

탈현장건설 프리캐스트 콘크리트 제품의 전과정 내재탄소영향에 관한 연구

The Life Cycle Embodied Carbon of Off-site Constructed Precast Concrete Structures

김현식¹ · 김정환²
Kim, Hyunsik¹ · Kim, Jeonghwan²

Received February 27, 2024 | Revised March 8, 2024 | Accepted March 11, 2024

ABSTRACT

The seriousness of global warming is increasingly being recognized worldwide, and there is a growing need to precisely understand the impact of greenhouse gas emissions from the construction industry. Particularly, with increasing interest in Off-Site Construction (OSC) technology in the domestic construction sector, it has become urgent to assess the embodied carbon emissions of concrete structural products produced in factories, known for their high inherent carbon emissions, as concrete is one of the most widely used materials in the construction industry. In this study, the embodied carbon emissions of precast concrete (PC) which is a representative off-site construction structure, were calculated based on actual data of PC manufacturing factories. Data on inputs, processes, outputs were collected from five representative PC factories in Korea. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was used to calculate and analyze the embodied carbon impact of PC throughout its life cycle. The results of this study are expected to serve as fundamental data for establishing sustainable application methods for domestic OSC technology in the future.

Keyword : Precast concrete, Life cycle assessment, Embodied carbon, Off-site construction

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

전 세계적으로 지구온난화의 심각성이 대두되고 있는 가운데, IPCC에서 발표한 보고서에서 지구 온도 상승을 1.5°C 이내로 제한하기 위해 2050년까지 이산화탄소의 배출을 제로화하고, 2063~2068년까지는 모든 온실가스(greenhouse gas, GHG)의 net-zero 달성을 권고하고 있다(IPCC, 2022). 2019년 기후 정상회의에서 세계 65개 국가가 탄소중립을 선언하였으며, 유럽이 2050 탄소중립을 목표로 European green deal을 발표하면서 중국과 미국도 잇따라 탄소중립을 선언한 가운데 한국 또한 2050년을 목표로 탄소중립을 선언하였다(European Commission, 2019; IEA, 2021; U.S. Department of State, 2021; The Government of the Republic of Korea, 2020).

이러한 탄소중립을 위한 세계적인 움직임에 앞서 건설 부

문에서는 건설구조물의 지속가능성 확보를 위해 다년간 노력해왔다. 특히, 여러 건설기술들 중 off-site construction(OSC)은 여러 이점으로 인해 최근 건설 산업에서 매우 중요한 기술 중 하나로 대두되고 있다(Wang et al., 2019; Jayawardana et al., 2023; Haar et al., 2023). OSC와 같은 프리캐스트 기술은 지속가능성, 저 에너지 사용, 내재 탄소 및 폐기물 감축 및 생산성 향상을 위한 건설 분야의 주요 기술로써 인식되고 있다. 하지만, 구조물의 전생애 주기 관점에서 OSC 기술이 반드시 모든 조건에서 탄소 저감의 효과를 가져오는 것은 아니다(Teng et al., 2018; Kim et al., 2023a). 현장시공 철근콘크리트(RC) 구조물과 비교하여 사전 제작된 콘크리트 제품인 프리캐스트 콘크리트(PC) 구조물은 건설현장에 투입되기 전에 공장에서 제조되어 현장으로 보내진다. 따라서, 공장에서의 사전 제조 공정에 따른 내재적인 지구온난화지수(global warming potential, GWP)를 수반하게 된다(Kim et al., 2023a). 이에 따라 건설구

¹교신저자 · 정회원 · 한국교통대학교 사회기반공학전공 연구원(Corresponding Author, Member, Ph.D. Researcher, Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, visionysj@gmail.com)

²정회원 · 한국교통대학교 사회기반공학전공 조교수(Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, jeonghwan.kim@ut.ac.kr)



Copyright © 2024 Korean Society of Automation and Robotics in Construction. 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.

조물의 전생애 주기에 있어서 오히려 현장시공보다 높은 내재 탄소영향을 야기할 수도 있다.

이러한 건설구조물 전생애 관점에서의 환경 성능을 평가하고 분석하는 대표적인 방법으로 전과정평가(life-cycle assessment, LCA)가 널리 활용된다. 특히, 최근 여러 환경 성능 중 지구온난화가 가장 중요해짐에 따라 여러 산업분야에서 LCA 방법론을 활용한 탄소발자국 평가를 도입하고 있다. 탄소발자국이란 모든 방출된 GHG를 CO₂ equivalent로 환산하는 것을 말하며, 일반적으로 중량 단위로 측정된다(Li and Zheng, 2020). 일부 연구에서는 탄소발자국을 공정에서 소비된 자재 또는 에너지로부터 유도된 이산화탄소 배출의 측정으로 정의하기도 한다(Liu et al., 2011; Yu et al., 2011). 이에 따라, 탄소발자국 평가 방법을 활용하면 건설구조물의 전생애 주기 별 자재 및 에너지 소비에 따른 구조물 전체의 내재탄소영향을 평가할 수 있게 된다.

이에, 본 연구에서는 LCA 기반의 탄소발자국 방법론을 활용하여 한국의 건설구조물 및 콘크리트 산업의 정밀한 지구온난화 평가를 지원하고자 국내에서 생산되는 구조용 PC에 대한 전과정 내재탄소 영향을 산정하고 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 향후 국내 OSC 기술의 지속가능한 적용 방법을 정립하는 데에 기초자료로써 널리 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 건설구조물 LCA 문헌 검토

LCA는 국제적으로 표준화된 환경 평가 방법 중 하나로써 ISO 14040 시리즈에 의해 제품 시스템의 생애 주기 전체에서 모든 투입물, 산출물 및 잠재적인 환경영향을 편성하고 평가하는 것이라고 정의되어 있다(Kloepffer, 2008; ISO, 2006; Vasishta et al., 2023). LCA는 전 세계적으로 다양한 제품 또는 서비스의 원자재 획득부터 end of life까지의 cradle-to-grave 환경영향을 분석하는 데에 광범위하게 활용되고 있다(Finnveden et al., 2009; Joshi, 1999). LCA는 일반적으로 4가지의 단계를 통해 수행한다: (1) 목적 및 범위 정의, (2) 전과정 목록분석(life cycle inventory, LCI), (3) 전과정 영향평가(life cycle impact assessment, LCIA), (4) 전과정 해석. 목적 및 범위 정의를 통해 평가의 목적, 기능단위, 시스템경계, 영향평가 범주, 데이터 요구조건, 가정 및 제한사항 등을 포함한 연구의 전체적인 전제조건이 설정된다. LCI 단계는 설정된 시스템의

투입물 및 산출물을 정량적으로 측정하기 위한 단계이며, 연구의 목표를 충족하기 위해 반복적으로 보완해 나가는 매우 중요한 과정이다(Joshi, 1999). LCIA 단계는 잠재적으로 연관된 환경영향을 고려하는 단계로써 적절한 영향 평가 방법 및 관련된 영향 범주를 선택하는 것은 목적 및 범위 정의에 따라 결정된다(Vasishta et al., 2023; Finnveden et al., 2009). 영향 범주는 지구온난화, 부영양화, 오존층영향, 산성화, 광화학 산화물, 토지 이용 및 수자원 이용 효과 등 매우 다양하다. 특히, 이 중 지구온난화 영향(global warming potential, GWP)은 지구온난화에 대한 문제가 심각해짐에 따라 여러 LCA 연구에서 필수적으로 평가하고 있는 영향 범주이며, 이를 평가한 것을 탄소발자국 평가라고 부른다.

GWP는 건설 분야와 관련된 여러 LCA 제도에서 의무적으로 평가하고 있다. 미국의 LEED, 영국의 BREEAM, 국내의 G-SEED 등 다양한 녹색건축물 인증 제도에서 건축물에 대한 LCA를 수행하고 있는 가운데 공통적으로 GWP를 주요 영향 범주로 채택하고 있다(Pai and Elzarka, 2021; Ferreira et al., 2023; Kim et al., 2023b). 레디믹스드 콘크리트(ready mixed concrete, RMC)와 같은 건설 재료와 PC, pile과 같은 콘크리트 구조물 제품들의 경우에는 여러 국가별 EPD 제도를 통해서 LCA가 수행되고 있으며, 마찬가지로 GWP를 주요 영향 범주로 채택하여 각 건설 제품에 대한 탄소발자국을 평가하고 있다(AzariJafari et al., 2023; Witte and Garg, 2024; Rangelov et al., 2021). 이는 과거부터 수행되어 온 여러 토목 구조물의 환경영향에 관한 연구에서도 공통적으로 다루고 있는 요소로써

Table 1. Impact categories considered in previous LCA studies

Author	Environmental impacts considered*
Hammervold et al. (2013)	ADP, AP, EP, GWP, ODP, POCP
Du and Karoumi (2013)	ADP, AP, EP, GWP, ODP, POCP
Penadés-Plà et al. (2018)	18 categories including GWP, ODP, POCP
Du et al. (2018)	13 categories including GWP, ODP, POCP
Du et al. (2014)	12 categories including GWP, ODP, POCP
O'Born (2018)	ADP, ADP(fossil fuels), AP, EP, GWP, ODP, POCP
Khorgade et al. (2022)	11 categories including ADP, AP, EP, GWP, ODP, POCP

*Notes: abbreviations
 ADP(Abiotic depletion), AP(Acidification), EP(Eutrophication),
 GWP(Global warming), ODP(Ozone layer depletion),
 POCP(Photochemical oxidation)

Table 1과 같이 다양한 교량 LCA 연구에서도 GWP 영향 분석이 필수적으로 다루어지고 있다(Hammervold et al., 2013; Du and Karoumi, 2013; Penadés-Plà et al., 2018; Du et al., 2014; Du et al., 2018; O’Born, 2018; Khorgade et al., 2022). 이렇듯, 건설분야에서 탄소발자국 평가는 매우 중요한 요소로 자리잡고 있으며, GWP 관점에서 더욱 정밀한 연구결과가 제시되어야 할 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1 연구의 프레임워크

본 연구는 우선적으로 실제 PC 생산 공장을 통해 PC 생산의 전과정 범위를 정의하고 탄소발자국 평가에 필요한 데이터를 수집하였다. 이어서, 수집된 현장 데이터 및 LCA 방법론을 활용하여 PC의 전과정 내재 GWP를 산출하였으며, 최종적으로 본 연구를 통해 도출한 PC의 GWP와 현장 시공 RC의 내재 GWP를 비교 분석하였다. 본 연구의 프레임워크는 Fig. 1과 같이 요약된다.

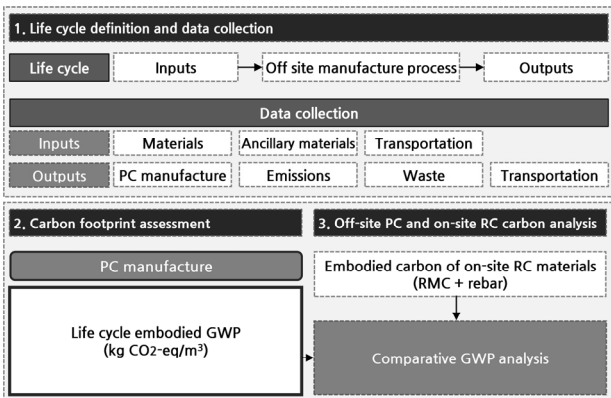


Figure 1. Framework of this study

2.2 전과정 정의 및 데이터 수집

본 연구에서는 PC의 LCA를 수행하기 위해 각 자재의 전과정 범위를 정의하고 각 과정에 해당하는 데이터들을 수집하였다. 정보의 신뢰성을 확보하기 위하여 본 연구에서는 한국의 대표적인 구조용 PC 생산공장 5곳을 방문하여 투입물, 제조 공정, 산출물에 대한 현장 데이터를 조사했으며, Fig. 2와 같이 PC에 대한 전과정 시스템 범위를 정의하였다. 여기서, 투입물은 제조공정에서 사용되면서 최종적으로 제품 내 존재하는 물

질을 의미하는 원자재와 제조공정에는 사용되나 최종적으로 제품에 존재하지 않는 물질을 의미하는 부자재로 구분할 수 있다. 특히, 부자재의 경우 제조 공정을 운영하기 위해 사용되는 물질들로써 주로 에너지를 의미하는 가운데 PC 생산을 위해 기계설비의 가동과 함께 증기양생을 위한 보일러 가동에 에너지가 투입되는 것으로 확인되었다. 또한, 산출물은 크게 폐기물, 배출물, 그리고 최종 제품으로 구분할 수 있는데, 이중 폐기물의 경우 모든 공장에서 전량 재활용 업체로 운송하여 처리하는 것으로 확인되었고 배출물의 경우 별도로 데이터 관리를 하고 있지 않은 관계로 본 연구에서 도출한 계산치를 결과 값으로 활용해야 하는 것으로 나타났다. 이와 더불어, 투입물과 산출물의 물질들을 수송하는 과정에서의 환경영향도 함께 고려해야하므로 수송거리에 대한 정보를 함께 조사하였다. 여기서, 모든 데이터는 각 공장의 ERP 시스템을 통해 수집된 1년간의 데이터를 활용하였다.

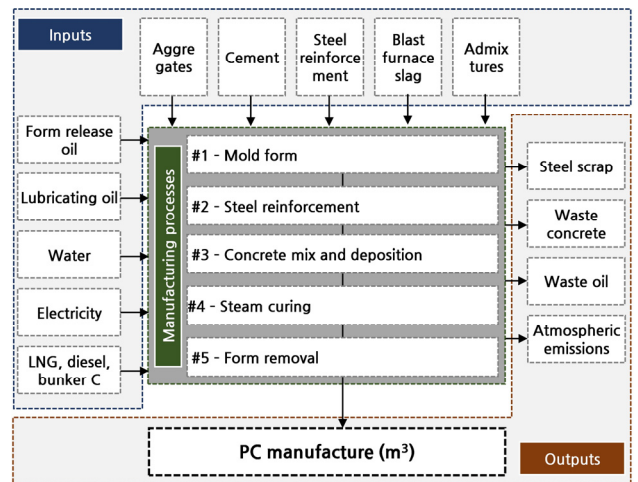


Figure 2. Life cycle system of PC

2.3 전과정 탄소발자국 평가

본 연구에서는 ISO-14040 시리즈에 기반한 LCA 방법론을 통해 수집된 데이터를 활용하여 PC의 GWP를 산출하였다. PC의 기능단위는 건설업계에서 PC생산량을 관리하는 단위를 반영하여 m³로 설정하였다. 또한, 각 자재의 전과정 GWP 도출을 위한 시스템 경계는 원료 물질의 채취부터 PC 1m³를 생산하는 범위까지로 설정하여 cradle-to-gate 평가를 수행하였다. 기본적으로 본 연구에서는 다수의 공장에서 데이터를 수집하여 연구를 수행한 관계로 GWP 계산을 위한 데이터는

모든 공장들의 평균치를 활용하였다. 본 연구에서 정의한 기능, 기능단위, 기준흐름은 Table 2와 같다.

Table 2. Function, functional unit, and reference flow of PC LCA

Category	Definition
Function	PC made in factories in a transportable shape and size to be used as structural members, such as columns, beams, slabs, and walls in infrastructures and buildings
Functional unit	PC 1m ³ manufacture
Reference flow	PC 1m ³

ISO-14040 시리즈에서는 LCA를 수행할 때 평가 대상이 되는 데이터와 평가에서 제외할 데이터에 대한 cut-off를 진행하는데, 일반적으로 전체 원자재 중 중량이 상위 99%에 해당하는 자재를 선정하여 평가를 수행한다. 이에, 본 연구에서도 cut-off를 위해 각 원자재의 중량 기여도를 산출하여 상위 99%에 해당하는 자재들을 특정하고 상위 99%에 해당하지 않는 자재는 평가에서 제외하였다. 여기서, PC의 중량 환산을 위해 사용된 단위중량은 국내 표준품셈의 철근콘크리트 단위중량을 참고하여 2,400kg/m³을 적용하였다. 수집된 데이터 중 물의 용도는 각 제품의 원자재로써의 용도와 부자재로써의 용도로 구분되는데, 각 공장 별 물 사용량 데이터는 이러한 용도 별로 구분하여 수집할 수 없으므로 본 연구에서는 연간 총 물 사용량을 수집하여 공장 별 PC 제품의 평균적인 배합비에 따라 투입되는 원자재로써의 물 사용량을 할당하여 평가에 활용하였다. GWP 계산에 활용한 배출계수 DB는 기본적으로 국가LCI DB들을 활용하였고 부재한 DB는 Ecoinvent version 3.3을 활용하였다.

2.4 내재탄소 분석

본 연구에서는 RMC와 철근을 현장에서 직접 타설하는 일반적인 RC와 탈현장 생산되는 PC의 현장 투입 시 내재탄소에는 어떠한 차이가 있는지 비교 분석하였다. 본 연구에서 수집한 투입물과 산출물 데이터에 따르면 PC의 콘크리트와 철근의 중량 비율은 47:3인 것으로 나타났다. 이러한 콘크리트 및 철근의 비율만큼 현장에서 직접 타설한 일반 RC와 사전 제작 공정을 통해 생산된 PC 제품의 내재탄소를 비교 및 분석하였다. 여기서, RC 1kg 당 GWP를 산출하기 위해 국가LCI DB를

통해 제공하고 있는 RMC의 강도 별 GWP 계수를 활용하고 철근에 대한 GWP 계수도 함께 활용하였다. 다만, PC의 GWP는 1m³당 탄소량을 나타내는 kgCO₂-eq/m³의 단위로 산출된 바, kgCO₂-eq/kg로 비교 단위를 통일하기 위해 단위중량 2,400kg/m³을 적용하였다.

3. 연구결과

3.1 전과정 탄소발자국 평가 결과

PC의 원자재 중 본 연구의 평가에 반영할 자재들을 cut-off 분석한 결과 Table 3과 같이 혼화제의 경우 중량 기준으로 상위 99%에 포함되지 못하여 평가에서 제외되어야 할 것으로 나타났다.

Table 3. Cut-off results

Materials	Weight contribution rate	Cumulative weight contribution	Assessment inclusion
Coarse aggregate	44.07%	44.07%	O
Fine aggregate	33.74%	77.81%	O
Cement	14.14%	91.95%	O
Rebar	6.38%	98.33%	O
Blast furnace slag	1.55%	99.88%	O
Admixtures	0.11%	100.00%	X

이에 따라, PC에 대하여 LCA를 수행한 결과 전과정 GWP가 425.58kgCO₂-eq/m³인 것으로 나타났다. PC의 전생애 프로세스 중에서 철근, 시멘트, 전기를 생산/투입하는 과정과 투입물의 운송과정 및 PC 제조공정에서 전체 GWP 중 96% 이상의 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이 중에서 특히 PC의 주 재료인 시멘트 및 철근의 생산/투입으로 인한 GWP가 각각 270.79kgCO₂-eq/m³, 66.10kgCO₂-eq/m³으로 전체 내재탄소의 약 79% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 또한, 모든 투입물의 운송으로 인한 GWP 또한 45.04kgCO₂-eq/m³으로 전체 내재탄소의 10% 이상을 차지하는 것으로 나타난 가운데, PC를 생산하는 데에 있어서 내재탄소를 감소시키기 위해서는 해당 과정들에 대한 개선이 최우선으로 고려되어야 할 것으로 사료된다. PC의 내재탄소 기여도를 분석한 결과 Fig. 3과 같이 요약되었다.

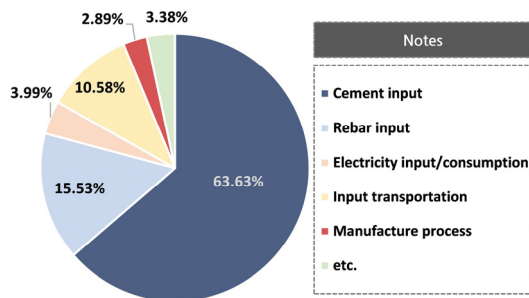


Figure 3. GWP contribution rates

3.2 내재탄소 분석 결과

Fig. 4와 같이 PC의 내재탄소영향을 kgCO₂-eq/kg 단위로 환산하여 강도 별 RC의 내재탄소영향과 비교하여 분석한 결과 일반적인 강도의 RMC를 적용한 RC에 비하여 PC가 높은 수준의 내재탄소를 갖는 것으로 분석되었다. 특히, 국내의 건설구조물 LCA에서는 주로 21MPa과 24MPa에 해당하는 LCI DB 배출계수를 활용하는데, 이를 적용한 RC의 GWP는 PC의 약 66% 수준에 불과한 것으로 분석되었다. 이는, PC의 경우 현장에서 시공하는 RC와 달리 사전 제작 공정에 따른 내재탄소를 보유하고 있는 데에서 기인한 것으로 사료되며, 이로 인해 콘크리트 건설구조물에 대한 내재탄소영향 평가 시 PC에 해당하는 물량을 RC로 가정할 경우 실제 GWP에 비하여 매우 과소평가될 수 있는 위험이 있다는 것을 의미한다. 한편, 50MPa의 RMC를 활용한 RC의 경우 PC의 GWP와 비교하여 매우 유사한 값을 나타냄으로써 고강도 콘크리트 건설구조물

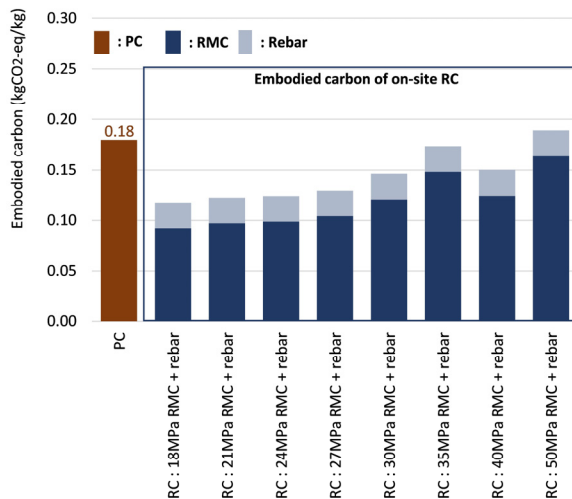


Figure 4. Comparative analysis of life cycle embodied carbon impacts of PC and RC

의 내재탄소영향 평가 시 PC의 GWP 계수 부재에 따른 대체 계수로 활용할 수 있을 것으로 분석되었다. 또한, RMC의 강도가 높아짐에 따라 RC의 내재탄소영향이 증가하는 경향을 보이는 가운데, 50MPa의 강도를 초과하는 구조물의 경우 RC를 탈현장 PC로 대체함으로써 내재탄소 측면의 친환경성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 LCA 기반의 탄소발자국 방법론을 활용하여 한국의 건설구조물 및 콘크리트 산업의 정밀한 지구온난화 평가를 지원하고자 국내에서 생산되는 구조용 PC에 대한 전과정 내재탄소 영향을 산정하고 분석하였으며, 그 결과 하기와 같은 결론은 도출하였다.

1. 국내 PC의 전과정 내재탄소영향은 425.58kgCO₂-eq/m³으로 나타났다.
2. 특히, 시멘트 및 철근의 생산/투입에 따른 내재탄소영향이 매우 큰 것으로 나타났으며, PC 제조 시 투입물의 운반에 따른 내재탄소 또한 높은 것으로 나타났다.
3. 본 연구를 통해 산정한 PC의 내재탄소영향은 일반강도의 현장 시공 RC와 비교하여 높은 수준인 것으로 분석되었으며, 50MPa 강도의 RC와 유사한 수준인 것으로 나타났다.
4. 50MPa의 강도를 초과하는 고강도 구조물의 경우 탈현장 제작된 PC를 적용함으로써 내재탄소 측면의 친환경성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구를 통해 도출된 결과는 실제 현장 데이터를 기반으로 국내에 부재한 PC 구조물의 내재탄소영향을 정밀하게 제시했다는 데에 의의가 있으며, 향후 국내 탈현장건설 기술의 지속가능성 정립을 위한 기초자료로써 널리 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 수집하여 사용한 데이터는 한국의 일부 공장에서 수집한 데이터이므로 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 더 많은 공장의 데이터가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 최근 콘크리트 산업에서 온실가스 저감에 대한 요구가 높아짐에 따라 원자재의 배합 비율 개선 및 공정의 개선을 통해 탄소영향을 줄이기 위하여 노력하고 있는 가운데, 이러한 산업의 변화를 반영한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국건설자동화·로보틱스학회 제2회 정기학술대회에서 발표된 논문을 수정·보완하여 작성되었으며, 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2023-00246508).

References

- AzariJafari, H., Rangelov, M., Gregory, J., and Kirchain, R. (2023). Suitability of EPDs for supporting lifecycle and comparative analysis of concrete mixtures. *Environmental Science & Technology*, 57(19), pp. 7321-7327.
- Du, G., and Karoumi, R. (2013). Lifecycle assessment of a railway bridge: Comparison of two superstructure designs, maintenance, management, life-cycle design and performance. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(11), pp. 1149-1160.
- Du, G., Pettersson, L., and Karoumi, R. (2018). Soil-steel composite bridge: An alternative design solution for short spans considering LCA. *Journal of Cleaner Production*, 189, pp. 647-661.
- Du, G., Safi, M., Pettersson, L., and Karoumi, R. (2014). Lifecycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(12), pp. 1948-1964.
- European Commission. (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Communication On The European Green Deal, European Union(EU), Brussels, Belgium, https://commission.europa.eu/publications/communication-european-green-deal_en#files (Accessed December 30, 2023).
- Ferreira, A., Pinheiro, M. D., de Brito, J., and Mateus, R. (2023). A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings. *Journal of Building Engineering*, 66, pp. 105825.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinee, J., Heijungs, R., Hellweg, S., and Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), pp. 1-21.
- Haar, B. T., Kruger, J., and Zijl, G. (2023). Off-site construction with 3D concrete printing. *Automation in Construction*, 152, pp. 104906.
- Hammervold, J., Reenaas, M., and Brattebø, H. (2013). Environmental life cycle assessment of bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 18(2), pp. 15-161.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge University Press, Cambridge, UK, <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed December 30, 2023).
- International Energy Agency (IEA). (2021). An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. International Energy Agency, Paris, France, <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china> (Accessed December 30, 2023).
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO-14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- Jayawardana, J., Sandanayake, M., Jayasinghe, J. A. S. C., Kulatunga, A. K., and Zhang, G. (2023). A comparative life cycle assessment of prefabricated and traditional construction-A case of a developing country. *Journal of Building Engineering*, 72, pp. 106550.
- Joshi, S. (1999). Product environmental life-cycle assessment using input-output techniques. *Journal of Industrial Ecology*, 3(2-3), pp. 95-120.
- Khorgade, P., Rettinger, M., Burghartz, A., and Schlaich, M. (2022). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer and steel-reinforced bridges. *Structural Concrete*, 24, pp. 1737-1750.
- Kim, H., Kim, J., and Roh, S. (2023a). The Embodied Life Cycle Global Warming Potential of Off-Site Prefabricated Concrete Products: Precast Concrete and Concrete Pile Production in Korea. *Buildings*, 13, pp. 2590.
- Kim, J., Lee, D., and Nam, S. (2023b). Potential for environmental impact reduction through building LCA (Life Cycle Assessment) of school facilities in material production stage. *Building and Environment*, 238, pp. 110329.
- Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), pp. 89.
- Li, X. J., and Zheng, Y. D. (2020). Using LCA to research carbon footprint for precast concrete piles during the building construction stage: A China study. *Journal of Cleaner Production*, 245, pp. 118754.
- Liu, M., Li, Y. Q., and Zhan, X. (2011). Generic model for energy carbon emission of building materials. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 168, pp. 365e368.
- O'Born, R. (2018). Life cycle assessment of large scale timber bridges: a case study from the world's longest timber bridge design in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, pp. 301-312.
- Pai, V., and Elzarka, H. (2021). Whole building life cycle assessment for buildings: A case study ON HOW to achieve the LEED credit. *Journal of Cleaner Production*, 297, pp. 126501.
- Penadés-Plà, V., Garcia-Segura, T., Marti, J., and Yepes, V. (2018). An optimization-LCA of a prestressed concrete precast bridge. *Sustainability*, 10, pp. 685.
- Rangelov, M., Dylla, H., Mukherjee, A., and Sivanesarwan, N. (2021). Use of environmental product declarations (EPDs) of pavement

- materials in the United States of America (USA) to ensure environmental impact reductions. *Journal of Cleaner Production*, 283, pp. 124619.
- Teng, Y., Li, K., Pan, W., and Ng, T. (2018). Reducing building life cycle carbon emissions through prefabrication: Evidence from and gaps in empirical studies. *Building and Environment*, 132, pp. 125-136.
- The Government of the Republic of Korea. (2020). 2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea : Towards a Sustainable and Green Society, The Government of the Republic of Korea, Seoul, The Republic of Korea, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf (Accessed December 30, 2023).
- U.S. Department of State. (2021). The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050. the United States Department of State and the United States Executive Office of the President, Washington DC, U.S, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/US_accessibleLTS2021.pdf (Accessed December 30, 2023).
- Vasishta, T., Mehany, M. H., and Killingsworth, J. (2023). Comparative lifecycle assessment (LCA) and lifecycle cost analysis (LCCA) of precast and cast-in-place buildings in United States. *Journal of Building Engineering*, 67, pp. 105921.
- Wang, Z., Hu, H., Gong, J., Ma, X., and Xiong, W. (2019). Precast supply chain management in off-site construction: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, 232, pp. 1204-1217.
- Witte, A., and Garg, N. (2024). Quantifying the global warming potential of low carbon concrete mixes: Comparison of existing life cycle analysis tools. *Case Studies in Construction Materials*, 20, pp. e02832.
- Yu, D., Tan, H., and Ruan, Y. (2011). A future bamboo-structure residential building prototype in China: life cycle assessment of energy use and carbon emission. *Energy and Buildings*, 43(10), pp. 2638e2646.

요 지

전 세계적으로 지구온난화의 심각성이 대두되고 있으며, 건설 분야에서도 건설 산업에서 발생하는 지구온난화 영향을 더욱 정밀하게 파악할 필요가 있다. 특히, 건설 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 콘크리트의 내재탄소 배출량이 매우 높은 것으로 알려진 가운데, 국내 건설분야에서 탈현장건설(OSC) 기술에 대한 관심이 증가함에 따라 공장에서 생산되는 콘크리트 구조 제품들의 내재탄소 배출량에 대한 파악이 시급해진 실정이다. 이에, 본 연구에서는 대표적인 탈현장건설 구조물인 구조용 프리캐스트 콘크리트(PC)에 대한 전과정 내재탄소 배출량을 실제 공장 데이터를 토대로 산정하였다. 이를 위해 한국의 대표적인 PC 생산공장 5곳의 투입물, 공정, 제품 및 부산물 등에 대한 현장 데이터를 수집했으며, 전과정평가(LCA) 방법론을 통해 PC의 전과정 내재탄소영향을 산정하고 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 향후 국내 OSC 기술의 지속가능한 적용 방법을 정립하는 데에 기초자료로써 널리 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 프리캐스트 콘크리트, 전과정 평가, 내재탄소, 탈현장건설