

# 인프라시설의 물발자국 산정방법론 개발 및 적용: 고속국도를 중심으로\*

## Application and Development of Methodology for Calculation of Water Footprint in Infrastructure: Focused on Expressway System

김영운 Kim Youngwoon\*\*, 황용우 Hwang Yongwoo\*\*\*, 이성유 Lee Seongyou\*\*\*\*

### Abstract

In this study, a water footprint methodology that reflects the characteristics of domestic water resources, was developed and calculated the water footprint for expressway system as an infrastructure. Water footprint characterization factors were developed for groundwater and surface water in six representative watersheds which are Han River Basin, Nakdong River Basin, Geum River Basin, Seomjin River Basin, Youngsan River Basin, and Jeju. Three different water footprint methodologies, Boulay's methodology, Korea Ministry of Environment methodology, this study methodology were compared in an actual construction case of expressway. As the results, the water footprint of 1 km and 4 lane expressway with Boulay and MOE methodology showed 58,804 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>Oeq, 42,036 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>Oeq, respectively throughout whole life cycle. However, 9,478 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>Oeq. of water footprint was calculated by using this study methodology. This difference is mainly due to a developed regional characterization factor, and its related water consumption coefficient of the construction materials.

Keywords: Water footprint, Expressway, Infrastructure, LCA, Water management

### I. 서론

알려진 바와 같이 국제인구행동연구소(Population Action International) 기준(PAI 2003)에 따르면 한국은 2003년 1인당 가용 수자원 기준, 물 스트레스 국가로 분류되었으며, OECD 환경 전망 보고서(OECD 2012)에서

도 OECD 국가 중 물 스트레스 비율이 40% 이상인 극심한 물 스트레스 국가로 분류되고 있다. 최근 많은 국가에서 수자원을 늘리기 위해 물 순환 정책을 추진하고 있지만, 실질적으로 국가 또는 지역의 수자원 가용성이나 양을 상세히 파악하기란 쉽지 않다. 물발자국(Water Footprint) 방법은 이러한 배경으로 수자원

\* 본 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(P0008421, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)임.

\*\* 인하대학교 대학원 글로벌산업환경융합전공 산학협력전담교수(제1저자) | Prof., Program in Global Industrial & Environmental Technology, Graduate School of Inha Univ. | Primary Author | mikey72@inha.ac.kr

\*\*\* 인하대학교 환경공학과 교수(교신저자) | Prof., Dept. of Environmental Engineering, Inha Univ. | Corresponding Author | hwangyw@inha.ac.kr

\*\*\*\* 인하대학교 대학원 글로벌산업환경융합전공 박사과정 | Ph.D. Candidate, Program in Global Industrial & Environmental Technology, Graduate School of Inha Univ. | 22192033@inha.edu

의 양적 질적 가치를 식별하는 방법으로 등장하였다.

물발자국은 Hoekstra and Hung(2002)이 소비자 또는 생산자가 직접 또는 간접적으로 사용하는 담수를 표시하는 방법으로 처음 제안하였다. 즉, 물발자국은 “하나의 제품이나 서비스 전 과정에 이용되는 물 사용량으로서, 제품이나 서비스를 생산하는 데 필요한 원재료인 직접수 사용량과 생산·유통·사용·폐기의 각 단계에서 투입되는 제품이나 서비스를 생산하는 데 필요한 간접수 사용량을 합산한 값”으로 정의된다. 이후, WFN(Water Footprint Network)에서는 2011년에 The Water Footprint Assessment Manual(이하 ‘WFN Guideline’)(Hoekstra, Chapagain, Aldaya and Mekonnen 2011)을 개발하여 보급하였으며, ISO(2014)에서도 전 과정 평가(Life Cycle Assessment: LCA)의 개념을 도입하여, 원료 취득, 생산, 유통 및 폐기에 사용되는 담수의 양을 산정하는 방법론으로 ISO 14046을 2014년에 제정하였다.

초기에는 농산물을 기반으로 물 소비량을 가상으로 산정하는 연구가 주를 이루었으나(Hoekstra, Chapagain, Aldaya and Mekonnen 2011), 이후 재료 및 제품 등으로 대상을 확대하고 있다(Arpke and Hutzler 2006, Cabeza, Rincon, Vilarino and Perez et al. 2014). 국내에서도 농업분야에서 작물 44개의 연간 물 가상 소비량을 산정하는 연구(유승환, 최진용, 김태곤, 임정빈 외 2009), 쌀 생산과 관련된 물 소비량을 산정하는 연구(김준범, 강현, 신상민 2013) 등이 진행되었으며, 공업 제품 분야에서도 세탁기의 전 과정에 사용되는 물의 양을 산정하는 연구 등이 수행되었다(김우람 2011).

이와 같이 현재 국내외에서 식품, 재료, 제품 등에 대해서는 다양한 물 발자국 연구가 수행되고 있지만, 본 연구의 대상인 도로 등의 대형 인프라 시설에 대한 연구 사례가 거의 없다. 인프라 시설은 그 규모 면에서, 그리고 건설되면 장기간 존속한다는 측면에서 물

발자국의 도입이 절실한 대상이기도 하다.

현재 국내의 연구는 대부분 환경부에서 개발한 방법론(이하 환경부 방법론)을 주로 이용하고 있지만, 이 방법론은 해외의 자료를 이용하여 계산인자를 산출하고 있어, 국내의 수자원 특정한 반영한 물발자국 영향평가방법론도 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 국내 수자원 특성을 반영한 물발자국 영향평가방법론을 개발하고, 개발한 물발자국 영향평가방법론과 기존의 국내외 방법론을 인프라 시설인 고속국도에 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다.

## II. 연구방법

물발자국에는 지표수, 지하수 등의 물의 형태, 수질과 수량 등이 고려되어야 하며 어떤 영향평가방법론을 선정하느냐가 매우 중요하다. ISO 14044와 ISO 14046에서 규정하고 있는 영향평가는 특성화 단계까지 수행하고, 정규화, 가중치부여단계는 필요에 따라 수행하는 것으로 규정하고 있다. 따라서 대부분의 물발자국 영향평가방법론도 특성화까지 개발되고 있다. 부영양화, 산성화 등 수질 측면의 물발자국 영향평가는 LCA(Life Cycle Assessment, ISO 14040)를 통해 수행되고 있어 본 연구에서는 수량 측면의 물발자국 영향평가방법론만 고려하였다.

수량 측면의 물발자국 영향평가방법론에는 크게 WTA(Withdrawal to Availability), CTA(Consumption to Availability), AMD(Availability Minus Demand)형태가 있다.

WTA 방법은 취수량을 기준으로 하며, AMD 방법은 사용가능한 물에서 물 수요를 뺀 양을 기준으로 하고, CTA 방법은 담수 사용량을 기준으로 동일 지역으로 배출되는 물의 양을 제외하고 평가한다. 이 세

가지 방법 중에서 담수의 투입량과 배출량을 모두 고려하여 물 사용량을 정량화하는 CTA 방법이 환경부 방법론에서 활용되고 있어, 본 연구에서도 CTA 방법을 기준으로 물발자국 영향평가방법론을 개발하였다.

본 연구의 절차는 다음과 같다. 우선 기존에 개발된 CTA 물발자국 영향평가방법론을 고찰하고, 본 연구의 비교 대상 물발자국 영향평가방법론을 선정하였다. 그리고 국내 기초자료를 바탕으로 신규 물발자국 영향평가방법론(이하 본 연구방법론)을 개발하였다. 이후 본 연구방법론과 기존의 국내외 CTA 물발자국 영향평가방법론을 고속국도를 대상으로 적용하여 물발자국 산정결과를 비교 분석하였다.

### III. 물발자국 산정방법론 개발

#### 1. 기존 물발자국 산정방법론 고찰

CTA 물발자국 영향평가방법론의 특징을 <Table 1>에 나타내었다(Hoekstra, Chapagain, Aldaya and Mekonnen 2011; Boulay, Bulle, Bayart and Deschenes et al. 2011; Berger, Ruud, Eisner and Bach et al. 2014; 환경부 2017). 물발자국은 특성화인자를 이용하여 산정한다. 특성화인자는 물발자국 영향평가 시 기본단위로 변환시키는 데 활용되는 인자로 특성화 모델에 따라 특성화인자가 다르다.

Table 1\_ Characteristics of Water Footprint Impact Assessment Methodologies

Variable	Hoekstra(2011)	Boulay(2011)	Berger(2014)	Korea Ministry of Env. (2017)
Characterization Factor (CF) of Water Footprint Impact Assessment	Availability - 20% of Availability  Consumption - Industrial Water : 5% of Industrial Water Intake - Tap Water : 5% of Tap Water Intake	Availability - Sum of 9 months  Consumption - Ground Water : Ratio of Consumption of Ground Water - Surface Water : Ratio of Consumption of Surface Water	Availability - Sum of Surface Water, Outflow of Ground Water and Stored Dam and Lake  Consumption - Water Consumption	Ground Water Surface Water Rain Water  Classification of Input and Output  Classification of Standardization on Pollution of Water Quality
Used Data	Monthly Data from FAO*	Annual Data from WaterGAP Model	Annual Data from WaterGAP2 Model	Almost Use of Boulay's Classification Factor
Characteristics	Focused on Agriculture and Food	Classification of 8 areas which are Water Quality and Status on Pollution of Water Quality each Country as Classification Factor	Difficulty on Calculation of Stored Dam and Lake	Classification of Input Water and Output Water as Classification Factor  Classification of Classification Factor each Area** which is "Clean Area", "Ga Area", "Na Area" and "Specific Area" as Output  Almost Use of Boulay's Classification Factor

Source: Hoekstra, Chapagain, Aldaya and Mekonnen 2011; Boulay, Bulle, Bayart and Deschenes et al. 2011; Berger, Ruud, Eisner and Bach et al. 2014; Ministry of Environment 2017.

Note: FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

\*\*Area: Area regulated in Table No. 13 of Enforcement Rule of Law on Water Quality and Aquatic Ecosystem.

Hoekstra는 농축산물을 중심으로 적용한 방법론으로 특성화인자는 공업용수와 생활용수로 구분하여 개발하였다. Boulay는 수질오염정도를 8단계로 구분하여 각 국가별 지하수, 지표수, 빗물에 대해 특성화인자를 개발하였다. Berger는 양적인 부분을 강조한 방법론으로 가용 수자원량에서 댐, 호소의 저장량을 산출하기는 어렵다는 단점이 있다. 국내 환경부에서 개발한 방법은 투입수와 배출수를 구분하였다는 특징이 있으나 대부분 Boulay 방법의 특성화인자를 이용하고 있다.

본 연구에서는 국내의 환경부 방법론을 개발할 때 활용한 Boulay 물발자국 영향평가방법(Boulay 방법론)과 국내에서 이용 중인 환경부 방법론을 비교 분석 대상으로 선정하였다.

## 2. 물발자국 영향평가방법론 개발

### 1) 기초자료 수집

본 연구의 특성화인자 개발에 적용한 산정식을 <식 1>과 <식 2>에 나타내었다.

지표수의 특성화인자  $WCF_{S_j}$ 는 지표수의 취수량  $W_{i,S}$ 를 가용 지표수량  $W_{a,S}$ 로 나누고, 소비계수  $C_j$ 를 곱하여 산정하였다. 같은 방식으로 지하수의 특성화인자  $WCF_{G_j}$ 도 지하수의 취수량  $W_{i,G}$ 를 가용 지하수량  $W_{a,G}$ 로 나누고, 소비계수  $C_j$ 를 곱하여 산정하였다. 여기에서  $C_j$ 는 <식 3>에 나타난 바와 같이 공업용수의 총 배출량  $IW_{e,Tj}$ 에서 제품에 포함된 물의 양과 증발량의 합인  $IW_{e,Oj}$ 를 제한 후,  $IW_{e,Tj}$ 로 나눈 값으로, 공업용수 배출량 중 동일권역이 아닌 타 권역으로 배출되는 값을 나타내는 계수이다. 그리고,  $C_j$ 는 지하수와 지표수를 동일하게 적용하였다.

$$WCF_{S_j} = \frac{W_{i,S_j} \times C_j}{W_{a,S_j}} \quad \text{<식 1>}$$

$WCF_{S_j}$  : Characterization Factor of Surface Water for Water Footprint in j Watershed

$W_{a,S_j}$  : Amount of Annual Available Surface Water in j Watershed ( $m^3/yr$ )

$W_{i,S_j}$  : Amount of Annual Surface Water Intake in j Watershed ( $m^3/yr$ )

$C_j$  : Consumption Coefficient of j Watershed, which is the Value Subtracted Product and Vapor among Total Emission of Industrial Water

$$WCF_{G_j} = \frac{W_{i,G_j} \times C_j}{W_{a,G_j}} \quad \text{<식 2>}$$

$WCF_{G_j}$  : Characterization Factor of Ground Water for Water Footprint in j Watershed

$W_{a,G_j}$  : Amount of Annual Available Ground Water in j Watershed ( $m^3/yr$ )

$W_{i,G_j}$  : Amount of Annual Ground Water Intake in j Watershed ( $m^3/yr$ )

$C_j$  : Consumption Coefficient of j Watershed

$$C_j = \frac{IW_{e,Tj} - IW_{e,Oj}}{IW_{e,Tj}} \quad \text{<식 3>}$$

$C_j$  : Consumption Coefficient of j Watershed

$IW_{e,Oj}$  : Sum of the Amount of Water included in Product and Evaporation among Amount of Industrial Water Emissions in j Watershed ( $m^3/yr$ )

$IW_{e,Tj}$  : Amount of Industrial Water Emissions in j Watershed ( $m^3/yr$ )

본 연구에서는 지표수와 지하수의 특성화인자 산정에 2016년, 2017년, 2018년의 3개년 평균자료를 이

용하였으며 <Table 2>에 나타내었다(환경부, 국립환경과학원 2018; 2019; 2020). 지표수와 지하수의 가용 수자원의 합  $W_{a,SGj}$ 는 국가수자원관리시스템(WAMIS)의 장기유출자료를 이용하였다. 지표수와 지하수의 취수량의 총합인  $W_{i,SGj}$ 는 WAMIS에서 제공하는 생활용수, 공업용수, 농업용수 이용량의 합으로 계산하였다. 가용 지하수량  $W_{a,Gj}$ 와 지하수 취수량  $W_{i,Gj}$ 는 국가지하수정보센터(GIMS)에서 제공하는 지하수개발 가능량과 지하수이용량을 이용하였다. 가용 지표수량인  $W_{a,Sj}$ 는 장기유출자료  $W_{a,SGj}$ 에서 가용 지하수량  $W_{a,Gj}$ 를 제한 수자원량이며, 지표수 취수량  $W_{i,Sj}$ 는

지하수 취수량  $W_{i,Gj}$ 을 뺀 수자원량이다. 수자원 소비를 나타내는 소비계수를 산정하기 위해 필요한  $IW_{e,Tj}$ 과  $IW_{e,Oj}$ 는 “산업폐수의 발생 및 처리(환경부, 국립환경과학원 2018—2020)”에서 공업용수 배출량자료를 이용하였다.

환경부 방법론에서는 우리나라를 1개의 물 권역으로 적용하고 있으나, 실재는 유역마다 수자원 가용량 및 소비특성이 다르므로 본 연구에서는 한강유역, 낙동강유역, 금강유역, 섬진강유역, 영산강유역, 제주도 등 6개 유역으로 구분하여 방법론을 개발하였다. <Table 3>에 2016년부터 2018년까지의 유역별 자료

**Table 2\_ Basic Data of Surface Water and Ground Water**

Variable		Reference
Amount of Annual Available Water	$W_{a,SGj}$	Average Long-term Outflow from WAMIS
Amount of Annual Water Intake	$W_{i,SGj}$	Average Usage of Agricultural Water, Industrial Water and Drinking Water from WAMIS
Amount of Annual Available Ground Water	$W_{a,Gj}$	Developable Ground Water from WAMIS
Amount of Annual Ground Water Intake	$W_{i,Gj}$	Average Usage of Ground Water from GIMS
Amount of Annual Available Surface Water	$W_{a,Sj}$	Amount of Annual Available Water ( $W_{a,SGj}$ ) - Amount of Annual Available Ground Water( $W_{a,Gj}$ )
Amount of Annual Surface Water Intake	$W_{i,Sj}$	Amount of Annual Water Intake ( $W_{i,SGj}$ ) - Amount of Annual Available Ground Water Intake ( $W_{i,Gj}$ )
Sum of the Amount of Water Included in Product and Evaporation among Amount of Industrial Water Emissions	$IW_{e,Oj}$	Average Emissions Status of Industrial Water from “Generation and Treatment of Industrial Wastewater”
Amount of Industrial Water Emissions	$IW_{e,Tj}$	Average Emissions Status of Industrial Water from “Generation and Treatment of Industrial Wastewater”

**Table 3\_ Basic Data of Each Watershed to Calculate Characterization Factor**

Variable	Amount of Water( $10^3 \text{ m}^3/\text{yr}$ )					
	Han River	Nakdong River	Geum River	Seomjin River	Youngsan River	Jejudo
$W_{a,SGj}$	24,633,698	12,997,624	6,407,265	3,488,842	2,110,818	2,164,289
$W_{i,SGj}$	4,362,936	4,755,102	2,366,548	974,312	1,360,379	480,614
$W_{a,Gj}$	4,951,711	3,584,247	2,091,918	1,075,612	555,150	730,400
$W_{i,Gj}$	886,920	882,408	819,096	273,891	354,274	230,571
$W_{a,Sj}$	19,681,987	9,413,376	4,315,348	2,413,330	1,555,669	1,433,889
$W_{i,Sj}$	3,476,016	3,873,694	1,547,453	700,422	1,006,105	250,043
$IW_{e,Tj}(10^3 \text{ m}^3/\text{d})$	7,019	5,046	2,380	2,673	1,197	35
$IW_{e,Oj}(10^3 \text{ m}^3/\text{d})$	5,970	4,132	1,451	31	1,109	26

Source: WAMIS 2021; GIMS 2021; Ministry of Environment and National Institute of Environmental Reserch 2018-2020.

를 이용하여 산정한 각각의 수자원량을 나타내었다.  $W_{a,SG}$ 은 한강유역이 가장 높고 영산강유역이 가장 낮았으며,  $W_{a,SG}$ 와  $W_{a,S}$ 는 한강유역이 가장 높고 제주도가 가장 낮게 나타났다. 또한  $W_{i,SG}$ ,  $W_{i,S}$ ,  $IW_{e,T}$ ,  $IW_{e,O}$  등도 유역별로 각각 다른 특성을 나타냈다.

## 2) 특성화인자 개발

<Table 4>는 <Table 3>에 나타낸 값을 이용하여 지표수와 지하수의 특성화인자를 산정한 결과이다.

먼저, 소비계수  $C_i$ 는 <식 3>에 나타낸 계산식을 이용하여, 공업용수 총 배출량에서 제품과 증발되는 공업용수배출량을 제한 후, 공업용수 총 배출량으로 나누어 산정하였다.

한강유역의 소비계수;

$$C_{Han\ River} = (7,019 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d} - 5,970 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}) \div 7,019 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d} = 0.149$$

다른 유역의 소비계수도 동일한 방법으로 산정하였다. 지하수의 특성화인자  $WCF_{G_i}$ 는 <식 1>에 나타낸 산식에 의해, 지하수취수량과 소비계수를 곱한 후, 가용지하수량으로 나누어서 산정하였다.

한강유역의 지하수 특성화인자;

$$WCF_{G_i, Han\ River} = (886,920 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr} \times 0.149) \div 4,951,711 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr} = 0.027$$

다른 유역의 지하수 특성화인자도 동일한 방법으로 산정하였다. 산정 결과, 섬진강유역이 가장 높게 나타났으며, 한강유역이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 주로 가용지하수량과 지하수취수량의 유역별 차이에 기인하고 있다.

지표수의 특성화인자  $WCF_{S_i}$ 는 <식 1>에 나타낸 산식에 의해, 지표수취수량과 소비계수를 곱한 후, 가용지표수량으로 나누어서 산정하였다.

한강유역의 지표수 특성화인자;

$$WCF_{S_i, Han\ River} = (3,476,016 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr} \times 0.149) \div 19,681,987 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{yr} = 0.026$$

다른 유역의 지표수 특성화인자도 동일한 방법으로 산정하였다. 산정 결과, 섬진강유역이 가장 높게 나타났으며, 한강유역이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 가용지표수량에 비해 지표수취수량이 다르기 때문에 발생하고 있다.

Table 4 \_ Characterization Factor Each Watershed

Variable	Han River	Nakdong River	Geum River	Seomjin River	Youngsan River	Jejudo
$IW_{e,T}(10^3 \text{ m}^3/\text{d})$	7,019	5,046	2,380	2,673	1,197	35
$IW_{e,O}(10^3 \text{ m}^3/\text{d})$	5,970	4,132	1,451	31	1,109	26
$C_i$	0.149	0.181	0.390	0.988	0.074	0.258
<b><math>WCF_{G_i}</math></b>	<b>0.027</b>	<b>0.045</b>	<b>0.153</b>	<b>0.252</b>	<b>0.047</b>	<b>0.081</b>
$W_{a,G_i}$	4,951,711	3,584,247	2,091,918	1,075,612	555,150	730,400
$W_{i,G_i}$	886,920	882,408	819,096	273,891	354,274	230,571
<b><math>WCF_{S_i}</math></b>	<b>0.026</b>	<b>0.075</b>	<b>0.140</b>	<b>0.287</b>	<b>0.048</b>	<b>0.045</b>
$W_{a,S_i}$	19,681,987	9,413,376	4,315,348	2,413,330	1,555,669	1,433,889
$W_{i,S_i}$	3,476,016	3,873,694	1,547,453	700,422	1,006,105	250,043

Note:  $C_i$ ,  $WCF_{G_i}$  and  $WCF_{S_i}$  were calculated by equation 1~3.

<Table 5>는 Boulay 방법론과 환경부 방법론, 본 연구방법론의 특징을 비교한 것이다. Boulay는 수질 오염정도를 8단계로 구분하여 지하수, 지표수, 빗물에 대해 특성화인자를 개발하였다.

한편, 국내 환경부 방법론은 Boulay 방법론의 특성화인자를 이용하였으나 투입수와 배출수를 구분한 것이 특징이다. 투입수에 대한 특성화인자는 공업용수, 상수 취수원 수역, 자체 수원은 빗물, 지하수, 지표수로 구분하였으며, 배출수는 청정지역, 가지역, 나지역, 특례지역으로 구분하였다. 그 외 대부분 Boulay 방법론에서 제시한 특성화인자를 채용하였다.

한편, 본 연구방법론은 환경부 방법론과 달리 특성화인자에서 지표수와 지하수를 국내 수자원의 특성을 반영한 6대 권역으로 구분하였다. 따라서 국내 전체

평균자료를 이용한 환경부 방법론과는 달리 지역의 특성을 반영할 수 있다는 특징을 가지고 있다.

그리고 물발자국 계산을 위해서는 자재나 에너지 등 각 투입물질에 대한 물소비계수가 필요하다. 물소비계수는 각 투입물질에 대해 기 구축되어 있는 전과정 목록분석 데이터베이스(Life Cycle Inventory Database: LCI DB)에 각 방법론의 특성화인자를 적용하여 산정하게 된다. 여기서 LCI DB는 각 나라별로 상황에 따라 달리 적용하기도 하나, 본 연구에서는 비교의 통일성을 위하여 세계에서 가장 널리 이용되고 있는 Ecoinvent® DB를 세 방법론에 공통으로 적용하였다.

세 방법론에 대해 특성화인자를 적용하여 산정한 물질의 물소비계수를 <Table 6>에 나타내었다.

Boulay 방법을 이용하여 물소비계수를 산정하는

**Table 5\_ Characteristics of CTA Water Footprint Impact Assessment Methodologies**

Variable	Boulay	MOE	Method of this Study
Characterization Factor	Classification of Ground Water, Surface Water and Rain Water Classification of 8 Areas which are Water Quality and Status on Pollution of Water Quality each Country as Classification Factor  CF of Surface Water : 5.10E-01 CF of Ground Water : 1.11E-02	Classification of Input Water and Output Water Classification of Input Water - Industrial Water and Drinking Water Intake Basin : CF is 9.56E-01 - Self Intake : Ground Water, Surface Water : CF is 9.56E-01 * Surface Water is followed with Classification of Output Water Classification of Output Water : - Clean Area, "Ga Area", "Na Area" and "Specific Area"* - CF : 6.50E-01	Classification of Ground Water and Surface Water  Classification of 6 Watersheds in Korea : Han River, Nakdong River, Geum River, Seomjin River, Youngsan River and Jeju-do

Note: \*Area Regulated in Table No. 13 of Enforcement Rule of Law on Water Quality and Aquatic Ecosystem.

**Table 6\_ Water Consumption Coefficient of High Density Polyethylene(HDPE) Production**

	Classification			Unit	LCI	Boulay		MOE		This Study	
						CF	Water Footprint	CF	Water Footprint	CF	Water Footprint
Input	Raw	Water, Cooling, Unspecified Natural Origin	In Water	m <sup>3</sup>	2.91E-02	5.10E-01	1.49E-02	9.56E-01	4.74E-04	7.50E-02	2.19E-03
	Raw	Water, Salt, Sole	In Water	m <sup>3</sup>	3.55E-07	5.10E-01	1.81E-07	9.56E-01	3.40E-07	7.50E-02	2.66E-08
	Raw	Water, Unspecified Natural Origin	In Water	m <sup>3</sup>	2.21E-03	5.10E-01	1.13E-03	9.56E-01	2.11E-03	7.50E-02	1.66E-04

(continued)

Table 6 \_ Water Consumption Coefficient of High Density Polyethylene(HDPE) Production (continued)

Classification				Unit	LCI	Boulay		MOE		This Study	
						CF	Water Footprint	CF	Water Footprint	CF	Water Footprint
Input	Raw	Water, Salt, Ocean	In Water	m³	1.31E-04	-	-	9.56E-01	1.26E-04	-	-
	Raw	Water, Well, in Ground	In Water	m³	1.23E-04	1.11E-02	1.37E-06	1.00E+00	1.23E-04	4.50E-02	5.52E-06
	Raw	Water, River	In Water	m³	9.79E-04	5.10E-01	5.00E-04	9.56E-01	9.37E-04	7.50E-02	7.34E-05
	Raw	Water, Lake	In Water	m³	2.31E-07	5.10E-01	1.18E-07	9.56E-01	2.21E-07	7.50E-02	1.73E-08
	Raw	Water, Turbine Use, Unspecified Natural Origin	In Water	m³	1.59E-02	5.10E-01	8.11E-03	-	-	7.50E-02	1.19E-03
	Total				m³	4.85E-02		2.46E-02		3.77E-03	
Output	Air	Water	Unspecified	m³	1.20E-02	-	-	6.59E-01	2.27E-03	-	-
	Air	Water	Non-urban Air or from High Stacks	m³	7.78E-07	-	-			-	-
	Air	Water	Urban Air Close to Ground	m³	1.08E-06	-	-			-	-
	Air	Water	Lower Stratosphere + Upper Troposphere	m³	5.67E-15	-	-			-	-
	Water	Water	Unspecified	m³	3.65E-02	9.56E-01	1.86E-02			7.50E-02	2.74E-03
	Water	Water	Ground Water	m³	4.93E-07	-	-			4.50E-02	2.22E-08
	Water	Water	Surface Water	m³	3.39E-06	9.56E-01	1.73E-06			7.50E-02	2.54E-07
	Water	Water	Ocean	m³	2.58E-08	-	-			-	-
	Total				m³	4.85E-02				1.86E-02	
Input - Output				m³	1.12E-05		5.98E-03		1.50E-03		8.84E-03

경우에는 투입수와 배출수가 동일권역으로 가정하고, 투입수에서 해수는 제외하였으며, 배출수에서 동일권역이 아닌 대기로 배출되는 물과 해수, 특정되지 않은 지하수는 제외하고, <Table 5>에 제시한 특성화인자를 적용하였다. 이를 고려하여 산정한 HDPE 1kg을 생산할 경우의 물소비계수는 Input이 2.46E-02m³ H₂Oeq.이고, Output이 1.86E-02m³ H₂Oeq.로 Input에서 Output를 빼면 5.98E-03m³ H₂Oeq.로 나타났다.

환경부 방법을 이용하여 산정하는 경우에는 투입수와 배출수가 동일 권역으로 가정하고, 투입수에서 국내 LCI DB내 물의 양을 고려하여 Water, Turbine Use, Unspecified Natural Origin는 산정하지 않고, Water, Cooling, Unspecified Natural Origin은 1.17%만

적용하였다. 배출수는 국내 LCI DB를 적용하는 경우와 유사한 방법을 적용하여, 투입수 중 Water, Turbine Use, Unspecified Natural Origin은 제외하여 고려하였다. 투입수의 특성화인자 중 지표수의 경우는 <Table 5>에 나타난 공업용수 및 상수 취수원인 9.56E-01을 적용하였으며, 지하수는 1.00E+00을 적용하였다. 배출수는 <Table 5>에 나타난 청정지역, 가, 나 지역의 평균값인 6.59E-02를 적용하였다. 이를 고려하여 산정한 HDPE 1kg를 생산할 경우의 물소비계수는 Input이 3.77E-02m³ H₂Oeq.이며, Output은 2.27E-02m³ H₂Oeq.로 Input에서 Output을 빼면 1.50E-02m³ H₂Oeq.로 나타났다.

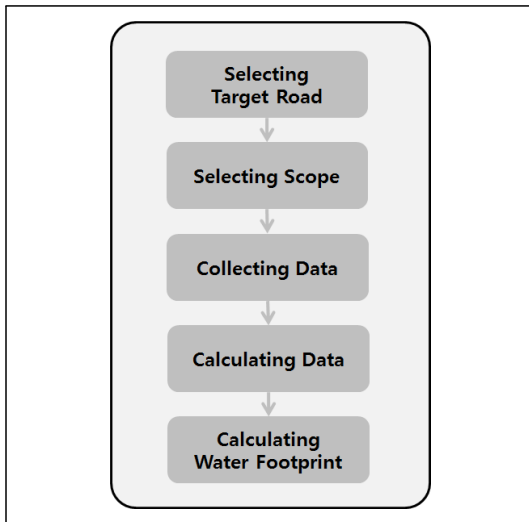
본 연구방법을 이용하여 물소비계수를 산정하는

경우에는 투입수와 배출수가 동일권역으로 가정하고, 투입수에서 해수는 제외하였으며, 배출수에서 동일권역이 아닌 대기로 배출되는 물과 해수는 제외하고, 지표수와 지하수에 대해 <Table 4>에 제시한 낙동강 유역의 특성화인자를 적용하였다. 이를 고려하여 산정한 HDPE 1kg을 생산할 경우의 물소비계수는 Input이  $3.62E-03m^3H_2O_{eq}$ 이고, Output이  $2.74E-03m^3H_2O_{eq}$ 로 Input에서 Output를 빼면  $8.84E-04m^3H_2O_{eq}$ 로 나타났다.

#### IV. 고속국도의 물발자국 산정 방법

본 연구에서는 인프라 시설의 대상으로 고속국도를 선정하였으며 <Figure 1>에 나타난 범위와 절차에 따라 물발자국을 산정하였다.

Figure 1 \_ Assessment Process of Water Footprint in Expressway System



#### 1. 대상 설정과 분석 조건

본 연구에서는 교량과 터널이 포함되어 있는 부산외곽순환고속도로 O공구 <Table 7>을 대상으로 선정하였고 기능단위는 ‘왕복 4차로 1km’로 정하였다.

평가의 시간적 범위는 법인세법 시행규칙 별표 5의 건축물 등의 기준내용연수 및 내용연수 자료에 의거하여 20년으로 하였고, 영향평가는 CTA 방법으로 특성화단계까지 고려하였다.

#### 2. 시스템 경계 설정

본 연구에서는 <Figure 2>에 나타난 바와 같이 고속국도는 한 번 건설되면 지속적으로 유지된다는 측면에서 폐기단계를 제외한 건설, 운영 및 유지보수단계까지를 분석 범위로 정하였다.

Figure 2 \_ System Boundary of Express Infrastructure

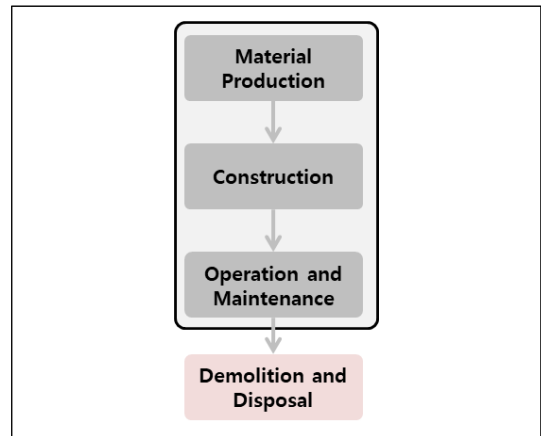


Table 7 \_ Case of Expressway in this Study

Expressway	Distance(km)		
	Total	Tunnel	Bridge
No X. Construction Works Area of Pusan's Suburb Circulation Expressway	4.06	1.32	1.41

Source: KEC 2010.

### 3. 데이터 수집

#### 1) 자재 생산단계

자재 생산단계에서는 한국도로공사(2015; 2016)에서 제공받은 실시설계내역서, 일위대가(호표, 단가 산출), 적산 프로그램 파일, 주요 자재별 집계표, 단가산출 총괄표(노임, 재료비, 경비 포함), 내역서 총괄표, 원가 계산서 등을 사용되는 자재의 양을 파악하였다.

#### 2) 시공단계

시공단계에서는 사용되는 건설장비에 대해서 연료, 에너지 등 투입량을 파악하였으며, 한국도로공사에서 제공받은 자재생산단계 자료 외에 기계경비총괄표, 건설장비사용내역서 등을 사용하였다.

#### 3) 운영단계

운영단계에서는 관리시설 운영에 에너지, 유틸리티 등이 사용되며, 기존에 운영되고 있는 타 구간의 전력 고지서, 연료 사용 청구서, 연료 구매내역, 수도사용 청구서, 운영기간 등의 데이터를 수집하여 사용하였다(한국도로공사 2015; 2016).

#### 4) 유지보수단계

유지보수단계에서는 고속국도를 유지하기 위해 투입되는 자재량과 사용되는 건설장비의 에너지소비량 등의 파악이 필요하다. 본 연구에서는 국토교통부의 도로보수현황의 포장 보수실적, 건설공사 표준품셈 등을 이용하여 산정하였다(국토교통부 2017a; 2017b).

### 4. 단계별 투입 데이터 산정

#### 1) 자재 생산단계

<식 4>에 나타난 산식에 의해 각 공종별로 사용되는 자재량을 산정하였다. 공종별 자재사용량은 공종별 작업량에 일위대가의 자재 투입량을 곱하여 산정하였다.

$$U_{material(production),j,k} = Q_k \times Q_{U_{j,k}} \quad \text{<식 4>}$$

$U_{material(production),j,k}$ : Amount of Used Material and Consumed Energy of j in the Works of k (ton, m<sup>3</sup>, kWh)

$Q_k$ : Quantity of Works of k (Unit)

$Q_{U_{j,k}}$ : Used Material and Consumed Energy of j on Breakdown Cost in the Works of k (Ton/Unit, m<sup>3</sup>/Unit, kWh/Unit and etc)

#### 2) 시공단계

건설장비의 에너지소비량은 <식 5>, <식 6>의 산식을 이용하여 각 공종별로 산정하였다. 즉, 건설장비에 에너지소비량은 작업량과 단위 작업량당 건설장비 사용시간, 건설장비의 연비를 곱하여 산정하거나, 작업량과 연비를 곱한 후, 시간당 작업량을 나누어 산정하였다.

$$U_{m,j,k} = Q_k \times \frac{1}{Q_{m,k}} \times F_{m,j} \quad \text{<식 5>}$$

$$U_{m,j,k} = Q_k \times T_{m,Q_k} \times F_{m,j} \quad \text{<식 6>}$$

$U_{m,j,k}$ : Amount of Consumed Energy of j by using Construction Equipment of m in the Works of k (L, kWh)

Q: Quantity of Works of k (Unit)

Q<sub>m,k</sub>: Work Quantity per Hour by Using Construction Equipment of m in the Works of k (Unit/hr)

T<sub>m,Qk</sub>: Working Hour of Construction Equipment of m per Work Quantity in the Works of k (Unit/hr)

F<sub>m,j</sub>: Amount of Used Material and Consumed Energy of j per Hour by using Construction Equipment (L/hr)

### 3) 운영단계

고속국도 관리 및 운영에 사용되는 전기, 수도 등의 사용량은 전기, 수도 등의 자료를 이용하여 연간 사용량을 파악한 후, 설정한 운영기간을 곱하여 산정하였다.

### 4) 유지보수단계

고속국도를 유지보수하기 위해 사용되는 자재사용량과 에너지소비량에 유지보수주기를 곱하여 산정하였다.

## 5. 단계별 물발자국 산정

앞에서 산정한 자재 투입량, 에너지 사용량을 이용하여 물발자국을 산정하였다. 본 연구에서는 Boulay 방법, 환경부방법, 본 연구방법을 적용하여 각 단계별로 산정하였다.

### 1) 자재 생산단계

자재 생산단계의 물발자국은 <식 7>의 산식을 이용하여 자재사용량과 자재의 물소비계수를 곱한 후, 고속국도 연장으로 나누어 산정하였다.

$$WF_{i,material(production)} = \frac{\sum U_{material(production)j,i} \times WC_j \times WCF_c}{S_j}$$

<식 7>

WF<sub>i,material, energy(production)</sub>: Amount of Water Consumed to Produce Material and Energy of j (m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>Oeq)

U<sub>material(production)j,i</sub>: Amount of Used Material and Consumed Energy to Construct Infrastructure (Expressway) of i (kg, m<sup>3</sup> and etc)

WC: Water Consumption Coefficient, Unit Amount of Water Consumed to Produce Material and Energy of j (m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>Oeq/kg, m<sup>3</sup>, and etc)

S: Length of Infrastructure(Expressway) of i (km)

WCF<sub>c</sub>: Characterization Factor in Watershed of c

### 2) 시공단계

시공단계에서는 사용되는 장비의 연료 및 전기의 에너지 소비량에 물소비계수를 곱한 후, 고속국도 연장으로 나누어 산정하였다.

$$WF_{j,construction} = \frac{\sum U_{j,i,construction} \times WC_j \times WCF_c}{S_j}$$

<식 8>

WF<sub>i,construction</sub>: Amount of Water Consumed to Construct Infrastructure of i (m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>Oeq)

U<sub>j,construction</sub>: Amount of Used Material and Consumed Energy of j to Construct Infrastructure of i (kg, m<sup>3</sup> and etc)

WC: Water Consumption Coefficient, Unit Amount of Water Consumed to Produce Material and Energy of j (m<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>Oeq/kg, m<sup>3</sup>, and etc)

S: Length of Infrastructure of i (km)

WCF<sub>c</sub>: Characterization Factor in Watershed of c

### 3) 운영단계

운영단계의 물발자국은 <식 9>의 산식을 이용하여 에너지, 물 등의 사용량과 각각의 물소비계수를 곱한 후, 고속국도 연장으로 나누어 산정하였다.

$$WF_{i,operation} = \frac{\sum U_{j,i,operation} \times WC_j \times WCF_c}{S_j} \quad \text{<식 9>}$$

$WF_{i,operation}$ : Amount of Water Consumed to operate Infrastructure of i ( $m^3-H_2Oeq$ )

$U_{j,operation}$ : Amount of Used Material and Consumed Energy of j to operate Infrastructure of i (kg,  $m^3$  and etc)

$WC_j$ : Water Consumption Coefficient, Unit Amount of Water Consumed to produce Material and Energy of j ( $m^3-H_2Oeq/kg$ ,  $m^3$ , and etc)

$S_j$ : Length of Infrastructure of i (km)

$WCF_c$ : Characterization Factor in Watershed of c

### 4) 유지보수단계

유지보수단계의 물발자국은 <식 10>의 산식을 이용하여 에너지, 물 등의 사용량과 각각의 물소비계수를 곱한 후, 고속국도 연장으로 나누어 산정하였다.

$$WF_{i,maintenance} = \frac{\sum U_{j,i} \times WC_j \times WCF_c}{S_j} \quad \text{<식 10>}$$

$WF_{i,maintenance}$ : Amount of Water Consumed to Maintain i ( $m^3-H_2Oeq$ )

$U_{j,i}$ : Amount of Used Material and Consumed Energy of j to Maintain Infrastructure of i (kg,  $m^3$  and etc)

$WC_j$ : Water Consumption Coefficient, Unit Water Usage Consumed to Produce Material and

Energy of j ( $m^3-H_2Oeq/kg$ ,  $m^3$ , and etc)

$S_j$ : Length of Infrastructure of i (km,  $m^3$  and etc)

$WCF_c$ : Characterization Factor in Watershed of c

### 5) 전과정

고속국도의 전 과정의 물발자국은 <식 11>에 의해 산정하였다. 즉, 자재 생산단계, 시공단계, 운영단계, 유지보수단계의 물 소비량을 합산하여 물발자국을 산정하였다.

$$W_{i-lifecycle} = W_{i-material,energy(production)} + W_{i-construction} + W_{i-operation} + W_{i-maintenance} \quad \text{<식 11>}$$

## V. 고속국도의 물발자국 산정 결과

### 1. 기본 투입량 산정

#### 1) 자재 생산단계

고속국도 시공에 필요한 자재량을 산출하기 위해 <Table 8>에 나타난 실시설계내역서, 일위대가, EBS(Event Break-down System) 파일을 수집하였다(한국도로공사 2010).

<Table 9>의 (a)는 내역서로 공사에서 사용되는 수량을 나타내며, <Table 9>의 (b)는 일위대가-산근표를 나타내는 것으로 자재비가 산출된 내역이다. 예

**Table 8**\_ List of Design Data of Expressway

Main Data
• Working Design Report
• Breakdown Cost (Characteristic Number, Calculation Unit Price, and etc)
• EBS (Event Breakdown System) File

Source: KEC 2010.

를 들어 H형강의 자재사용량은 다음과 같이 산정하였다. <Table 9>의 (b)에서 산출된 H형강의 자재비는 <Table 9> (a)에 나타난 수량 13.16톤에 1톤당 H형강의 가격 831.818원, 인자 1.07, 0.3을 곱하면, 3,513,898원이 산정된다. 여기에서 비용인 831,818원/톤을 나누어 산정하면 <Table 10>에 나타난 H형강의 자재사용량인 4.22436톤을 산정할 수 있다. 이와 동일한 방법으로 각각의 자재사용량을 파악하였다.

2) 시공단계

건설장비로 인한 전력, 연료 등의 에너지 사용량은 건설장비 작업량, 건설장비의 작업시간, 건설장비의 시

간당 에너지 사용량을 이용하여 산정하였다.

구체적으로 <Table 11> (a)의 공사별 작업량과 <Table 11> (b)의 일위대가-산근 자료에 나타난 건설장비의 작업시간과 건설장비 시간당 에너지소모량을 곱하여 산정하였다. 건설장비 사용으로 인한 자재비는 <Table 11> (b)에 나타난 61,381원/hr를 작업량(Q)인 93.73m<sup>3</sup>/hr로 나누면 654.8원/m<sup>3</sup>이 된다. 따라서 32톤 불도저 사용으로 인한 경유사용량은 여기에서 비용 대신 건설장비의 시간당 경유사용량으로 변경하고, <Table 11> (a)에 나타난 작업량 2,916m<sup>3</sup>을 곱하면, <Table 12>에 나타난 1,294.2L로 산정할 수 있게 되는 것이다. 이와 동일한 방법으로 각각의 장비에 대한 에너지소비량을 구하였다.

**Table 9** \_ Basic Data to Calculate the Amount of Materials

(a) List of Construction Works

Construction Works	Quantity	Unit
Temporary facility	0	
Heam and Earth Plate	0	
Quantity of Steel and Transportation	13.16	ton

(b) Breakdown Cost

Cost of Material
H-Pile (300*300*10*15) : 13.16 ton * 1.07 * 831.818*0.3 = 3,513,898.6

Source: KEC 2010.

**Table 10** \_ Example of Calculated Amount of Materials

Works			Material	Quantity (ton)
Drainage and Retaining Walls Works	Heam & Earth Plate	Cost of Steel and Transportation	H-Pile	4.22

Source: KEC 2010.

**Table 11** \_ Basic Data to Calculate Amount of Consumed Energy by Construction Equipment

(a) List of Construction Works

Construction Works	Quantity	Unit
Ground Breaking and Cutting	0	
Soil	2,916	m <sup>3</sup>

(b) Breakdown Cost

Ground Cutting
32 ton Bulldozer
D = 20 m
E = 0.45
F = 0.77
U1 = 40 m/min
U2 = 43 m/min
Q1 = 5.5
CM = D/U1 + D/U2 + 0.25 = 1.22 min
Q = 60 * Q1 * F * E/CM = 93.73 m <sup>3</sup> /hr
Cost: 33,257/Q m <sup>3</sup> /hr = 354.8
Labor Fee: 20,561/Q m <sup>3</sup> /hr = 219.3
Cost of Material: 61,381/Q m <sup>3</sup> /hr = 654.8

Source: KEC 2010.

**Table 12** \_ Example of Calculated Amount of Consumed Energy Using Construction Equipment

Works		Quantity	Unit	Con. Machine	Spec.	Working time	Unit	Unit Quan. (L)	Quan. (L)
Ground cutting	Soil	2,916	m <sup>3</sup>	Bulldozer	32 ton	31.11	hr	41.6	1,294.20

Source: KEC 2010

3) 운영단계

고속국도 운영단계에서는 비상발전기, 차량, 가로등, CCTV 등이 사용되면, 이로 인해 전력, 연료 등이 소모된다. 본 연구에서는 <Table 13>에 나타낸 기존 고속도로 운영자료(한국도로공사 2015; 2016)를 수집하고 그 평균 사용량을 적용하였다.

4) 유지보수단계

일반적으로 고속국도의 유지보수에는 포장, 시설공사

등이 포함되나, 본 연구에서는 비용이 가장 높고 작업량이 많은 포장만을 고려하였고, 자료로는 국토교통부(2017a; 2017b)의 도로 보수실적 중 포장실적과 표준품셈 공사내역을 이용하였다.

자재사용량은 아스팔트 작업의 거리와 두께를 곱하여 부피기준의 아스팔트의 사용량을 산정한 후, 아스팔트의 밀도인 2.35ton/m<sup>3</sup>을 곱하여 구하였으며 결과를 <Table 14>에 나타내었다. 에너지량은 각 공사별로의 작업량과 작업량원단위를 곱한 후, 하루의 작업량을 산정하고, 1일 기준의 작업시간을 곱하여 작업시간을 산정한 다음, 건설장비별 연비를 곱하여 구

Table 13 \_ Consumed Energy in Operation Stage

Energy	Unit	Consumed Quantity (Unit/yr)			Using Source
		2015	2016	Average	
Kerosene	L	50	44	47	• Boiler : Branch, Business Office
LPG	kg	4	5	5	• Restaurant
Light Fuel	L	166,023	164,170	165,096	• Emergency Generator : Branch, Business Office • Facility : Car and Machine
Gasoline	L	2,397	1,556	1,977	• Facility : Patrol Car
Electricity	kWh	7,382,959	8,235,548	7,809,254	• Construction for Branch and Business Office • Street Lights, CCTV, AVC, VDS, VMS, Electricity Room in Tunnel, Tunnel Lights

Source: KEC 2015; 2016.

Table 14 \_ Amount of Construction Material of Each Work in Maintenance Stage

Classification		Class. of Standard of con. estimate	Construction Material	Working Quantity (m <sup>2</sup> )	Thickness (m)	Qt'n (m <sup>3</sup> )	Density (ton/m <sup>3</sup> )	Qt'n (ton)
Repair in Pavement of Road	Surface Treatment	Slurry Seal	Asphalt for Outer Layer (AP-3)	1,230,755	0.006	7,385	2.35	17,354
	Overlay	Asphalt Overlay		924,970	0.070	462		3,700
	Re-pavement	Asphalt Overlay after Cutting		323,045	0.070	65		517

Source: KEC 2015; 2016.

Table 15 \_ Consumed Fuel Quantity of Each Work in Maintenance Stage

Classification		Class. of Standard of Con. Estimate	Construction Machine	Working Time (hr)	Fuel	Unit Consumed Fuel (L/hr)	Consumed Fuel Quantity (L)
Repair in Pavement of Road	Surface Treatment	Slurry Seal	Slurry Seal Machine	1,969	Light Fuel oil	23.4	46,079
			Excavator	1,969		15.3	30,129
		Surface Flatness Work	Grinding Machine + Road Breaker of 2m	8,951		52.7	471,715
			Tire Loader	8,951		3.5	31,328
			Sprinkler Truck	8,951		9.3	83,244

(continued)

Table 15\_ Consumed Fuel Quantity of Each Work in Maintenance Stage (continued)

Classification	Class. of Standard of Con. Estimate	Construction Machine	Working Time (hr)	Fuel	Unit Consumed Fuel (L/hr)	Consumed Fuel Quantity (L)	
Recovery for Small-sized Pavement	Recovery for Small-sized Pavement	Plate Compacter	3,428	Gasoline	1.0	3,428	
		Hand-guided Vibration Roller	49,358	Light Fuel oil	2.2	108,587	
		Tire Excavator	49,358		5.6	276,404	
		Truck	49,358	2.9	143,138		
	Emergency Recovery Work for Small-sized Roads	Plate Compacter	3,428	Gasoline	1	3,428	
		Motorized Vibration Roller	82,263	Light Fuel oil	2.3	189,205	
		Excavator+Breaker	82,263		11.6	954,253	
		Truck	82,263	2.9	238,563		
	Overlay	Asphalt Overlay	Cutter for Concrete and Asphalt	82,263	Gasoline	5.6	460,674
			Asphalt Finisher	3,700	Light Fuel oil	13.0	48,098
			Macadam Roller	3,700		9.3	34,409
			Tire Roller	3,700		8.0	29,599
			Tandem Roller	3,700		11.2	41,439
	Sprinkler Truck	3,700	12.9	47,728			
Re-pavement	Asphalt Overlay after Cutting	Road Breaker	517	Light Fuel oil	52.7	27,239	
		Tire Loader	517		3.5	1,809	
		Asphalt Finisher	517		13.0	6,719	
		Macadam Roller	517		9.3	4,807	
		Tire Roller	517		8.0	4,135	
		Tandem Roller	517		11.2	5,789	
		Sprinkler Truck	517		12.9	6,668	

Source: KEC 2015; 2016.

하였다(<Table 15> 참조).

## 2. 물발자국 산정

각 단계에서 산정한 자재사용량, 에너지소비량 등의 투입량 결과를 바탕으로 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론에 대하여 물발자국을 산정하였다. 본 연구방법론 적용에 있어서는 <Table 4>에 개발한 특성화인자 중 대상 고속국도의 권역인 낙동강유역의 특성화인자를 사용하였다. 각 단계에서 사용되는 자재 등에 대해서는 생산지역을 파악하기 어려워 낙동강유역에서 생산되는 것으로 가정하여 낙동강유역의 특성화인자를 적용하였다.

### 1) 자재 생산단계

자재 생산단계에서의 물발자국은 <Table 9>와 <Table 10>의 과정으로 거쳐 산정한 자재량에 각 자재의 물소비계수를 이용하여 <식 7>를 이용하여 산정하였다.

<Figure 3>은 3가지 방법에 대해 물발자국을 산정한 후 고속국도의 연장인 4.06km로 나누어, 기능단위인 '1km 왕복 4차선'에 대한 물발자국을 나타낸 결과이다. 자재 생산단계에서의 물발자국은 1km 기준으로 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론순으로 각각 46,071m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>Oeq., 32,426m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>Oeq., 7,204m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>Oeq.으로 나타났다. 주요 원인을 살펴보면, Boulay 방법, 환경부 방법, 본 연구의 개발방법에 의한 물발자국은 모두 교

Figure 3\_ Water Footprint in Material Production Stage

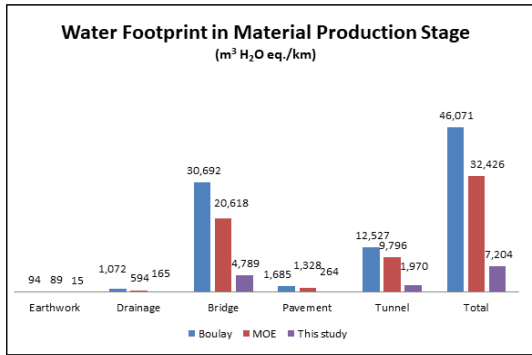


Figure 5\_ Water Footprint in Operation Stage

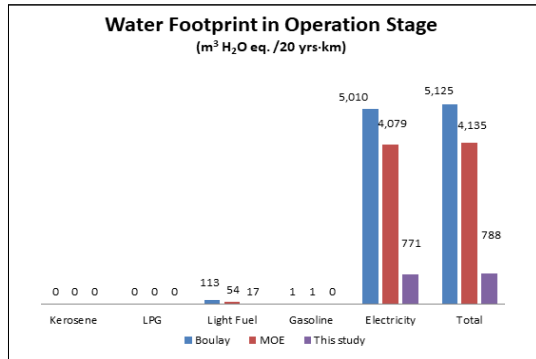
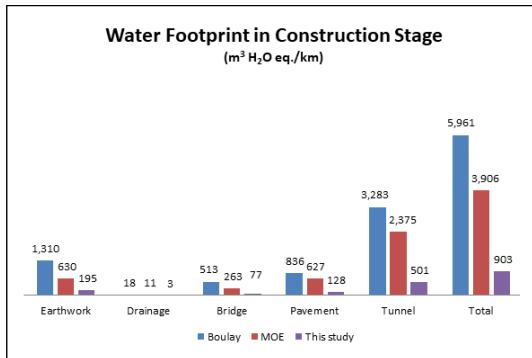


Figure 4\_ Water Footprint in Construction Stage



<식 8>을 이용하여 산정하였으며, <Figure 4>에 결과를 나타내었다.

시공단계에서의 물발자국은 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론순으로, 각각 5,961m³H₂Oeq., 3,906m³H₂Oeq., 903m³H₂Oeq.으로 나타났다. 주요 원인을 살펴보면, 세 가지 방법론 모두 터널공사과정이 55%, 61%, 56%로 가장 높게 나타났으며, 토목공사, 포장 및 부대공사, 교량공사, 배수 및 옹벽공사순으로 나타났다.

량공사과정에서 76%, 64%, 66%로 가장 높았으며, 터널공사, 포장 및 부대공사, 배수 및 옹벽공사, 토목공사순으로 나타났다.

물발자국에 영향을 미치는 주요 물질은 Boulay 방법, 환경부 방법, 본 연구의 개발방법의 결과에서 모두 이형철근의 영향이 가장 높았으며, 강관 파일(Pile)이 그다음으로 영향이 큰 것으로 나타났다.

2) 시공단계

시공단계의 물발자국은 <Table 11>과 <Table 12>의 과정으로 거쳐 산정한 건설장비를 사용하기 위해 필요한 에너지소비량에 각 에너지의 물소비계수를

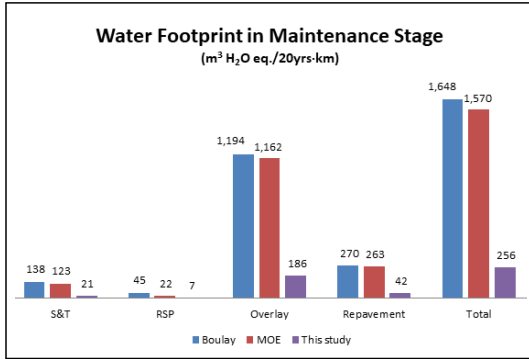
물발자국에 영향을 미치는 물질로는 전력의 영향이 가장 높았으며, 다음으로 경유로 나타났다.

3) 운영단계

운영단계의 물발자국 역시 항목별 에너지소비량에 에너지별 물소비계수를 곱하여 산정하게 된다.

본 연구에서 설정한 20년간 운영단계의 물발자국은 <Table 13>에 나타난 보일러등유, LPG, 경유, 휘발유, 전기사용량과 환산계수, 각각의 물소비계수와 20년의 운영기간을 이용하여 <식 9>에 따라 기능단위 기준으로 산정하였다. <Figure 5>에 나타난 바와 같이, 운영단계의 물발자국은 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론순으로 각각 5,125m³H₂Oeq.,

Figure 6 \_ Water Footprint in Maintenance Stage



4,135m³H₂Oeq., 788m³H₂Oeq.으로 나타났다. 주요 원인 물질로는 세 방법론 모두 전기에 의한 물발자국 소비량이 가장 높게 나타났다.

4) 유지보수단계

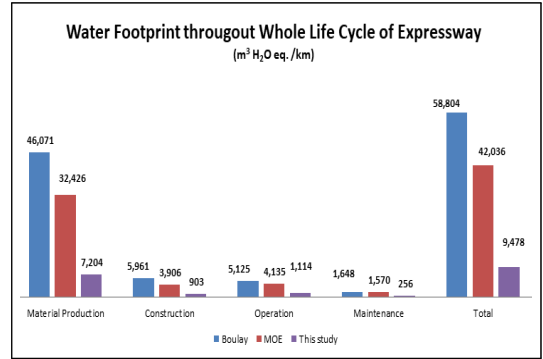
유지보수단계의 물발자국은 <Table 14>의 자재 사용량과 <Table 15>의 건설장비 사용으로 인한 에너지소비량, 물소비계수를 이용하여 <식 10>을 따라 산정하였다.

<Figure 6>은 에너지소비량에 물소비계수와 운영기간 20년을 곱한 후, 유지보수거리와 각 공사별 유지보수기간을 나누어 산정한 물발자국 결과이다. 고속국도를 유지보수하기 위해 유지보수단계의 물발자국은 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론순으로, 각각 1,648m³H₂Oeq., 1,570m³H₂Oeq., 256m³H₂Oeq.으로 나타났다. 주요 원인으로 덧씌우기 작업이 가장 높게 나타났으며, 다음으로 재포장, 표면처리, 소파보수순으로 나타났다.

5) 전 생애주기

<Figure 7>에 자재 생산, 시공, 운영 및 유지보수단

Figure 7 \_ Water Footprint throughout Whole Life Cycle



계를 포함한 전 생애주기 물발자국을 산정한 결과를 나타내었다. 전 생애에 걸친 물발자국은 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론순으로 각각 58,804 m³H₂Oeq., 42,036m³H₂Oeq., 9,478m³H₂Oeq.으로 나타났다. 단계적 기여도는 세 가지 방법 모두 자재 생산 단계에서 가장 높게 나타났다. 각 방법론별로 차이가 발생하는 원인은 특성화인자와 물발자국 영향평가방법론에 따라 다르기 때문이다.

4. 고찰

본 연구에서는 국내 수자원 특성을 반영한 물발자국 영향평가방법론을 개발하였으며, 고속국도를 대상으로 기존 방법론인 Boulay 방법론, 환경부 방법론과 비교 분석을 수행하였다.

동일한 대상, 동일한 LCI DB를 사용했음에도 평가 방법론에 따라 물발자국 산정결과가 다르게 나타났다. 이는 영향평가방법론별 특성화인자와 물질의 물 소비계수를 산정하는 방법에 따라 다르게 나타날 수 있다는 것을 의미하며, 평가 목적에 따라 방법론의 선택도 필요할 수 있다는 것을 의미한다. 물은 지구전체로 순환하기도 하지만 이용은 주로 수계별로 이루어진다. 이러한 점에서 국가 단위의 상위 물 관리 정책

도 필요하지만 경우에 따라 지역별 세부적인 정책수립도 필요하다. 본 연구에서 개발한 방법론은 국내 권역별 수자원의 특성을 반영하였다는 장점을 가지고 있으며, 국가 중심의 환경부 방법론에서 해결하지 못하는 지역 중심의 물소비량 파악 등 물발자국 해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

## VI. 결론

본 연구에서는 국내의 수자원 특성을 반영한 물발자국 영향평가방법론을 개발하였다. 그리고 본 연구방법론과 기존의 가장 보편적인 물발자국 방법론인 Boulay 방법론, 그리고 우리나라에서 이용하는 환경부 방법론을 적용하여 고속국도의 전 생애주기 단계에 대하여 비교 분석하였다. 본 연구에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫 번째, 본 연구에서는 우리나라를 단일 권역으로 분석했던 방법론과는 달리 한강, 금강, 낙동강, 섬진강, 영산강, 제주도의 6개 유역으로 구분하여 특성화인자를 개발하였다. 그 결과, 방법론의 핵심인 지하수의 특성화인자로 각각 0.027, 0.045, 0.153, 0.252, 0.047, 0.081, 지표수의 특성화인자로 각각 0.026, 0.075, 0.140, 0.287, 0.048, 0.045를 도출하였다. 지하수의 특성화인자를 가용지하수량과 지하수취수량, 소비계수를, 지표수는 가용지표수와 지표수취수량, 소비계수를 이용하였다. 지하수와 지표수의 특성화인자가 다른 원인은 지하수취수율과 지표수취수율, 취수된 후, 배출되는 비율을 나타내는 소비계수의 영향으로 나타났다.

두 번째, Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구방법론을 실제 고속국도 건설 사례에 적용하여 1km, 왕복 4차선의 기능단위당 물발자국을 산정하였다. 그 결과 전 생애주기 물발자국이 각각  $58,804\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$ ,

$42,036\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$ ,  $9,478\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq}$ 로, 방법론별로 차이점을 나타냈으며, 특히 지역 특성화인자를 적용한 본 연구방법론에서 국가 전체를 적용한 타 방법론과 차이를 보였다.

본 연구 외에 국내 수자원 특성을 반영한 물발자국 영향평가방법론 개발 시도는 아직 없다. 그러나 수자원의 특성상 지역여건을 반영해야하는 분석도 필요하며, 그 경우에 본 연구가 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

그리고 국내 물 부족 상황을 고려하면, 향후 고속국도, 고속철도, 댐, 공항, 항만 등 대규모 물적 자원이 투입되는 대형 건설 사업 수행, 그리고 국가 건설 정책 수립에 물발자국 개념의 적용이 반드시 필요하며, LCC, LCA와 더불어 지속가능 건설을 위한 하나의 수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌 •••••

1. 국가수자원관리종합정보시스템. <http://www.wamis.go.kr/> WAMIS. <http://www.wamis.go.kr/>
2. 국가지하수정보센터. <http://www.gims.go.kr/> GIMS. <http://www.gims.go.kr/>
3. 국토교통부. 2017a. 도로보수현황. 세종: 국토교통부. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2017a. *Road Repair Status*. Sejong: MOLIT.
4. \_\_\_\_\_. 2017b. 2017 건설공사 표준품셈. 세종: 국토교통부. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2017b. *Standard Construction Estimate*. Sejong: MOLIT.
5. 김우람. 2011. Water footprint 개념을 이용한 가전제품의 수자원 사용량 산정에 관한 연구(세탁기를 중심으로). 석사학위논문, 인하대학교. Kim Wooram. 2011. *A Study on the Evaluation of Water Consumption in Electric Appliances Using Water Footprint: Focusing on washing machine*. M.S. diss., Inha University.
6. 김준범, 강현, 신상민. 2013. 쌀 농업에 대한 지역별 물 발자국 산정에 관한 연구. *대한환경공학회지* 35권, 11호:

- 827-834.
- Kim Junbeum, Kang Hun and Shin Sangmin. 2013. A study about regional water footprint of rice production in agriculture industry. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 35, no.11: 827-834.
7. 법제처. 2017. 법인세법 시행규칙 별표 5 건축물 등의 기준 내용연수 및 내용연수범위표.  
Ministry of Government Legislation (MOLEG). 2017. *Table 5 Boundary of standard durable years and Standard durable years of buildings and etc. on enforcement regulations of corporation tax act.*
  8. 유승환, 최진용, 김태곤, 임정빈, 전창후. 2009. 한국의 농산물 가상수 산정. 한국수자원학회논문집 42권, 11호: 911-920.  
Yoo Seunghwan, Choi Jinyong, Kim Taegon, Im Jeongbin and Chun Changhoo. 2009. Estimation of crop virtual water in Korea. *Jour. of Korea Water Resources Association* 42, no.11: 911-920.
  9. 한국도로공사. 2010. 내부 설계 자료.  
Korea Expressway Corporation (KEC). 2010. Internal Design data.
  10. \_\_\_\_\_. 2015. 내부 운영 자료.  
Korea Expressway Corporation (KEC). 2015. Internal Operation data.
  11. \_\_\_\_\_. 2016 내부 운영 자료.  
Korea Expressway Corporation (KEC). 2016. Internal Operation data.
  12. 환경부. 2017. 환경성적표지인증제도. 세종: 환경부.  
Ministry of Environment (MOE). 2017. Environmental product declaration certification operational regulation. Sejong: MOE.
  13. \_\_\_\_\_. 2018. 2018 공장폐수의 발생과 처리. 세종: 환경부.  
Ministry of Environment and National Institute of Environmental Reserch. 2018. *Generation and Treatment of Industrial Wastewater in 2018.* Sejong: MOE.
  14. \_\_\_\_\_. 2019. 2019 산업폐수의 발생과 처리. 세종: 환경부.  
Ministry of Environment and National Institute of Environmental Reserch. 2019. *Generation and Treatment of Industrial Wastewater in 2019.* Sejong: MOE.
  15. 환경부, 국립환경과학원. 2020. 2020 산업폐수의 발생과 처리. 세종: 환경부.  
Ministry of Environment and National Institute of Environmental Reserch. 2020. *Generation and Treatment of Industrial Wastewater in 2020.* Sejong: MOE.
  16. Arpke, A. and Hutzler, N. 2006. Domestic water use in the United States: A life cycle approach. *J. Ind. Ecol.* 10, no.1-2: 169-184.
  17. Berger, M., Ruud van der Ent., Eisner, S., Bach, V. and Finkbeiner, M. 2014. Water accounting and vulnerability evaluation: Considering atmospheric evaporation recycling and the risk of freshwater depletion in water footprinting. *Environ. Sci. and Tech.* 48, no.8: 4521-4528. <https://doi.org/10.1021/es404994t>
  18. Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschenes, L. and Margni, M. 2011. Regional characterization of freshwater use in LCA: Modeling direct impacts on human health. *Environ. Sci. and Tech.* 45, no.20: 8948-8957. <https://doi.org/10.1021/es1030883>
  19. Cabeza, L. F., Rincon, L., Vilarino, V., Perez, G. and Castell, A. 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29: 394-416.
  20. Ecoinvent 3.3. <http://www.ecoinvent.org/>
  21. Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q. 2002. Virtual water trade: A quantification of water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series*, No.11. Delft: IHE Delft.
  22. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. and Mekonnen, M. M. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard.* Earthscan.
  23. ISO. 2014. ISO 14046 : *Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines.* Geneva: ISO.
  24. OECD. 2012. *OECD Environment Outlook to 2015.* Paris: OECD.
  25. PAI. 2003. *The Security Demographic: Population and civil conflict after the cold war.* Washington, DC: Population Action International.

- 
- 논문 접수일: 2021. 4. 12.
  - 심사 시작일: 2021. 4. 26.
  - 심사 완료일: 2021. 6. 1.

---

## 요약

주제어: 물발자국, 고속국도, 인프라시설, 전과정평가, 물관리

본 연구에서는 국내 수자원의 특성을 반영한 물발자국 방법론을 개발하였다. 주요 결과로, 물발자국 특성화인자를 지하수와 지표수에 대해 한강유역, 낙동강유역, 금강유역, 섬진강유역, 영산강유역, 제주도의 6개 유역으로 구분하여 개발하였다. 그리고 Boulay 방법론, 환경부 방법론, 본 연구에서 개발된 방법론을 인프라시설의 하나인 고속국도에 적용하여 물발자국 결과를 비교 분석 하였다. 그 결과, 4차선 고속국도 1km 기준으로 Boulay 방법론과 환경부 방법론은 전

과정에 걸쳐  $58,804\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq.}$ ,  $42,036\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq.}$ 으로 나타났다. 한편 본 연구방법론에 의한 물발자국은  $9,478\text{m}^3\text{H}_2\text{Oeq.}$ 로 나타났으며, 이러한 차이는 본 연구에서 개발된 지역의 특성화인자와 이와 관련된 건설 자재의 물소비계수로 인하여 발생하였다. 본 연구의 결과는 고속국도의 물소비량을 저감하기 위한 정책에 활용할 수 있을 것이다. 고속국도 이외에 철도, 항만 등 인프라시설에 적용하여 정량화된 물소비량을 파악할 필요가 있을 것으로 사료된다.