

전과정 온실가스 배출량 산정 방법을 고려한 수소연료전지 주택의 온실가스 감축 효과 분석

김건용* · 노재학** · 김다연*** · 이재영**** · 황용우*****†

*고등기술연구원 에너지환경IT융합그룹 연구원, **E-순환거버넌스 연구센터 선임, ***한국청정수소진흥연구원 선임연구원,
****인하대학교 순환경제환경시스템전공 박사과정, *****인하대학교 환경공학과 교수

Analysis of greenhouse gas reduction effects in hydrogen fuel cell houses considering life cycle greenhouse gas emission estimation methods

Kim, Geon Yong* · No, Jae Hak** · Kim, Da Yeon*** · Lee, Jae Young**** and Hwang, Yong Woo*****†

*Researcher, Energy Environment IT Convergence Group, Institute for Advanced Engineering, Yongin, Korea

**Manager, R&D Center, E-Cycle Governance, Suwon, Korea

***Senior Researcher, Korea Promotion and Research Institute of Clean Hydrogen, Gwacheon, Korea

****Ph.D Student, Program in Circular Economy Environmental System, INHA University, Incheon, Korea

*****Professor, Department of Environmental Engineering, INHA University, Incheon, Korea

ABSTRACT

This study proposes a method for estimating life cycle greenhouse gas (GHG) emissions of a hydrogen fuel cell house using the Life Cycle Assessment (LCA) framework. Subsequently, a case analysis based on the proposed method was conducted to assess the GHG reduction potential of a hydrogen fuel cell house. To establish the life cycle GHG estimation method, international and domestic LCA-related standards, guidelines, and prior studies were reviewed. The method was evaluated in three sequential components: system boundary definition, data collection, and GHG calculation. The system boundary was established following the modular approach outlined in EN 15804. Data collection was based on case studies from domestic and international research as well as BOM (Bill of Materials) from hydrogen fuel cell house demonstration sites. The GHG calculation involved the formulation of estimation equations for individual items and the identification of applicable databases. Using the proposed method, the life cycle GHG emissions of a hydrogen fuel cell house utilizing reformer-based hydrogen were calculated to be $1.33\text{E}+03 \text{ kgCO}_2\text{-eq/m}^2$. A comparative analysis revealed that a hydrogen fuel cell house using clean hydrogen achieved a 20.3% reduction in life cycle GHG emissions compared to the reformer-based hydrogen house and a 19.2% reduction compared to conventional houses. The results indicate that hydrogen fuel cell houses offer emission reduction benefits, but their environmental impact is significantly influenced by the hydrogen production method. Additionally, the study highlights the importance of the transition of conventional houses to hydrogen fuel cell houses and the supply of low-carbon hydrogen for maximizing GHG reduction potential. These findings provide valuable insights for sustainable development of hydrogen-based residential energy systems and contribute to policy discussions on carbon-neutral urban infrastructure.

Key words : Hydrogen, Hydrogen Fuel Cell, Fuel Cell House, Life Cycle Assessment, Greenhouse Gas

†Corresponding author : hwangyw@inha.ac.kr (INHA University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea. Tel. +82-32-860-7501)

ORCID 김건용 0009-0002-6533-2113
노재학 0009-0007-1311-4890
김다연 0000-0003-1042-4045

이재영 0009-0003-0865-0972
황용우 0000-0001-9844-7596

1. 서론

기후변화는 오늘날 세계가 직면한 가장 심각한 환경문제 중 하나이며, 온실가스 배출로 인한 지구온난화는 현재까지도 가속화 되어가고 있다. IPCC의 1.5℃ 지구온난화 특별보고서에 따르면, 현재 속도로 지구온난화가 지속될 경우 2030년에서 2052년 사이 지구의 평균기온은 1.5℃ 이상 상승할 것으로 예상되며, 평균기온의 상승을 1.5℃ 이내로 제한하기 위해서는 2030년까지 온실가스 배출을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하여야 한다(IPCC, 2018). 이를 위해 세계 각국에서는 2030년 국가 온실가스 감축목표(NDC) 이행, 탄소중립 로드맵 수립, 기후변화 관련 법령 제정 등의 노력을 진행 중이다. EU는 2020년 유럽 그린 딜(European Green Deal)을 통과시키며 EU가 직면한 기후·환경 위기를 기회로 전환하여 EU 경제의 지속가능성을 확보하기 위한 로드맵을 제시하였다(Kim et al., 2020). 미국은 2021년에 2035년까지 100% 무탄소 전력 달성 및 2050년까지 넷제로 달성 목표를 수립하고, 2022년에는 해당 목표를 기반으로 철강, 화학, 석유정제, 시멘트 등 탄소 집약적인 산업 분야의 탈탄소 달성을 위한 로드맵을 발표하였다(Kim and Kim, 2020). 미국은 2021년에 2035년까지 100% 무탄소 전력 달성 및 2050년까지 넷제로 달성 목표를 수립하고, 2022년에는 해당 목표를 기반으로 철강, 화학, 석유정제, 시멘트 등 탄소 집약적인 산업 분야의 탈탄소 달성을 위한 로드맵을 발표하였다(Jung, 2022). 우리나라의 경우 지속가능한 녹색사회 실현을 위해 2020년 ‘2050 탄소중립’을 선언하였으며, 2021년에는 NDC, 온실가스 감축·적용 시책, 기후대응기금 등 탄소중립 정책 추진에 필요한 핵심 사항이 규정된 ‘기후 위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장기본법’을 제정하였다(Jung and Kim, 2023). 또한 각 정부부처에서는 탄소중립 로드맵을 수립하여 각 부처의 특색에 맞는 탄소중립 달성 전략을 제시하였다.

2021년 국토교통부는 탄소중립 달성을 위한 추진 과제 및 이행 방안을 건물, 교통, 국토·도시, 국외 감축 등의 세부 부문으로 구분하여 탄소중립 로드맵을 제시하였다. 국토·도시 부문 내 추진 과제 중 하나인 탄소중립 공간조성 및 확대의 경우 탄소중립도시 조성 추진 및 탄소 흡수원 신규 확보를 통해 이행될 계획이다. 특히 탄소중립도시 중 수소 도시는 주거·산업·교통 등에 사용되는 에너지원을 수소로 전환하여 온실가스 배출량을 감축하는 기능을 수행하게 된다(Ministry of Land, Infrastructure and

Transport, 2021). ‘수소경제 활성화 로드맵’에 따르면, 수소 도시 활용 부문의 핵심 요소 중 하나인 수소연료전지 주택에 투입되는 가정·건물용 연료전지의 보급 목표는 2040년까지 누적치로 2.1GW 이상을 목표로 하고 있으며, 이를 통해 기존 주택에 투입되던 도시가스과 그리드 전력을 대체할 예정이다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019). 수소연료전지 주택은 연료전지를 활용하여 전기와 난방 에너지를 공급하기 때문에 연료원으로 수소만을 사용하는 경우 직접 배출되는 온실가스는 0에 가깝다. 하지만, 수소연료전지 주택의 탄소중립 기여 효과를 직접 배출 개념에 입각하여 평가하는 경우 온실가스 배출 감축 효과가 과대평가 될 수 있다는 문제가 있다. 주택을 건설하기 위해 투입되는 원자재의 내재 탄소뿐 아니라 시공 단계에서 사용되는 건설장비의 연료 사용에 의한 온실가스 배출도 존재하기 때문이다. 따라서, 수소연료전지 주택의 온실가스 배출량을 정확히 정량화하기 위해서는 전과정(Life-Cycle) 개념에서의 배출량 산정이 필요하다. 본 연구에서는 국내외 전과정 온실가스 산정 방법으로 제시된 표준 및 지침을 검토하여 수소연료전지 주택에 적용 가능한 전과정 온실가스 산정 방법을 제시하고, 해당 방법을 활용하여 도시가스, 그리드 전력을 수소에너지로 전환한 단독주택 형태 기반 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량 및 감축 효과를 산정하였다. 더 나아가 도시가스와 그리드 전력을 활용하는 기존 주택, 개질 수소를 활용하는 수소연료전지 주택, 청정수소를 활용하는 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량 비교 분석으로 탄소중립 달성을 위한 수소연료전지 주택의 핵심 요소를 확인하고자 한다.

2. 국내외 전과정 온실가스 산정방법론 및 연구사례 분석

2.1. 국내외 전과정평가 및 전과정 온실가스 산정방법론

전과정 온실가스 배출량 산정은 직접 배출되는 온실가스뿐 아니라 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)에 기반하여 제품 또는 시스템의 원료 채취부터 폐기 및 재활용까지의 전과정에서 배출되는 온실가스를 정량화하는 기법이다. 전과정 기반의 온실가스 산정 방법을 제시하기 위해 전과정평가 표준인 ISO 14040 및 해당 표준에서 파생된 방법론들을 우선 검토하였으며, 전과정 온실가스 산정 방법론에 대한 추가 검토를 진행하였다. 또한 수소연

료전지 주택 건축 단계에서의 온실가스 배출 특성을 반영하기 위해 건축 분야 전과정 온실가스 배출량 산정 표준 및 지침을 확인하였다. 연료전지의 경우 별도의 표준은 개발되어 있지 않아 ISO 14040 기반의 연료전지 전과정 평가 수행 가이드라인을 확인하였다.

온실가스 산정 방법에는 전과정 기반의 산정 이외에도 특정 지역과 특정 시기에 대하여 배출된 온실가스의 총량을 산정하는 방법이 존재한다. 총량적 접근은 국가 단위에서 국가 온실가스 인벤토리라는 명목으로 매년 국가 시스템 경계 내 온실가스 배출량을 산출하여 관리하는 방식을 의미한다. 해당 방식은 제품 또는 시스템에서 직간접적으로 배출된 모든 온실가스를 산정하는 전과정 기반 방법론과 달리 시스템 경계 내에서 직접 배출된 온실가스를 모두 합하여 산정한다는 특징이 있다(Kim et al., 2021). 수소연료전지 주택 전과정 온실가스 산정 방법의 신뢰도를 제고하기 위해 전과정 온실가스 산정 방법론 이외에도 총량 접근 방식의 온실가스 산정 방법을 추가로 검토하였으며, 본 연구에서 검토한 모든 표준 및 지침을 Table 1에 나타내었다.

2.2. 국내외 연구사례

수소연료전지 주택은 연료전지와 주택의 개념이 혼합

된 대상으로 일반적인 연료전지의 전과정 온실가스 산정 방식을 그대로 적용하기에는 여러 가지 제약 조건이 있다. 연료전지만의 전과정 온실가스 산정은 ISO 14040/44, FC-HY Fuel Cell Guidance 등 국제적으로 통용되는 전과정평가 관련 표준 및 연료전지 전과정평가 수행 가이드라인을 활용할 수 있으나, 주택 적용에 따른 건물 시공, 유지관리, 에너지 및 용수 사용, 건물의 수명 등에 관한 개념에 기존 전과정평가 표준 및 가이드라인을 동일하게 적용하는 것은 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 연료전지 및 연료전지 적용 설비와 건물의 전과정평가 연구 사례를 통해 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 산정에 필수적으로 고려해야 하는 핵심 요소를 도출하였다.

연료전지의 경우 연료전지만을 평가한 연구는 드물며, 대부분의 연구는 연료전지가 적용된 설비를 대상으로 수행되었다. Dhanushkodi et al. (2008)은 원료 취득 단계부터 폐기 단계까지의 Cradle to Grave 접근을 통해 PEMFC 연료전지 자동차의 전과정 환경영향을 분석하였다. 원료 취득 단계에서는 촉매, 멤브레인, 양극재, 스택 원료물질의 환경영향을 고려하였으며, 제조 단계에서는 연료전지 스택 및 시스템 제조의 영향을 포함하였다. 사용 단계에서 연료전지에 투입되는 수소는 천연가스 개질을 통해 생산된 수소의 배출 원단위를 활용하여 사용 단계의 환경영

Table 1. Review of global and domestic LCA standards and GHG emission calculation methods

Standards	Title	Remarks
ISO 14040	• Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework	• Provides a framework for performing LCA studies, including definitions, system boundaries, data, and impact assessment etc
ISO 14044	• Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines	• Specifies requirements for LCA studies, including data collection, impact assessment, and reporting
ISO 14067	• Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification	• Focuses on quantifying the carbon footprint of products (CFP), consistent with ISO 14040 and 14044
EN 15804	• Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products	• Details core rules for preparing Environmental Product Declarations (EPDs) for construction products
RICS	• Whole life carbon assessment for the built environment	• Considers all life cycle stages, from material extraction to maintenance and disposal (aligns with EN 15978)
FC-Hy Guide	• Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H2 Technologies	• Specific guidance for LCAs involving fuel cell and hydrogen-related technologies
GHG Protocol	• The Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard	• Focuses on understanding and reducing GHG emissions throughout a product's life cycle
IPCC (2006)	• Guidelines for inventory to assess national greenhouse gas emissions	• Provides methods for calculating national GHG emissions across sectors, including waste and energy

향을 정량화하였다. Tahir and Hussain (2020)은 기존 전기버스와 수소연료전지 버스에 투입되는 에너지의 생산 시나리오에 따라 변화하는 전과정 환경영향을 비교하였다. 수소연료전지 버스에서 고려된 사항은 연료전지 스택, 수소 실린더 및 저장 탱크, 전력 저장을 위한 배터리 등이며, 버스의 사용 시 투입되는 수소의 환경영향은 그리드 전력으로부터 생산된 수전해 수소의 배출원단위를 기준으로 산정하였다. Stropnik et al. (2019)는 PEMFC 연료전지에 투입되는 핵심 소재를 중심으로 전과정평가를 수행하여 전과정 단계 내에서 필수로 고려해야 하는 인벤토리 리스트를 도출하였다. 연료전지 시스템 BOP의 경우 크롬강, 알루미늄 등 시스템의 틀을 구성하는 재료가 주요 영향 물질로 확인되었으며, 연료전지 스택의 경우 촉매와 나피온이 주요 영향 물질로 나타났다. 사용 단계에서는 수소 생산 방식에 따라 전과정 온실가스 배출이 제조 단계 대비 최대 100배까지 차이가 발생할 수 있으며, 수소 생산에 투입되는 에너지원의 종류에 대한 고려가 필수적이다.

건물의 전과정평가 또는 전과정 온실가스 산정은 일반적으로 EN 15804 표준 내 모듈 개념을 활용하여 수행되었다. Estokova and Fabianova (2024)는 건축자재에 초점을 맞추어 주택 건설 시 A1~A4 모듈에서의 전과정 온실가스 배출량을 산정하였다. 건축자재의 범주는 기초자재, 수직구조 자재, 수평구조 자재, 내부 자재, 단열재, 지붕재로 구분하여 데이터를 수집하였으며, 자재 운송의 경우 유럽 내 평균 운송 거리 통계를 활용하였다. 전과정 온실가스 배출은 전과정목록 데이터베이스를 활용하여 상위 흐름을 연결 후 IPCC 방법론에 기반하여 GWP를 산정하였다. Evangelista et al. (2018)은 Cradle to Grave 접근을 통해 주거용 건물 4개에 대한 전과정 환경영향을 정량화하는 연구를 수행하였다. 건설 단계에서 투입되는 에너지는 건설장비 사용 시간이 아닌 소비된 총 에너지량의 개념을 적용하여 데이터를 수집하였다. 운영 단계는 용수, 전기 사용과 건물 유지관리에 투입되는 건축 자재가 고려되었으며, 용수 및 전기 사용은 가구별 평균 유틸리티 사용 데이터를, 유지관리에 투입되는 자재의 양은 건축물의 총 사용 수명 대비 건축자재의 내구성을 반영하여 데이터를 수집하였다. Kim et al. (2021)은 광해방지사업에 포함된 시설 설치의 전과정 온실가스 배출량 산정 방법을 제시하면서 세부 공종별 데이터 수집 및 탄소배출량 산정 방법을 개발하였다. 가장 상위 범주인 토목공사의 하위 범주로 토공사, 구조공사, 철공사 등이 포함되며, 해당 공

사에 투입되는 자재의 수량과 건설장비의 사용 데이터를 개별 수집하였다. 건설 과정의 전과정 온실가스 산정은 각 자재와 건설장비의 온실가스 배출원단위를 곱하여 산정하게 된다.

3. 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 산정 방법

수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 산정 방법은 전과정평가 표준 ISO 14040/44, 건축물 전과정평가 지침 EN 15804/15978, 제품의 탄소발자국 산정 표준 ISO 14067, 그리고 EU의 연료전지 전과정평가 지침 “Guidance Document for performing LCAs on Fuel Cells and H2 Technologies”를 준용하여 검토하였다. 가장 먼저 수소연료전지 주택의 기능단위와 전과정 온실가스 배출량을 산정할 범위인 시스템 경계를 설정하였으며, 이후 각 항목의 데이터 수집 및 분석 방법과 온실가스 배출량 산정 방법 순으로 검토를 진행하였다.

3.1. 기능단위 및 시스템 경계 설정

기능단위(Functional Unit)는 분석 대상이 제공하는 기능을 값의 개념으로 나타낸 것으로, 전과정평가 수행 시 해당 단위에 맞게 전체 환경영향을 정량화하게 된다. 대부분 연료전지의 전과정평가가 연구에서는 연료전지를 통해 생산된 전력 1 kWh, 에너지 1 MJ 등의 기능단위를 활용하는데, 이는 연료전지는 전기 생산과 열 생산의 두 가지 기능을 갖기 때문이다. 하지만 주택에서 사용되는 연료전지에서 생산된 전력과 열은 일반적으로 외부로 이동하지 않고 주택 내에서 모두 소비되므로 전력과 에너지를 구분할 수 없고, 수소뿐 아니라 그리드 전력과 도시가스가 모두 에너지를 기준으로 기능단위를 설정하는 것은 불가능하다. 따라서 수소연료전지 주택의 기존 건축물의 전과정평가 수행 시 일반적으로 활용되는 건축물 면적 1 m²을 적용할 수 있으며, 해당 기능단위에 따른 온실가스 배출은 시스템 경계 내에서 건축물의 수명을 포함한 전과정 동안 배출되는 온실가스의 총량을 주택의 면적으로 나누어 정량화하게 된다.

시스템 경계는 분석 대상의 환경부하 또는 온실가스 배출 정량화에 포함되는 전과정 단계의 범위를 의미한다. 표준 및 지침에 따라 시스템 경계를 업스트림, 코어, 다운스트림을 구분하기도 하며, 모듈에 따라 구분하기도 한다.

A1 ~ A3 Manufacturing	A4 ~ A5 Construction	B1 ~ B5 Use	B6 ~ B7 Operation	C End of Life
• A1: Acquisition of Raw Materials for Fuel Cells and Housing Construction • A2: Transportation of Raw Materials • A3: Manufacturing of Fuel Cell Components and Construction Materials	• A4: Transportation of Fuel Cell Components and Construction Materials • A5: Construction of a Hydrogen Fuel Cell House	• B1 ~ B5: Use(B1), Maintenance(B2), Repair(B3), Replacement(B4), and Refurbishment(B5) of a Hydrogen Fuel Cell House	• B6: Energy Use During the Operation of a Hydrogen Fuel Cell House • B7: Water Use During the Operation of a Hydrogen Fuel Cell House	• C1 ~ C4: Deconstruction(C1), Transport(C2), Waste Processing(C3), Disposal(C4) of a Hydrogen Fuel Cell House

Fig. 1. System boundary for a hydrogen fuel cell house

모듈로 구분하는 시스템 경계는 건축물 전과정평가 지침인 EN 15804에서 제시한 개념으로 A 모듈은 제품 및 건설 단계, B 모듈은 사용 단계, C 모듈은 사용 후 단계를 의미한다. 본 연구의 대상인 수소연료전지 주택은 연료전지와 주택이라는 두 대상을 모두 포함하기 때문에 연료전지의 전과정을 모듈별로 구분하여 시스템 경계를 설정하였으며, 모듈별 구분과 단계 및 설명은 Fig. 1과 같다. 모듈은 통합하여 선언이 가능하며, 본 연구에서는 모듈을 크게 제조 단계(A1 ~ A3), 건설 단계(A4 ~ A5), 사용 단계(B1 ~ B5), 운영 단계(B6 ~ B7), 사용 후 단계(C)로 구분하였다. 제조 단계에서는 연료전지와 주택에 투입되는 원료물질의 취득, 운송, 제조가 포함되며, 건설 단계에서는 제조된 주택의 건설 자재, 연료전지 구성품의 운송과 주택의 건설이 포함된다. EN 15804에서는 B 모듈을 모두 사용 단계로 정의하고 있지만, 운영에너지의 영향이 큰 수소연료전지 주택의 특성을 반영하기 위해 사용 단계(B1 ~ B5), 운영 단계(B6 ~ B7)로 모듈을 구분하였다. 사용 단계에서는 주택과 연료전지 수명 동안의 유지관리, 수리, 교체의 영향을 선언할 수 있으며, 운영 단계에서는 에너지(전기, 수소, 도시가스 등) 사용과 용수 사용의 영향이 포함된다. 마지막으로 사용 후 단계는 주택의 해체 및 건설 자재와 연료전지의 폐기물 처리의 영향이 포함된다.

3.2. 데이터 수집 및 분석

수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량을 정량화하기 위해 분석하고자 하는 대상의 시스템 경계 설정을 완료한 이후 모듈별 데이터 수집 필수 요소를 분석하였다. A 모듈 필수 요소의 경우 연료전지 및 주택에 대한 국내외 연구 논문과 수소연료전지 주택 실증 사이트의 설계 내역서를 활용하여 검토를 수행하였다. B 모듈과 C 모듈

은 건물의 수명을 고려해야 하는 모듈로서 시나리오 설정에 사용 가능한 통계 데이터를 중심으로 검토를 수행하였다. 모듈별 데이터 수집 필수 요소는 Table 2와 같다.

제조 단계인 A1 ~ A3 모듈은 연료전지의 원료물질, 운송 및 부품 제조와 주택의 원료물질, 운송 및 자재 제조를 포함하는 모듈이다. 데이터 수집 시 연료전지의 BOM 기반 원료물질의 종류와 제조 단계에서의 유틸리티 및 전력 사용량을 필수로 포함하여야 하며, 설계 내역서를 기반으로 주택 건설에 투입된 자재의 종류, 양에 대한 데이터를 수집하여야 한다. A4 ~ A5 모듈은 부품의 운송 및 수소연료전지 주택의 건설을 포함하는 모듈이다. 운송의 경우 연료전지의 부품과 건설 자재가 제조되는 사업장으로부터 건설 현장까지의 거리, 운송에 사용된 차량, 연비의 데이터 수집이 필요하다. 건설 단계인 A5 모듈은 건축 내역서를 기반으로 투입되는 건설장비의 종류와 연료 소비량, 장비 운영 시간에 대한 데이터가 필수로 수집되어야 한다.

주택과 연료전지의 운영 단계와 수명이 고려되어야 하는 B 모듈과 C 모듈은 시나리오를 기반으로 데이터를 수집하게 된다. B 모듈 내 연료전지의 경우 스택 및 시스템의 수명을 확인하여 수소연료전지 주택의 수명 동안 교체 투입되어야 하는 부품의 양을 알아야 하며, 연료전지에 투입되는 총 연료(수소)의 양에 대한 추산이 필요하다. 주택 또한 수명 내에서 교체되어야 하는 자재의 종류와 양, 그리고 주택에 투입되는 연료, 전력 및 용수에 대한 예측 데이터가 수집되어야 한다. C 모듈은 사용 후 단계로 폐기 시나리오에 따라 주택을 철거하는데 투입되는 장비의 종류와 연료 소비량, 철거된 자재의 양, 자재의 처리 방식(매립, 소각, 재활용 등)에 대한 데이터 수집이 필요하다.

Table 2. Essential data required for the estimation of life cycle GHG emissions of a hydrogen fuel cell house

Module	List of Data
A1 ~ A3	• Types of raw materials based on BOM • Utility and power input during the manufacturing stage • Types and quantities of input raw materials based on BOQ
A4 ~ A5	• Distance from the fuel cell component manufacturing facility to the construction site • Distance from the construction material manufacturer to the construction site • Types of construction equipments and fuel efficiency
B1 ~ B5	• Types and quantities of fuel cell components replaced during the lifespan of the house • Types and quantities of construction materials replaced during the lifespan of the house
B6 ~ B7	• Total amount of hydrogen consumed by the fuel cell • Total amount of fuel, electricity, and water consumed by the house
C1 ~ C4	• Types of equipment and fuel consumption used for demolishing the house • Quantity of demolished materials • Methods of material disposal (Landfill, Incineration, Recycling, etc.)

Table 3. Calculation of life cycle of GHGs emission and applicable DB for a hydrogen fuel cell house

Item	Equation	Applicable Data
Material	$\Sigma[\text{Material input (kg, m}^3 \text{ etc)} \times \text{Emission factor(kgCO}_2\text{-eq/kg, m}^3 \text{ etc)}]$	National LCI DB, GLAD DB, Ecoinvent DB etc
Utility and Electricity	$\Sigma[\text{Utility and Electricity Use (MJ, m}^3, \text{kWh etc)} \times \text{Emission factor (kgCO}_2\text{-eq/MJ, m}^3, \text{kWh etc)}]$	
Transport	$\Sigma[\text{Distance (km)} \times \text{Loading Capacity (ton)} \times \text{Emission factor (kgCO}_2\text{-eq/ton}\cdot\text{km)}]$	
Waste Treatment	$\Sigma[\text{Material output for treatment (kg, m}^3 \text{ etc)} \times \text{Emission factor (kgCO}_2\text{-eq/kg, m}^3 \text{ etc)}]$	
Equipment	$\Sigma[\text{Operation time (hr)} \times \text{Emission factor (kgCO}_2\text{-eq/hr)}]$	National calorific value and IPCC calorific amount
	$\Sigma[\text{Work amount (unit)} \times \text{Equipment usage time (hr/unit)} \times \text{fuel efficiency (L/hr)} \times \text{Emission factor (kgCO}_2\text{-eq/L)}]$	

3.3. 전과정 온실가스 배출량 산정

기본적으로 전과정 온실가스 배출량은 데이터 수집을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 각 항목의 전과정 온실가스 배출계수를 곱하여 산정하는 방식을 통해 정량화가 가능하다. 전과정 온실가스 배출계수는 GWP (Global Warming Potential) 계수를 의미하는데, 대부분의 전과정 영향평가 방법론에서는 IPCC에서 제시하고 있는 이산화탄소 등가량(CO₂-eq) 인자를 활용하고 있다. 물질(연료전지 원료물질, 건축 자재)과 유틸리티 및 전력의 경우 국가 LCI DB와 GLAD, Ecoinvent, GaBi 등의 국제 공유 LCI DB를 연결하여 상위 흐름 온실가스 배출에 대한 산정이 가능하다. 장비 사용의 경우 물질, 유틸리티 및 전력과 같이 해

당 장비에 대한 LCI DB를 연결하여 상위 흐름 온실가스 배출을 정량화할 수 있으나, A5 모듈의 데이터 수집에 활용되는 건설 내역서에는 건설장비의 종류, 연비, 사용 시간 등에 대한 정보가 존재하므로 에너지 사용량을 계산하여 직접 배출량 산정도 가능하다. 마지막으로, 재활용, 소각, 매립 등의 처리 과정에서의 배출량은 LCI DB 연결을 통해 하위 흐름 온실가스 배출에 대한 산정을 하게 된다. 항목별 전과정 온실가스 산정 방법과 활용 가능한 데이터 베이스는 Table 3과 같다.

4. 사례 분석

본 연구를 통해 제시한 수소연료전지 주택 전과정 온실

Table 4. Operating conditions and lifespan of a hydrogen fuel cell house

	Value	Unit
Hydrogen Input per Day	0.5	kgH ₂ /day
Inverter Efficiency	60	%
Electricity Output per Day	10	kWh/day
House Lifespan	30	year
House Area	100	m ²

가스 산정 방법의 실효성과 보완점을 확인하기 위해 사례 분석을 수행하였다. 사례 분석의 대상은 2 kW급 PEM 설비가 적용된 수소연료전지 주택으로 설정하였다. 사례 분석을 위한 수소연료전지 주택 관련 데이터 수집을 진행하였으며, 실제 수소연료전지 주택의 내역서 중 주택 건설에 투입된 항목을 확인할 수 있었다. 하지만 수량 관련 정보는 누락 되어있어, 투입 항목이 유사한 연료전지 및 주택 관련 연구에 포함된 문헌 데이터 기반의 주택을 분석 대상으로 설정하였다. 앞서 제시한 전과정 온실가스 산정 방법과 같이 시스템 경계는 원료 취득 및 제조(A1 ~ A3), 건설(A4 ~ A5), 주택의 사용(B1 ~ B5), 주택의 운영(B6 ~ B7), 해체 및 폐기(사용 후 단계, C1 ~ C4)의 5단계로 설정하였다. 수소연료전지 주택의 운영 조건은 Table 4와 같으며, 주택 수명의 경우 국내 공동주택의 평균 수명인 30년으로 설정하였다(Park, 2024). 4인 가구 월 평균 전력 사용량인 약 300 kWh와 PEM 설비의 발전 효율 약 60%를 고려하여 1일 동안 주택 내 연료전지에 투입되는 수소는 0.5 kgH₂/day로 가정하였다(KEPCO, 2024; Kim, 2021).

4.1. 분석 방법

본 연구 수행 시 수집한 건설 내역서 내 수량의 정보가 누락 되어, 원료 취득 및 제조 단계(A1 ~ A3)와 건설 단계(A4 ~ A5)의 데이터는 연료전지 및 주택 관련 연구에 포함되어 있는 문헌 데이터를 대상에 맞게 가공하여 사용하였다(Mori et al., 2023; Verbeeck and Hens, 2010). 주택의 사용 단계(B1 ~ B5)에서는 PEM 스택의 교체 주기를 5년, PEM 시스템 구성품의 교체 주기를 15년으로 설정하여 주택의 전체 수명 동안 투입되는 물질의 데이터를 정량화하였다. PEM 스택 및 시스템의 교체 주기의 경우 연료전지 관련 연구에서 활용한 제품 유형별로 주기가 상이하어, 전과정평가 수행 시 보편적으로 활용할 수 있는 Ecoinvent LCI DB 내 PEM 스택 및 시스템의 교체 주기를 적용하였다. 이에 따라 PEM 스택은 총 1번의 생산과

5번의 교체를, EPM 시스템 구성품의 경우 총 1번의 생산과 1번의 교체를 진행하게 된다. 주택에 투입되는 물질의 경우 금속과 골재를 제외한 물질이 주택의 수명 동안 한번 교체되는 것으로 가정하였다. 주택의 운영 단계(B6 ~ B7)에서는 연료전지에 투입되는 수소의 양, 주택에 공급되는 전력, 도시가스, 용수의 양에 대한 데이터를 수집하였다. 연료전지에 투입되는 수소의 양은 연료전지의 발전 목표치(10 kWh/day)와 연료전지 발전 효율(60%)을 고려하여 값을 산정하였다. 주택에 공급되는 전력, 도시가스, 용수의 양은 통계청에서 제공하는 가구당 평균 유틸리티 및 전력 투입량을 수집하였으며, 전력 및 도시가스의 경우 연료전지에서 생산되는 전력 및 열 만큼의 양을 제외하였다. 사용 후 단계(C1 ~ C4)는 투입되는 물질을 기준으로 금속류는 재활용, 합성수지류는 소각과 재활용, 골재 및 목재류는 매립 처리되는 것으로 가정하였다. 또한 사용 후 단계에는 원료 취득 및 제조 단계, 건설 단계, 사용 단계에 투입되는 모든 종류의 물질을 처리 방식별로 구분하여 투입 물질의 양을 계산하였다. 모듈별 투입되는 항목과 값은 Table 5와 같다. 데이터 수집 이후 Ecoinvent v3.10을 활용하여 각 모듈의 투입물에 대한 LCI DB를 검토하였으며, GWP 배출계수를 연결해 상위 흐름 및 하위 흐름의 전과정 온실가스 배출량을 산정하였다.

4.2. 분석 결과

단계별 전과정 온실가스 배출량 분석 결과는 Fig. 2와 같으며, 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출은 1.33.E+03 kgCO₂-eq/m²로 나타났다. 온실가스 배출량 중 가장 많은 양을 차지한 단계는 운영 단계로 7.90.E+02 kgCO₂-eq/m²를 배출하여 전과정 배출 중 59.5%를 차지하였다. 운영 단계의 뒤를 이어 제조 단계가 29.6%, 사용 단계가 6.6%, 건설 단계가 3.4%, 사용 후 단계가 0.9%의 온실가스 배출을 차지하는 것으로 나타났다. 각 단계의 경우 주택의 수명 동안 1회 투입에 의한 온실가스 배출만이

Table 5. Input items for the life cycle of a hydrogen fuel cell house and GWP factors of each item (100m² Hydrogen Fuel Cell House)

Item		Value	GWP factor
A1 ~ A3			
PEM Stack	Graphite	9.00.E+00 kg	2.01.E-02 kgCO ₂ -eq/kg
	Phenolic Resin	2.20.E+00 kg	4.59.E+00 kgCO ₂ -eq/kg
	Aluminum	6.00.E-01 kg	1.98.E+01 kgCO ₂ -eq/kg
	Others	5.30.E-01 kg	-
	Electricity	4.50.E+01 kWh	4.95.E-01 kgCO ₂ -eq/kWh
PEM System (BOP)	Sheet Rolling Steel	1.50.E+02 kg	3.96.E-01 kgCO ₂ -eq/kg
	Inverter, 2.5 kW	1.50.E+01 kg	2.51.E+02 kgCO ₂ -eq/kg
	Injection Moulding	5.30.E+00 kg	1.52.E+00 kgCO ₂ -eq/kg
	Others	1.17.E+01 kg	-
	Electricity	1.00.E+02 kWh	4.95.E-01 kgCO ₂ -eq/kWh
	LNG	7.00.E+02 MJ	8.94.E-01 kgCO ₂ -eq/MJ
Construction Material	Concrete	9.50.E+00 m ³	1.95.E+02 kgCO ₂ -eq/m ³
	Saw wood	6.00.E+01 m ³	8.46.E+01 kgCO ₂ -eq/m ³
	Clay Brick	1.80.E+04 kg	3.33.E-02 kgCO ₂ -eq/kg
	Cement mortar	6.00.E+03 kg	2.40.E-01 kgCO ₂ -eq/kg
	Reinforcing Steel	7.00.E+02 kg	2.17.E+00 kgCO ₂ -eq/kg
	Others	5.60.E+03 kg	-
A4 ~ A5			
Transport	Total Distance	1.25.E+04 ton*km	1.39.E-01 kgCO ₂ -eq/ton*km
Construction	Building Machine (Fuel, Diesel)	5.76.E+03 L	4.04.E-01 kgCO ₂ -eq/L
B1 ~ B5			
Maintenance and replacement	PEM Stack	1.00.E+00 EA/5yr	-
	PEM System	1.00.E+00 EA/15yr	-
B6 ~ B7			
Operation	Hydrogen (Reforming)	5.00.E-01 kg/day	9.00.E+00 kgCO ₂ -eq/kg
	Electricity	1.10.E+00 kWh/day	4.95.E-01 kgCO ₂ -eq/kWh
	LNG	1.21.E+00 m ³ /day	8.94.E-01 kgCO ₂ -eq/m ³
	Water	8.00.E+02 kg/day	3.23.E-04 kgCO ₂ -eq/kg
C1 ~ C4			
Waste Treatment	Recycling	2.60.E+03 kg	1.78.E-02 kgCO ₂ -eq/kg
	Incineration	3.54.E+03 kg	3.41.E+00 kgCO ₂ -eq/kg
	Landfill	7.77.E+04 kg	1.22.E-02 kgCO ₂ -eq/kg

발생하나, 운영 단계(B6 ~ B7)의 경우 주택의 수명인 30년 동안 지속적으로 유틸리티(개질 수소, 그리드 전력, 천연가스, 용수)가 투입되어 다른 단계 대비 많은 양의 온실가스가 배출되는 것으로 분석되었다.

수소연료전지 주택의 온실가스 감축 효과를 확인하기 위해 연료전지가 적용되지 않은 주택 및 청정수소를 연료원으로 사용하는 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스

배출량을 산정하였다. 기존 주택의 경우 제조 단계에서 연료 전지 스택 및 시스템 구성을 위한 원료물질 취득과 운송, 제조의 영향이 제외되며, 건설 단계에서는 연료전지 스택 및 부품의 운송 영향을 제외하였다. 사용 단계는 연료전지 적용으로 인해 감소했던 전력 그리드와 도시가스의 투입량을 추가하였다. 마지막으로 사용 후 단계에서는 연료전지 구성 물질의 소각과 재활용 영향을 제외하였

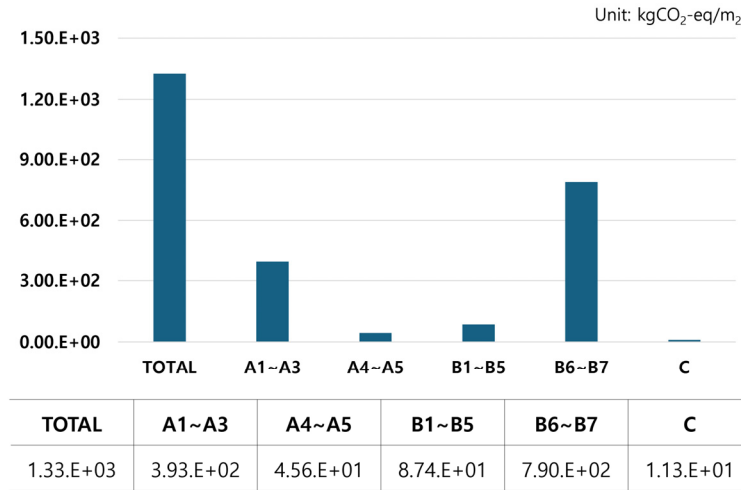


Fig. 2. Results of life cycle GHG emission estimation for a hydrogen fuel cell house

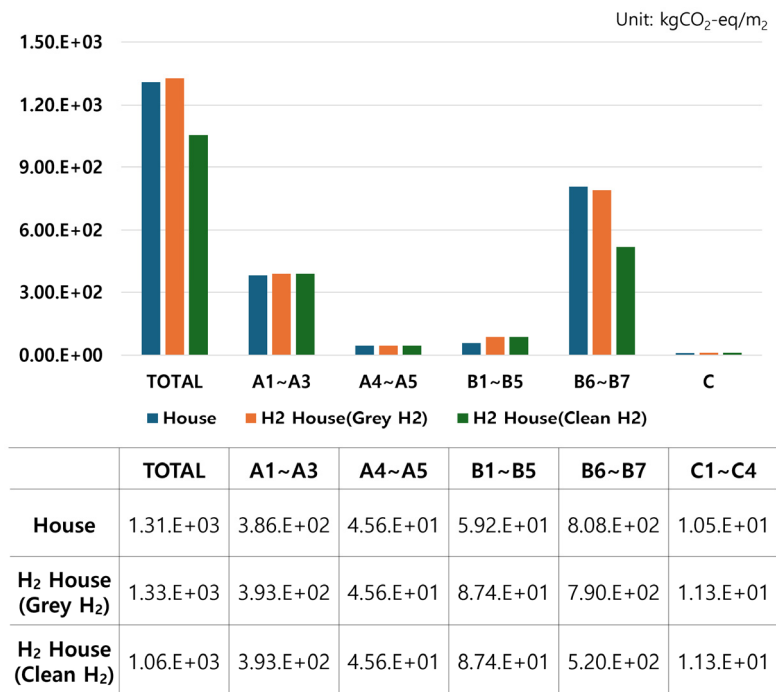


Fig. 3. Comparison of life cycle GHG emissions by house

다. 청정수소를 연료원으로 사용하는 수소연료전지 주택의 경우 기존 개질 수소의 배출계수를 현재 국내 청정수소 인증제에서 청정수소로 인증하고 있는 최대 배출계수인 4 kgCO₂-eq/kgH₂로 변경하여 산정하였으며, 이외의 항목에 대한 배출계수는 기존 분석과 동일하게 적용하였다. 주택별 전과정 온실가스 배출량 산정 결과는 Fig. 3과

같다.

개질 수소를 사용하는 수소연료전지 주택의 경우 기존 주택 대비 운영 단계에서의 온실가스 배출은 소폭 감소하였으나(2.3%), 제조 단계 및 사용 단계에서의 연료전지 제조와 교체에 의한 환경영향 증가로 전과정에서 약 1.37% 만큼의 온실가스 배출이 증가하였다. 반면, 수소연료전지

주택에 청정수소를 적용한 경우 개질 수소 적용 주택보다 운영 단계에서의 환경영향이 34.2% 감소하여서 전과정 온실가스 배출은 20.3%만큼 감소하였다. 수소를 연료원으로 사용하지 않는 기존 주택 대비해서는 약 19.2%의 전과정 온실가스 배출량 감축 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 기존 주택을 수소연료전지 주택으로 전환하는 경우 어느 정도의 전과정 온실가스 감축이 가능하지만, 주택의 전환뿐 아니라 청정수소로의 연료 전환이 수소연료전지 주택의 탄소중립 달성에 기여하기 위한 핵심 요소를 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 탄소중립 달성을 위한 수소 도시의 핵심 요소인 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량 산정 방법을 제시하고, 해당 방법을 적용하여 사례 분석을 수행하였다. 전과정 온실가스 배출량 산정의 시스템 경계는 건축물 전과정평가 지침의 개념에 기반해 모듈로 구분 후 각 모듈 내에 주택과 연료전지의 전과정 단계를 통합하여 반영하였다. 이후, 국내외 연료전지 및 건물의 전과정평가 연구 사례와 수소연료전지 주택 실증 사이트의 설계 내역서를 기반으로 모듈별 데이터 수집 필수 요소를 도출하였다. 마지막으로 물질, 유틸리티 및 에너지, 운송, 폐기, 장비사용으로 항목을 구분하여 항목별 온실가스 산정식과 적용 가능한 데이터베이스를 제시하였다. 마지막으로 제시한 방법을 활용하여 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량을 정량화하였으며, 기존 연구들은 연료전지 또는 주택의 환경영향을 개별로 산정하거나 단순 수소 사용에 의한 온실가스 배출량을 산정하였으며, 수소연료전지 주택의 온실가스 배출량을 정량화한 연구 사례는 부재하다. 본 연구는 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 산정 방법을 단계별로 구분하여 제시하고, 기존 주택과의 비교를 통해 수소연료전지 주택의 온실가스 감축 효과를 평가했다는 점에서 연구의 가치가 있다. 하지만 전과정 온실가스 배출량의 정확한 산정을 위해 데이터 수집 방법, 데이터 품질 평가, 제외 기준 등의 세부적인 사항은 향후 보완이 필요한 과제로 남아있다. 또한 본 연구에서 진행한 시나리오 분석의 경우 제한된 데이터 및 가상의 주택을 기반으로한 분석으로 향후 실제 내역서 내 수량 정보와 다양한 수소 생산 방식을 반영한 추가 연구가 필요하다.

수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량 사례 분

석의 결과, 개질 수소가 적용된 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량은 $1.33.E+03 \text{ kgCO}_2\text{-eq/m}^2$ 로 나타났다. 운영 단계(B6 ~ B7)의 배출이 59.5%를 차지하여 전과정 내에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 개질 수소를 사용하는 수소연료전지 주택, 청정수소를 사용하는 수소연료전지 주택, 기존 주택의 비교 결과, 기존 주택 대비 개질 수소 적용 주택은 전과정 온실가스 배출이 약 1.37% 증가하였으나 청정수소를 적용한 경우 기존 주택 대비 약 19.2%, 개질 수소 적용 주택 대비 20.3%만큼 온실가스 배출이 감소하는 것으로 나타났다. 주택의 운영 조건과 주택 건설 및 연료전지 생산에 투입되는 원료물질의 종류에 따라 결과값에 차이가 발생할 수 있으나, 기존 주택과 개질 수소를 사용하는 수소연료전지 주택의 전과정 온실가스 배출량은 크게 차이 나지 않았다. 반면 배출계수가 50% 수준인 청정수소를 적용한 경우 기존 주택 및 개질 수소 적용 주택 대비 전과정 온실가스 배출량에 유의한 차이를 보였다. 이는 수소연료전지 주택에 기반한 온실가스 감축을 위해 기존 주택 전환과 더불어 저탄소 수소의 공급이 핵심 요소임을 의미한다. 따라서, 수소 도시 내 고효율 수소연료전지 주택 보급과 저탄소 수소 생산을 위한 인프라 구축이 함께 진행된다면 국토교통분야의 탄소중립에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00417444).

Reference

- British Standards Institution (BSI). 2019. EN 15804 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products.
- Dhanushkodi S, Mahinpey N, Srinivasan N, Wilson M. 2008. Life cycle analysis of fuel cell technology. J Environ Inf 11(1): 36-44. doi:10.3808/jei.200800109
- Estokova A. Fabianova M. 2024. Environmental impacts of materials in masonry residential house. Euro-Mediterr J Environ Integr: 1-10. doi:10.1007/s41207-024-00518-y

- Evangelista P, Kiperstok A, Torres EA Gonçalves JP. 2018. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Constr Build Mater* 169: 748-761. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045
- Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU). 2011. Guidance document for performing LCAs on fuel cells and H₂ technologies.
- Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol). 2011. The product life cycle accounting and reporting standard.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2018. Global warming of 1.5°C. Geneva, Swiss: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- International Organization for Standardization (ISO). 2006a. ISO 14040 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- International Organization for Standardization (ISO). 2006b. ISO 14044 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.
- International Organization for Standardization (ISO). 2018. ISO 14067 - Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification.
- Jung GW. 2022. Decarbonization roadmap for carbon-intensive emission industries in the United States. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute. World Energy Market Insight 2022-23.
- Jung H, Kim DG. 2023. Research on legislative strategies of major countries for addressing the climate crisis and strengthening industrial competitiveness, and domestic response measures. Seoul, Korea: National Assembly Futures Institute. Research Report 2023-17.
- Kim HG. 2021. Overview and current status of fuel cells. Seoul, Korea: Export-Import Bank of Korea. New Deal Industry INSIGHT Report 2021-3.
- Kim SH, Kim CH. 2020. Trends and implications of the european green deal. Ulsan, Korea: Korea Energy Economics Institute. Special Report 2020-01.
- Kim SI, Kwak IH, Wie DH, Park KH, Baek SH. 2021. Study on estimation methods of life cycle GHGs emission for the mine reclamation project. *Econ Environ Geol* 54(6): 733-741. doi:10.9719/EEG.2021.54.6.733
- Korea Electric Power Corporation. 2024. Statistics of Electric Power in Korea 2023.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2021. National land and transportation carbon neutral roadmap.
- Ministry of Trade, Industry and Energy. 2019. Hydrogen economy roadmap.
- Mori M, Iribarren D, Cren J, Cor E, Lotrič A, Gramc J, Drobníč B, Rey L, Campos FC, Puig FS. 2023. Life cycle sustainability assessment of a proton exchange membrane fuel cell technology for ecodesign purposes. *Int J Hydrogen Energy* 48(99): 39673-39689. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.05.255
- Park YS. 2024. Current status and policy challenges of the housing remodeling market. Seoul, Korea: Construction & Economy Research Institute of Korea. Construction Issue Focus 2024-03.
- Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). 2023. Whole life carbon assessment for the built environment.
- Stropnik R, Sekavčnik M, Lotrič A, Mori M. 2019. Life cycle assessment of 1kW PEMFC system with the focus on critical materials. *Proceedings of 2019 7th International Youth Conference on Energy (IYCE)*; 2019 July 3~July 6. Bled, Slovenia: IEEE. doi:10.1109/IYCE45807.2019.8991589
- Tahir S, Hussain M. 2020. Life cycle assessment of hydrogen fuelcell-based commercial and heavy-duty vehicles. *Proceedings of ASME 2020 Power Conference*; 2020 August 4~August 5. Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/POWER2020-16770
- Verbeeck G, Hens H. 2010. Life cycle inventory of buildings: A calculation method. *Build Environ* 45(4): 1037-1041. doi:10.1016/j.buildenv.2009.10.012