



K-water 건설사업의 탄소배출량 산정에 관한 연구

A study on the estimation methodology of carbon emissions for construction project of K-water

곽인호^{1,*}·위대형¹·김남룡²

In-Ho Kwak^{1,*}·Dae-Hyung Wie¹·Nam-Ryong Kim²

¹(주)엔디렉션, ²K-water연구원 물인프라연구소

¹ENDIRECTION Co., Ltd.

²Water Energy & Infrastructure Research Center, K-water Research Institute

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

ABSTRACT

The “Carbon Neutral” has become the most important goal to achieve in the era of the climate change crisis. K-water has prepared a roadmap for implementing “Carbon Neutral” by 2050. However, only the reduction targets and strategies for scope 1 and 2 have been set, so the management of carbon generated during the construction project and upfront carbon is not being implemented. Therefore, in this study, the criteria and methodology for estimation carbon emissions in the construction sector at domestic and foreign were reviewed, and a methodology for estimation carbon emissions suitable for K-water construction projects was presented, and a case study was conducted. As a result, most of the carbon emissions were more than 90% of the upfront emissions due to material production. Therefore, upfront carbon management is required for carbon management of K-water construction projects, and it is necessary to quantify carbon emissions through GHG construction inventory, etc., and to establish strategies for future reduction technologies.

Key words: Carbon emissions, Estimation methodology of carbon emissions, K-water construction work, Carbon neutral, Upfront carbon

주제어: 탄소배출량, 탄소배출량 산정방법, K-water 건설공사, 탄소중립, 업프론트(upfront) 탄소

Received 28 November 2022, revised 14 December 2022, accepted 15 December 2022.

*Corresponding author: In-Ho Kwak (E-mail: inho@endirection.co.k; Fax: +82-505-099-0800, Tel. +82-505-099-0802)

• **곽인호 (대표이사) / In-Ho Kwak (CEO)**

서울시 강남구 테헤란로 113길 13(삼성동, 칠성빌딩) 502호, 06173
113, Teheran-ro 113-gil, Gangnam-gu, Seoul 06173, Republic of Korea

• **위대형 (본부장) / Dae-Hyung Wie (Head Manager)**

서울시 강남구 테헤란로 113길 13(삼성동, 칠성빌딩) 502호, 06173
113, Teheran-ro 113-gil, Gangnam-gu, Seoul 06173, Republic of Korea

• **김남룡 (책임연구원) / Nam-Ryong Kim (Principal Researcher)**

대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
2125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea

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. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 이 시대 최대의 환경문제 중 하나이다. 지구온난화는 온실가스로 인하여 유발되며, 현 상태로 온도 수준이 상승한다면 전 세계에 환경, 사회, 경제 전 분야에서 심각한 영향을 미칠 수 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 1.5℃ 특별보고서에 따르면, 전 세계 온실가스 배출량은 지난 10년 동안 지속적으로 증가하였으며, 2100년까지 지구 온도 1.5℃ 상승 시나리오가 가능하기 위해서는 2050년까지 전지구적 탄소중립을 달성해야 하는 것으로 나타났다(IPCC, 2018). 탄소중립은 인간의 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고, 남은 온실가스는 흡수, 제거해서 실질적인 배출량이 “0”이 되는 상태로 넷제로(Net-zero)라고 불린다.

탄소중립을 위하여 2015년에 체결된 파리협약에 따라 기후변화협약에 가입한 국가를 중심으로 탄소중립을 위한 국가별 감축목표를 설정하고, LEDS(Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies)를 수립하고 있다. 우리나라도 탄소중립을 달성하기 위하여 “2050 탄소중립 추진전략”을 발표하였고, 이를 위한 정책과제를 단계적으로 추진하고 있다.

K-water(한국수자원공사)는 온실가스에너지목표관리제 관리대상 기업으로 자체적으로 온실가스 인벤토리를 구축하고, “K-water 2050 탄소중립 로드맵”을 수립하여 시행중이다(K-water, 2021). 하지만, 조직경계 내에서 탄소배출량을 줄이기 위한 노력에는 한계가 있으며, 탄소중립을 위하여 LCA(Life Cycle Assessment) 기반으로 K-water가 추진하는 사업의 투입되는 자재 생산부터 시설물의 해체 및 폐기까지 전과정에 대하여 탄소배출량을 산정하고 관리해야 할 필요성이 지속적으로 대두되고 있다.

K-water가 수행하는 사업중 댐 시설의 건설, 하천정비, 도로 등 SOC(Social Overhead Capital) 사업에서 발생하는 탄소 중 상당 부분은 만들어진 시설물의 운영과정뿐 아니라 해당 시설물을 건설하기 위하여 투입되는 자재 생산과정에서도 발생되며, 운영 중 배출량(건물의 난방, 냉방 및 조명 등에 사용되는 에너지에서 생성되는 온실가스)이외 각종 건축자재를 시공한 뒤 사용, 유지관리 및 폐기단계에서 발생하는 내재탄소(embodied carbon emissions) 또는 원자재나 건설 공정 과정 중에 발생하는 “업프론트(upfront) 탄소”가 약

1/3 정도 차지하는 것으로 알려져 있다 (World Green Building, 2019; PWC, 2021).

따라서, 본 연구에서는 국내외 탄소배출량 산정방법론과 지침을 검토하여 K-water 건설사업 중 원자재나 건설 공정 과정 중에 발생하는 업프론트 탄소배출량을 정량적으로 산정할 수 있는 방법론을 선정하였고, 이를 활용하여 K-water 건설사업에 대하여 사례분석을 실시하였다. 그리고, 향후 지속적인 K-water 건설사업에 대한 탄소배출량 산정과 관리를 위한 방안을 제시하였다.

2. K-water 건설공사 탄소배출량 산정 방법

2.1 K-water 건설공사 탄소배출량 산정방법론 설정을 위한 표준 및 지침 분석

건설공사는 대규모의 에너지와 자원이 투입되는 산업으로 일반 제조업과는 다른 특징을 보이므로, 현재 제조업 중심으로 탄소배출량을 산정하는 지침을 바로 적용하기에는 무리가 있다. 건설공사는 공사기간 내 장비 사용에 따른 에너지 배출이 직접적인 배출에 기인하며, 도로공사의 경우, 직접적인 배출이 아닌 자재 생산, 운송 등에 의해 발생하는 업프론트 탄소배출량이 90% 이상 차지한다 (Kwak et al., 2012). 따라서 LCA관점에서 제품 또는 시스템에 대하여 원료 채취부터 폐기 및 재활용까지 전과정에 대하여 탄소배출량을 산정하는 방식에 대한 방법에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 K-water 건설공사 탄소배출량 산정에 적합한 방법을 선정하기 위하여, Table 1.에 나타난 것과 같이, ISO(International Organization for Standardization) 14064, EN(European Norm) 15978 등의 EU(European Union) 및 국제 표준과 우리나라 국토교통부에서 제시한 “시설물별 탄소배출량 산정가이드라인” 등을 검토하였다.

검토 결과, K-water 건설공사의 탄소배출량 산정방법은 Table 1.에 나타난 지침을 복합적으로 검토하여 제시된, RICS(Royal Institution of Chartered Surveyors)의 “Whole life carbon assessment for the built environment (WLCA)”, 즉, EN 15978과 PAS(Publicly Available Specification) 2080에서 제시한 탄소 배출원과 관리대상 온실가스의 범위를 선정하고, 국토교통부의 “시설

**Table 1.** Key international and European standards and domestic carbon emission calculation methods referred to in this study

Standard	Main Contents	Regional jurisdiction
IPCC(2006)	• Guidelines for building inventory to assess national greenhouse gas emissions	International standard
ISO 14040: 2006	• Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework	International standard
ISO 14044: 2006	• Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines	International standard
WRI/GHG Protocol(2011)	• The Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard	International standard
MOLIT(2011)	• Carbon emissions calculation methods and guidelines for roads, railways and buildings	Korea document
EN 15978: 2011	• Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method	European standard
EN 15804: 2012 + A1: 2013	• Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products	European standard
EN 16449: 2014	• Wood and wood-based products. Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide	European standard
EN 16485: 2014	• Round and sawn timber. Environmental Product Declarations. • Product category rules for wood and wood-based products for use in construction	European standard
PAS 2080: 2016	• Carbon management in infrastructure	UK document
ISO 21930: 2017	• Sustainability in buildings and civil engineering works – Core rules for environmental product declarations of construction products and services	International standard
ISO/TS 14067: 2018	• Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification	International standard
EN 16757: 2017	• Sustainability of construction works. • Environmental product declarations. • Product Category Rules for concrete and concrete elements	European standard
RICS(2017)	• Whole life carbon assessment for the built environment	UK document
ISO 14064-1: 2018	• Specifies principles and requirements at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas (GHG) emissions and removals.	International standard
ISO 14064-2: 2019	• Specifies principles and requirements and provides guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of activities intended to cause greenhouse gas (GHG) emission reductions or removal enhancements.	International standard
ISO 14064-3: 2019	• Specifies principles and requirements and provides guidance for those conducting or managing the validation and/or verification of greenhouse gas (GHG) assertions.	International standard

물별 탄소배출량 산정 지침”에서 제시한 국내 건설공사 시 수집해야 하는 데이터 수집 목록과 방법을 준용하여 검토하였다. 우선 K-water 건설사업의 life cycle 단계를 구분하였으며, 분석하고자 하는 주요 사업에 대해서 평가 범위 및 경계설정, 활동 데이터 수집 및 분석 그리고 탄소배출량 산정의 3단계로 진행 된다.

2.2 평가 범위 및 경계설정

평가 범위 및 경계설정에서는 평가 대상 사업의 내용과 주요 활동 사항, 시스템 경계를 설정하고 범위 등을 결정한다. 데이터 수집 및 분석 단계에서는 분석 시 필요한 데이터 리스트를 정리하고 해당 데이터를 수집하는 방안, 기간 등을 조사하여, 데이터 분석을 통해 투입 자재량, 에너지 사용량 등을 분석한다. 평

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437

Table 2. Estimation methods of GHGs emission for K-water Projects

Category		Composition
Scope and boundary definition	Assessment target	• Assessment target and method definition
	Assessment of life cycle	• life cycle definition, method
	Target greenhouse gases	• Consideration of the kinds of greenhouse gases
	Assessment scope of life cycle	• Life cycle definition by assessment scope and target, method
	Identify source	• Direct emissions, Indirect emissions, other indirect emissions separated by sources calculations
Data collection and analysis	Data collection	• Data collection of life cycle for carbon emissions calculations
	Data analysis for emissions calculation	• Input analysis for emissions analysis
Carbon emissions calculation	Emissions formula definition	• Construction stage: carbon emissions formula according to input materials, equipment usage
	Connection with carbon emissions factor	• Connection with materials DB and energy DB
	Carbon emissions calculation	• Calculations of life cycle carbon emissions
	Cut-off level for data analysis	• Cut-off level setting for life cycle

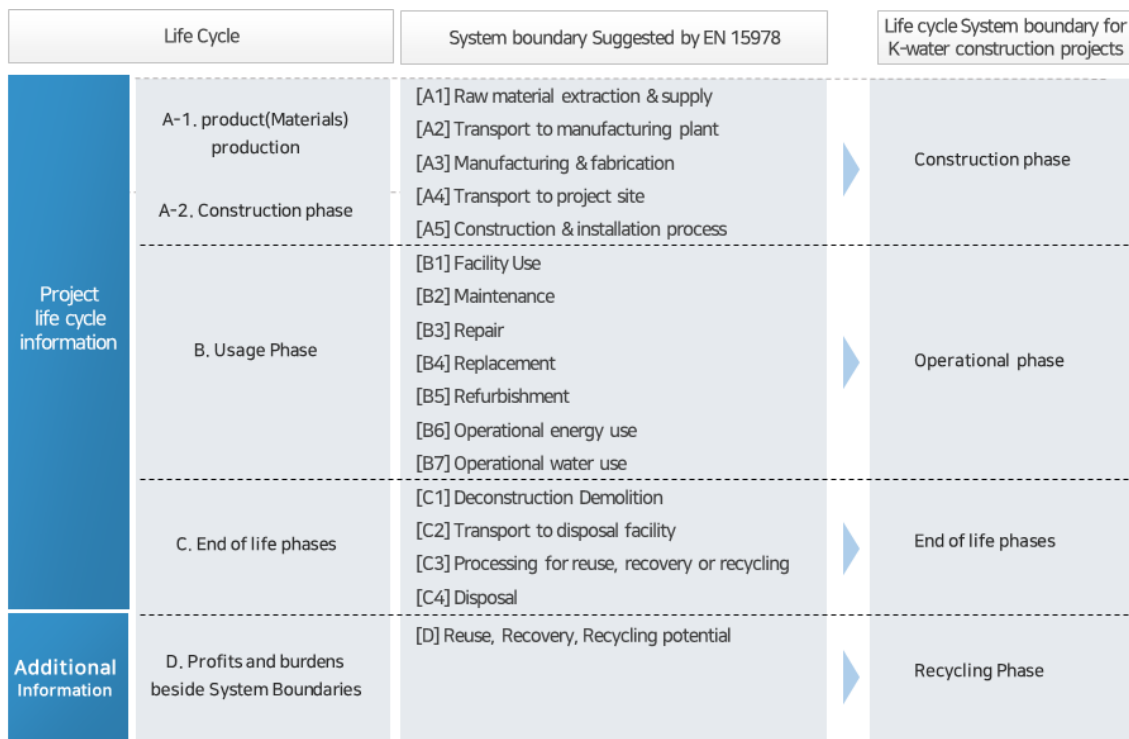


Fig. 1. System boundary for K-water construction projects.

가 범위 및 경계설정과 데이터 수집 및 분석 결과를 활용하여 탄소배출량 산정을 수행하며, 탄소배출량 산정시에는 배출량 산정식, 사용 DB(Database) 및 배출계수 연계 기준 등을 확정하고 세부사업별 배출량 산정, 분석 자료의 Cut-off, 주요 민감도 분석 등을 수

행하며 세부 절차는 Table 2와 같다.

K-water 건설사업에 대한 탄소배출량 산정 평가 범위는 한국수자원공사법 제9조에 명시된 수자원의 종합적인 이용·개발을 위한 다목적댐 및 생활용수 등의 공급을 위한 댐, 하구둑 및 다목적용수로, 내륙 주운



pp. 319-327
pp. 329-337
pp. 339-349
pp. 351-362
pp. 363-375
pp. 377-390
pp. 391-402
pp. 403-411
pp. 413-425
pp. 427-437

및 운하시설과 기타 수도 시설 등 관련 건설사업으로 설정한다. K-water는 20개 다목적댐, 14개 용수댐, 보 17개소 및 아라뱃길 운영, 48개 광역·공업용수도 시설 구축, 3개 수상태양광 설비를 운영하고 있으며 국내 뿐만 아니라 해외 댐 개발사업, 수도 시설 확충 사업 등 물관리 관련 다양한 사업을 수행 중이다.

K-water에서 발주하는 댐, 수도 시설, 도로시설 등 대상 건설 활동 수행시에 탄소배출원은 WRI(World Resources Institute)/WBCSD(World Business Council for Sustainable Development) GHG(Greenhouse Gas) Protocol에 의거 온실가스 배출원 규명 시 직접배출(Scope 1), 간접배출(Scope 2), 그 밖의 간접배출(Scope 3) 3가지로 구분하여 산정하며 탄소배출량 산정 시 대상 온실가스는 IPCC에서 제공하는 지구온난화 지수(GWP, Global Warming Potential) 값을 적용하여 CO₂-equivalent (CO₂-eq.)로 산정한다.

EN15978, PAS 2080 및 WLCA에서는 건설사업의 전과정은 재료의 생산 단계(A-1. product(Materials) production), 건설 단계(A-2, Construction phase), 해당 시설물의 운용단계(B. Usage Phase), 해당 시설물의 해체 및 철거 단계(C. End of life phase) 그리고 건설재료의 재사용, 재활용 등의 재활용 단계(D. Profits and burdens beside System Boundaries)로 구분하고 있다(BSI, 2016: EN15978, 2011; RICS, 2017). 또한 국토교통부의 시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인에서는 건설사업의 단계를 시공, 운영, 폐기 및 재활용 단계로 구분하고 있다(MOLIT, 2011). 따라서 본 연구에서는 K-water의 건설사업의 전과정을 Fig. 1과 같이 시공(Construction phase), 운용(Operational phase), 해체 및 폐기(End of life phases)의 3단계로 구분하고, 추가적인 재료 재활용 단계는 재료의 재활용으로 설정하되 별도 탄소배출량을 산정하지 않는 것으로 적용하였다.

2.3 활동 데이터 수집 및 분석

활동 데이터 수집 및 분석 단계에서는 K-water 건설사업의 사업 수행 절차에 따른 기초 및 상세조사 보고서, 설계 관련 보고서(기본설계, 실시설계), 최종 준공기준 설계 내역서 등의 자료를 수집하며, 데이터 수집 수준에 따라 분석 가능 데이터의 신뢰도 수준 등을 명시하여 반영한다.

기초 및 상세조사 보고서에서는 대상 사업의 개요,

사업 주요 내용, 용량, 시설 정보 등을 파악할 수 있으나 탄소배출량 산정 시에 필요한 실제 자재 사용량, 장비 사용 등의 데이터를 수집하기에 한계가 있다. 따라서 일부 가용 가능한 데이터를 제외하고는 사업 현황(시설용량, 사업부지 등) 자료만 참고하고 그 외 실제 분석을 위한 데이터는 설계 관련 보고서를 중심으로 조사하여 분석한다.

기본설계 및 실시설계 보고서 등 설계 관련 보고서에는 대상 사업에 대한 구체적인 사업 내역, 공사비, 사업 및 세부 공종별 규격 및 수량 등이 명시되어 있어, 탄소배출량 산정이 가능하므로 준공기준 설계내역서 데이터를 수집하는 것이 중요하며 세부 일위대가, 산정근거(산근) 등 산정 근거가 세부적으로 명시되어 있는 데이터를 수집할수록 신뢰성이 높은 탄소배출량 결과를 산정할 수 있다.

설계내역서 기준은 최종 설계 변경 사항이 반영된 최종 설계내역을 기준으로 분석을 수행하여야 하며 설계내역 프로그램인 EBS(Event Break down System for Construction) 기준 파일로 수집이 가능할 경우 소요자원 집계 수행 등을 활용하여 분석 기간 등을 단축하여 산정할 수 있다. EBS 기준 파일이 없이 엑셀 기준 설계내역서를 수집하여 분석할 경우 자료 확보는 용이하나 상대적으로 분석 시간이 다소 소요된다. 단점이 있다. 반면, 세부 사업 및 공종별로 배출량 기여도 분석을 다양하게 수행할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 일반적인 데이터 수집 및 분석 시 활용되는 엑셀파일 기준 설계내역서 자료 수집을 통한 탄소배출량 산정방법을 도출하였으며, 조사 대상 자료는 실시설계 내역서, 일위대가표, 표준품셈, 소요자원 집계표, 중기사용내역서 등이며 세부 수집 항목 및 분석 자료는 Table 3에 나타내었다. 자재사용량은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 작업량과 일위대가상 자재 투입물량의 곱으로 산정하며 장비별 에너지 사용량 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 시간당 작업량과 연비 등의 인자를 활용하여 산정한다.

2.4 탄소배출량 산정

평가 범위 및 경계가 설정되고 그에 따른 활동 데이터를 수집하여 자재 및 장비 사용량 등의 분석이 완료되면, 도출된 데이터를 활용하여 IPCC 국가 인벤토리 가이드라인에서 정한 탄소배출량 산정방식을 기

준으로 Table 4.에 나타난 것과 같이 배출량 산정을 수행한다.

탄소배출량 산정을 위해서는 장비, 자재 등 각 항목 별 해당하는 배출계수(LCI DB(Life Cycle Inventory Database))를 연계하여야 하며, DB 적용 시에 신뢰성이 높은 국가 LCI DB를 우선하여 적용한다. 국가 LCI DB로 연계되는 물질이 없으면 기타 국내 연구기관 등에서 수행하여 개발된 DB를 연계하며, 국가 및 국내 DB가 없을 시 GLAD(Global LCA Data Access network)에 등록된 국외 주요 DB를 활용하되 해당 DB 사용 시의 산정 근거를 상세하게 명시한다.

건설공사에 투입되는 수많은 자재 중에는 관련 LCI

DB가 구축되어 있지 않은 경우가 대부분이나, 단일재질이거나 유사재질로 DB가 연계할 수 있는 경우 관련 LCI DB를 적용하며, 화학물질 등은 제품 MSDS (Material Safety Data Sheet) 조사를 통해 구성성분 물질 비율을 참고하여 온실가스 배출계수를 추정 및 적용할 수 있다.

데이터 수집 시의 설계내역서 상 자재사용량의 단위와 LCI DB 구축 기준 단위가 상이할 경우 별도의 환산을 적용하여 단위 기준을 설정하여야 하며 설계내역서 세부규격에 단위 환산을 위한 기준 등이 명시되어 있는 경우 해당 내용을 반영하여 도출한다.

설계내역서에서 탄소배출량 산정 대상은 공사비 중

Table 3. Data collection and analysis contents

Category	Analysis contents
Detail estimate sheet	• Work amount by construction work, Input amount(the material cost)
Itemized unit cost	• Material input(ton, m ³ , etc), Energy usage due to equipment usage (L)
A standard of estimate	• The application of the average standard amount of construction work when there is no basis for calculating the details such as itemized unit cost
Total material input	• Calculation of inputs by material and usage by equipment energy source
Heavy equipment usage estimate	• Unit price, Equipment usage time(hr/unit)

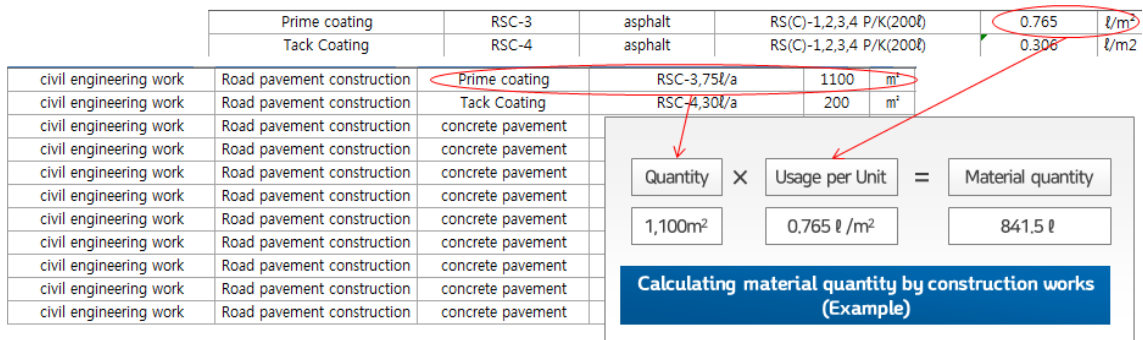


Fig. 2. Example of calculating material quantity by construction works.

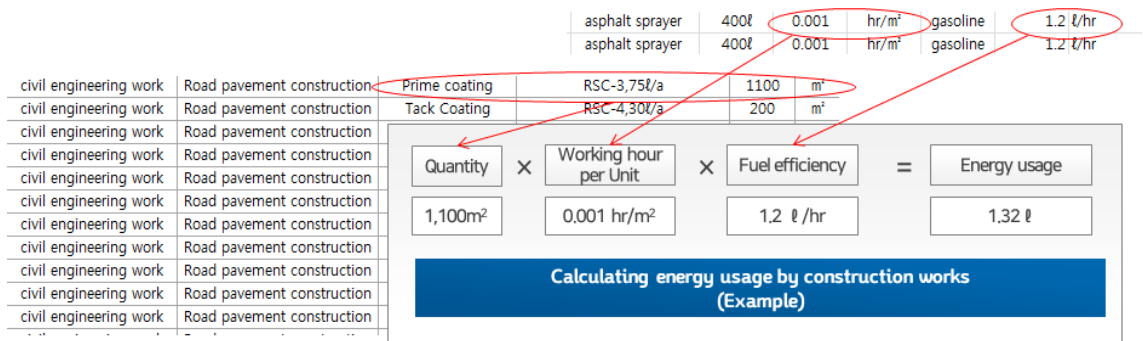


Fig. 3. Example of calculating energy usage by construction works.



pp. 319-327
pp. 329-337
pp. 339-349
pp. 351-362
pp. 363-375
pp. 377-390
pp. 391-402
pp. 403-411
pp. 413-425
pp. 427-437

Table 4. Calculation of GHGs emissions and applicable DB for K-water construction projects

Calculation items	Equation	Applicable data	Remarks
Material input (ton, m ³ , etc)	Work amount (unit) × Material inputs (ton, m ³ /unit)	• Estimation system of Design/ Calculation basis	Activity data for scope 3
Energy usage due to equipment usage (L)	Work amount (unit) / amount per hour (unit/hr) × fuel efficiency(L/hr) or Work amount (unit) × Equipment usage time(hr/unit) × fuel efficiency (L/hr)	• Select according to the calculation method in the estimation of design (Only for diesel or gasoline)	Activity data for scope 1
CO ₂ emissions due to material input (tCO ₂ -eq)	∑[Material input (kg, m ³ etc) × Emission coefficient (tGHG(CO ₂ /CH ₄ / N ₂ O)/kg, m ³ etc) × GWP]	National LCI DB, UNEP-GLAD DB ^{a)} , Ecoinvent DB etc can be applied	Scope 3 Upfront carbon emissions
CO ₂ emissions from equipment use (tCO ₂ -eq)	∑[Energy usage(kWh, m ³ etc) × Permutations(MJ/kWh, m ³ etc) × Emission coefficient (tGHGs (CO ₂ /CH ₄ /N ₂ O)/T)] × 10 ⁻⁹ × GWP]	National calorific value ^{b)} and IPCC 2006 calorific amount ^{c)} Can be applied. The basic emission coefficients by fuel and greenhouse gas in the mobile combustion (road) sector may be applied.	Scope 1 or 2 Direct Emission Indirect Emission

a) UNEP-GLAD: Global LCA Data Access network
b) Energy Law Enforcement Rules
c) GWP: IPCC 2006 Guideline

Table 5. Overview of target project(Sihwa MTV Line 1-117)

Category	Contents	Category	Contents
Target project name	• Sihwa MTV Line 1-117	Length	• L=1.36 km
Location	• Wolgot-dong, Siheung-si, Gyeonggi-do	Major facilities	• Bridge: 688 m / 1 ea(Regid-Frame-Typed Segmental PSC Box Girder Bridges) • Underground road: 80 m / 1 ea(PSTM)
Width of road	• B=27.0 m ~ 31.3 m(6 lane road)		

재료비에 해당하는 항목만을 대상으로 수행하며 노무비, 인건비는 인력에 의한 작업으로 제외하고 경비를 시스템 경계상 해당하지 않는 것으로 제외하여 산정한다. 전체 설계내역 및 세부공정에 대한 재료비 항목에 대한 탄소배출량 산정을 완료한 이후 전체 재료비 중 탄소배출량 산정 재료비의 비율을 산정하여 Cut-off 수준을 도출하며 일반적으로 90% 이상의 재료비를 분석하고 세부 데이터 연계 및 산정식 등의 이상이 없으면 신뢰성이 높은 탄소배출량 산정 결과로 간주할 수 있다.

현재 건설공사에 투입되는 자재 및 물질 중에는 복합재질로 구성된 부품이나 자재 등도 많아 현재 DB 구축 수준으로는 산정이 어려운 항목이 있으며 향후 주요 자재 등에 대한 신규 LCI DB 구축, 조사 등이 이루어지면 해당 내용을 반영하여 탄소배출량 신뢰성을 향상할 수 있다.

3. K-water 건설공사 탄소배출량 사례 분석

3.1 분석 개요

건설공사 탄소배출량 산정방법에 따른 평가 범위 및 경계설정, 활동 데이터 수집 및 분석, 탄소배출량 산정 절차 및 방법에 따라 실제 K-water 건설공사에 대한 탄소배출량을 분석하였다.

본 연구에서는 시설물의 운영은 현재 K-water의 온실가스 인벤토리로 인하여 보유하고 운영하는 시설에 대한 관리를 수행 중이므로 별도 산정하지 않았고, 해체 및 폐기단계와 재료의 재활용으로 인한 탄소배출량은 산정을 위한 기초 데이터 확보의 어려움으로 제외하고 시공단계, 즉 특정 공사에서 시공중 장비 사용으로 인하여 발생하는 탄소배출량과 해당 공사 중 필요한 자재 생산 때문에 배출된 탄소배출량(내재 탄소)에 한정하여 분석하였다.

분석 대상 건설공사는 K-water에서 발주한 우회도로 건설공사 사례이며 도로폭이 6차로, 교량 1개소, 지하차도 1개소가 포함된 도로연장 1.36km 공사로 해당 사업의 실시설계 보고서, 공사비산출서 등의 자료를 수집하여 탄소배출량 분석을 수행하였다. 분석 사례 공사의 세부 사업 개요는 Table 5와 같다.

분석 대상 공사의 평가 범위 및 대상은 K-water에서 발주한 우회도로의 시공단계로 설정하였고, 탄소배출원은 직접배출(Scope 1), 간접배출(Scope 2), 그 밖의 간접배출(Scope 3)에 대하여 산정하였다. 해당사업의 공사비 내역 상 재료비 항목에 해당하는 자재사용, 장

비 투입만 탄소배출량을 산정하였으며, 노무비나 인건비는 인력에 의한 작업으로 범위에서 제외하였으며, 경비 사용에 대한 부분은 시스템 경계에 해당하지 않는 것으로 제외하였다.

활동 데이터 수집을 통해 대상 우회도로 공사의 실시설계 보고서, 공사비산출서, 산출내역서 등의 자료를 수집하였으며, 세부공종별 투입 자재, 사용 장비 항목을 도출하였다. 실시설계 보고서에서는 사업의 목적, 범위, 공사개요 등의 내용을 파악하고 실제 탄소배출량 산정에 필요한 자재 투입, 장비 사용 등의 수량은 산출내역서 자료를 중심으로 분석하였다.

Table 6. Detailed Construction work classification

No.	Category	No.	Category	No.	Constriction work
I	Common cost	I.1	Common facilities	A	Common part
II	Road transportation facilities	II.1	Main road	A	Cut embankment session
				B	Road structure
				C	Pavement of a road
				D	Road safety facilities
				E	Landscape facilities
III	Bridge facilities	III.1	Wolgot Bridge	A	Bridge substructure
				B	Bridge road
				C	Bridge safety facilities
				D	Bridge structure
IV	Government-supplied materials	-	-	-	-

Table 7. Input material quantity and carbon emission DB by major material

Category	Material quantity	Unit	DB name	DB source
Sention steel	1,872	TON	electric steel sections	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Trade, Industry and Energy, 2003)
Gravel	25,696	M ³	Gravel	National LCI DB ^{a)} (KEITI, 2019)
Steel bar	12,445	TON	electric steel deformed bars	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Trade, Industry and Energy, 2003)
Cement	44,125	bag	Cement	National LCI DB ^{a)} (KEITI, 2016)
Steel grating	194	EA	Stainless Steel	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Environment, 2005)
Steel pipe	5,751	M	carbon steel	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Environment, 2005)
PET	3,796	M	PET	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Environment, 2003)
Sand	36	M ³	Sand	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2006)
Mastic asphalt	270	D/M	Mastic asphalt	Mastic asphalt(RoW), Ecoinvent 3.8V
Bridge bearing	152	EA	Elastomeric Bearing	Domestic LCI DB(Hwang et al., 2017)
Expansion joint	108	M	Expansion joint	Domestic LCI DB(Hwang et al., 2017)
Ascon	15,659	TON	Ascon	National LCI DB ^{a)} (KEITI, 2018)
Ready mixed concrete	53,344	M ³	Ready mixed concrete (25-210-12)	National LCI DB ^{a)} (Ministry of Trade, Industry and Energy, 2003)

a) Korea LCI Database information network



대상 사업은 최초 설계 기준으로 총 공사비 965억 그 중 직접공사비가 약 585억, 재료비 246억, 관급자재비 54억으로 탄소배출량 산정 대상 범위에 해당하는 재료비는 약 300억 수준의 공사이며, 전체 공사비의 약 31%의 비율을 나타낸다.

대상 사업의 공중체계 분류는 가장 큰 분류로 공통 공사비, 도로운송시설, 교량시설, 관급자재대로 구분할 수 있으며 세부적인 공중체계 분류는 Table 6.과 같다.

탄소배출량 산정 시에 장비, 자재 등 각 항목별 배출계수를 연계하여 산정하며 국내외 활용이 가능한 배출계수 목록을 조사하여 적용 우선순위에 따라 신뢰성이 높은 배출계수를 연계하였다. 먼저 국가 LCI DB 정보망에서 구축이 완료된 원료/에너지 항목을 적용하며, 관련 DB가 없을 시 국내 관련 기관에서 개발된 DB나 연구보고서, 논문 등 데이터 근거가 명확한 DB를 먼저 적용하였다.

Table 8. Carbon emissions of target project(Sihwa MTV Line 1-117)

Category1	Category2	Category3	Carbon emissions(tCO ₂)			
			Material (Scope 3)	Equipment (Scope 1+2)	Total	Ratio(%)
Common cost	Common facilities	Common part	895.59	0.11	895.70	2.93%
Road transportation facilities	Main road	Cut embankment session	57.32	11.96	69.28	0.23%
		Road structure	3,338.28	187.95	3,526.24	11.53%
		Pavement of a road	14.81	0.00	14.81	0.05%
		Road safety facilities	0.27	0.00	0.27	0.00%
		Landscape facilities	0.00	0.00	0.00	0.00%
Bridge facilities	Wolgot Bridge	Bridge substructure	1,470.24	0.26	1,470.50	4.81%
		Bridge road	1,718.03	0.00	1,718.03	5.62%
		Bridge safety facilities	0.00	0.00	0.00	0.00%
		Bridge structure	0.00	0.00	0.00	0.00%
Government-supplied materials	-	-	22,886.18	0.00	22,886.18	74.84%
Total			30,380.72	200.29	30,581.01	100.00%

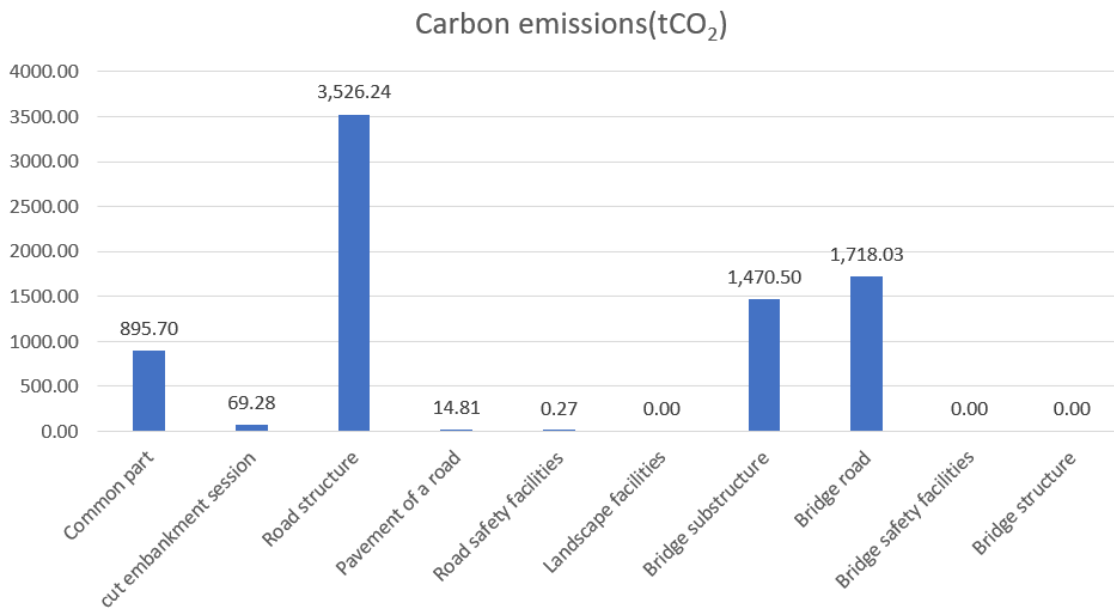


Fig. 4. Carbon emissions by construction work classification except government-supplied materials.

pp. 319-327
pp. 329-337
pp. 339-349
pp. 351-362
pp. 363-375
pp. 377-390
pp. 391-402
pp. 403-411
pp. 413-425
pp. 427-437

국내에 관련 DB가 없을 시 국외 DB(Ecoinvent, GaBi)를 검토하여 DB의 구축범위, 지역경계, 시스템 경계 등이 국내와 유사한 DB를 우선하여 연계하였다.

본 대상 사업에서 DB 연계가 가능한 자재는 형강, 자갈, 철근, 시멘트, 스틸그레이팅, 강관, PET(Polyethylene terephthalate), 모래, Mastic asphalt, 교좌장치, 신축이음장치, 아스콘, 레미콘 총 13종류이며 자재별 투입물량 및 탄소배출계수 사용 목록을 Table 7.에 나타내었다.

3.2 분석 결과

3.2.1 탄소배출량 종합 결과

대상 사업의 시공에 따른 탄소배출량 조사결과 총 탄소배출량은 30,581.01 tCO₂-eq.로 분석되었으며. 공종체계분류별 탄소배출량 기여도 조사결과 주요 자재 사용이 포함된 관급자재대를 제외하면 도로구조물의 탄소배출 기여 수준이 가장 높게 나타났으며, 교량주행부, 교량 하부구조물 순으로 배출 기여도가 높은 것으로 나타났다. 대부분의 탄소배출은 자재 사용으로 인해 기인하며 주요 공사 유형별로 관급자재대 22,886.18 tCO₂-eq.(74.8%), 도로 운송시설 3,610.59 tCO₂-eq.(11.8%), 교량시설 3,188.53 tCO₂-eq.(10.4%), 공통공사 895.70 tCO₂-eq.(2.9%) 순으로 분석되었다. 세부적인 탄소배출량 분석 결과는 Table 8과 Fig. 4에 나타내었다.

도로구조물 공종에서는 세부공종 중 PSTM(Pressurizing

Support Tunneling Method) 굴착공의 내부굴착 시 강관 다단 그라우팅 공사에 제작되는 강관 및 설치 시 강관 자재 투입으로 인한 탄소배출량이 723.61 tCO₂-eq.로 주요 배출 원인으로 분석되었다.

3.2.2 업프론트 탄소배출량 산정 결과

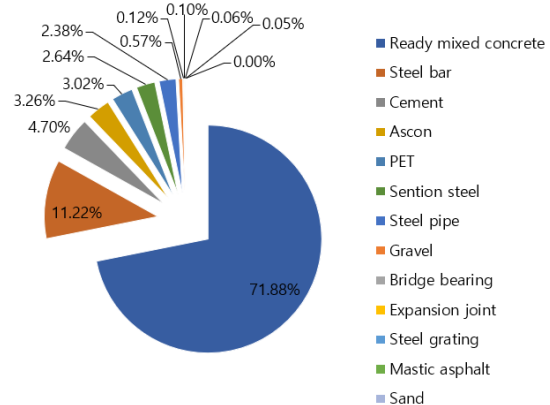
건설과정 중 투입되는 자재 생산으로 배출되는 업프론트 탄소배출량은 30,380.72 tCO₂-eq로 나타났다. 주요 자재에 의한 배출 기여도는 Table 9.에 나타낸 것과 같이 레미콘 21,837.16 tCO₂-eq(71.88%), 철근 3,409.12 tCO₂-eq(11.22%), 시멘트 1,427.89 tCO₂-eq(4.70%), 아스콘 989.65 tCO₂-eq(3.26%), PET 918.76 tCO₂-eq(3.02%) 순으로 나타났다. 우회도로 건설 시 투입되는 자재 투입량이 가장 높은 레미콘의 탄소배출이 가장 높았고, 제조시 다량의 에너지가 투입되는 Steel의 배출이 그 다음을 나타냈으므로, 건설 재료 선택 시 탄소배출량이 높은 자재부터 저탄소 자재로 교체가 요구된다.

4. K-water 건설사업의 지속적인 탄소 관리 방안

K-water는 2050년까지 7.8 백만톤의 온실가스 감축이라는 목표 아래, 탄소 zero 물관리, 물에너지 확대,

Table 9. Upfront Carbon emissions by major material

Material	Carbon emissions(tCO ₂)	Ratio
Ready mixed concrete	21,837.16	71.88%
Steel bar	3,409.12	11.22%
Cement	1,427.89	4.70%
Ascon	989.65	3.26%
PET	918.76	3.02%
Sention steel	803.20	2.64%
Steel pipe	723.61	2.38%
Gravel	173.96	0.57%
Bridge bearing	35.15	0.12%
Expansion joint	29.80	0.10%
Steel grating	17.73	0.06%
Mastic asphalt	14.55	0.05%
Sand	0.14	0.00%
Total	30,380.72	100.00%





그린수소 활성화, 흡수원 조성이라는 4대 전략을 수립하고 광역·지방상수도 탄소중립, 유역·그린도시 흡수원, 그린수소 개발 및 확대와 친환경 신재생에너지 생산으로 온실가스 감축을 적극 추진하는 “2050 탄소중립 로드맵”을 수립하였다 (K-water, 2021). 하지만, 내부 조직 경계 내에서 이루어지는 탄소관리에 집중되어 있어, 건설공사 중 발생하는 탄소에 대한 관리는 현재 이루어지지 않고 있다. 사업의 목적은 다르지만, 건설공사와 유사한 절차로 사업이 운영되고 관리되는 광해방지사업의 경우, 한국광해광업공단에서 전과정 탄소배출량 산정방법을 마련하고, 이를 지원하기 위한 광해방지사업 표준품셈 기반 탄소배출원단위를 기술기준에 포함하기 위한 연구가 진행 중이다 (Kim et al., 2021; KOMIR, 2021). 따라서, 본 연구에서 제시한 전설 공사 탄소배출량 산정방법을 활용하여 향후 발주되는 K-water 건설공사에 대하여 건설과정 중 발생하는 탄소와 건설공사에 투입되는 자재의 생산 중 발생하는 내재탄소의 양을 정량적으로 산정하고 이를 관리할 수 있는 시스템 마련이 요구된다.

이를 위해서는 먼저 K-water 건설공사의 설계시 활용되는 표준품셈 단위 공종별로 탄소배출량 산정이 가능한 공종과 불가능한 공종을 구분하고 세부 공종별로 탄소배출 원단위(GHG construction inventory)의 개발이 필요하다. 모든 건설공사는 내역서 기반의 설계가 먼저 수행되고 설계내역서를 활용하여 공사를 작업하게 되므로 설계내역서 작성에 기초가 되는 표준품셈 단위의 자재와 장비에 대한 탄소배출량 산정을 위한 원단위, 그리고 이러한 자재와 장비 사용에 따른 탄소배출량을 조합한 내역서 기반 표준품셈 단위 공종별 원단위를 정비하고, 건설공사 발주 전 기초적인 탄소배출량 산정 결과를 가이드로 제시하면 직접적인 탄소배출 이외 업프론트 탄소와 내재 탄소의 관리가 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 현재 K-water 조직경계 내에서 이루어지는 배출 활동 이외의 탄소 관리를 위하여 K-water가 관리하는 SOC 시설물의 건설과정에서 발생하는 탄소배출량을 정량적으로 산정하는 방식을 제시하고, 이를 활용하여 시범 사례 분석을 수행하였고, 탄소중립

을 위한 관리 전략을 수립하는 방안에 대하여 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

K-water 건설사업은 K-water가 시행하는 명확한 법률적 경계 내에서 시행되는 사업이지만, 그 사업 추진 절차별로 다양한 이해관계자의 활동으로 진행되고 있기 때문에, 현재 조직 경계 내의 탄소배출량의 관리만으로는 기업의 ESG 경영 측면에서의 탄소중립에는 한계가 있다. 본 연구에서 시범 사례분석한 결과를 보면, K-water 건설사업에서 직접적으로 배출하지 않고 자재 생산단계에서 배출된 업프론트 탄소배출량이 90% 이상으로 나타나 직접 배출원의 관리만으로는 최종 수요처인 K-water의 탄소중립을 달성하기에는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 K-water에서 관리하는 건설사업에 대하여 설계부터 해당 시설물의 폐기 및 재활용까지 K-water 전체 사업에 대한 탄소배출량을 산정하고 관리하는 시스템을 구축하여, 건설사업으로 인하여 야기되는 업프론트 탄소배출량을 줄이게 하는 방법이 합리적인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 K-water 건설공사에 대한 정량적인 산정방법과 이를 활용하여 시공단계 탄소배출량을 시범 사례분석을 통하여 수행하였고, 지속적인 건설사업의 탄소 관리를 위한 방안을 제안하였다. 하지만, 시범 사례분석이 이루어진 사업이 K-water의 대표 사업으로 분류될 수 있는 하천정비, 댐 건설, 정수처리 등이 아니라 일부 하천정비를 위한 우회도로에만 한정되어 있고, 지속적으로 운영되는 시설물이 아니라 life cycle 전과정에 대한 평가를 수행할 수 없는 한계가 있다. 따라서, 지속적인 K-water 건설공사의 탄소관리를 위해서는 본 연구에서 제시된 탄소배출량 산정 방법을 활용하여 다양한 건설사업에 대한 사례분석이 필요하며, 사례 분석 중 발생하는 다양한 문제점을 보완하여 K-water 건설공사의 탄소배출량 산정 방법에 대한 표준 제정이 요구된다.

또한, 간략한 탄소배출량 산정을 위하여 K-water 건설공사 설계의 기본이 되는 표준품셈 기반 탄소배출원단위의 산정과 탄소배출원단위의 신뢰성 향상과 관리를 위한 시스템 구축이 지속적으로 필요하다. 탄소배출원단위는 표준품셈에서 제시되는 일위대가 및 산근에 기반하여 구축되는 것이 바람직 하며, 다양한 공법 개발이 지속적으로 이루어지고, 사용되는 자재 역시 기술이 발전하고 있으므로, 탄소배출량을 산정하

기 위한 탄소배출계수를 지속적으로 업데이트하는 방식을 적용하고 나아가서 설계적산 프로그램과 연동하여 설계 시 탄소배출량이 정량적으로 계산될 수 있는 시스템 개발이 필요하다. 탄소배출량을 정량적으로 산정할 수 있는 탄소배출원단위가 정비되고 K-water 건설공사별로 해당 시설물의 최대 허용 탄소배출량을 제시하고, 건설단계에서부터 탄소 배출을 줄이는 방안이 마련된다면, 우리나라 전체 탄소배출량 감축에 상당한 기여가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 “K-water 건설공사 탄소배출량 산정기법 학술연구용역”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- BSI. (2016). PAS 2080:2016 Carbon management in infrastructure.
- CEN European Committee for Standardization. (2011). EN 15978:2011 Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method.
- CEN European Committee for Standardization. (2012). EN 15804:2012 Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations: Core rules for the product category of construction products.
- CEN European Committee for Standardization. (2014). EN 16449:2014 Wood and wood-based products – Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide.
- CEN European Committee for Standardization. (2014). EN 16485:2014 Round and sawn timber – Environmental Product declarations: Product category rules for wood and wood-based products for use in construction.
- CEN European Committee for Standardization (2014). EN 16757:2017 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements.
- Ecoinvent. (2022). Ecoinvent Version 3.8, Ecoinvent, Switzerland, Available at: www.ecoinvent.org (September 25, 2022)
- Hwang, Y.W., Wie, D.H., Kim, Y.C. and Kwak, I.H. (2017). A study on the calculation method of the elastomeric bearing life cycle inventory (LCI) database to improve reliability of evaluation of environmental load of bridges, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 37(4), 681-691.
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S, Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K.(eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Portner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Pean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32.
- ISO 14040:2006 (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- ISO 14044:2006 (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines.
- ISO 14064-1:2018, (2018). Greenhouse gases —Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals.
- ISO 14064-2:2019 (2019). Greenhouse gases —Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements.
- ISO 14064-3:2019 (2019). Greenhouse gases —Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements.
- ISO 14067:2018 (2018). Greenhouse gases —Carbon footprint of products —Requirements and guidelines for quantification.
- ISO 21930:2007 (2007). Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products.
- K-water (2011), https://www.kwater.or.kr/water/sub04/sub01/renePage.do?s_mid=151 (November 25, 2022)
- Kim, S.L., Kwak, I.H., Wie, D.H., Park, K.H. and Baek, S.H. (2021). Study on Estimation Methods of Life



- Cycle GHGs Emission for the Mine Reclamation Project., Econ. Environ. Geol. 54(6), 733-41.
- KOMIR (2021). Analysis and Estimation of carbon dioxide emissions by type of the Mine Reclamation Project for Net-Zero, 2021-039, 6.
- Korea LCI Database information network (2022). <https://www.greenproduct.go.kr/epd/lci/lciIntro.do> (November 25, 2022)
- Kwak, I.H., Park, K.H., Hwang, Y.W. and Park, J.H. (2012). Development and Application of Carbon Emissions Estimation Methodology during the Life Cycle of Road., J. Korean Soc. Env. Eng., 34(6), 382-390.
- Minister of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2011). A Study on the Calculation of Carbon Emissions in Each Facilities-final Report, Republic of Korea.
- Pricewaterhouse Coopers(PwC). (2021). Climate Technology Report Climate Tech, Venture Capital's Next Destination, 28.
- Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). (2017). *Whole life carbon assessment for the built environment, RICS professional statement*, UK, 1st edition.
- UNEP GLAD LCA. (2022). <https://www.globalcadataaccess.org/> (November 25, 2022)
- World Green Building Council. (2019). Bringing embodied carbon upfront Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon.
- World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2011). GHG Protocol: Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard.

pp. 319-327

pp. 329-337

pp. 339-349

pp. 351-362

pp. 363-375

pp. 377-390

pp. 391-402

pp. 403-411

pp. 413-425

pp. 427-437