

국내 물 자원 통계자료 분석을 통한 물발자국 방법론 국내 적용 가능성 확인 연구

김선욱¹, 조서원¹, 안재현¹, 이한웅¹, 연성모^{2,*}

¹한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터
06211 서울시 강남구 테헤란로 322 한신인터밸리24 동관 18층
²(주)에이치아이피
08591 서울시 금천구 가산디지털1로 30

(2018년 4월 27일 접수; 2018년 5월 16일 수정본 접수; 2018년 5월 16일 채택)

A Study on the Applicability of Water Footprint Methodology in Korea by Analyzing Domestic Water Resources Statistics

Sun Uk Kim¹, Seo Weon Jo¹, Jae Hyun Ahn¹, Han Woong Lee¹, and Sung Mo Yeon^{2,*}

¹Korea Institute of Industrial Technology, Environmental Regulation Compliance Office
Hanshin Intervalley 24 East B/D 18F 322, Teheran-ro, Gangnam-gu, Seoul 06211, Korea
²H.I.Pathway Co., LTD.
10F 1006, Gasan digital 1-ro 30, Geumcheon-gu, Seoul, 08591, Korea

(Received for review April 27, 2018; Revision received May 16, 2018; Accepted May 16, 2018)

요 약

물발자국은 EU가 추진하고 있는 자원효율적인 유럽을 위한 로드맵(Roadmap to a Resource Efficient Europe)을 바탕으로 제시된 친환경제품 시장통합정책(Single Market for Green Product initiative)의 중요한 구성요소이다. 2014년 7월 EU 회원국의 주도로 물발자국 산정 국제표준(ISO 14046)이 제정되었으며 우리나라도 한국산업표준(KS I ISO 14046)으로 2015년 4월 부합화를 완료하였다. 국제표준(ISO 14046)에 기반을 둔 인증제도가 도입되는 경우, 기반을 갖추지 못한 인도, 베트남 등의 개도국에게는 수출시 무역장벽이 될 수 있으므로 우리나라는 이를 역이용하기 위한 전략을 수립해야 한다. 한편, 물발자국은 전과정평가(LCA)를 적용한 유사 발자국(예, 탄소발자국)인증과 비교할 때 국지적(Local) 환경영향을 고려하도록 되어 있어, 우리나라에서 생산 및 제조되는 제품들은 우리나라 수역에 미치는 영향을 고려해야 한다. 따라서 물발자국 산정방법은 국내외 호환을 위해 표준에 적합해야 하며, 우리나라의 물 환경을 고려하기 위해서 우리나라 적합한 물발자국 산정계수들의 도출이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 국제표준을 바탕으로, 현재 국내·외에서 진행된 물발자국 산정연구를 검토하고 국내 기존 물 자원 관련 통계자료 분석을 통해 물발자국 방법론의 국내 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 물발자국, 환경영향, 방법론, 물 자원

Abstract : The water footprint is an important component of the Single Market for Green Product initiative based on the EU's Roadmap to a Resource Efficient Europe. In July 2014, the EU has established the International Standard for Water Footprint (ISO 14046) and Korea has complied with the Korean Industrial Standard (KS I ISO 14046) in April 2015. If a certification system based on the international standard (ISO 14046) is introduced, developing countries such as India and Vietnam, which are not equipped with bases, can become a trade barriers in exporting, so Korea should establish a strategy to reverse them. On the other hand, water footprints are designed to take into account local environmental impacts when compared to similar footprints (eg, carbon footprint) using LCA, so that products manufactured and manufactured in Korea will have an impact on domestic waters Should be considered. Therefore, the method of the water footprint should conform to the standard for compatibility with other countries. In order to consider the domestic water condition, it is necessary to identify suitable indicator or factor for estimating water footprint on Korea. For this purpose, this study analyzed the water footprint estimation study conducted at domestic and foreign based on international standards and through the analysis of statistical data related to domestic water resources, we confirmed the applicability of the water footprint methodology in Korea.

Keywords : Water footprint, Environmental impact, Methodology, Water resources

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: lifecat@kncpc.re.kr; Tel: +82+2-2183-1532; Fax: +82+2-2183-1519

doi: 10.7464/ksct.2018.24.2.146 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리가 이용할 수 있는 물은 지구상 존재하는 물의 2.5%에 불과하여 현재와 같이 물을 소비할 경우, 향후 심각한 물 부족 사태에 직면할 수 있다. 또한 담수의 약 75%는 빙하에 저장되어 있으므로 실제로 이용할 수 있는 물은 지구상에 존재하는 물의 약 0.7%에 불과한 실정이다. 이에 국제사회는 지속 가능한 물 관리를 위해 물발자국 산정 가이드라인을 개발하고, 물발자국 국제표준을 제정하는 등의 움직임을 보이고 있다. 특히, EU가 추진하고 있는 자원효율적인 유럽을 위한 로드맵(Roadmap to a Resource Efficient Europe)을 바탕으로 제시된 친환경제품 시장통합정책(Single Market for Green Product initiative)에서 물발자국은 중요한 구성요소이다.

2011년 비영리단체인 물발자국 네트워크(Water footprint network (WFN))는 물발자국 글로벌 가이드라인을 공표하였다. 2014년 7월 EU 회원국의 주도로 물발자국 산정 국제표준(ISO 14046)이 제정되었으며 우리나라도 한국산업표준(KS I ISO 14046)으로 2015년 4월 부합화를 완료하였다. 국제표준(ISO 14046)에 기반을 둔 인증제도가 도입되는 경우, 기반을 갖추지 못한 인도, 베트남 등의 개도국에게는 수출시 무역장벽이 될 수 있으므로 우리나라는 이를 역이용하기 위한 전략을 수립해야 한다. 한편, 물발자국은 전과정평가(LCA)를 적용한 유사 발자국(예, 탄소발자국)인증과 비교할 때 국지적(Local) 환경영향을 고려하도록 되어 있어, 우리나라에서 생산 및 제조되는 제품들은 우리나라 수역에 미치는 영향을 고려해야 한다.

따라서 물발자국 산정방법은 국내외 호환을 위해 표준에 적합해야 하며, 우리나라의 물 환경을 고려하기 위해서 우리나라 적합한 물발자국 산정계수들의 도출이 필요하다. 이를 위해 이 연구에서는 첫째, 국제표준을 비롯한 국내외 물발자국 산정 방법론의 비교·분석하고, 현재 국내외에서 진행된 물발자국 산정연구를 검토하였다. 이를 바탕으로 다양한 물발자국 산정 방법을 확인 및 정리하고 국내 기존 물 자원 관련 통계자료 분석을 통해 물발자국 방법론의 국내 적용 가능성을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1. 국내외 물발자국 산정방법론 분석

이번 연구의 목적은 국내에 적합한 물발자국 산정방법을 제안하기 위한 사전 연구로써 국제표준을 바탕으로, 현재 국내외에서 진행된 물발자국 산정연구를 검토하고 국내 기존 물 자원 관련 통계자료 분석을 통해 물발자국 방법론의 국내 적용 가능성을 확인하는 것이다. 이에 현재 국내외에서 진행되고 있는 물발자국 산정 연구를 분석하여 국제적으로 호환성을 고려하고 국제적으로 합의된 방법을 검토하였다.

2.1.1. 물발자국 글로벌 가이드라인(The water footprint assessment manual - setting the global standard) [1]

네덜란드 법에 의해 설립된 비영리단체인 물발자국 네트워크(WFN)는 2011년 물발자국 글로벌 가이드라인을 발간하였다.

현재 국내외 물발자국 관련 연구문헌에서 주로 활용하는 방법론으로 생산 활동시 전과정에서 소모되는 수자원의 총량을 물발자국 정의로 제시하며, 청색수(Blue water), 녹색수(Green water) 및 회색수(Grey water)로 구분하여 물발자국을 산정하도록 하였다.

물발자국 평가는 물발자국 연구의 목적 및 범위 정의, 물발자국 산정, 물발자국 지속가능성 평가 및 물발자국 대응전략 수립의 4단계로 구성된다.

청색 물발자국은 생산과정에서의 증발량, 제품에 융합되는 양 및 동일한 권역으로 환원되지 않는 수자원량의 합으로 정의되며 녹색 물발자국은 해당 지역에 내린 강수량 중 증발산된 물의 양 및 식물에 융합된 물의 합으로 정의하고 회색 물발자국은 인간활동으로 인해 오염된 폐수를 정화하기 위해 소비되는 물의 양으로 정의한다.

2.1.2. ISO 14046 [2]

국제표준화기구(Standard for international organization (ISO))는 2009년부터 물발자국 산정에 대한 국제표준화 작업을 진행하여, 2014년 물발자국 국제표준(ISO 14046:2014 Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines) 제정을 완료하였다.

물발자국 평가의 방법론적 큰 틀은 ISO 14040 전과정평가를 따라 목적 및 범위정의, 물발자국 목록분석, 물발자국 영향평가 및 물발자국 결과 해석의 총 4단계로 구성되어 있다.

물발자국 평가 목적 및 평가범위를 정하는 단계로 평가대상은 공정/제품/조직 등이 될 수 있으며 평가범위는 수행 목적에 따라 설정한다. 물발자국 평가의 범위 설정 시 기능단위, 시스템경계, 데이터 수집의 지리적, 시간적 범위 등을 설정해야 하며 이는 ISO 14040과 동일하다.

물발자국 목록분석 단계는 평가대상의 시스템 경계 내 투입물과 배출물 데이터를 수집하는 단계로 사용된 물의 양(취수/배수), 수자원 유형, 물의 사용 형태 및 수질, 수자원의 지리적, 시간적 경계에 대한 데이터 수집이 필수적이다.

물발자국 영향평가 단계는 목록분석 결과와 특성화인자를 활용하여 물 사용으로 인한 잠재적 환경영향을 평가하는 단계이다. 물발자국 영향평가는 수량 및 수질저하 측면에 대해 잠재적 환경영향을 평가하는 중간점 접근방법(Midpoint approach)을 통해 최종적으로 인간건강, 생태계 질 등이 받는 종말점(endpoint)에 대한 영향을 평가하고자 한다. 수량 측면의 영향범주는 물 가용성(Water availability) 및 물 부족(Water scarcity)으로, 수질 저하 측면에서는 산성화, 부영양화, 생태독성 및 열오염으로 영향범주를 구분하여 모든 영향을 포괄한다.

2.1.3. 농림축산식품부 물발자국 산정 방법론[3]

우리나라 농림축산식품부의 물발자국 산정 방법론은 ISO 14046과 ISO 14040을 기본으로 적용하였으며, 그 외에 일부 분 물발자국 글로벌 가이드라인을 준용하고 있다. 이용자를

위한 물발자국 산정 및 활용 매뉴얼을 개발하였고 방법론적인 큰 틀은 ISO 14046과 유사하며, 물발자국의 정의나 수자원 유형 등의 사항은 일부 변형하여 적용하였다.

2.1.4 국내외 방법론 간의 차이점

국내외 주요 물발자국 산정 방법론 검토 결과, 주로 적용대상 및 물발자국 정의와 물발자국 산정, 평가에서 차이점을 보였다.

적용대상의 경우 물발자국 글로벌 가이드라인 및 ISO 14046의 경우 공정/제품/조직에 대한 물발자국 산정 가능하다. 물발자국 글로벌 가이드라인은 기업, 소비자 등 다양한 조직의 물발자국 산정에 대한 가이드라인을 제시하고 있으며 ISO 14046는 부속서 A에 조직 물발자국 산정에 대한 추가적인 요구사항 및 지침을 제시하였다. 농림축산식품부 방법론의 경우 향후 국내 물발자국 인증제도에 대비하여 개발된 것으로 적용 대상은 제품으로 제한하였다.

물발자국 정의에는 물발자국 글로벌 가이드라인과 ISO 14046에서 다소 차이를 보였으며 농림축산식품부의 경우 물발자국 글로벌 가이드라인과 동일하였다. 물발자국 글로벌 가이드라인 및 농림축산식품부는 물발자국을 생산 활동 시 전과정에서 소모되는 수자원의 총량으로 정의하였고, ISO 14046은 전과정에서 소모되는 수자원의 총량의 개념에서 더 나아가 사용된 수자원의 총량이 환경에 미치는 영향을 포함하여 정의하였다.

물발자국 산정의 경우, 크게 수자원 유형, 할당절차 및 산정 결과에서 차이를 보였다.

수자원 유형의 경우 ISO 14046이 물발자국 글로벌 가이드라인보다 세부적으로 분류했으며 농림축산식품부는 두 가지 방법론을 혼용해서 적용하였다. 물발자국 글로벌 가이드라인은 청색수(지표수 및 지하수), 녹색수(빗물), 회색수(오염원을 정화시키기 위해 필요한 담수의 양)로 수자원 유형을 분류하였다. ISO 14046은 빗물, 지표수, 지하수, 회색수, 기수, 해수로 수자원 유형 구분하였으며 농림축산식품부의 경우 큰 범위에서 물발자국 글로벌 가이드라인의 수자원 유형으로 분류하고 세부항목을 ISO 14046의 수자원 유형으로 구분하고 있다.

물발자국 할당의 경우 물발자국 글로벌 가이드라인과 ISO 14046이 권장하는 할당 방법의 우선순위가 달랐으며 농림축산식품부는 ISO 14046을 따르고 있다. 물발자국 글로벌 가이드라인은 할당방법에 대한 우선순위로 경제적 가치를 권고하고 있으며 이에 대한 자세한 가이드라인 제시하였으나, ISO 14046은 할당에 대해 가능한 회피하는 것을 원칙으로 하고 있으며 필요 시 물리적 관계(예: 제품 무게)를 적용하는 것을 우선순위로 하고 있다.

물발자국 산정 단계 결과물로서 물발자국 글로벌 가이드라인 및 농림축산식품부의 경우 물 사용량의 합이 되며 ISO 14046은 투입물 및 배출물의 목록이 도출된다. ISO 14046의 경우 수자원의 투입물 및 배출물이 목록분석 단계에서 통합되어서는 안 되며 이는 물발자국 영향평가 단계에서 특성화인자에 의해 진행된다.

물발자국 평가 단계에서는 물발자국 평가 시 평가기준, 평가

내용 및 결과에서 차이점을 보이고 있다. 현 단계 ISO 14046의 물발자국 영향평가 단계에 해당되며 물발자국 글로벌 가이드라인의 경우 물발자국 지속가능성평가 단계에 해당된다. 농림축산식품부 방법론은 국내 특성화인자의 부재로 인해 물발자국 영향평가 단계를 제외한 상태이다.

물발자국 평가기준으로 ISO 14046은 환경적 영향을 기준으로 평가하고 있으며 물발자국 글로벌 가이드라인의 경우 환경, 경제 및 사회적 기준에서 물발자국 지속가능성 평가를 진행한다. ISO 14046은 수량(물 부족, 물가용성)범주와 수질 저하(산성화, 부영양화, 생태독성, 열오염)범주로 구분하여 환경에 대한 물발자국의 영향을 고려하나, 물발자국 글로벌 가이드라인의 경우 환경적 측면 외에도 사회적, 경제적 기준에서 고려한다.

ISO 14046은 환경영향범주 별 특성화인자를 통해 잠재적 환경영향을 평가하며 물발자국 글로벌 가이드라인의 경우 핫스팟을 찾기 위한 기준으로서 특성화인자와 유사한 개념을 적용하고 있다. ISO 14046은 목록분석 결과와 환경영향 범주 별 특성화인자의 곱으로 평가를 진행하나, 물발자국 글로벌 가이드라인에서 제시하는 핫스팟에 대한 기준은 수자원 유형별로 다르게 적용되며 사회적 및 경제적 측면에 대한 지속가능성 평가 기준은 명확하게 제시되어 있지 않다. 물발자국 평가 단계 결과물로서 ISO 14046의 경우 환경영향 범주 별 특성화 결과가 도출되며 물발자국 글로벌 가이드라인은 핫스팟 유무에 따른 지속가능/불가능에 대한 결론이 도출된다.

2.1.5. 국내외 호환성을 고려하기 위한 물발자국 산정방법론 도입 요건의 기본방향

현재 개발된 농림축산식품부 방법론의 경우 ISO 14046의 요구사항을 만족시키지 못하고 있다. ISO 14046은 공정/제품/조직에 대한 물발자국 산정 방향을 제시하고 있으나 농림축산식품부 방법론의 경우 제품에 대한 산정 방향만을 제시하고 있다. 또한, ISO 14046은 물발자국 영향평가를 수행하지 않을 경우 ‘물발자국’이 아닌 ‘물발자국 인벤토리’로 인정하고 있으나 농림축산식품부 방법론은 국내 특성화인자의 부재로 인해 물발자국 영향평가 단계 제외하고 있다. 이외에도 물발자국 산정결과 및 물발자국 정의 등 부분적으로 물발자국 글로벌 가이드라인을 준용하고 있다. 따라서 국내외 호환성을 고려하여 ISO 14046의 요구사항을 충분히 반영할 수 있는 한국형 방법론의 도입 또는 구축이 필요하다.

국내외 호환성을 고려하기 위해서는 방법론 구축시 방법론 체계는 ISO 14046을 기본으로 하되 일부 항목에 있어서는 국내 현황을 고려하여 국제표준을 크게 벗어나지 않는 범위 내에서 개정 필요하며 국내 실현가능성, 수자원 이용 현황 등의 기준으로 물발자국 산정 및 영향평가 단계 중 일부 항목에 대해 중점적으로 고려가 필요하다.

물발자국 산정 단계에서는 평가대상의 시스템 경계 내 투입물과 배출물 데이터를 수집하는 단계로 수집이 필요한 수자원 유형 및 수질 관련 데이터에 대한 개정 필요하다. 수자원 유형은 국내 수자원 이용 현황에 따라 지표수, 지하수 및 빗물을 중점적으로 고려하되 특정 산업군의 경우에 해수, 기수,

화석수 고려할 필요가 있다. 수질 관련 데이터의 경우 수계 배출물을 중점적으로 고려하되 수질에 영향을 줄 수 있는 토양 및 대기 배출물의 양이 많거나 환경적으로 중요한 물질일 경우 고려해야 한다. 그러나 농축산 분야의 경우 농지에 살포된 농약, 비료 등 토양 배출물이 일종의 비점오염원으로서 수질에 영향을 미치게 되므로 토양 배출물의 고려가 필요하다.

물발자국 영향평가 단계에서는 물 사용으로 인한 잠재적 환경영향을 평가하는 단계로 물발자국 영향평가 시 수행할 접근 방법에 대한 설정이 필요하다. 물발자국 영향평가는 크게 중간점 접근방법(midpoint approach)과 종말점 접근방법(endpoint approach)으로 구분되며 우선적으로 중간점 수준(midpoint level)의 환경영향범주에 대한 한국형 특성화인자 구축이 필요하다. 현재 국내 물발자국 영향평가에 대한 연구는 아직 초보적인 단계에 있으며 종말점 접근방법의 경우 현재 수준으로는 물발자국 목록항목과 종말점 수준(endpoint level)범주간의 상관관계를 논리적, 객관적으로 정립하기 어려운 실정이다. 전과정평가 또한 중간점 수준의 산정 연구가 주를 이루고 있으며 종말점 접근방법에 대한 환경메커니즘 모델 관련 연구는 진행 중에 있다.

따라서 국내 현실가능성을 고려했을 때 우선적으로 중간점 수준의 환경영향범주에 대한 한국형 특성화인자를 구축하고 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2.2. 물발자국 환경영향 범주, 범주지표 및 특성화인자 분석

2.2.1. 물발자국 환경영향 범주·범주지표 및 특성화인자 정의

물발자국 관련 문헌 및 연구보고서에서 환경영향 범주, 범주지표 및 특성화인자의 용어가 다양하게 사용되고 있으므로 먼저 ISO 14046의 기본이 되는 전과정평가 국제표준인 ISO 14044[4]에서 정의하고 있는 용어를 사용하였다.

2.2.2. 물발자국 환경영향 범주 체계 정의

ISO 14046 및 ISO 14073[5]에서 다루고 있는 주된 물발자국 영향범주는 크게 수량(Water quantity) 및 수질저하(Water degradation)로 분류한다. 수량 측면의 물발자국 영향범주는 물가용성(Water availability)과 물 부족(Water scarcity)로 구분하고, 수질 측면의 물발자국 영향범주는 부영양화, 산성화, 생태독성, 열오염으로 구분한다.

ISO 14046에서는 수량 및 수질 측면을 모두 고려한 영향평가 값(Indicator result)을 물발자국 프로파일로 정의한다.

2.2.3. 물발자국 환경영향 범주별 특성화인자 및 특성화인자 산정방법론 분석

부족 물발자국(Water scarcity footprint)의 특성화인자는 크게 Withdrawal to Availability (WTA), Consumption to Availability (CTA), Availability minus Demand (AMD)로 분류한다.

WTA, CTA, AMD 모두 가용수자원량을 특성화인자의 구성요소로 정의하고 있으나 취수량, 물 사용량, 수요량에 대한 정의를 달리하고 있다. 예를 들어 취수량이 30 m³일 때 사용량은 같은 권역으로 방류한 물의 양(20 m³)을 제외한 10 m³이

되며, 수요량은 사용량과 생태계 유지를 위해 필요한 수자원량(생태계요구량)의 합으로 정의한다.

Table 1에 수량 관련 특성화인자별 산정 방법론을 분류하여 나타내었다.

수량 관련 특성화인자는 산성화 특성화인자(Acidification potential; 이하 AP), 부영양화 특성화인자(Eutrophication potential; 이하 EP), 생태독성 특성화인자(Ecotoxicity potential; 이하 ETP) 및 열 오염 특성화인자(Thermal pollution characterization factor)로 분류한다.

산성화, 부영양화, 생태독성 특성화인자는 1992년 Heijungs에 의해 처음으로 개발 되었으며, 특정 지역에 국한되지 않는 특성화인자를 개발하였다. 지역적 특성 및 배출물의 거동을 고려하지 않았기 때문에 지역적 영향을 고려하지 못한다. 따라

Table 1. Methodology for characterization factor of water scarcity impact category

Type	Impact category	Characterization factor	Methodology
Water quantity	Water scarcity	WTA	Frischknecht et al. (2006) [6]
			Pfister et al. (2009) [7]
			Pfister et al. (2012) [8]
			Pfister et al. (2013) [9]
		CTA	Hoekstra et al. (2011) [10]
			Boulay et al. (2011) [11]
			Berger et al. (2014) [12]
		AMD	WULCA (2015) [13]
		the others	Yano et al. (2015) [14]

Table 2. Methodology for characterization factor by impact category

Impact category	Characterization factor		Methodology
Water degradation	Aquatic acidification	Site independent	Heijungs (1992) [15]
		Site dependent	Hauschild, Wenzel (1997) [16]
			Huijgreets (1999b) [17]
			Seppala et al (2006) [18]
	Aquatic eutrophication	Site independent	Heijungs (1992) [15]
		Site dependent	ReCiPe Huijbregts, Seppala (2001) [19]
	Aquatic ecotoxicity	Site independent	Heijungs (1992) [15]
		Site dependent	Huijbregts (1999a & 2000) [20]
			USEtox
	Thermal pollution	Site dependent	Verones et al (2010) [21]

서 이를 개선하기 위해 각 수질 영향범주(산성화, 부영양화, 생태독성, 열오염)에 대한 지역적 특성 및 배출물 거동을 고려하여 Table 2와 같이 특성화인자 산정방법론을 개발하였다.

산성화, 부영양화, 생태독성, 열오염과 같은 물발자국 영향 범주는 모두 Local impact이며 주로 유럽 지역에서 다매체 거동 모델링을 활용하여 특정 지역 배출물의 거동을 고려하였다.

2.3. 물발자국 환경영향 범주별 특성화인자 산정 가능성 검토를 위한 국내 물 관련 통계자료 적용을 위한 필요 데이터 검토 및 정리

2.3.1. 부족 물발자국 특성화인자 산정 방법론 별 필요 데이터 검토

부족 물발자국 방법론별 필요 데이터를 파악하고 이에 적용 가능한 국내 통계 데이터를 검토하였으며 주로 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 데이터 활용한다.

이를 위해 WTA 특성화인자 산정 방법론은 공통적으로 (연간/월간) 취수량 및 가용수자원량 데이터가 필요하며 방법론에 따라 (연간/월간) 강수량 데이터, CTA 특성화인자 산정 방법론의 경우 공통으로 필요한 데이터는 (연간/월간) 사용량이며 방법론에 따라 생태계요구량, 가용 지하수량 등의 데이터 추가적으로 필요하다.

또한 AMD 특성화인자 산정 방법론은 세계 평균 및 국내의 월간 가용수자원량과 수요량 데이터가 필요하며 기타 방법론인 Yano et al. [14]은 세계 평균 연간 강수량, 가용지표수량

등에 대한 데이터 필요하다.

일부 데이터는 통계 자료가 불충분하였으나 가정을 통해 산정 가능하며, 예를 들어, 월간 취수량의 경우 연간 취수량의 12로 나눈 값을 적용할 수 있으며 지하수 사용 비율은 지하수 취수량을 연간 사용량으로 나눈 값으로 하는 등 가정을 통해 산정할 수 있다.

국내 및 세계 평균 생태요구량은 방법론 참고문헌 중 Smakhtin [22]에서 제시한 주요 국가 별 생태요구량 산정비율을 참고하여 국내의 경우 가용수자원량의 27%, 세계 평균 생태요구량은 30%를 적용하였다.

2.3.2. 수질 관련 특성화인자 산정 방법론별 필요 데이터 검토

수질 관련 특성화인자 산정방법론 중 일부는 배출물의 거동을 고려하기 위해 다매체 거동모델을 적용하였으나 input에 따른 output 데이터의 불확도가 높다는 문제점이 있었다. 또한 현재 적용되고 있는 대부분의 다매체 거동 모델은 주로 유럽을 중심으로 연구되어, 국내 특성을 반영하지 못하는 한계가 있었다.

따라서 이번 연구에서는 국내 통계 데이터를 활용하여 산정이 가능한 부족 물발자국 특성화인자 산정 방법론에 한하여 산정 가능성 검토를 진행하였으며, 수질 관련 특성화인자 산정 방법론은 국내 통계 데이터가 거의 사용되지 않으므로 검토 범위에서 제외하였다.

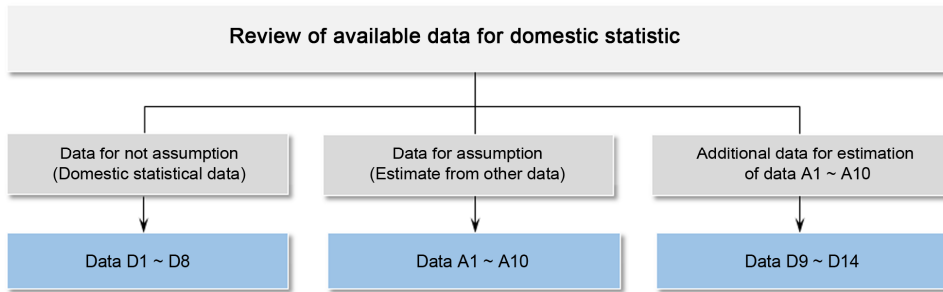


Figure 1. Classification of available domestic statistical data.

Table 3. List of domestic data (D1~D8)

No.	Required data	Reference
D1	Annual water withdrawal by region	WAMIS, Annual agriculture, industry, living water usage data by region ('00~'11)
D2	Annual available water resources by region	WAMIS, Annual Long-Term Runoff Data by Region ('00~'11)
D3	Monthly available water resources by region	WAMIS, Monthly Long-Term Runoff Data by Region ('00~'11)
D4	Annual precipitation by region	WAMIS, Average Area Annual Rainfall by Region ('00~'11)
D5	Monthly precipitation by region	WAMIS, Average Area Monthly Rainfall by Region ('00~'11)
D6	Available groundwater	Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Groundwater Management Basic Plan ('12~'21), Groundwater recharge and developable quantity data by large area ('11)
D7	World average annual precipitation	National Territory Traffic Statistics. Data on the status of water resources around the world ('09. Japan Water Resources Statistics Citation), 807 mm/yr
D8	Water storage	WAMIS, Dam Volume Data by Region

2.3.3. 국내 통계 데이터 가공 및 정리

부족 물발자국 특성화인자 산정 방법론의 경우, 방법론 별 중복되는 데이터 종류와 수집이 필요한 통계 데이터의 양이 많아 다음과 같이 정리 및 분류하였다.

통계 데이터 그대로 적용 가능할 경우 ‘D1~D8’, 데이터 부족으로 인해 가정이 필요한 데이터는 ‘A1~A10’로 표기하였으며 ‘A1~A10’을 산정하기 위해 추가적으로 필요한 데이터는 ‘D9~D14’로 분류한다.

주로 국가수자원관리종합시스템(WAMIS)의 데이터를 활용하였으며 WAMIS의 구축 시작 연도인 2000년을 기준으로 2011년까지의 통계 데이터의 평균값 적용하며 각 데이터의 출처 및 사용 형태는 Table 3을 참고한다.

Table 4에서는 Table 3의 국내 데이터를 활용하여, 특성화인자 산정에는 필요하지만 현재 불충분한 데이터에 대해 가정을 통해 산정한 데이터 목록을 나타내었다. 예를 들어 A1(권역별 가용 지표수량)의 경우 국내 통계 데이터인 D3(월간 권역별 장기유출 데이터)에서 D6(권역별 지하수 함량/개발가능량)을 뺀 값으로 산정할 수 있다. 이는 가용 수자원량에서 가용 지하수량을 제외한 가용 지표수량을 의미한다. 또한, A2(연간 권역별 사용량)의 경우는 D10(물이동 특성 데이터)과 D11(농업부분유효수량)을 더하여 산정할 수 있다. 즉 타권역으로 유출되는 수자원량과 농업유효수량을 합하여 연간 권역별 사용량을 가정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경영향 범주별 산정 가능한 특성화인자 산정 방법론 검토 결과

부족 물발자국 특성화인자의 경우 조사한 모든 방법론에 대해 특성화인자 산정 가능성을 검토하였으며, 수질 관련 특

Table 5. Water footprint methodology by environmental impact category

Impact category	Characterization factor	Methodology	Note
Water scarcity	WTA	Frischknecht et al. (2006) [6]	Water quantity
		Pfister et al. (2009) [7]	
		Pfister et al. (2012) [8]	
	CTA	Pfister et al. (2013) [9]	
		Hoekstra et al. (2011) [10]	
		Boulay et al. (2011) [11]	
AMD	WULCA (2015) [13]		
The others	Yano et al. (2015) [14]		
Aquatic acidification	Acidification potential	Heijungs (1992) [15] Hauschild, Wenzel (1997) [16]	Water degradation
Aquatic eutrophication	Eutrophication potential	Heijungs (1992) [15]	
Aquatic ecotoxicity	Ecotoxicity potential	Heijungs (1992) [15]	

Table 4. List of assumed data through domestic data (A1~A10)

No.	Required data	Data usage type		Reference
		Usage data	Definition	
A1	Quantity of available indexes by region	$A1 = (D2 \text{ or } D3) - D6$	Available water resources - Available groundwater	D3 : WAMIS, Monthly Long-Term Runoff Data by Region('00~'11) D6 : Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Groundwater recharge and developable quantity data by region / large area ('11)
A2	Annual usage by region	$A2 = D10 + D11$	Leaked to other regions + Agricultural effective rainfall	D10 : WAMIS, Water movement characteristic data D11 : WAMIS, Effective rainfall in agricultural area ('00~'11)
A3	Groundwater use ratio	$A3 = \frac{D12}{D10 + D11}$	$\frac{\text{Groundwater withdrawal}}{\text{Annual usage}}$	D10 : WAMIS, Water movement characteristic data D11 : WAMIS, Effective rainfall in agricultural area ('00~'11) D12 : National Groundwater Information Center (GIMS), Groundwater use statistics
A4	Decrease in water shortage due to groundwater storage (%)	$A4 = \frac{D6}{D13}$	$\frac{\text{Available groundwater}}{\text{Sphere area}}$	D6 : Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Groundwater recharge and developable quantity data by region / large area ('11) D13 : WAMIS, Area Characteristics, Sphere area Data
A5	Monthly usage by region	$A5 = \frac{A2}{12}$	$\frac{\text{Annual usage by region}}{12}$	
A6	Monthly water withdrawal by region	$A6 = \frac{D1}{12}$	$\frac{\text{Annual water withdrawal by area}}{12}$	D1 : WAMIS, Annual Agriculture, industry, living water usage data by region ('00~'11)
A7	World average monthly water availability	$A7 = \frac{D9}{12}$	$\frac{\text{World average annual water availability}}{12}$	D9 : National Territory Traffic Statistics, Data on the status of water resources around the world, Annual available water resources
A8	Domestic ecological demand	$A8 = D2 * 0.27$	Available water resources by area * 0.27	D2 : WAMIS, Annual Long-Term Runoff Data by Region ('00~'11)
A9	World average monthly demand	$A9 = (D14 + A7) * 0.3$	(Usage + Ecological requirement) * 0.3	D14 : International Statistics for water services 2012, IWA
A10	Monthly demand by domestic area	$A10 = A5 + A8$	Usage + Ecological requirement	

성화인자는 다매체 거동 모델을 필요로 하지 않는 방법론에 한하여 특성화인자를 산정 가능성을 검토하였다. 앞서 분석된 열오염 특성화인자 산정 방법론인 Verones et al. [21]의 경우 다매체 거동 모델을 필요하므로 본 연구에서 제외하였다.

Table 5는 환경영향 범주별 산정 가능한 방법론을 나타내었다.

3.2. 부족 물발자국 특성화인자 산정 방법론별 필요 데이터 확인

부족 물발자국 특성화인자 산정 방법론별 필요 데이터와 산정식은 Table 6과 같다. 앞서 국내 물 자원 통계자료 검토 및 분석한 결과를 토대로 영향범주별 산정 가능한 방법론을 확인하여 현 시점에서 특성화인자 산정이 가능한 방법론별로 필요한 데이터를 확인할 수 있었다. 통계 데이터는 불충분하지만 일부 가정을 통하여 방법론상 필요 데이터를 충족 가능하므로 모든 부족 물발자국 특성화인자는 산정 가능할 것으로 예측된다.

4. 결론

국내외 물발자국 방법론을 검토한 결과 국내외 호환성을 고려했을 때 국제표준(ISO 14046)을 기반으로 한 한국형 물발자국 산정방법론 구축 필요할 것으로 파악된다. 국제표준의 경우 공정/제품/조직에 대한 물발자국 산정 방향을 제시하

고 있으나 우리나라 농림축산식품부 방법론의 경우 제품에 대한 산정 방향만을 제시하고 있다. 또한 국제표준은 물발자국 영향평가를 수행하지 않을 경우 ‘물발자국’이 아닌 ‘물발자국 인벤토리’로 인정하고 있으나 농림축산식품부 방법론은 국내 특성화인자의 부재로 인해 물발자국 영향평가 단계 제외하고 있다.

따라서 평가대상 확대 및 한국형 특성화인자 개발 등 국내외 호환성을 고려하여 국제표준의 요구사항을 충분히 반영한 한국형 물발자국 산정방법론 구축이 필요한 것으로 판단된다.

물발자국의 국내 적합성 판단 기준으로 통계 데이터에 대한 검토를 진행한 결과 국내 통계 자료를 바탕으로 특성화인자 산정한 결과 WTA는 통계 자료가 충분하였으나 CTA 및 AMD의 경우 데이터가 불충분하여 가정이 필요한 경우가 많았다.

국내외 호환성 측면의 경우, 현 상황에서는 어떤 특성화인자를 적용해도 문제가 없을 것으로 판단되나 특성화인자 개발 추세로 보았을 때 AMD 개념을 적용한 특성화인자가 적합할 것으로 판단된다.

국내 적합성 측면의 경우, WTA 개념을 적용한 특성화인자가 현재 구축된 데이터로 산정하기에 가장 적합할 것으로 보이나, 장기적인 측면에서 국가 차원의 데이터가 불충분하여 가정이 필요한 정보를 수집 및 관리하여 향후 AMD 개념의 특성화인자 산정시 가정 데이터를 최소화할 수 있는 방안으로 마련하도록 해야 할 것이다.

Table 6. Required data and estimation logic for characterization factor of water scarcity impact category

Type	Methodology	Required data										Estimation logic										
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10			
WTA	Frischknecht (2006) [6]	✓	✓																		$\left(\frac{D1}{D2 \times 20\%}\right)^2$	
	Pfister (2009) [7]	✓	✓		✓	✓															1. $WTA_i = \frac{D1}{D2}$ 2. $VF = e^{\sqrt{\ln(D4)^2 + \ln(D5)^2}}$ 3. $WTA^* = VF(\text{or } \sqrt{VF}) \times WTA_i$ 4. $WSI = \frac{1}{1 + e^{-6.4 \cdot WTA^*} \left(\frac{1}{0.01} - 1\right)}$	
	Pfister (2012) [8]	✓	✓		✓	✓															1. Same to method at Pfister et al. (2009) 2. $WSI = \frac{Local\ WSI}{0.602}$	
	Pfister (2013) [9]				✓	✓										✓					1. $WTA_i = \frac{A6}{D3}$ 2. $WTA_{month}^* = D4 \times WTA_i$ 3. $WSI_{mon} = \frac{1}{1 + e^{-9.8 \cdot WTA_{month}^*} \left(\frac{1}{0.01} - 1\right)}$	
CTA	Hoekstra (2011) [10]			✓											✓					✓	$\frac{A5}{D3 - A8}$	
	Boulay (2011) [11]						✓		✓	✓	✓										$WSI_{surface} = \frac{A2 \times (1 - A3)}{A1}$ $WSI_{CRW} = \frac{A2 \times A3}{D6}$	
	Berger (2014) [12]		✓						✓	✓	✓										1. $SWS = \frac{\sum D8}{100}$ 2. $CTA^* = \frac{A2}{D2 + SWS} \cdot A4$ 3. $WDF = \frac{1}{1 + e^{-40 \cdot CTA^*} \left(\frac{1}{0.01} - 1\right)}$	
AMD	WULCA (2015) [13]			✓												✓		✓	✓		1. $UWR = \frac{D3 - A10}{A7 - A9}$ 2. $CF = \frac{1}{UWR}$	
The others	Yano (2015) [14]					✓	✓		✓												$CF_{surface} = \frac{D7}{A1}$ $CF_{groundwater} = \frac{D7}{D6}$	

감사

본 논문은 산업통상자원부 정책연구과제(국내외 호환가능한 물발자국 산정방법 개발 연구)로 지원된 연구임.

References

1. Arjen, Y. H., Ashok, K. C., Maite, M. A., and Mesfin, M. M., The Water Footprint Assessment Manual Setting the Global Standard, Water Footprint Network (2014).
2. ISO 14046:2014 Environmental Management - Water Footprint - Principles, Requirements and Guidelines (2014).
3. Kim, Y. D., "Estimate and Apply Water Footprint for Sustainable Water Use," Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (2014).
4. ISO 14044:2006 Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines (2006).
5. ISO/TR 14073:2017 Environmental Management - Water Footprint - Illustrative Examples on How to Apply ISO 14046 (2017).
6. Frischknecht, R., Steiner, R., and Jungbluth, N., The Ecological Scarcity Method-Eco-Factors 2006, A Method for Impact Assessment in LCA., Federal Office for the Environment, Bern, Swiss (2009).
7. Pfister, S., Koehler, A., and Hellweg, S., "Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA," *Environ. Sci. Technol.*, **43**(11), 4098-4104 (2009).
8. Ridoutt, B. G., and Pfister, S., "A New Footprint Calculation Method Integration Consumptive and Degradative Water Use into a Single Stand-Alone Indicator," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **18**, 204-207 (2012).
9. Pfister, S., and Bayer, P., "Monthly Water Stress: Spatially and Temporally Explicit Consumptive Water Footprint of Global Crop Production," *J. Cleaner Production*, **73**, 52-62 (2013).
10. Hoekstra, A. Y., and Mekonnen, M. M., Global Water Scarcity: The Monthly Blue Water Footprint Compared to Blue Water Availability for the World'S Major River Basins, Value of Water Research Report Series No. 53 (2011).
11. Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschenes, L., and Margni, M., "Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health," *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 8948-8957 (2011).
12. Berger, M., Van der Ent, R., Eisner, S., Bach, V., and Finkbeiner, M., "Water Accounting and Vulnerability Evaluation: Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting," *Environ. Sci. Technol.*, **48**, 4521-4528 (2014).
13. Presentation at the Annual Meeting SETAC Europe, Barcelona, WULCA, Spain (May 2015).
14. Yano, S., Hanasaki, N., Itsubo, N., and Oki, T., "Water Scarcity Footprints by Considering the Differences in Water Sources," *Sustainability*, **7**, 9753-9772 (2015).
15. Heijungs, R., Guinee, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, H. A., and Sleswijk, W. A., Environmental Life Cycle Assessments of Products, NOH Report 9266, Center of Environmental Science, Leiden, Netherlands (1992).
16. Hauschild, M., and Wenzel, H., Environmental Assessment of Products. Volume 2: Scientific Backgrounds, Springer, US (1998).
17. Huijbregts, M., Life-cycle Impact Assessment of Acidifying and Eutrophying Air Pollutants, Calculation of Equivalency Factors with RAINS-LCA, Draft Version, University of Amsterdam, Netherlands (1999).
18. Seppala, J., Posch, M., Johansson, M., and Hettelingh, J. P., "Country-Dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based in Accumulated Exceedance as an impact category indicator," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **11**(6), 403-416 (2006).
19. Huijbregts, M., and Seppala, J., "Life Cycle Impact Assessment of Pollutants Causing Aquatic Eutrophication," *Int. J. Life Cycle Assess.*, **6**(6) 339-343 (2001).
20. Huijbregts, M., Priority Assessment of Toxic Substances in LCA, Development and Application of the Multi-Media Fate, Exposure and Effect Model USES-LCA, Project of Dutch Organisation for Scientific Research, University of Amsterdam, Netherlands (1999).
21. Verones, F., Hanafiah, M. M., Pfister, S., Huijbregts, M., Pelletier, J. G., and Koehler, A., "Characterization Factors for Thermal Pollution in Freshwater Aquatic Environments," *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 9364-9369 (2011).
22. Smakhtin, V., Revenga, C., and Doll, P., "A Pilot Global Assessment of Environmental Water Requirements and Scarcity," *Water Int.*, **29**(3), 307-317 (2004).