

## 배수공 각 작업 단계별 물발자국 영향평가

천디\* · 김준수\*\* · 바타갈래 위누리\*\*\* · 김병수\*\*\*\*

Chen Di\*, Kim, Joon-Soo\*\*, Batagalle Vinuri\*\*\*, Kim, Byung-Soo\*\*\*\*

## Impact Evaluation of Water Footprint on Stages of Drainage Works

### ABSTRACT

Fresh water that can be used by a person of the total amount of water on the planet is increased because it is less than 0.01 % except underground water, ice and snow, etc. water management response need. In order to protect and efficiently utilize water resources, major countries are conducting water footprint studies that can quantitatively estimate the amount of water put into the operating phase of the resource harvesting phase, mainly agriculture. Korea has also recently developed a number of policies in order to cope with water shortages, and in the construction industry, as well as the need for basic research to support it has been emphasized. This study was constructed DB up to the raw material harvesting step, the transport step, the production stage in order to estimate the water consumption of resources to be put into the work process to target the drainage of the road. Water usage estimation method was utilized the method presented in the Water Footprint Manual and the environmental score card certification guide, unit water usage each drainage main method was calculated after estimating the water footprint considering the water character factor, indirect water and the direct water, the water consumption factor of material input to each process. Brown asphalt, rebar, remicon of the drainage material as a result of the water footprint calculation accounted for 97 % of the total. Drainage method is a culvert, a side channel, a culvert wing wall, reinforced concrete open channel accounted for 92.2 % of the total. Drainage total step-by-step calculated water consumption and water footprint was found in order of raw material harvesting step, transport stage, production stage. Water footprint each drainage method or total drainage material calculated in this study can be used as a base data in the agricultural and construction sectors. In order to increase the reliability of the analysis, it is believed that further overseas databases will be needed for continuous review and research.

**Key words :** Water control, Water footprint, Water consumption index, Drainage method

### 초록

지구상 물의 총량 중 사람이 사용할 수 있는 담수는 지하수, 빙설 등을 제외하면 0.01 % 이하이기 때문에 물 관리 대응 필요성이 커지고 있다. 주요 국가들은 수자원을 보호하고 효율적으로 활용하기 위해서 자원의 채취단계에서 운영단계에 투입되는 물의 양을 정량적으로 추정할 수 있는 물 발자국 연구를 주로 농업 중심으로 진행하고 있다. 우리나라도 최근 물 부족에 대응하기 위하여 여러 정책을 진행 중에 있으며 건설산업에서도 정책개발은 물론 이를 뒷받침할 수 있는 기초연구의 필요성이 강조되고 있다. 본 연구는 도로의 배수공을 대상으로 공중에 투입되는 자원의 물 소모량을 산정하기 위하여 원료채취단계, 운반단계, 제작단계까지 분석 및 DB를 구축하였다. 물 사용량을 추정방법은 Water Footprint Manual과 환경성적표지 인증안내서에서 제시한 방법을 활용하였으며, 각 공정에 투입된 자재의 물소모계수, 취수원 수역에 따른 물 특성화 인자, 간접수 및 직접수를 고려한 물 발자국을 산정 후 배수공 주요 공법별 원단위 물 사용량을 산정하였다. 물발자국 산정 결과 배수공 자재 중 브라운 아스팔트, 철근, 레미콘이 전체 97%를 차지하였다. 배수공법별은 암거공, 측구공, 암거날개벽, 철근콘크리트 개거가 전체 92.2%를 차지하였다. 배수공 전체 단계별 산정된 물 소모량과 물발자국은 원료 채취단계, 운반단계, 제작단계 순으로 나타났다. 본 연구에서 산정된 배수공 전체 자재나 배수공법별의 물발자국은 농업 분야와 건설업 분야 기초 자료로써 활용될 수 있다. 분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 추후 국외의 데이터베이스를 더 찾아서 지속적인 검토 및 연구가 필요할 것으로 판단된다.

**검색어 :** 물관리, 물발자국, 물소모계수, 배수공법

\* 경북대학교 토목공학과 석사과정 (Kyungpook National University · 5075022@naver.com)

\*\* 정희원 · 경북대학교 토목공학과 박사과정 (Kyungpook National University · kimjsoonsoo@knu.ac.kr)

\*\*\* 경북대학교 토목공학과 석사과정 (Kyungpook National University · vinurikarunarathne@gmail.com)

\*\*\*\* 중신회원 · 교신저자 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · bskim65@knu.ac.kr)

Received November 18, 2019/ revised December 11, 2019/ accepted December 30, 2019

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 필요성

‘물과 미래’보고서(MLIT, 2015)에서는 지구상 물의 총량 중 염수는 97.47 %인 13.51억 km<sup>3</sup>이며, 담수는 2.53 %인 3,500만 km<sup>3</sup>으로 조사되었다. 그리고 사람이 사용할 수 있는 담수는 지하수, 빙설 등을 제외하면 0.01 % 이하인 0.1백만 km<sup>3</sup>에 불과하여 물 관리 대응 필요성에 대한 내용이 보고되었다(Kim, 2018).

국내 건설업은 대규모의 에너지와 자원이 투입되는 산업으로 일반 제조업보다 더 많은 환경영향을 나타내며 국제적인 환경영향 최소화 흐름에 맞추어 건축자재의 제조 및 사용 시 발생하는 환경부하를 저감하기 위해 환경영향 발생량을 정량화하는 것이 필요하다(Hwang, 2000). 특히 인구증가 등의 이유로 물 사용량이 증가함에 따른 물 부족현상 및 수질오염이 전 세계적인 이슈로 부각됨에 따라, 세계 각 국가의 산업분야에서는 물발자국 연구를 통해 제품생산과 사용에 따른 물 고갈 및 오염의 정량적 평가에 대한 요구가 증대되고 있다(Kim et al., 2015).

물 발자국(Water footprint)은 단위 제품 및 서비스 생산 전과정(life cycle) 동안 직접 및 간접적으로 이용되는 물의 총량을 뜻하는 것으로 우리가 일상생활에서 사용하는 제품을 생산 및 소비하는데 얼마나 많은 양의 물이 필요한지 나타내는 지표를 나타낸다(Chapagain, 2007). 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)는 ISO 14001의 환경경영 시스템을 구현하기 위한 하나의 도구로써 사용되며 원재료의 조달로부터 설계, 제조, 사용, 재활용, 그리고 폐기에 걸쳐 제품이 사용하는 자원 및 에너지가 배출하는 환경부하와 제품 자체에서 배출되는 환경부하를 정량적으로 평가함으로써 제품의 잠재적인 환경영향을 평가하는 기법이다. 수자원을 보호하고 효율적으로 활용하기 위해서 주요 국가들은 자원의 채취단계에서 운영단계에 투입되는 물의 양을 정량적으로 추정할 수 있는 물 발자국 연구를 주로 농업 중심으로 진행하고 있다. 우리나라도 최근 물 부족에 대응하기 위하여 여러 정책을 진행 중에 있으며 건설산업에서도 정책개발은 물론 이를 뒷받침할 수 있는 기초연구의 필요성이 강조되고 있다.

따라서 본 연구에서는 물 발자국 개념을 가지고 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 기법을 이용하여 도로의 배수공을 대상으로 공중에 투입되는 자원의 물 소모량을 산정하기 위하여 원료채취 단계, 운반단계, 제작단계까지 분석 및 DB를 구축하였다. LCI database (DB)란 LCA의 수행단계 중에서 전과정 목록분석의 결과이며, 어떤 물질에 대해 원재료의 채취 및 소재, 생산 및 수송, 사용, 폐기 등의 전과정에 걸쳐 시스템 경계에서 투입물인 자원, 에너지의 양과 배출물인 대기 배출물, 수계 배출물, 폐기물의 양을 파악하여 정량화한 데이터베이스이다. 물 사용량을 산정방법은 Water Footprint Manual과 환경성적표지 인증안내서에서 제시한

방법을 활용하였으며, 각 공정에 투입된 자재의 물소모계수, 취수원 수역에 따른 물 특성화 인자, 간접수 및 직접수를 고려한 물 발자국을 산정 후 배수공 주요 공법별 원단위 물 사용량을 산정하였다.

### 1.2 선행연구

#### 1.2.1 물 발자국에 대한 연구

UN의 세계 수자원 보고서에 따르면 지구의 1인당 담수공급량은 20년 안에 3분의 1로 줄어드는데 반해 2050년까지 인구는 93억 명으로 늘어나 향후 전 세계 인구의 20 %가 심각한 물 부족현상을 겪을 것으로 예상되고 있다. 물 발자국은 사람이 직접 마시고 씻는데 사용한 물에서 음식이나 제품을 만드는데 소요되는 가상수(virtual water, 눈에 보이지 않는 물)를 합친 총량으로 측정한다. 가상수는 ‘농산물 생산에 사용되고 있는 물’로 정의 할 수 있으며 물발자국은 ‘가상수’개념을 확장한 것이다. 이 개념은 선진국과 저개발국 사이의 물 사용의 불균형을 해소하고 전 세계 물 사용량을 조절하기 위해 도입되었다. 물 발자국의 개념은 네덜란드 Twente 대학의 수자원 관리학 교수 Arjen Hoekstra와 UNESCO-IHE Water Institute에서 근무하면서 Water Footprint Network의 공동 창립자이자 과학 감독으로 2002년에 만들어졌다. Hoekstra와 Hung은 2002년에 ‘가상수 무역에 관한 국제 전문가회의’에서 국제 농산물 무역을 가상수 이론과 접목시켜 국가간 지역간 국제 가상수 교역에 대한 추세를 분석하고 ‘물발자국’이란 새로운 개념을 소개하였으며 개인이나 집단, 지역 등이 소비하는 재화와 서비스를 생산하는데 필요한 물의 총량으로 정의하였다(Hoekstra et al., 2011).

#### 1.2.2 배수공의 물 소비량 선행연구

배수공법은 완공된 시설에서 빗물을 빼내거나 지하수위 저하공법을 포함한 공사 중의 배수 전체를 일컫는 공법을 말한다. 배수의 목적은 시공단계에서는 작업능률을 높이고 붕괴사고를 막으려는 것이고, 유지 단계에서는 도로의 경우 물을 잘 빠지게 하여 안전한 교통을 돕고, 철도의 경우 노반 지지력을 증대시키고 사면을 안정시키는 것이다.

배수공의 환경평가와 관련된 연구는 주로 전과정평가(life cycle assessment, LCA)에 대한 연구하고 있다. 전과정평가는 주로 에너지사용량과 탄소배출량을 조사하는 탄소발자국(carbon footprint)에 대해 분석하였다. 물 사용량 측정에 관한 연구는 주로 농업에 관련되어있다. 이는 건축자재의 물 사용량 관련 자료가 미비하기에 도로교량의 배수공에 관한 국내 환경영향 및 물발자국에 대한 분석이 부재한 실정이다.

## 2. 연구 범위 및 방법

### 2.1 연구 범위

본 연구의 범위는 사회기반시설 중 도로교량을 건설하는 인천

강화도 일대의 00국도(총 연장 : 4.03 km)를 대상으로 하였다. 다른 단계의 정보가 부족한 관계로 배수공의 원료채취단계, 운반단계 및 제작단계와 배수공의 공법별(측구공, 맹암거, 집수정공, 다이 크 및 집수거, 배수로, 황배수관공, 종배수관공, 배수관날개벽, 암거공, 암거날개벽, 수로보호공, 수로이설공, 철근콘크리트 개거, 문비 등 14개)에 대해 WFN (Water Footprint Network)의 Water Footprint Manual 2011에서 제시한 방법을 사용하여 물소모량을 산정하고자 물발자국 평가를 실시하였다.

## 2.2 연구 방법

본 연구에서는 인천 강화도 일대의 00국도를 대상으로 필요한 데이터베이스가 있는 주요 자재에 대해 자재의 무게와 물소모계수를 수집하였으며 Fig. 1과 같이 물발자국 산정 프로세스를 제안하였다.

본 연구의 산정 방법은 물 발자국 산정은 WFN (Water Footprint Network)의 Water Footprint Manual 2011에서 제시한 방법을 사용하였다(Hoekstra et al., 2011).

채취단계에서 전체 원료 또는 에너지별의 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 는 제품에 사용된  $i$ 원료/에너지별의 수량  $f_i$ 와 물소모계수  $E_{fi}$ 를 곱하여 산정하였다. 운반단계에서 전체 원료 또는 에너지를 현장에 운반과정 중 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 는 운반하는 전체 원료/에너지별의 수량  $f_i$ 와 수송모드의 물소모계수  $E_{fi}$ 를 곱하여 산정하였다. 제작단계에서 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 는 사용할 때 사용된  $i$ 에너지별의 수량  $f_i$ 와 물소모계수  $E_{fi}$ 를 곱하여 산정하였다. 각 단계별의 물 소모량 산정식은 Eq. (1)로 나타냈다.

$$W_{proc}[i] = f_i \times E_{fi} \quad (1)$$

채취단계의 물 발자국은 전체 원료 또는 에너지별의 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 과 지역별 수자원의 특성값을 곱한 값을 합하여 산정된 값을 공중별 생산길이  $P_j$ 로 나누어 산정하였다. 운반단계의 물 발자국은 전체 원료 또는 에너지를 현장에 운반과정 중 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 과 지역별 수자원의 특성값을 곱한 값을 합하여 산정된

값을 수송거리  $P_j$ 로 나누어 산정하였다. 제작단계의 물 발자국은 시공할 때 사용된 에너지별의 물 소모량  $W_{proc}[i]$ 과 지역별 수자원의 특성값을 곱한 값을 합하여 산정된 값을 공중별 생산길이  $P_j$ 로 나누어 산정하였다. 각 단계별의 물 발자국 산정식은 Eq. (2)로 나타냈으며, 이는 환경성적표 작성지침(EPD, 2017)을 참조하였다.

$$WF_{j-material,energy(transportation)} = \frac{\sum_i (W_{proc}[i] \times IWCF_c)}{P_j} \quad (2)$$

$WF_{j-material,energy(transportation)}$ :  $j$ 제품에 들어가는  $i$ 원료·에너지 생산에 따른 소모된 물사용량 또는  $j$ 제품 수송에 따른 물 사용량

$W_{proc}[i]$ :  $j$ 제품 제조할 때 사용되는  $i$ 원료·에너지의 물 소모량 또는 현장에 운반과정 중 물 소모량

$P_j$ :  $j$ 제품 연간 생산량 또는 생산대수

$IWCF_c$ :  $c$ 지역(또는국가) 수자원의 수량 및 수질의 특성을 나타내는 값

최종적인 물 발자국  $WF$ 는 채취단계, 운반단계 및 제작단계에 투입된 총 물의 양  $W_{proc}[p]$ 을 총 생산량(Material production, Unit: m)으로 나누어 산정되며 그 공식은 Eq. (3)과 같다.

$$WF = \frac{WF_{proc}[p]}{MP_{Unit : M}} \quad (3)$$

본 연구의 대상은 도로교량 사례 중에 건설된 인천 강화도 일대의 00국도의 배수공을 대상으로 배수공을 건설하기 위한 도로교량 4.03 km (4,030 m)을 가정하여 필요한 물 사용량을 구하였다. 그리고 공업용수지수(IWCFc)는 9.56E-01을 설정하였고 배수공에 투입되는 전체 자재는 Table 1과 같으며 자재별 물소모계수 데이터베이스는 한국환경산업기술원의 자료를 참조하였다.

제품의 물발자국 평가는 제품, 공정 혹은 조직에 의해 사용되거나 영향을 받은 물과 관련된 투입물, 산출물 그리고 잠재적인 환경영향에 대한 종합과 평가로 정의하고 있다. 또한 제품의 물발자국 평가의 구성은 LCA (life cycle assessment) 구성요소와 유사하다(ISO 14046, 2014).

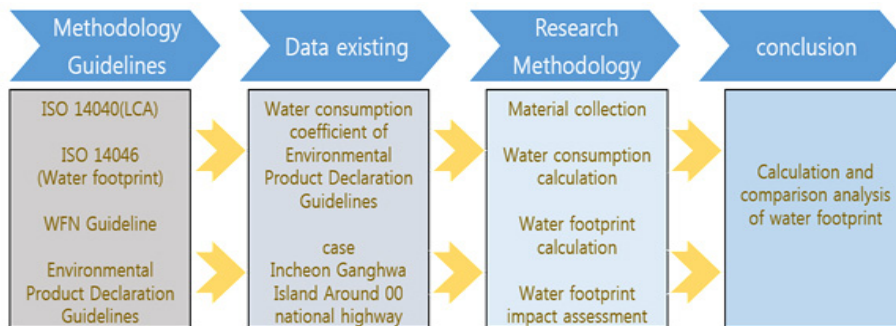


Fig. 1. Process of Study

### 3. 물발자국 선정

인천 강화도 일대의 00국도에서 배수공은 45개의 자재로 이루어져 있지만 국내에 구축된 물소모계수 데이터베이스가 미흡한 관계로 Table 1과 같이 배수공에는 31개만 적용하였다.

적용하는 배수공의 데이터는 전체 데이터에서 68.89 %를 차지 하였다.

각 공정의 물 사용량의 합은 각 공정에서 제품에 사용된 물질의 무게와 물 발자국 지수를 곱한 간접수와 직접수를 합하여 선정한다. 최종적인 물발자국은 자재 생산에 투입된 총 물의 양을 총 생산량으로

Table 1. Water Consumption Coefficient and Water Consumption Calculation Result of Drainage Materials (Environmental Product Declaration for Certification, 2017)

Material name	Quantity	Water consumption coefficient	unit	Water consumption (L)
	$f_i$	$E_{fi}$		$W_{proc}[i]$
Brown Asphalt	32113.2 kg	7.56E-01	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.43E+07
Rebar	1133014kg	1.90E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.15E+07
Remicon	25084.7 m <sup>3</sup>	5.44E-01	tonH <sub>2</sub> Oeq./m <sup>3</sup>	1.36E+07
V.R Tube	485.2 m <sup>3</sup>	5.44E-01	tonH <sub>2</sub> Oeq./m <sup>3</sup>	2.64E+05
Plywood	46393.8 kg	6.47E-04	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.57E+05
Bolt	1624.9 kg	1.90E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.49E+05
Elastic Sealant	752.7 kg	8.59E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.29E+05
Cement	138486 kg	1.17E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.62E+05
Concrete Curing Agent	2765.4 kg	3.58E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	9.90E+04
Backup Rod	571.2 kg	5.20E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	8.61E+04
Ordinary Wire	2552.5 kg	1.90E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	4.85E+04
High Strength Polyethylene Tubes	47921.1 kg	5.20E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	3.09E+04
Centrifugal Reinforced Concrete Pipe	473.3 m <sup>3</sup>	5.44E-01	tonH <sub>2</sub> Oeq./m <sup>3</sup>	3.00E+04
PVC Index	2974.6 kg	4.65E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.38E+04
Sealant	1586.4 kg	8.59E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.36E+04
Vinyl	3681.6 kg	2.96E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.09E+04
Dowel Bar	12054.4 kg	1.90E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	6.47E+03
Drain Board	569.3 kg	9.55E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	5.44E+03
Unrefined Grout	133125.7 kg	6.47E-04	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.97E+03
Diesel	60273.4 kg	4.57E-05	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.75E+03
Mixed Aggregate	16388.7 m <sup>3</sup>	1.53E-04	tonH <sub>2</sub> Oeq./m <sup>3</sup>	2.51E+03
Glue	173.5 kg	8.59E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.49E+03
Water Swelling Rubber Index Material	438.9 kg	1.39E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.09E+03
Prima	126.1 kg	8.59E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.08E+03
Heavy Oil	1346.5 kg	4.80E-04	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	6.46E+02
Form Oil	126.9 kg	8.59E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	6.10E+02
Peeling Paint	18.2 kg	2.28E-02	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	4.15E+02
Gasoline	3839.5 kg	7.51E-05	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	2.88E+02
Polyethylene Foam Insulation	29.9 kg	5.88E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.76E+02
Sand	5.0 m <sup>3</sup>	1.71E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./m <sup>3</sup>	8.53E+00
Hose	0.246 kg	4.65E-03	tonH <sub>2</sub> Oeq./kg	1.14E+00
Application rate of LCI DB			68.89 %	
Not application rate of LCI DB			31.11 %	

Table 2. Sample of Water Footprint Calculation by Material

Material name	Quantity	Water consumption coefficient	Water consumption	IWCFc	Total length	Water footprint
	$f_i$	$E_{fi}$	$W_{proc}[i]$	$IWCF_c$	$P_j$	$WF_j$
Diesel	60,273.4 kg	4.57 E-05 ton H <sub>2</sub> Oeq./kg	2.75 E + 03 L	9.56 E-01	4,030 m	6.53 E-01 LH <sub>2</sub> Oeq/m

나누어 산정된다. 계산과정은 Table 2와 같다. 자재의 물소모계수 단위의 분모와 자재의 단위를 동일하게 환산해야 한다. 자재의 단위는 kg과 m<sup>3</sup>, 물소모계수는 tonH<sub>2</sub>Oeq./kg과 tonH<sub>2</sub>Oeq./m<sup>3</sup>, 물 소모량은 L, 물발자국은 LH<sub>2</sub>Oeq/m와 LH<sub>2</sub>Oeq/ton·km로 설정하였다. 각각의 단위는 m와 ton·km가 소모된 물의 양을 의미하다.

자재별의 물 발자국을 산정하려면 자재 수량의 단위를 동일하게 환산해야 한다. 사례 프로젝트의 내역서에 명시된 경유의 수량은 단위가 L로 표시되어 있다. 본 연구에 필요한 단위가 kg이기 때문에 L단위를 kg으로 환산해야 한다. 내역서상의 1L = 0.83 kg에 해당하므로 경유 수량에 환산계수 0.83을 곱하여 환산한다. 경유 환산수량  $f_i = 72,618.53 \text{ L} \times 0.83 = 60,273.4 \text{ kg}$ .

적용하는 배수공의 데이터를 수집 후 자재별 단위를 환산하여 물소모량 계수와 곱하여 Table 1과 같이 자재별 물 소모량을 산정하였다. 자재별 물 발자국 산정과정은 다음과 같다.

경유의 물소모계수  $E_{fi}$ 는 부록: 물소모계수 (I) 원료 및 에너지 생산 ‘경유’ 부분을 보면 4.57E-05 tonH<sub>2</sub>Oeq./kg이다.

$$\begin{aligned} W_{proc}[\text{경유}] &= f_i \times E_{fi} \\ &= 60,273.4 \text{ kg} \times 4.57\text{E-}05 \text{ tonH}_2\text{Oeq./kg} \\ &= 2.75 \text{ ton} \end{aligned}$$

연구에서 물 소모량의 단위가 L이기 때문에 물 소모량을 계산하는 값은 1,000을 곱하여 사용한다.

따라서 연구에서 적용한 값은 2.75 ton × 1000 = 2.75E+03 L이다.

$IWCF_c$  는 환경성적표지 인증안내서에서 물 특성화인자 참조 (공업용수/상수 취수원 수역IWCFc: 9.56E-01).

$$\begin{aligned} WF_{\text{경유}} &= (W_{proc}[\text{경유}] \times IWCF_c) \div P_j \\ &= 2.75\text{E+}03 \times 9.56\text{E-}01 \div 4,030 \\ &= 6.53\text{E-}01 \text{ LH}_2\text{Oeq/m이다.} \end{aligned}$$

Table 1 산정 결과는 Fig. 2와 같으며 배수공의 자재별 중에서는 브라운 아스팔트가 2.43E+07L, 철근이 2.15E+07L, 레미콘이 1.36E+07L, V.R 관이 2.64E+05L, 철못이 2.49E+05L, 탄성실란트가 2.29E+05L, 시멘트가 1.62E+05L의 물 소모량을 순서대로 나타냈다.

배수공법별의 자재를 수집한 후에 WFN (Water Footprint Network)의 Water Footprint Manual 2011에서 제시한 방법을 사용하여 Table 3과 같이 계산하였으며, 공법별의 물발자국 산정 표본에 따라 배수공법별의 물 소모량과 물발자국은 Table 4와 같은 결과가 나타났으며, 이는 직관적으로 순서대로 볼 수 있다.

Table 3에서 공법별의 물 발자국을 산정하면 Table 1에 있는  $WF_{\text{경유}}$  과 같이 먼저 자재별의 물 발자국을 산정한 후에,

$$\begin{aligned} WF_{\text{평균배수관공}} &= WF_{\text{경유}} + WF_{\text{시멘트}} + WF_{\text{모래}} + WF_{\text{레미콘}} + \\ &WF_{\text{V.R관}} + WF_{\text{원심력철근콘크리트관}} \\ &= (4.37\text{E-}02)+(5.65\text{E-}02)+(1.19\text{E-}04) \\ &+(2.82\text{E+}02)+(6.26\text{E+}01)+(1.09\text{E+}01) \\ &= 3.56\text{E+}02 \text{ LH}_2\text{Oeq/m이다.} \end{aligned}$$

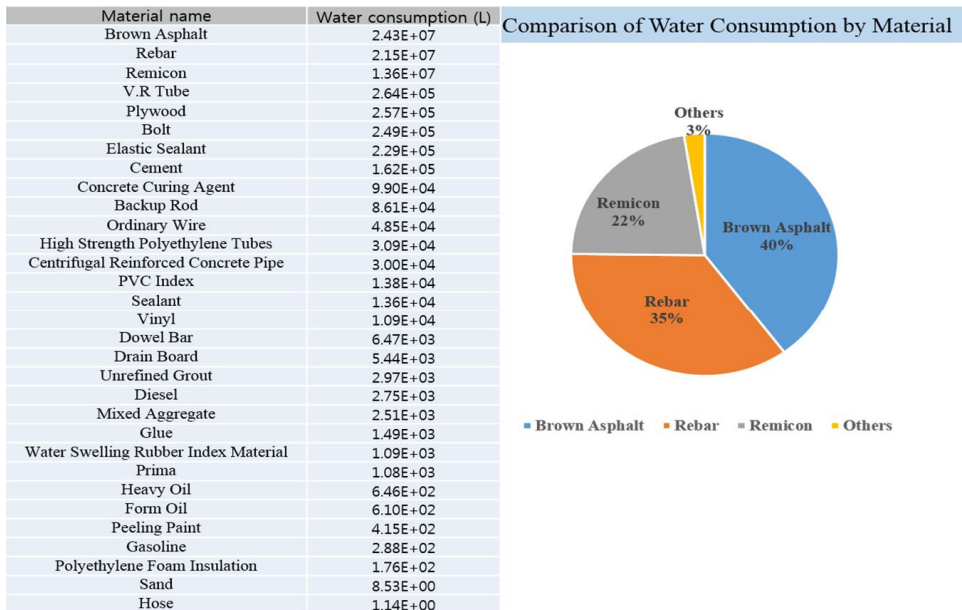


Fig. 2. Analysis of Water Consumption of Drainage Materials

Table 3. Specimen of Water Footprint Calculation by Each Drainage

Drainage name	Material name	Water consumption	IWCFc	Total length	Water footprint (L H <sub>2</sub> O eq/m)	Total water footprint (L H <sub>2</sub> O eq/m)
Lateral drainage	Centrifugal Reinforced Concrete Pipe	4.59E+04L	9.56E-01	4030 m	1.09E+01	3.56E+02
	Cement	2.38E+02L	9.56E-01	4030 m	5.65E-02	
	Sand	5.02E-01L	9.56E-01	4030 m	1.19E-04	
	Remicon	1.19E+06L	9.56E-01	4030 m	2.82E+02	
	Diesel	1.84E+02L	9.56E-01	4030 m	4.37E-02	
	V.R tube	2.64E+05L	9.56E-01	4030 m	6.26E+01	

Table 4. Water Consumption and Water Footprint Calculation Results by Each Drainage

Drainage works	Total water consumption (L)	Water footprint (LH <sub>2</sub> Oeq/m)	ranking
Culvert	3.87E+07	9.18E+03	1
Side ditch	7.31E+06	1.73E+03	2
Culvert wing wall	5.87E+06	1.39E+03	3
Reinforced concrete open channel	4.12E+06	9.76E+02	4
Drainage	1.59E+06	3.78E+02	5
Lateral drainage	1.50E+06	3.56E+02	6
Manhole	4.30E+05	1.02E+02	7
Drainage wing wall	3.41E+05	8.08E+01	8
Conduit	2.49E+05	5.92E+01	9
Longitudinal drainage	2.41E+05	5.72E+01	10
Dyke and manhole	2.38E+05	5.64E+01	11
Waterway protection	6.47E+04	1.53E+01	12
Waterway transfer	2.96E+04	7.02E+00	13
total	6.07E+07	1.44E+04	

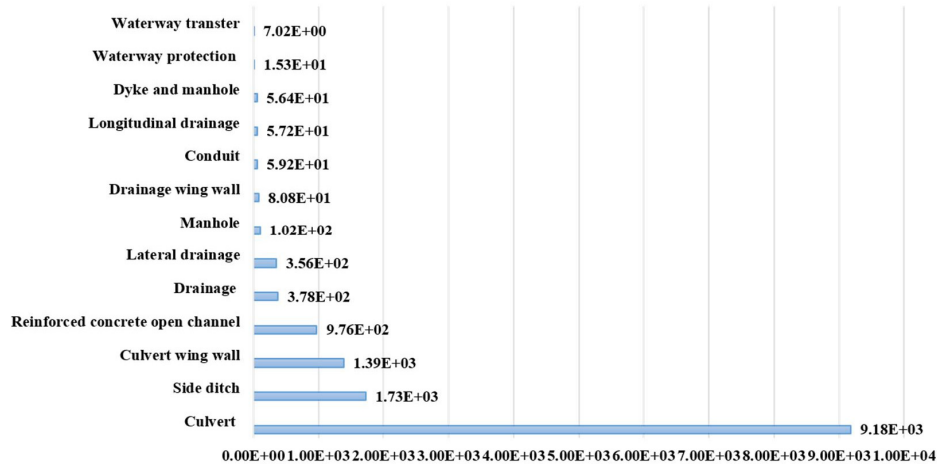


Fig. 3. Comparison of the Water Footprint Results Each Drainage

Table 4를 살펴보면 Fig. 3 중에서 배수공법별은 암거공이 9.18E+03 LH<sub>2</sub>Oeq/m, 측구공이 1.73E+03LH<sub>2</sub>Oeq/m, 암거날개벽이 1.39E+03LH<sub>2</sub>Oeq/m, 철근콘크리트 개거이 9.77E+02LH<sub>2</sub>Oeq/m,

배수료가 3.77E+02LH<sub>2</sub>Oeq/m, 횡배수관공이 3.56E+02LH<sub>2</sub>Oeq/m의 순서대로 나타났다.

도로교량 사례의 전체 배수공의 물 소모량과 물발자국을 산정한

**Table 5. Total Water Consumption and Water Footprint Calculation Result**

Totality drainage works	Total water consumption (L)	Total water footprint	unit
Material collection stage	6.10E+07	1.45E+04	LH <sub>2</sub> Oeq/m
Transportation stage	3.61E+05	8.56E+01	LH <sub>2</sub> Oeq/ton·km
Process stage	3.69E+03	8.75E-01	LH <sub>2</sub> Oeq/m

경우는 Table 5와 같으며 채취단계 물 사용량의 합은 자재별과 에너지별의 무게와 물소모계수를 곱한 간접수를 합하여 산정해서 지역별의 특성 값을 곱한 결과를 도로교량의 총 길이로 나누어 산정하여 물발자국을 나타냈다. 운반단계 물 사용량의 합은 자재별의 무게와 수송 방법별의 물소모계수를 곱한 간접수를 합하여 산정해서 지역별의 특성 값을 곱한 결과를 수송 거리로 나누어 산정하여 물발자국을 나타냈다. 제작단계 물 사용량의 합은 공정할 때 필요한 에너지별의 무게와 에너지별의 물소모계수를 곱한 간접수를 합하여 산정해서 지역별의 특성값을 곱한 결과를 도로교량의 총 길이로 나누어 산정하여 물발자국을 나타냈다. 본 연구를 통해 산정된 배수공 전체 단계의 물 소모량과 물발자국은 Table 5와 같으며 산정된 값들은 채취단계, 운반단계, 제작단계 순으로 나타냈다.

#### 4. 결론

오늘날 가뭄, 폭염, 홍수, 집중 호우 등 기후변화로 인한 자연재해가 빈번하게 발생하고 있다. 많은 자재와 에너지가 소비되는 사회기반 시설은 이산화탄소와 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있지만 물 소모량과 관련된 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 기후변화 대응과 관련하여 물 소모량의 중요성이 높아진 사회의 요구에 따라 사회기반시설 설계 시 참고할 수 있는 기초자료 제공을 목적으로 제품의 물 소모량 및 물 발자국을 산정하였다. 본 연구에서는 도로교량의 배수공을 대상으로 주요 공법별 원단위 물 사용량 추정 모델을 개발하였다. 공중에 투입되는 자원의 물소모량 분석은 Water Footprint Manual과 환경성적표지 인증안내서에서 제시한 방법을 활용하였다. 물 소모량을 원료채취단계, 운반단계, 제작단계 까지 분석 및 DB를 구축하고 각 공정에 투입된 자재의 물 발자국을 산정하였다.

물발자국 산정 결과 배수공의 자재 중 브라운 아스팔트, 철근, 레미콘이 전체 97 %를 차지하였다. 배수공법별은 암거공, 측구공, 암거날개벽, 철근콘크리트 개거가 전체 92.2 %를 차지하였다. 배수공 전체 단계별 산정된 물 소모량과 물발자국은 채취단계, 운반단계, 제작단계 순으로 나타냈다.

본 연구에서 산정된 배수공 전체 자재나 배수공법별의 물발자국

은 농업 분야와 건설업 분야 기초 자료로써 활용될 수 있다. 분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 추후 국외의 데이터베이스를 더 찾아서 지속적인 검토 및 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다만, 하나의 프로젝트만을 대상으로 분석한 결과이므로 일반화하기에는 다소 무리가 있다. 많은 자재가 투입되는 건설업의 경우, 물발자국을 산정한다면 수자원을 보호 할 수 있는 새로운 친환경 의사 결정 기준을 마련 할 수 있다고 생각된다. 현재 물 발자국은 기본적으로 농업에서 활용하여 건설 분야 자재의 데이터베이스가 부족한 상황이라 정밀하고 고도화된 분석이 어렵다는 결론을 얻었다. 현재 이 연구는 기초연구 단계이며, 주어진 데이터베이스 범위 내에서 배수공의 물 소모량 정보를 제공한 것에 의의가 있음으로 판단하였다. 추후 보다 다양한 프로젝트를 대상으로 분석할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1A2B6009111).

본 논문은 2019 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

#### References

Chapagain, A. K. (2007). "The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands." *Ecological Economics*, Vol. 64, No. 1, pp. 109-118.

Environmental Product Declaration for Certification (EPD) (2017). *Guideline for environmental product declaration certification*.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. and Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual : Setting the global standard*, Washington, DC : Earthscan (in Columbia).

Hwang, Y. W. (2000). "The need for lca for comprehensive environmental load assessment of the construction industry." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 48, No. 1, pp. 13-18 (in Korean).

ISO 14046 (2014). *ISO 14046 Environmental management-water footprint-principles, Requirements and Guidelines*.

Kim, J. H., Tae, S. H., Kim, R. H. and Lee, J. G. (2015). "Fundamental research for the water footprint estimation of building materials." *Architectural Institute of Korea*, Vol. 35, No. 2. pp. 57-58 (in Korean).

Kim, Y. W. (2018). *Development and application of methodology for estimating water footprint in infrastructure: Focus on road and railway*, Ph.D. Thesis, Inha University, Incheon (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2015). *Water and future* (in Korean).