광역시, 제주도를 제외한 8개 시·도 지역을 지역적인 범위로 선정하였다. 선정한 지역의 생산면적, 생산량과 이에 따르는 해당 비율은 다음 Table 3과 같다.

이렇게 선정된 8개 지역은 충청남도, 전라남도, 전라북도, 경상북도, 경기도, 경상남도, 충청북도, 강원도(생산량 기준) 지역으로 국내 총생산량의 약 96.42%를 차지하며, 총 재배 면적의 96.07%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 수입되는 양은 극히 적은 양이므로 수입되는 양에 대한 고려는 하지 않았다. 물 발자국 산정 시 우선적으로 고려해야 하는 해당 작물의 국내/외의 흐름¹⁹⁾은 95% 이상이 국내에서 자급자족의 형태를 만족시키고 있기 때문에 대표성을 가지고 있으며 8개의 시·도 자료가 국내 자료를 대표할 수 있다고 판단하여 연구를 진행하였다. 본 논문에서 나타내는 지역은 2009년의 생산량을 기준으로 높은 지역부터 낮은 지역의 순서로 나타내었으며 같은 계산 과정이 반복됨으로 생산량 기준 가장 높은 지역인 충청남도 지역의 산정방법을 나타내었다. 또한 기상 데이터는 기상청, 농촌진흥청의 자료^{10,20)}를 이용하였다.

2.2.2. Green, blue water footprint산정

충청남도 지역에서 벼농사를 시행하는 지역은 16개 지역으로 이중에서 유효 기상자료를 가지고 있는 지역은 금산, 당진, 보령, 부여, 서산, 서천, 예산, 천안, 태안의 9개 지역이다. 이 기상자료를 가진 지역을 바탕으로 충청남도 16개 지역을 9개 지역으로 나누어 연구를 진행하였다.

2.2.2.1. Climate/ETo

이 부분에서 필요한 자료는 해당 지역의 위도, 경도, 평균 고도, 최저온도, 최고온도, 상대습도, 평균풍속, 일조시간의 데이터이다. 충청남도 한 지역의 예로 천안과 연기군의 기상

Table 4. Climate/ETo data of Cheonan and Yeongi area

Month	Min Temp, °C	Max Temp, °C	Humidity, %	Wind, km/day	Sun, hours	Rad, MJ/m ² /day	ETo, mm/day
January	-8.7	3.4	68	156	5.5	9.3	0.87
February	-2.6	7.6	69	173	4	9.8	1.23
March	0	12.2	60	233	6.6	15.4	2.33
April	4.6	19	58	190	7.1	18.6	3.3
May	12.1	25	62	181	7.8	21.1	4.27
June	16.9	28	67	173	7.5	21.2	4.62
July	20	28.7	78	173	4.2	16.2	3.71
August	20.5	29.8	76	164	6	17.6	4.07
September	15.1	26.5	76	130	6.5	16.1	3.33
October	8.1	22.1	71	156	7.3	14	2.67
November	2.2	11.6	69	181	3.9	8.2	1.55
December	-5.2	3.9	71	173	4	7.3	0.92
Average	6.9	18.1	69	174	5.9	14.6	2.74

데이터를 다음의 Table 4에 나타내었다.

위도, 경도, 평균 고도는 해당 지역의 평균값을 이용하였고, 최저, 최고 온도는 해당 월의 매일 최저, 최고 기온의 평균을 나타내며 평균 풍속은 표현 단위가 달라 환산계수를 적용하여 주었다. 이러한 기상데이터를 바탕으로 산출되는 값은 Rad 값과 ETo 값으로 여기서 산출되는 Rad (MJ/m²/day) 값은 해당 기상 데이터를 가진 지역의 복사량을 나타내게 되며 ETo (mm/day) 값은 농작물의 기준 증발산량(crop evapotranspiration)으로 이는 해당 지역의 토양, 작물, 강수량 등의 자료를 제외한 기상 자료만을 토대로 나타낸 산출 값이다.

2.2.2.2. 강수량(Rain)

강수량 데이터로 해당 지역의 해당 기간 동안의 데이터를 사용해준다. Climate/ETo와 마찬가지로 기간 설정은 년/월/일의 값을 사용할 수 있는데, 본 연구에서는 Climate/ETo와 마찬가지로 월간 강수량의 합을 이용하였다. Rain 부분에서 실제 기상데이터의 입력 결과로 나타나게 되는 것은 Effective rain 값으로 이는 강수 효율에 따른 실제 사용 가능한 빗물의 양이 된다. 예를 들어 실제로 내리는 비의 양이 100 mm라도 증발, 유출 등의 이유로 내리는 빗물의 전체량이 사용될 수는 없기 때문에 강수 효율과 함께 연계하여 나타나게 된다. 해당 지역의 강수 효율에 관련된 데이터가 있다면 해당 자료를 사용하면 되지만, 국내에는 강수 효율에 대한 자료가 없기 때문에 Cropwat 8.0 모델에서 제시하는 표준 강수 효율인 USDA S.C. Method 방식을 이용하였다. 이 지역뿐만 아니라 전체 자료에 걸쳐서 강수 효율은 Cropwat 8.0 모델의 USDA S. C. Method를 사용하였다. 본 연구에서 사용되어진 천안, 연기 지역의 Rain 결과는 다음의 Table 5와 같다.

Table 5. Cheonan and Yeongi area's rain data

Month	Rain	Effective rain
	mm	mm
January	13,3	13
February	16	15,6
March	51,6	47,3
April	30,6	29,1
May	112,6	92,3
June	55,6	50,7
July	335,8	158,6
August	212,3	140,2
September	30,8	29,3
October	61,1	55,1
November	39,7	37,2
December	40,5	37,9
Total	999,9	706,2

2.2.2.3. Crop과 Soil

Crop 항목에는 해당 농작물과 관련된 데이터들이 사용되어진다. 가장 우선적으로 설정하는 것은 농작물의 종류이고, 벼의 경우 옮겨심기가 이루어지기 때문에 옮겨심기를 해주는 시기를 투입해주어야 한다. 우리나라에서 옮겨심기가 이루어지는 시기는 크게 두 지역으로 구분해서 중·북부 지역과 남부 지역으로 구분해 준다. 중·북부 지역에서 옮겨심기는 5월 10일에서 6월 10일에 이루어지고, 남부 지역에서의 옮겨심기는 5월 20일에서 6월 20일에 이루어지기 때문에 본 연구에서는 옮겨 심는 날짜를 공통적으로 적용해 주기

위해 중·북부 지역과 남부 지역의 중간 시기인 5월 30일로 옮겨 심는 날짜를 설정하였다.²⁰⁾ 또한 해당 작물의 심는 깊이, 초기 성장기간 등을 정확하게 알 수 있다면 해당 지역의 자료를 사용해야 하지만 해당되는 국내의 자세한 자료는 없기 때문에 Cropwat 8.0 모델에서 제공하는 쌀 데이터를 국내 전 지역에 걸쳐 사용하였다.

Soil 항목에서는 해당 농작물을 재배하는 토양에 관련된 데이터를 입력해주게 된다. 필요한 항목은 해당 토양의 최대 수분함량, 최대 강우침투율, 최대 경작깊이, 초기 수분함유율 등의 데이터를 사용해주어야 한다. 일반적인 토양데이터는 이 정도의 데이터를 입력해 주어야 하지만 벼농사에 대한 산정을 하는 경우에는 추가적으로 해당 토양의 투수율, 농작물에서 사용 가능한 물의 양, 최대로 물을 함유하기 위해 웅덩이를 파는 경우의 깊이 등이 추가되어야 한다. 이 부분에도 구축되어진 국내자료가 없는 관계로 Cropwat 8.0 모델에서 제공하는 black clay soil 데이터를 이용하였다.

2.2.2.4. 작물 물 요구량(CWR: Crop water requirement)

지금까지 입력해준 Climate/ETo, Rain, Crop, Soil의 데이터를 입력하면 CWR (crop water requirements) 결과가 도출된다. 도출된 결과를 다음 Table 6에 나타내었다.

도출된 CWR값을 바탕으로 green 값과 blue 값을 도출할 수 있다. 도출된 ETblue 값과 ETgreen 값을 이용하여 각각의 CWU (crop water use)값을 산출하게 되는데 산출은 다음과 같이 식 (1)과 (2) 과정을 거쳐서 이루어질 수 있다.

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{lcp} ET_{blue} \quad (1)$$

Table 6. Cheonan and Yeongi area's CWR data

Month	Decade	Stage	Kc	ETc	ETc	Eff rain	Irr. Req.	ET green	ET blue
			coeff	mm/day	mm/dec	mm/dec	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Apr	3	Nurs	1,2	0,43	0,4	1,4	0,4	1,4	0,4
May	1	Nurs/LPr	1,19	0,85	8,5	27	90,5	27	90,5
May	2	Nurs/LPr	1,06	4,55	45,5	35,7	9,8	35,7	9,8
May	3	Init	1,07	4,7	51,7	29,4	112,2	29,4	112,2
Jun	1	Init	1,1	5,03	50,3	16,8	33,5	16,8	33,5
Jun	2	Deve	1,1	5,19	51,9	9,8	42,1	9,8	42,1
Jun	3	Deve	1,12	4,89	48,9	24,1	24,7	24,1	24,7
Jul	1	Deve	1,14	4,48	44,8	44,9	0	44,8	0
Jul	2	Mid	1,15	4,17	41,7	58,9	0	41,7	0
Jul	3	Mid	1,16	4,37	48	54,8	0	48	0
Aug	1	Mid	1,16	4,66	46,6	51,7	0	46,6	0
Aug	2	Mid	1,16	4,84	48,4	51,1	0	48,4	0
Aug	3	Late	1,16	4,5	49,5	37,3	12,2	37,3	12,2
Sep	1	Late	1,12	3,99	39,9	17,8	22,1	17,8	22,1
Sep	2	Late	1,07	3,56	35,6	3,3	32,3	3,3	32,3
Sep	3	Late	1,03	3,21	19,2	5	15,1	5	15,1
Total					630,8	469	394,9	437,1	394,9

* Dec : 10 days (Decade), Nurs : Nursery, LPr : Landprep, Init : Initial stage, Deve : Development stage, Mid : Middle stage, Late : Final stage

Table 7. CWU_{green} and CWU_{blue} data in Cheonan and Yeongi area

CWU _{green} (m ³ /ha)	CWU _{blue} (m ³ /ha)	Y* (ton/ha)
4,371	3,949	5.46

* Y: Total production / cultivation area

Table 8. Results of water footprint (WF) calculation in Cheonan and Yeongi area

WF _{proc, green} (m ³ /ton)	WF _{proc, blue} (m ³ /ton)	WF _{proc, tot} (m ³ /ton)
800.91	723.59	1,524.50

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{green} \quad (2)$$

l_{gp} : 농작물의 경작 기간

d : 농작물의 경작 일

산정된 CWU blue 값과 green 값은 다음의 Table 7과 같다.

여기에서 해당 지역의 전체 생산량에 해당 지역의 재배 면적을 나누어 준 값인 Y값을 토대로 각 요소들의 물 발자국 산정 값을 다음의 식으로 산정할 수 있다.

$$Y = \frac{\text{해당 지역의 전체 생산량}}{\text{해당지역 재배 면적}} \quad (3)$$

$$WF_{proc, green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (4)$$

$$WF_{proc, blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (5)$$

$$WF_{proc, tot} = WF_{proc, green} + WF_{proc, blue} \quad (6)$$

위의 식을 거쳐서 산출된 green water footprint 값과 blue water footprint 값을 모두 더해준 값이 해당 지역의 두 가지 요소를 합쳐 준 물 발자국 산정 값은 다음의 Table 8로 나타낼 수 있다. 결과를 보면 충청남도 천안과 연기 지역의 쌀 1톤을 생하는데 소요되는 물은 1,524.50m³이 소비되어진다. 이런 과정을 거쳐 산정된 충청남도 9개 지역의 평균 물 발자국 값들을 산정할 수 있다.

2.2.3. Grey water footprint

Grey water footprint는 해당 산업의 진행 공정상에서 발생하는 오염물질에 의한 수질 오염을 정화시키는데 필요한 물의 양으로 정의된다. 하지만 벼농사와 같은 농업의 경우 오염을 일으키는 원인은 재배 과정에서 사용되는 비료이고, 비료에 의한 오염이 발생하는 것은 비가 오는 과정에서 유실되는 것인데, 오염은 주변 하천으로 흘러가거나 땅 속으로 스며드는 과정을 거치게 된다. 이러한 경우 실제적인 오

염원에 의한 오염량을 측정함에 있어서 어려움이 따르게 된다. 농작물을 재배하는 농업 이외에 축산 농가, 공업제품 등을 생산하는 산업 등과 같이 산업의 공정상에서 배출되는 오염물질의 종류와 해당 오염물질로 인해 야기되는 오염 농도가 명확하게 나타나는 경우에는 grey water footprint 산정이 가능하지만, 실제적으로 농작물의 경우에는 산정에 어려움이 있다. 본 연구에서도 전체 물 발자국 산정에서 있어서 grey water footprint 산정 부분은 제외하여 연구를 수행하였다.

3. 연구결과 및 토의

국내에서 쌀 생산량이 가장 많은 지역인 충청남도의 사례를 바탕으로 앞에서 나타낸 물 발자국 산정과정을 나머지 7 지역에 대해서도 같이 적용하여 각 지역별 쌀 생산에 대한 물 발자국을 산정하여 다음의 Table 9에 나타내었다. 전체 8개 지역의 결과를 비교하면 가장 높은 물 발자국 산정 결과를 나타낸 곳은 전라남도 지역으로 1,669.54 m³/ton의 결과를 나타냈으며, 가장 작은 물 발자국 산정 결과를 나타낸 곳은 경상북도 지역으로 1,356.68 m³/ton의 결과가 나타났다. 결과적으로 나타난 값들을 평균 강수량 및 강수 효율과 비교하면 Fig. 2와 같다.

그래프를 보면 경기도 지역을 제외한 물 발자국 산정 결과가 평균 강수량, 평균 강수효율과 상관관계를 나타낸다. 강수량과 강수효율이 낮은 지역에서는 물 발자국 산정의 결과도 낮게 나타나고, 높은 지역에서는 마찬가지로 높은 결과를 나타낸다. 하지만 경기도 지역은 이러한 연관성을 나타내지 않는데 그 이유는 경기도 지역에 2009년 유난히 많은 양의 비가 내렸으며, 이에 대한 대비가 잘 되어있지 않아 많은 양의 농가 피해를 입게 되어 단위 면적당 쌀의 생산량이 줄어들어 생산 효율이 떨어지는 결과라고 사료된다. 또한, 세분화된 지역의 평균 강수량을 이용한 결과와 시·도의 평균 강수량을 이용한 산정 결과가 비슷한 양상으로 나타났다지만, 본 연구에서의 물 발자국 산정은 세분화된 개별 강수량을 이용한 결과가 조금 더 정확한 결과를 도출할 수 있을 것이라 고려하여 이를 토대로 진행하였다.

Table 9. Results of 8 area's water footprint calculation

	WF _{proc, green} (m ³ /ton)	WF _{proc, blue} (m ³ /ton)	WF _{proc, tot} (m ³ /ton)
Chungnam	763.95	647.68	1,411.62
Jeonnam	981.16	688.38	1,669.54
Jeonbuk	832.55	565.95	1,398.49
Gyeongbuk	689.99	666.69	1,356.68
Gyeonggi	818.23	573.11	1,391.34
Gyeongnam	904.46	670.69	1,575.15
Chungbuk	944.97	595.42	1,540.39
Gangwon	885.12	674.64	1,559.76

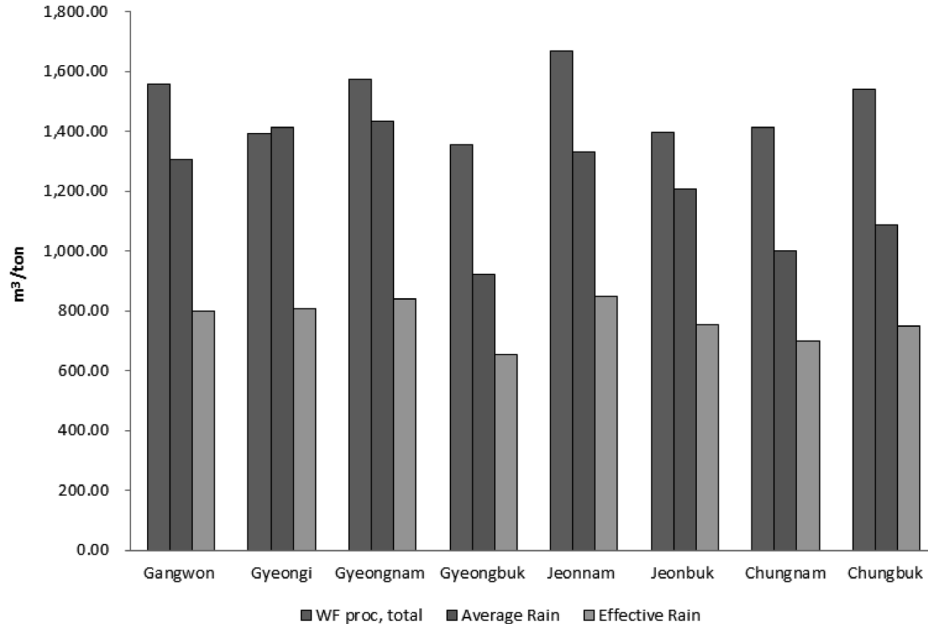


Fig. 2. Comparison of the water footprint results, rainfall and effective rain data in eight regions

Table 10. The result of research area's water footprint calculation

WF _{proc, green} (m ³ /ton)	WF _{proc, blue} (m ³ /ton)	WF _{proc, tot} (m ³ /ton)
852.55	635.32	1,487.87

전국의 평균 물 발자국 산정 결과 값을 보면 green water footprint 평균은 852.55 m³/ton, blue water footprint 평균은 635.32 m³/ton이고, 이 두 과정을 더해준 총 물 발자국 산정 결과 값은 1487.87 m³/ton이다. 여기에 우리나라 사람의 평균 1회 식사에 소요되는 쌀의 양인 130 g을¹⁰⁾ 이용해서 물의 사용량을 보면 밥 한 그릇에 소요되는 green + blue water의 양은 193.42 L가 된다. 이 자료를 바탕으로 또한 가정에서 밥을 지을 때 소요되는 물의 양을 포함할 수 있다. 가정에서 일반적으로 밥을 지을 때 사용되어지는 물의 양은 쌀 무게의 약 1.4배²¹⁾에 해당 되므로 이는 부피 단위로 환산하면 0.18 L (130 g × 1.4 = 182 g, 182 g = 0.18 L)의 물 사용량을 계산할 수 있다. 가정에서 밥을 짓기 전에 소요되는 간접 물 사용량 green + blue water인 193.42 L (99.9%)와 직접 물 사용량인 밥을 지을 때 사용되는 물의 양 0.18 L (0.01%)를 더해준다면 우리가 밥 한 그릇을 먹는데 투입되는 물의 총량은 193.61 L가 소비되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 물 발자국 산정 방법을 이용하여 우리나라 주식을 대표하는 쌀에 대하여 물 발자국을 산정하였다. 산정 범위는 한 사람이 한 끼 식사에서 섭취하는 밥 한 그릇에 사용되는 물의 양을 우리나라 전체 16개 시·도 중에서 서울특별시와 6개 광역시(인천광역시, 대전광역시, 대구광역시, 광주광역시, 울산광역시, 부산광역시), 제주도를 제외한 8개

시·도를 대상 범위로 하여 물 발자국을 Cropwat 8.0 모델을 이용하여 산정하였다. 본 연구의 결과로는

- 1) 우리나라 평균적인 green water footprint 값은 852.55 m³/ton, blue water footprint 값은 635.32 m³/ton이 나왔으며, 이 두 값을 더한 물 발자국 산정 값은 1,487.87 m³/ton으로 산정되었다.
- 2) 산정된 값을 바탕으로 1회 식사에 소요되는 쌀의 양인 130 g으로 환산하여 계산한 결과 간접적으로 사용되는 물 발자국은 193.42 L로 산정되었다.
- 3) 밥을 지을 때 쓰이는 물의 양인 직접적으로 사용되는 물의 양은 쌀의 무게에 1.4배를 사용하여 0.18 L의 직접적으로 사용하는 물의 양을 산정되어졌다.
- 4) 이렇게 산정된 직접 및 간접 물 사용량을 모두 더한 총 물 발자국 산정 값은 193.61L로 산정되었다.

본 연구에서는 국내 실정에 맞는 데이터가 없는 관계로 Cropwat 8.0 모델에서 표준으로 제공하는 값을 사용하였는데, 이를 국내 현황에 맞도록 데이터베이스를 구축한다면 산업 전반에 대해 보다 정확한 자료를 산출해 낼 수 있을 것이다. 우리나라 전체 산업 중 가장 많은 물 사용량을 나타내는 농업, 그 중에서도 전체 농가 중 가장 많은 농가가 재배하는 쌀의 물 사용량을 산정하였는데, 추후 쌀 뿐만 아니라 농업 분야의 전 분야에 걸친 연구가 진행된다면 일반 국민들이 자신이 사용하게 되는 물의 양이 어느 정도인지 조금 더 구체적으로 알 수 있을 것이다. 또한, 농업 분야를 넘어 전체 산업 분야로 산정이 진행된다면 국가 전체의 직접적인 그리고 간접적인 물 사용에 대한 데이터베이스 구축이 가능할 것이다. 이는 국가 물 관리에 보다 경쟁력을 갖출 수 있는 수단이 될 수 있을 것이며, 산정된 물 발자국 결과를

토대로 제품의 물 자원 사용을 나타내는 표시제도로도 활용이 가능할 것이라 사료되어진다.

KSEE

참고문헌

1. UN, World Water Development Report, (2003).
2. Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y., "Water footprints of nations," Value of Water Research Report Series No. 16. Available from, <http://www.waterfootprint.org/?page=files/Publications>, [12 June 2007](2004).
3. Allan, J. A., "Virtual Water: A Strategic Resource, Global Solutions to Regional Deficits," *Groundwater*, **36**, 545~546 (1998).
4. Bayart, J., Bulle, C. and Deschenes, L., "A Framework for Assessing Off-stream Freshwater Use in LCA," *Int. J. Life Cycle Ass.*, **15**, 439~453(2010).
5. Canals, L., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Assumpci, A. and Clift, R., "Assessing Freshwater Use Impacts in LCA: Part I-Inventory Modelling and Characterisation Factors for the Main Impact Pathways," *Int. J. Life Cycle Ass.*, **14**, 28~42(2009).
6. Park, J. H., "Water resource characteristic and statistic in Korea," *K-water*(2007).
7. Suh, K. D., "How will we do for water management?," *Kor. River Assoc.*(2005).
8. K-water, Basic data in water resource area(2006).
9. Park, K. H., "The future of Korean rice industry," *Kor. College Agric.*(2004).
10. National statistic potal, http://kosis.kr/abroad/abroad_01List.jsp
11. Allan, T., "Productive efficiency and allocative efficiency: why better water management may not solve the problem," *Agric. Water Manage.*, **40**(1), 71~75(1999).
12. Aldaya, M. M. "The water needed for Italians to eat pasta and pizza," *Agric. Syst.*, **103**(6), 351~360(2010).
13. Chapagain, A. K., "The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands," *Ecol. Economics*, **64**(1), 109~118(2007).
14. Water Footprint network, "<http://www.waterfootprint.org/?page=files/home>"
15. Green management team, Korean Standard Association, International standardization meeting results on environmental management, (2006).
16. Hoekstra, A. Y., "Water Footprint Manual : State of the art 2009," Water footprint network, (2009).
17. Smith, M. and Kivumbi, D., "Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies," <http://www.fao.org/docrep/004/y3655e/y3655e00.htm>, (2002).
18. FAO, "http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html"
19. Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K., "The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities," *Ecol. Economics*, **64**(1), 143~151(2007).
20. Rural development administration, Agriculture information, (2010).
21. Electric pressure rice cooker operating instructions, Cuckoo, <http://www.cuckooworld.com/Images/mall/productimages/manual/0611FA-499A.PDF>