

산업연관분석을 활용한 물발자국 인벤토리 개발

Development of Water Footprint Inventory Using Input-Output Analysis

김 영 득* / 이 상 현** / Ono, Yuya*** / 이 성 희****

Kim, Young Deuk / Lee, Sang Hyun / Ono, Yuya / Lee, Sung Hee

Abstract

Water footprint of a product and service is the volume of freshwater used to produce the product, measured in the life cycle or over the full supply chain. Since water footprint assessment helps us to understand how human activities and products relate to water scarcity and pollution, it can contribute to seek a sustainable way of water use in the consumption perspective. For the introduction of WFP scheme, it is indispensable to construct water inventory/accounting for the assessment, but there is no database in Korea to cover all industry sectors. Therefore, the aim of the study is to develop water footprint inventory within a nation at 403 industrial sectors using Input-Output Analysis. Water uses in the agricultural sector account for 79% of total water, and industrial sector have higher indirect water at most sectors, which is accounting for 82%. Most of the crop water is consumptive and direct water except rice. The greatest water use in the agricultural sectors is in rice paddy followed by aquaculture and fruit production, but the greatest water use intensity was not in the rice. The greatest water use intensity was 103,263 m³/million KRW for other inedible crop production, which was attributed to the low economic value of the product with great water consumption in the cultivation. The next was timber tract followed by iron ores, raw timber, aquaculture, water supply and miscellaneous cereals like corn and other edible crops in terms of total water use intensity. In holistic view, water management considering indirect water in the industrial sector, i.e. supply chain management in the whole life cycle, is important to increase water use efficiency, since more than 56% of total water was indirect water by humanity. It is expected that the water use intensity data can be used for a water inventory to estimate water footprint of a product for the introduction of water footprint scheme in Korea.

Keywords : water footprint, input-output analysis, water use intensity, inventory, direct water

요 지

물발자국은 제품과 서비스를 생산하는데 전과정 혹은 전체 공급망에서 사용된 담수의 양을 나타낸다. 물발자국 평가는 인간의 활동과 관련된 물의 희소성 및 오염과 관련된 정보를 파악하는데 보다 많은 정보를 주기 때문에 물소비관점에서 지속가능한 물관리에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 물발자국 제도의 도입을 위해서 물발자국 데이터베이스/물계정이 필수적인데 국내에서 전 산업분야에 적용할 수 있는 DB가 전무하다. 따라서 이 연구의 목적은 산업연관분석법을 이용해 국내의 403개 산업분야에 대한 물발자국 인벤토리를 개발하는 것이다. 주요 연구결과로는 농업분야의 물사용량이 전체

* 교신저자, 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원 (e-mail: youngkim.kr@gmail.com, Tel: 031-400-1884)

Corresponding Author, Senior Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, 870 Sa-dong Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea

** 서울대학교 지역시스템공학과 박사과정 (e-mail: yalggary@naver.com)

Ph.D. Candidate, Seoul National University

*** 동경도시대학교 환경정보학부 박사과정 (e-mail: g0631054@gmail.com)

Ph.D. Candidate, Faculty of Environmental and Information Studies, Tokyo City University

**** 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원 (e-mail: sain@ekr.or.kr)

Senior researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

직접수의 79%를 차지하며, 공업분야는 간접수의 사용량이 82%로 주를 이루는 것으로 분석되었다. 물사용량은 벼가 가장 많지만, 다음은 수산양식과 과일 생산으로 조사되었고, 가장 물사용강도($m^3/원$)가 높은 것은 비식용작물($103,263 m^3/백만 원$)로 분석되었고, 이와 같은 결과는 비식용작물(초지생산 등)의 직접수는 많지만 경제적 가치가 매우 낮아 높은 물사용강도를 보여주고 있다. 다음은 육림, 철광석, 원목, 수산양식, 상수도, 잡곡 등의 순으로 물사용 강도가 높게 나타났다. 전체적 관점에서 총 물사용량 중 56%가 간접수가 차지하기 때문에 간접수를 고려한 산업분야의 수자원관리, 즉 공급망에서 전과정을 고려한 관리가 물사용 효율성을 높이는 데 중요하다는 것을 알 수 있다. 전과정 개념과 산업연관분석법을 이용한 물사용강도 자료는 물발자국 도입시 제품단위 물발자국 산정의 기초 인벤토리로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 물발자국, 산업연관분석, 물사용강도, 인벤토리, 직접수

1. 서 론

지구상의 수자원 부존량은 총 14억 km^3 으로 이중 이용 가능한 담수의 양은 2.5%이고, 지표수와 지하수는 전체 수자원의 0.008%에 불과하다(MLTM and K-water, 2011). 또한 수자원은 기후변화에 가장 취약한 분야중 하나로, 「OECD 환경전망 2050」에 의하면 2020년까지 75~250백 만명이 물스트레스에 노출될 뿐만 아니라 전력, 생·공업 용수의 수요증가로 강우에 의존하는 농업(rain-fed agriculture)이 50%까지 감소할 것으로 전망하고 있다(Mountford, 2011). WFN (Water Footprint Network)와 세계물포럼 등 국제사회는 효율적인 수자원관리를 위한 지표로서 물발자국의 활용을 모색하고 있다(Hoekstra, 2002).

물발자국은 전통적인 물관련 통계자료가 제공하지 못하는 원료생산, 공급, 소비에 이르는 전과정에서 인간의 활동과 관련된 물의 양을 계산한 값으로 물의 이력을 내포하기 때문에 수자원관리의 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 물발자국은 1993년 앨런교수가 가상수의 이론을 처

음 제시한 이후(Allan 1993; 1994), 2002년부터 UNESCO-IHE, WFN (Water Footprint Network)를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 국제표준화기구(ISO)는 2009년 물발자국 표준화작업을 착수하여 2012년 현재 ISO WG-8에서 위원회안(Committee Draft)을 작성하여 국제표준으로 제정을 준비하고 있다(Lee et al., 2012). 국제사회의 이러한 요구에 부응하고 물발자국 제도를 국내에 도입하기 위해서는 물발자국 데이터베이스(인벤토리)의 개발이 필수적인데, 국내에는 이에 대한 연구가 매우 제한적이다. 또한 WFN은 전 세계의 농산물에 대한 품목별 물발자국을 산정하여 제시하고 있으나(Mekonnen and Hoekstra, 2010; 2011), 국내 논농업특성을 반영하지 못하고 있다.

최근 발간된 물발자국 매뉴얼(Hoekstra et al., 2011)에 따르면 물발자국은 녹색(green), 청색(blue), 회색(grey) 물발자국으로 분류하고 있는데(Fig. 1), 녹색 물발자국(green water footprint)은 제품/서비스 생산과정에서 자연상태로부터 공급되어 사용되는 강우량을 의미하며, 농업에서는 작물 생육기간 동안 유효우량을 의미한다. 청색 물발자국

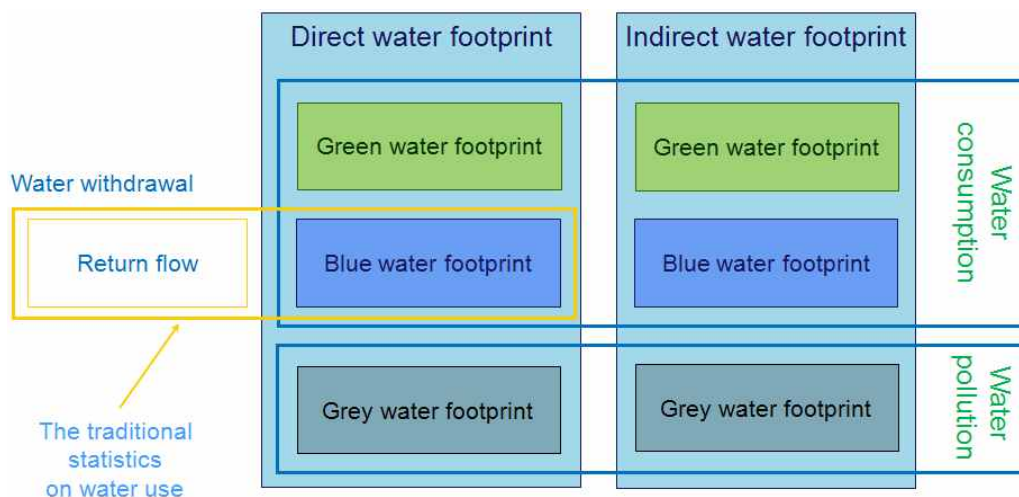


Fig. 1. Water Footprint Component (Hoekstra et al., 2011)

(blue water footprint)은 제품 생산/서비스 과정에서 사용되는 지표수 또는 지하수 소비량으로 농업부분에서는 작물 생육기간에 관개시스템에 의해 인위적으로 공급되는 관개 수량을 의미한다. 회색 물발자국(grey water footprint)은 제품 생산과정에서 발생한 오염물질 정화를 위해 필요한 물을 의미하는데 예를 들면 경작지에서 배출되는 질소, 인 등의 오염물질을 배출기준농도에 적합하도록 희석하기 위해 사용되는 희석수량에 해당된다.

물발자국은 전과정평가(Life Cycle Assessment, ISO 14044)의 기본틀을 따르는데(ISO, 2006), 인벤토리를 구축하는 방법은 크게 프로세스 누적법(process method)과 산업연관분석법(Input-Output Analysis)에 의한 방법이 있다. 산업연관분석은 미국 카네기 멜론대학에서 연구되기 시작하여 발전된 방법으로 탄소배출과 유해물질 등 환경 DB 구축에 활발히 적용하고 있는 방법이다(Mellon, 2009). 이 방법은 직접수 사용량과 산업연관표를 이용해 공급망(Supply chain) 전체의 물 사용량을 산정해 낸 후, 간접수를 산정하는 방식이다. 이 방법의 장점은 직접수와 간접수 모두를 산정할 수 있다는 점과, 시스템경계가 명확하지 않은 경우 비교적 간단하게 DB를 산정할 수 있다는 것이다. 일본과 유럽 국가들은 CO₂, 토지이용 DB를 산업연관분석에 의해 구축하여 활용하고 있고, 국내에도 Park et al. (2009)에 의해 CO₂ 배출 원단위 연구가 수행된 바 있다. 반면 프로세스 누적법은 정확도가 높지만, 공정별로 DB를 구축해야 하므로 많은 시간과 에너지가 필요하고, 기업정보보호라는 측면에서 데이터 수집이 어렵다

는 단점을 가지고 있다.

Table 1은 기존에 개발된 물관련 DB와 진행 중인 물발자국 표준화 기준을 나타낸 표이다. 세계 여러 나라의 정부 기관, 대학, 연구소 등에서 국가 인프라 구축차원에서 DB를 개발하고 있는데, 대부분은 프로세스(공정)단위로 투입·산출량을 적산하여 DB를 만들고 있다. 그 중 대표적인 DB는 스위스 기술연구소(ETH, Swiss Federal Institute of Technology)에서 1996년부터 Ecoinvent 라는 DB를 구축하였고, Gabi는 Stuttgart 대학의 IKP (Institute of Polymer Testing and Polymer Science)와 PE Europe이 공동으로 개발한 것으로 물인벤토리를 제공하고 있다. 그러나 이들 물관련 DB는 직접수에 국한되어 있고, 물사용형태가 분류되지 않아 물발자국의 개념을 고려한 DB로서는 한계가 있는 것으로 보인다.

산업연관표를 이용한 물 DB 연구로는 유럽의 마리아 (Vela'zquez, 2006; Maria, 2008), 중국의 Ma and Wang (2005)과 Zhao (2009), 미국의 Blackhust et al. (2010)이 산업간 물 발자국을 산정한 바 있지만, 이들 연구는 ISO가 추진하고 있는 용수원과 사용형태의 구분 없이 산정되었다. 최근 일본의 Ono (2010)가 용수원과 사용형태를 고려하여 401개 산업분야의 물 DB를 산정한 바 있다. 국내에서도 전체 산업군에 대한 물사용강도에 대한 연구를 수행한 바 있으나(Joo, 2010), 연구범위가 산업분류상 대부분류기준인 16개에 불과하여 제품 단위의 물발자국 산정이 불가능하므로 세 분류 수준의 물사용강도 산정이 절실하다. 특히, 물발자국 DB로서 산업연관분석을 이용한 물사

Table 1. Current Status of Water Database

Class	ISO Standard	LCI DB (Process method)		I-O Analysis		WFP
		Eco-invent	Gabi	Lenzen (2008), Kobayashi (2008), Blackhurst (2010)	Ono (2010)	
Developer		Eco-invent	Gabi	Lenzen (2008), Kobayashi (2008), Blackhurst (2010)	Ono (2010)	Hoerkstra et al. (2011)
Features		Simple inventory, elementary flow (withdrawal, turbine water, salt water)	Simple inventory	Focus on consumptive use	Consumptive, non-consumptive	Virtual water consumptive us. Regionalization is possible
Type of water resource	O	7 types(lake, river, groundwater, unspecified, etc)	10 types (feed, river, groundwater, lake, etc)	Total water use, or manageable water	4 types (rain, river, groundwater, other)	No consideration
Form of water use	O	-	-	-	Blue, green, grey	Blue, green, grey
	O	Direct water	Direct water	Direct + Indirect	Direct + Indirect	Direct water

용강도는 제품 또는 서비스의 단위 경제가치를 생산하는데 필요한 물사용량으로 $m^3/\text{원}$ 으로 표현된다. 산정된 물사용강도에 물질투입량(원)을 곱하면 최종적으로 제품의 물발자국을 산정할 수 있으므로 일본과 유럽 등 여러 나라에서 투입·산출 DB로서 사용되는 기본단위이다. 물사용강도는 간접수를 포함해 전과정에서 제품단위의 물발자국 산정을 가능케 하므로 물발자국 제도 도입을 위해서 반드시 필요하다.

수자원 장기종합계획(이하 수자원계획)을 포함한 기존의 물관련 통계의 문제점은 첫째, 공급망 전체와 소비관점의 물사용 정보를 제공할 수 없다는 점이다. 기존의 자료가 공급위주의 정책과 관리를 위해 유역별로 농업, 공업, 생활, 하천유지용수 필요수량과 수자원확보를 위한 개발 필요량을 제시하는데 초점이 맞추어져 있고, 물을 어떻게 사용하고 관리할 인가에 대한 고려는 부족한 현실이다. 둘째, 기존의 취수량 중심의 물관련 통계는 사용형태가 분류되지 않아 수자원 이용에 따른 영향을 평가하기 곤란하다. 수자원이용에 따른 수원별, 사용형태별로 환경영향이 다르기 때문에 물발자국과 같은 제품의 소비관점에서 물사용을 판단할 수 있는 인벤토리가 필요하다. 무엇보다 현재 물발자국 매뉴얼(Hoekstra et al., 2011; FAO, 2009)에 의하면 농업용수 산정방법은 Penman-Montieth 식을 이용한 필요수량 산정을 제안하고 있지만, 국내에서는 아직도 수정 Penman식에 의거 논용수 필요수량을 산정하고 있는 실정이다. 따라서, 이 연구는 제품 단위 물발자국 산정의 기초자료로 활용하기 위해 산업연관분석법을 적용하여 우리나라의 논농업 특성을 반영하고 국제표준에 부합할 수 있도록 물사용강도를 산정하는데 있다.

2. 연구방법

2.1 물발자국 인벤토리 산정절차

물발자국 매뉴얼(Hoekstra et al., 2011)에 따르면, 인벤토리 산정범위를 전지구 단위(레벨 A), 국가단위(레벨 B) 및 지역단위(레벨 C)로 실시할 수 있는데, 이 연구의 범위는 국가단위의 연구이며, 산정된 물발자국 인벤토리는 국가간 교역보다는 제품단위의 물발자국 산정과 평가를 위한 자료로 이용할 수 있다. Fig. 2는 물발자국 인벤토리 산정절차를 나타낸 그림으로 물사용강도를 산정하기 위해서는 우선 분야별 직접수 사용량을 산정하는 것이다. 둘째, 물사용량 산정결과와 산업연관분석표상의 산업분류기준이 상이하므로 한국표준산업 분류코드(KSIC)에 맞게 용수를 할당하고, 셋째 한국은행에서 제공하는 투입계수, 레온티프 역행렬, 산업코드별 국내총생산량(GDP)자료를 이용해 총 물사용량과 물사용강도를 계산하게 된다(BOK, 2008). 마지막으로 산정된 총 사용량 혹은 총 물사용강도에서 직접수를 차감하여 간접수를 산정하였다. 여기서, 간접수란 “제품생산과정에서 숨겨 있는 물로 전체 공급망에서 소비되거나 이용되는 물을 의미한다.” 소비수(Consumptive water)는 작물에 의해 이용되는 증발산량과 산업공정에서 제품에 포함된 원료수 및 사용된 후 타 유역으로 배출되는 물을 소비수로 구분하고, 그 외 나머지는 이용수(Non-consumptive, 혹은 비소비수)로 분류하여 산정하였다(Hoekstra et al., 2011). 아래 식은 물사용형태별 관계식을 나타낸 것이다.

$$TWU = WU_{con} + WU_{non-consumptive} \quad (1a)$$

$$= WU_d + WU_{ind} \quad (1b)$$

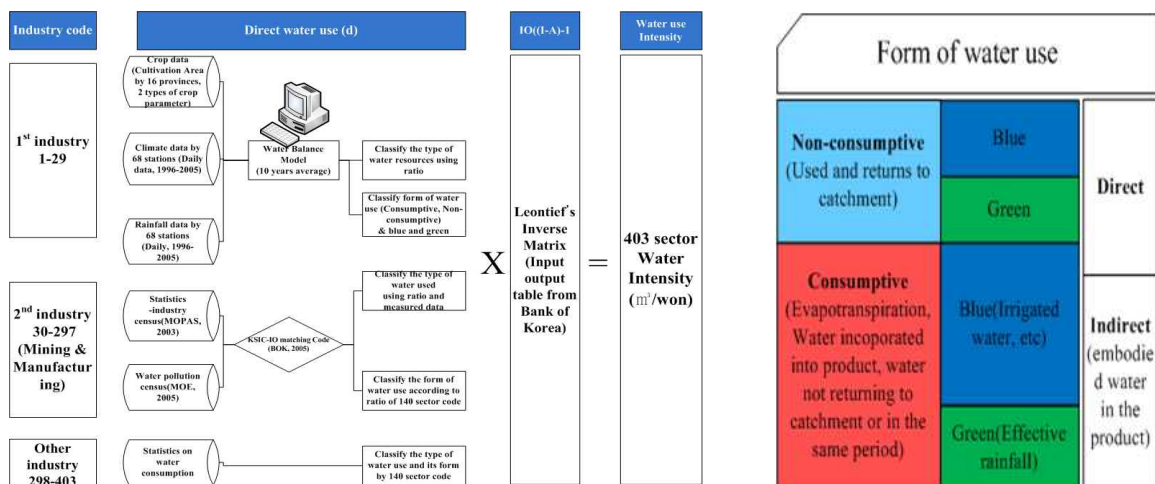


Fig. 2. Procedure of Water Use Intensity Calculation and Classification of Water Use

여기서, TWU: Total water use
WU_{con}: Consumptive water use
WU_{non-con}: Non-consumptive water use
WU_d: Direct water use
WU_{ind}: Indirect water use

이 연구에서는 용수원과 물사용형태를 구분하여 DB를 구축하였다. 사용형태별로 소비수와 이용수, 녹색과 청색수를 구분하여 산정하고, 용수원별로 지표수, 지하수, 재이용수 및 강우로 구분하여 산정하였다. 물사용강도(Water use intensity), 즉 물발자국 인벤토리는 단위 재화/서비스를 생산하는데 필요한 용수량으로 나타내기 위해 국내총생산량으로 나누어 물사용강도를 산정하였다.

$$E = d \cdot (I - A)^{-1} \quad (2)$$

여기서, E: 총물사용강도(m³/백만원)
d: 직접수 사용량(m³)
I: 단위행렬
A: 투입계수
(I-A)⁻¹: 레온티프 역행렬

2.2 직접수 산정방법

2.2.1 농업용수

농업용수는 전술한 바와 같이 작물필요수량은 Penman-

Montieth 식에 의해 산정하고, 유효우량은 물수지(Water balance model) 방법을 이용해 산정하였다(Yoo et al., 2008; 2012). 용수사용형태별로 관개용수는 청색수, 유효우량은 녹색수, 용수량에서 작물에 의해 소비되는 양을 소비수로, 나머지를 이용수로 분류하였다. 수원별 분류는 농업용수 통계와 지하수 사용량 통계자료의 비율을 적용하여 산정되었다. 이번 연구에서는 논용수 산정방법의 보완과 유효강우량, 밭작물 이외 섬유작물, 잎담배 등 기타 작물, 육림용수, 수산양식용수를 포함시켰다. 본 연구에서 증발산량은 FAO에서 추천하고 있는 Penman-Montieth 식을 사용하였고, 축산용수의 가공용수는 2차 산업분야에 별도로 축산가공분야가 있으므로 제외하여 2차 산업에 할당하였다.

작물 이외에 육림용수량은 목재생산 산림면적에 단위소비수량인 640mm를 곱하여 산정하였다. 여기서 산림면적은 생산에 기여하는 1.46백만 ha만을 적용하였는데, 이는 전체 경제림이 2.92백만 ha 중 목재생산과 관련된 50%만을 고려한 것이다(Won et al., 2011).

$$WU_{forest} = A_e * ET_c * 10 \quad (3)$$

여기서,

WU_{forest}: 목재생산 물사용량

A_e: 목재용 산림면적(1.46백만 ha, 경제림의 50%로 가정)

Table 2는 직접수 산정방법과 용수원(Water resource)

Table 2. Water Use Estimation and Allocation by Water Resources and form of Water Use

Class	Water use Estimation	Water resources (WU=A+B+C)			Form of water use (WU=D+E+F+G)			
		Surface water (A)	Groundwater (B)	Rain/reused water (C)	Consumptive (D)	Non Consumptive (E)	Blue (F)	Green (G)
1. Agricultural 1.1 Crop-paddy	PM equation, water balance model	Ratio of surface water	7.8% 2005 statistics	Eff. Rainfall	ET	Percolation, loss, etc	Irrigation	Eff. Rainfall
1.2 Other crop Field	PM equation (Same as the Water plan)	-	14.8% (2005 groundwater statistics)	Eff. Rainfall	ET	-	"	"
Greenhouse	PM equation (Same as the Water plan)	-	100%	-	ET	-	All are blue	No green
1.3 Livestock	Water unit per head (Same as water plan)	-	All are ground water	-	Drinking water	Cleaning, etc	All are blue	No green
1.4 Forestry	Estimation with ET of fruit (640 mm), forestry area for wood	-	-	Rainfall	ET (640 mm)	-	No blue	Green
1.5 Aquaculture	Estimated by water-use coefficient or water-replacement rated	Surface water	Pond type (19.5 mill. m ³)	Rainfall	-	All are non-consumptive	Others	Cage and raceway
2. Industrial	National Census statistics 2003 Industrial sector	2005 MOE Statistic 84.7%	2005 MOE Statistic 8.5%	Census 6.8%	8.5% of total water (Product water & boiler water) from census data	91.5% based on the census data	All are blue	No green
3. Domestic	National Census statistics (2003), MOCT (2006) data	Statistic 93.4%	Statistic 5.3%	Census 1.3%	10% of total use (FAO)	Remainder, 90%	All are blue	No green

과 사용형태별(Form of water use)별 분류기준을 정리한 표이다.

수산양식 용수량은 국내 물사용량 통계가 없으므로 양식방식별 면적과 물사용 계수를 이용하여 추정하는 방법을 제안하고 있어(Lovelac, 2009), Table 3과 같이 총 5,598 MCM으로 산정되었다.

2.2.2 공업·생활용수

공업용수량은 2003년 산업총조사(KSO, 2004) 전수조사자료와 2005년 전국 오염원 조사 자료(MOE, 2006)를 활용하였다. 공업용수에서 소비수는 물발자국에서 제시한 정의에 따라 전국 오염원조사자료의 산업 세분류별 원료용수와 보일러 용수 비율을 이용하여 소비수를 산정하여 할당하고, 나머지는 비소비수에 할당하였다. 제조업을 포함한 공업용수량은 2,600 MCM, 이중 소비수량은 세부 산업별로 상이하므로 업종별 비율을 각각 적용하였는데, 평균값은 8.5%이다. 생활용수량은 수자원계획 자료인 7,600 MCM을 이용하였고, 소비수는 FAO (2009)기준에 따라 10%를 할당하고 나머지는 이용수로 분류하였다. 수자원계획 수립시 생활·공업용수 회귀수량은 수요량의 65%,

즉 35%가 소비되고 65%는 하천으로 회귀하는 것으로 적용하고 있어 다소 차이가 있지만(MLTM, 2012; Choi, 2007)은 2000년대 생활용수 회귀율을 90% 내외로 산정한 바 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 직접수 사용량

물사용량 산정결과 2005년 기준 총 물사용량은 43,162 MCM인 것으로 분석되었다(Table 4). 농업용수 분야는 32,962 MCM로 산정하였고, 총 공업용수는 2,600 MCM, 생활용수 7,600 MCM을 각각 이용하였다. 농업용수는 수자원계획상의 16,000 MCM에 비해 약 2배 가량 크게 산정되었는데, 이와 같은 결과는 수자원계획에는 포함되지 않은 유효수량과 수산용수(5,598 MCM) 및 산림용수(9,344 MCM)가 포함되었기 때문이다.

Table 5에서 농업용수를 중심으로 직접수 사용량 산정 결과를 수자원계획 자료와 비교해 볼 때, 수자원 계획에서는 논과 밭작물을 중심으로 공급관점에서 10년 가뭄빈도를 고려한 필요수량을 산정하였고, 이번 연구에서는 논·밭 작물과 산업분류상에 약용식물, 화훼, 수산 및 산림용

Table 3. Water Use Estimation in Aquaculture

Class	Total	Watershed cage	Waterway	Recirculation	Pond	Other
Water use (mill m ³)	5,597.9	1.3	5,367.0	137.0	37.5	55.1
Blue	229.6	-	-	137.0	37.5	55.1
Green	5,368.3	1.3	5,367.0	-	-	-
Surface	5,578.4	1.3	5,367.0	137.0	18.0	55.1
Groundwater	19.5	-	-	-	19.5 ⁱⁱⁱ	-
Area(1,000 m ²) ⁱ	11,428.8	130.8	3,577.0	307.0	2,277.0	3,347.0
Basic unit (m ³ /m ² ,m) ⁱⁱ		10.0 m (5~15 m)	1,500.0 (1,000~3,000)	54.2	16.5 (1.8~54.2)	16.5 (1.8~54.2)

i: MOE (2006). 2006 Water pollution survey, p. 78 (in Korean).

ii: Kwon, O.S., Yoo, D., Park, S.M., Park, H., and Park, W. (2001). A study on the establishment of effluent guidelines for aquaculture facility. National Institute of Environment Research p. 46 (in Korean).

iii: MOCT (2006). 2006 Statistics of groundwater use (in Korean).

Table 4. Water Use Estimation by the form of Water Use

(Unit : MCM)

Class	Total Water (A+B)	Indirect water (A)	Direct water				
			Sub-total (B)	Form of water use		Water color	
				Consumptive	Non-consumptive	Green	Blue
Total	98,429	55,267	43,162	20,072	23,090	23,740	19,423
Agriculture, forestry, fisheries	41,641	8,679	32,962	19,092	13,870	23,740	9,223
Industrial sector	47,525	44,925	2,600	220	2,380	0	2,600
Domestic sector	9,263	1,663	7,600	760	6,840	0	7,600

수를 모두 포함하여 산정하였다. 이번 연구의 논 용수량은 13,161 MCM, 수자원계획 자료는 12,787 MCM로 나타났다. 전자의 경우 유효수량이 포함 된 수치이고, 후자의 경우는 유효수량이 제외되었지만, 10년 가뭄빈도 개념이 포함된 수치이다. 수자원계획에서 2006년 기준 당해연도 필요량인 8,226 MCM과 이번 연구에서 산정한 결과를 비교해 보면 유사한 결과를 보여줘 이번에 적용한 농업용수 사용량 자료는 신뢰성이 있는 것으로 볼 수 있다.

소비수와 이용수의 비율을 보면, 벼의 경우 전체사용량의 41%가 소비수이고, 나머지 발용수는 대부분이 소비수로 산정되었다. 전체 직접수에서 녹색수는 23,740 MCM으로 나타났고, 모두 농림수산분야이다. 전체 청색수는 19,423 MCM으로 분석되었으며, 이중 9,223 MCM은 농림수산분야이고 나머지는 생·공업분야인 것으로 분석되었다. 농림수산분야에서 용수사용량이 많지만, 대부분을 차지하는 것은 녹색수(유효강우)인 것을 알 수 있으며, 이는

상대적으로 물사용에 따른 환경영향이 크지 않을 수 있다고 해석할 수 있다.

Table 6은 물사용량이 큰 상위 15개 분야를 나타낸 표로 대부분이 1차 산업분야인 것을 알 수 있다. 벼, 산림, 수산양식, 야채의 순으로 직접수 사용량이 크고, 2차 산업 분야에서는 철강, 염색·표백, 제강관련 산업이 큰 것으로 분석되었다.

Table 7은 주요 곡물의 물발자국 비교결과를 나타낸 표로 벼의 물발자국은 1,907.0 m³/ton-rice, 이중 소비수와 비소비수가 각각 775.1 m³/ton, 1,131.9 m³/ton, 녹색수와 청색수가 각각 705.5 m³/ton, 1,201.6 m³/ton으로 분석되었다. 밀의 물발자국은 1,055.5 m³/ton-wheat, 옥수수는 1,148.4 m³/ton-maize이고, 모두 소비수로만 구성되어 있다. 여기에서 총 물발자국은 벼가 크지만, 소비수의 물발자국은 발작물인 밀과 옥수수가 더 큰 것을 알 수 있다. 벼생산을 위해 논에 공급된 용수는 775.1 m³/ton (40.6%)

Table 5. Comparison of Direct Water Use with the National Water Resources Plan (2006)

Class	This study		Water plan(2006)	
	Method	Result	Method	Result
Perspective	Water consumption	MCM	Water supply	MCM
Classification	Classification of water resources and form of water use (Blue, green, Consumptive-Nonconsumptive), direct and indirect		No classification of water use Only direct water Total water requirement	
Temporal scope	10 year average data (1996~2005)		requirement in 2003 reference year	
Coverage of sectors	All primary sector including horticulture, forestry, aquaculture, etc		No estimation	
Agricultural sector		32,962		15,966
Paddy	Penman-Montieth equation Perc: 4~6 mm/day Ponding depth method : 60 mm Effective rainfall included as a green water	13,161	Modified Penman equation Perc: average 5.2 mm/day Ponding depth method : 60mm Effective rainfall excluded 10 years drought frequency	13,170
	Water use excluding effective rainfall	(8,271)	Water use in 2006 reference year	(8,226)
Other crops	Penman-Montieth equation including horticulture, cotton, etc	4,270	Penman-Montieth equation	2,567
Livestock	Basic unit method excluding processing	202.8	Basic unit method	229
Others	Aquaculture, forestry, etc	15,328	River maintenance flow	7,500
Industrial sector	2003 industry census meta data	2,600	Reference year 2003 plan	2,600
Domestic	2003 industry census meta data	7,600	Reference year 2003 plan	7,627
Total		43,162		33,693

만 작물생산을 위해 사용되고 나머지 59.4%는 생산이외의 목적, 즉 지하수 함량, 하천유지용수 등 다양한 기능을 하고 있음을 보여주는 결과이다. Maruyama and Riota (1998)와 Yamaoka (2005)의 연구에 따르면, 논 용수의 50~75%는 수자원시스템에서 하천으로 회귀하여 생산이외의 기능, 다원적 기능을 하는 것으로 보고하고 있고, 수자원 계획상에도 농업용수 회귀수량을 35%를 적용하고 있어 이들 결과를 뒷받침해 주는 결과라고 할 수 있다.

3.2 물발자국 인벤토리(물사용강도)

직접수사용량과 산업연관분석에 의해 물사용강도를 산정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 청색은 직접

수 원단위를 적색은 간접수 원단위를 나타낸 것으로 농업 분야와 생활용수의 경우 직접수가 대부분을 차지하는 것을 볼 수 있고, 2·3차 산업분야는 간접수의 양이 큰 것을 알 수 있다. 또한 소비수와 이용수 비율을 보면 농업분야와 철강 분야에서 직접수의 사용량이 큰 것을 볼 수 있고, 2·3차 산업에서는 이용수의 비율이 큰 것을 볼 수 있다. 직접수가 큰 분야 총 32개 중 농업분야가 16개, 광업 2개, 식품, 섬유, 정유, 상수 등이 직접수의 사용이 큰 분야이다.

농업분야의 총물사용량 중 직접수가 79%를 차지하며, 공업분야에서는 간접수가 총사용량의 82%로 주를 이루는 것으로 분석되었다. 전체 403개 분야 중 371개 산업에서 간접수의 비율이 큰 것으로 분석되었는데, 이는 전체

Table 6. Top 15 Direct Water Use Out of 403 Industry Sectors

Name of industry sector	Total direct water	Type of water resources (MCM)				Form of water use (MCM)		Water color (MCM)	
		Surface water	Ground water	Rain water	Reused water	Consumptive	Non-consumptive	Green	Blue
Rice	13,161	7,242	1,029	4,890	0	5,349	7,812	4,890	8,271
Barley	171	0	0	171	0	171	0	171	0
Vegetables	1,773	0	493	1,280	0	1,506	266	1,280	493
Fruits	1,187	0	0	1,187	0	1,187	0	1,187	0
Pulses	548	0	0	548	0	548	0	548	0
Potatoes	202	0	0	202	0	202	0	202	0
Oleaginous crops	269	0	0	269	0	269	0	269	0
Other Inedible crops	191	0	0	191	0	191	0	191	0
Operation of timber tracts	9,344	0	0	9,344	0	9,344	0	9,344	0
Aquaculture	5,598	5,578	20	0	0	0	5,598	5,368	230
Iron ores	153	56	25	0	71	0	153	0	153
Fiber bleaching & dyeing	158	152	3	0	2	7	151	0	158
Water supply	7,600	7,102	401	0	97	760	6,840	0	7,600
Non-classifiable activities	305	256	26	0	23	34	270	0	164

Table 7. Water Footprint of Main Grains in Korea

(Unit: m³/ton)

Grains	Total	Consumptive	Non-consumptive	Green	Blue
Rice paddy	1,907.0	775.1	1,131.9	705.5	1,201.6
Wheat	1,055.5	1,055.5	-	1,055.5	-
Maize	1,148.4	1,148.4	-	1,148.4	-

산업의 92.1%에 해당되며, 간접수의 적절한 관리가 전체 용수관리에서 중요하다는 것을 알 수 있다. 우리나라의 경우, 간접수를 포함한 총 물사용량은 98,429 MCM으로 산정되었고, 이중 55,267 MCM이 간접수로 56%인 것으로 분석되었다. 미국(Blackhurst, 2010)의 경우, 60% 이상이

간접수가 크다고 보고하고 있고, 호주(Lenzen, 2008)의 경우, 간접수가 직접수의 약 8배로 분석하였는데 이는 관리 가능한 용수(청색수)만을 직접수로 분류하였기 때문이다.

Table 8은 물사용강도가 큰 상위 20개 분야를 나타낸 것으로 물사용강도가 가장 큰 것은 사료작물과 같은 기타

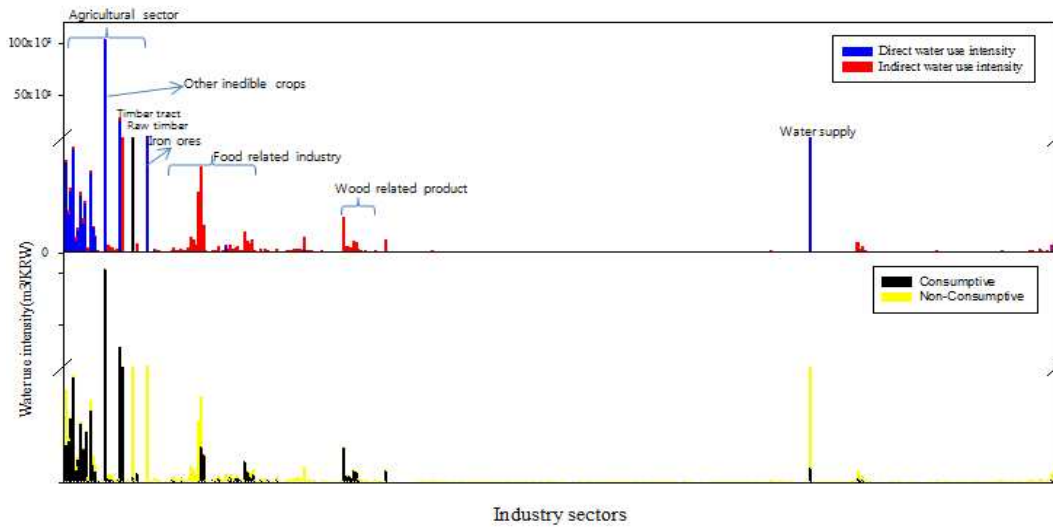


Fig. 3. Water Use Intensity at 403 Industry Sector

Table 8. Top 20 Water Use Intensity out of 403 Industry Sectors

Name of industry sector	Total Water use	Water use intensity (m ³ /mill. Won)=A+B+C+D+E+F							Domestic product (mill. won)
		Total Intensity	Direct (A)	Indirect (B)	Consumptive (C)	Non-consumptive (D)	Green (E)	Blue (F)	
Rice	13,356	1,599	1,574	25	649	950	594	1,005	8,361,859
Barley	274	741	696	45	732	9	732	9	245,150
Wheat	92	1,128	1,070	58	1,118	11	1,120	8	7,046
Misc. cereals	149	1,848	1,826	22	1,843	4	1,844	4	62,025
Fruits	1,238	424	414	10	417	6	418	6	2,871,554
Pulses	683	1,045	1,005	39	1,035	10	1,034	10	544,768
Potatoes	369	599	535	64	587	12	587	13	377,840
Oleaginous crops	291	882	870	11	879	2	879	2	308,594
Other edible crops	86	1,413	1,405	8	1,256	157	1,227	217	23,164
Cotton and hemp	17	458	446	12	317	141	452	6	2,382
Other Inedible crops	265	103,263	103,249	14	103,253	10	103,255	8	1,847
Operation of timber tracts	10,050	28,712	26,813	1,899	28,706	6	28,707	5	348,491
Raw timber	3,533	10,016	-	10,016	10,010	6	10,011	5	133,183
Aquaculture	6,166	4,194	3,772	421	91	4,103	4,020	174	1,484,068
Iron ores	208	11,526	11,510	16	9	11,517	10	11,515	13,277
Misc. processed seafoods	1,577	1,059	10	1,049	28	1,031	1,000	59	922,210
Polished rice	12,424	1,488	0	1,487	604	884	553	935	8,585,160
Polished barley	172	471	0	471	465	6	465	6	168,646
Lumber	244	607	1	606	601	5	601	5	1,175,150
Water supply	9,263	2,536	2,082	454	254	2,282	2	2,535	3,650,145

비식용작물(other inedible crop)로 103,263 m³/백만원이다. 물사용강도가 높다는 것은 물효율성이 낮다는 것을 의미한다. 상위 20개 중 식품과 관련된 분야가 13개이고, 벼의 경우 물사용량은 가장 많지만, 물사용강도는 1,599 m³/백만원으로 크지 않은 것으로 나타났다. 작물의 물사용강도는 272~1,843 m³/백만원으로, 축산분야의 경우 47~125 m³/백만원으로 분석되었다. 육림의 물사용강도는 28,712 m³/백만원으로 두 번째로 높게 분석되었는데, 이는 낮은 경제적 부가가치 때문인 것으로 보인다.

물사용강도 분석결과 농업분야의 물사용강도는 직접수의 비중이 높고, 산업분야는 간접수의 비중이 높은 것으로 분석되었다. 원목분야는 간접수의 비중이 높은 것으로 나타났는데 이는 대부분을 수입하기 때문이고, 철광석분야도 사용강도가 높는데 이것도 간접수사용이 크기 때문이다. 또한 육림과 관련된 목재(wood), 원목(timber) 그리고 제재업(lumber)의 물사용강도가 높은 것으로 분석되었다.

물사용강도 산정결과의 적정성을 검토하기 위해 일본의 물사용강도 자료와 비교를 실시하였는데, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 벼, 곡물, 화훼 및 축산분야에서 한국의 물사용강도는 일본의 물사용강도보다 작지만, 채소, 과일, 감자류, 기타 식용식물은 한국의 결과가 일본보다 큰 것으로 분석되었다. 감자류의 소비수량은 감자 355 mm, 고구마 674 mm로 종류에 따라 두배가량 차이가 나며, 각각의 재배비율의 차이가 이와 같은 결과로 나타났다. 산림분야의 원단위가 한국자료가 큰 것으로 분석되었는데, 육림의 경우 한국의 원단위 430,680 m³/백만엔으로 일본의 111,778 m³/백만엔보다 4배 가량 크게 산정되었고,

원목은 2.8배 큰 것으로 산정되었다. 이는 2005년 기준 일본의 삼림면적은 한국의 2배이지만, 일본이 국내생산량은 35.7배 큰 것으로 나타났고, 산림분야의 생산가치의 차이가 이와 같은 물사용강도의 차이로 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 물발자국 개념과 산업연관분석법을 이용해 물사용량과 물사용강도를 직·간접수, 녹색·청색수, 소비수·이용수를 구분하여 산정하였는데 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 물사용 산정결과 전체 물사용량의 56%는 간접수이고, 적절한 간접수의 관리는 제품생산에서 소비에 이르는 전과정에서 지속가능한 수자원관리를 위해 중요하게 고려되어야 한다.
- 2) 산정된 물사용강도(m³/원)는 전과정관점에서 물사용효율의 파악은 물론 소비측면에서 제품단위의 물발자국 산정을 위한 기초 인벤토리로서 활용될 수 있다. 또한 제품단위의 물발자국 산정 및 활용은 탄소발자국제도와 같이 생산자, 소비자, 정책 결정자 등 모든 물사용 이해관계자가 공급망 전체에서 물 이용 효율성 증대를 견인하고 수자원의 지속가능성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 보인다.
- 3) 농업분야의 물사용은 직접수의 비율이 크고, 산업분야의 경우 간접수의 비율이 큰 것으로 분석되었다. 작물의 물사용량은 소비수가 주를 이루지만, 벼는 소비수량이 40.6%에 불과하며, 나머지는 지하수함량, 하천유출 등 생산외의 기능을 한다고 볼 수 있다.

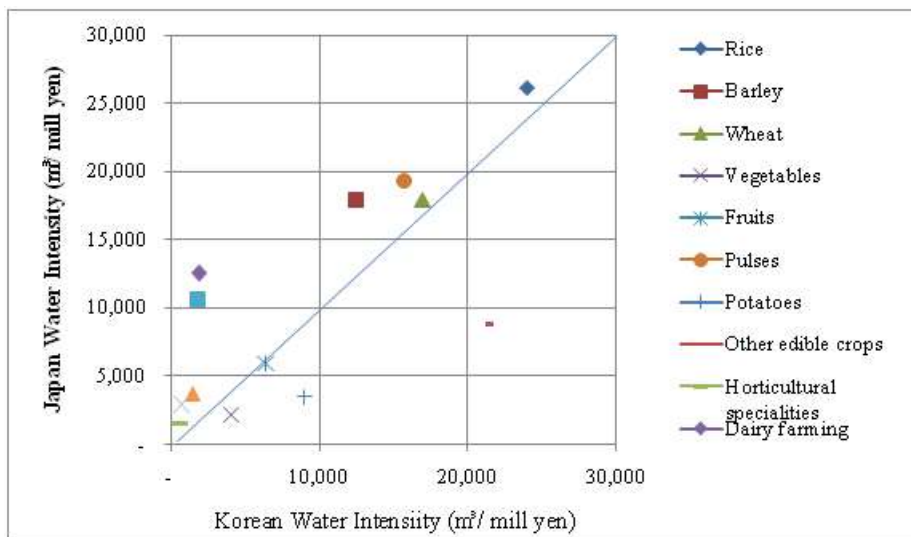


Fig. 4. Comparison of Water Use Intensity between Korea and Japan

- 4) 물사용강도가 가장 큰 것은 비식용작물(103,263 m³/백만원)로 분석되었고, 육림이 두 번째로 높게 나타났다. 사료작물과 비식용작물은 직접수는 많지만, 경제적 가치가 매우 낮기 때문에 높은 물사용강도를 보여주고 있다.
- 5) 본 연구는 물발자국개념과 산업연관표를 활용한 전 산업분야의 첫 물발자국 인벤토리로서 여러 한계점을 내포하고 추가 연구가 필요하다. 첫째, 이 연구결과는 국가평균값으로 지역간 편차를 반영할 수 없는 자료이다. 특히, 직접수의 경우 지역별 물발자국의 산정과 적용이 중요하므로 지역간 물사용강도를 개발하는 것이 필요하다. 둘째, 농업분야의 산정에 있어서 관개지역과 비관개 지역에 따라 용수사용량이 다른 점을 고려할 때, 이번 연구에는 관개-비관개 구분 없이 전체 면적으로 벼 필요수량을 산정하였다. 셋째, 수원별, 용수사용형태별 구분기준에 있어서 생활용수의 경우, FAO 평균값이 10%를 소비수로 간주하였으나, 이에 대한 검증과 추가 연구가 필요하다. 마지막으로 농업분야 중 육림 필요수량과 수산용수산정은 국내 통계자료의 부재로 원단위에 기초해 추정하였으나, 불확실성이 크므로 이에 대한 불확실성 검증 또한 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 농림수산식품부 농촌개발시험연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Allan, J.A. (1993). "Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible." *ODA, Priorities for water resources allocation and management*, ODA, London, pp. 13-26.
- Allan, J.A. (1994). "Overall perspectives on countries and regions." *Water in the Arab World: perspectives and prognoses*, edied by Rogers, P., & Lydon, P., Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 65-100.
- Blackhurst, M., Hendrickson, C., and Vidal, J.S.I. (2010). "Direct and indirect water withdrawals for U.S. industrial sectors." *Environmental Science and Technology*, Vol. 44, No. 6, pp. 2126-2130.
- BOK (2008). *2005 Input-Output tables*.
- Choi, G.W. (2007). *Interpretation of potential discharge for Maintenance flow in a catchment*. pp. 231-232.
- FAO (2009). *FAO Aquastat on-line database*.
- Hoekstra, A.Y. (2002). "Virtual water." *Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. Research Report Series No. 12, the Netherlands.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M. (2011). *Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, Cornwall, UK, p. 2, 131-146
- ISO (2006). *ISO 14044: Environmental Management - Life Cycle Assessment-requirement and guidelines*.
- Joo, S.U. (2010). *Study on water footprint between inter-industry in Korea using an input-output analysis*. MSc dissertation, The University of Suwon, pp. 20-28.
- Kobayashi, Y. (2008). "An estimation of embodied intensity of water consumption in Japan based on input-output analysis method." *Journal of Life Cycle Assessment*, Japan, Vol. 4, No. 4, pp. 359-366.
- KSO (2004). *2003 Industry Census report*.
- Lee, S.H., Kim, Y.D., and Yun, D.G. (2012). "From virtual water, to Water footprint (2/1)." *Water for the Future*, Vol. 45, No. 7, pp. 49-59.
- Lenzen, M. (2008). *The virtual water trust*. Report on Virtual water cycle of Victoria. GHD.
- Lovelace, J.K. (2009). *Methods for estimating water withdrawals for aquaculture in the United States 2005*. Reston, Virginia, USA.
- Ma, J., and Wang, H. (2005). "Virtual versus real water transfers within China." *Philosophical Transactions*, Vol. 36, No. 1, pp. 835-842.
- Maria, L. (2008). "Economic impact of alternative water policy scenarios in the Spanish production system: An input-output analysis." *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 1-2, pp. 288-294, 200.
- Maruyama, T., and Riota, N. (1998). *Water Supply Environmental Engineering*. Asakura Shoten, Tokyo, Japan.
- Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. (2010). *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products*. Value of Water Research Report Series, No. 47, the Netherlands.

- Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. (2011). "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 15, pp. 1577-1600.
- Mellon, C. (2009). Theory and Method behind EIO-LCA: EIO-LCA(Economic Input Output Life Cycle Assessment), <http://www.eiolca.net/Method/eio-lca-method.html> accessed 10 November 2012.
- MLTM (2012). *4th Water plan in Korea-2nd revision (2011-2020)*. p. 18, 93.
- MLTM and K-water (2011). *2011 Water for the future*. p. 1.
- MOCT (2006). "Integrated water use plan." *National Water Resources Plan (2006~2020)*, pp. 219-386.
- MOE (2006). *2005 National Survey on Pollution Sources*.
- Mountford, H. (2011). *Water: The Environmental Outlook to 2050 OECD Global Forum on Environment: Making Water Reform Happen*, 25-26 October 2011
- Ono, Y. (2010). *The development of water inventory database for the application to water footprint*. MSc thesis, Tokyo City University, Yokohama, pp. 10-55.
- Park, P.J., Kim, M.Y., and Lee, I.S. (2009). "Analysis of CO₂ Emission Intensity per Industry using the Input-Output Tables 2003." *Environment and Resources Economics Review*, Vol. 18, No. 2, pp. 279-309.
- Vela'zquez, E. (2006). "An input-output model of water consumption: Analyzing inter sectoral water relationships in Andalusia." *Ecological Economics*, Vol. 56, No. 2, pp. 226-240.
- Won, H.G., Kim, Y.H., Jang, K.M., Kim, C.M., and Lee, K.H. (2011). *Management of economic forest and model for long-term management plan*. Korea Forest Research Institute, pp. 59-62.
- Yamaoka, K. (2005). "Paddy field characteristics in water use experience in Asia." *OECD Workshop on Water and Agriculture Sustainability, Markets and Policies*, Adelaide, Australia, 14-18 November 2005, pp. 287-314.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., and Jang, M.W. (2008). "Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea." *Agricultural Water Management*, Vol. 95, pp. 845-853.
- Yoo, S.H., Choi, J.Y., Nam, W.H., and Hong, E. (2012). "Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea." *Agricultural Water Management*, Vol. 112, pp. 33-42.
- Zhao, X. (2009). "National water footprint in an input-output framework-A case study of China 2002." *Ecological Modelling*, Vol. 220, No. 2, pp. 245-253.

논문번호: 12-123	접수: 2012.12.06
수정일자: 2013.01.03/01.07	심사완료: 2013.01.07