



그린리모델링 건축물에서 전생애주기평가(LCA)의 전과정목록(LCI, Life Cycle Inventory) 방법 산정을 위한 연구동향 분석

Analysis of Research Trends for Calculating the Life Cycle Inventory (LCI) of Life Cycle Assessment (LCA) in Green Remodeling Buildings

임세형* · 심성진** · 김성은*** · 송용우**** · 박진철*****

Se-Hyeon Lim* · Sung-Jin Sim** · Seong-Eun Kim*** · Yong-Woo Song**** · Jin-Chul Park*****

* Main author, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (dlatpgus7578@naver.com)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (ssj3029@cau.ac.kr)

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (asteria03@naver.com)

**** Coauthor, Research Assistant Professor, School of Architectural Engineering, Chung-Ang Univ., South Korea (yongma0930@naver.com)

***** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (jincpark@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: In Korea, green remodeling is being promoted as a key strategy to reduce carbon emissions by improving the energy performance of existing buildings in order to achieve the goal of carbon neutrality in the building sector. However, there is currently a lack of research on life cycle assessment (LCA) in green remodeling. This study is a basic study that applies the LCA technique to analyze the carbon emissions of green remodeling, analyzes the international research trends, and discusses the LCI methodology based on them. **Method:** First, this study explains the main steps of LCA and compares the LCI techniques used in each step. Then, we identified the trends of international research to determine the LCI method suitable for green remodeling. **Result:** The results of the analysis showed that direct survey methods are mainly used overseas, but mixed methods are gradually spreading for accuracy, and research on remodeled buildings is increasing. It also emphasized the need to link with green certification systems to accurately assess and improve the environmental impact of buildings. This study concludes that mixed methods are suitable for LCA assessment of green remodeling in the future, and suggests that it is important to continue to develop and update the LCI database.

KEYWORD

그린리모델링
전생애주기 평가
전과정목록

Green Remodeling
Life Cycle Assessment
Life Cycle Inventory

ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 7, 2025

Final revision received Feb. 19, 2025

Accepted Feb. 25, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

최근 전세계적으로 이산화탄소 배출로 인한 지구온난화, 해수면 상승과 같은 환경문제와 기후변화에 대한 우려가 커지고 있다[1~4]. 국제에너지기구(IEA, International Energy Agency)에 따르면 전세계 이산화탄소 배출량은 2024년 기준 374억 톤이다[5]. 이에 세계 각국은 2020년 각국의 기준연도 대비 2050년까지 국가 온실가스 감축목표(NDC, Nationally Determined Contributions)를 상향하였다[6]. 우리 정부도 2050 탄소중립 선언, 2030 NDC 확정 등 각 부문별로 탄소중립을 위한 전략을 추진하고 있으며 특히, 건물 부문의 경우 탄소 배출량을 32.8% 감축하겠다는 목표를 수립하였다[7,8].

한편, 대한민국의 도시 및 주거환경정비법 시행령에 따르면 준공 후 20년 이상 경과된 건축물을 노후 건축물로 정의하고 있다[9]. 2023년 기준 20년 이상 경과된 건축물의 비중은 전체의 약 59.6%를 차지하고 있으며, 향후 수년 내에 노후건축이 되는 20년 미만의 건축물도 약 33.4%로 상당한 부분을 차지하고 있다[10]. 노후 건축물은 에너지 성능이 저하되어 이산화탄소 배출량을 증가시킨다. 따라서 우리나라의 경우 건물 부문의 탄소 저감 목표를 달성하기 위해서

는 신축 건축물 보다 기축 건축물의 에너지 성능을 우선적으로 개선해야 한다.

정부는 대응 방안으로 2020년부터 ‘공공건축물 그린리모델링 사업’을 시행하고 있고, 2025년부터는 민간 건물로의 확대를 계획하고 있다. 그린리모델링은 기축 건축물의 에너지 절감, 실내환경 개선, 탄소 배출 저감에 중심적인 역할을 하고 있다[11]. 이러한 정책 방향과 함께 건축물에서 발생하는 탄소 배출량을 그린리모델링을 통해 줄이고자 하는 연구가 다수 수행되었다.

우수진, 이상윤(2022)은 국공립 어린이집, 보건소, 공공의료시설을 중심으로 그린리모델링을 통한 에너지 절감 효과에 대해 분석하였으며, 총 1,065개 건물을 대상으로 평균 36.8%의 에너지절감 효과가 있음을 확인하였다[12]. 조정흙 외 3인(2023)은 노후 보건소를 대상으로 그린리모델링 적용 시의 에너지 절감 및 탄소 배출 저감효과에 대해 분석하였고, 기존 대비 39.3%의 에너지 절감 효과와 48.9%의 탄소 배출량 감축 효과를 도출하였다[13]. 윤범열 외 4인(2022)은 노유자시설 25개소를 대상으로 그린리모델링 전·후 건축물 에너지 성능과 탄소 저감량을 분석하여, 건물에너지를 최대 67.8%, 탄소배출량을 최대 59.8% 감축한 것을 밝혔다[14].

해당 연구들을 통해 노후건축물에 그린리모델링 적용 시 에너지 절감 측면과 탄소 배출량 저감 측면에 효과가 있음을 확인하였다. 그

러나, 선행연구들에서 언급하고 있는 탄소 배출량은 건물의 운영단계에 초점이 맞추어져 있어, 실질적으로 그린리모델링 시 추가적으로 투입되는 철거, 생산, 운송, 시공 정보에 대한 탄소 배출량을 고려한 연구는 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 수명주기 접근 방식 중 하나인 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 활용하여 그린리모델링 건축물의 탄소 배출량 분석을 수행하기 위한 기초연구단계로서, 국내외의 건축물 LCI(Life Cycle Inventory analysis) 연구동향을 분석하였다. 국내의 경우 'DBPia'를 기반으로 LCA 및 LCI 관련 문헌을 조사 후 주제를 분류하여 연구동향 조사를 실시하였으며, 국외의 경우 LCA 동향을 조사한 타 문헌 중 일부를 재분석하여 연구동향 조사를 실시하였다. 이후, 그린리모델링 단계별 특성을 파악하고, 국내외 연구동향 분석 결과를 바탕으로 하여, 이에 적합한 LCI 방법론을 산정하였다.

2. 전과정 평가(LCA)

2.1. LCA의 정의 및 특성

LCA는 제품, 서비스 또는 시스템의 전체 생애 주기 동안 발생하는 환경 영향을 평가하여, 이를 개선·저감하는 기법으로 주요 프로세스는 Fig. 1.과 같다. LCA는 ISO 14044을 바탕으로 하고 있으며, LCA의 환경성 평가를 위한 주요 수단으로 활용되고 있고, 대표적인

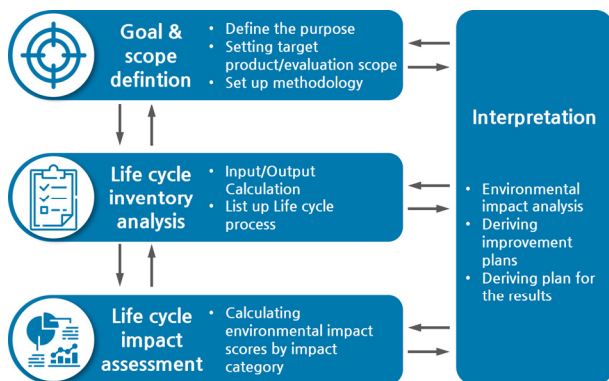


Fig. 1. Process of LCA

Table 1. Definition of LCA

LCA phase	Contents
Goal and scope definition	Steps to define the purpose of assessment and set the scope of your analysis
LCI (Life Cycle Inventory analysis)	Lifecycle assessment phase, which includes collecting and quantifying inputs and outputs throughout the product's lifecycle
LCIA (Life Cycle Impact Assessment)	A lifecycle assessment phase that aims to understand and assess the magnitude and significance of potential environmental impacts on product systems throughout the product lifecycle
Interpretation	A lifecycle assessment phase in which the results of an inventory analysis or impact assessment, or both, are evaluated in relation to defined goals and scope to draw conclusions and recommendations

의사결정 도구 중 하나로 사용되고 있다[15]. 해당 LCA는 건축물의 전생애주기 동안 발생하는 투입·산출물에 의한 환경영향을 종합적으로 평가하는 데에 활용할 수 있다[16]. LCA의 주요 프로세스는 목적 및 범위 설정(Goal and scope definition), 전과정 목록 분석(LCI, Life Cycle Inventory analysis), 전과정 영향 평가(LCIA, Life Cycle Impact Assessment), 전과정 해석(Interpretation), 총 4단계로 나눌 수 있으며, 내용은 Table 1.과 같다[15,17,18].

목적 및 범위 설정 단계는 평가의 목적을 정의하고 분석 범위를 설정하는 단계로, 분석할 시스템의 경계를 명확하게 해야하며, 데이터를 수집할 기간 및 지표를 결정한다. 전과정 목록 분석은 LCA 단계의 핵심 단계로서, 시스템의 각 단계에서 발생하는 물량과 에너지 등 데이터를 수집하고 기록한다. 건축물 LCA의 경우 자재, 에너지, 배출물 등 모든 물량 등에 대해 분석하는 단계이다. 전과정 영향 평가 단계에서는 수집된 데이터를 바탕으로 해당 시스템이 환경에 미치는 영향을 평가하는 단계로, 건축물의 경우 탄소배출량, 자원 소비, 에너지 사용 등의 영향에 대해 평가할 수 있다. 마지막으로 전과정 해석 단계에서는 분석된 데이터를 바탕으로 환경적 영향 감소를 위한 개선점에 대해 개별적·종합적으로 제시하는 단계이다[19,20].

2.2. 전과정목록(LCI) 방법론

보다 정확한 분석을 위해서는 LCA의 2번째 단계이자 핵심 단계인 LCI 단계에서의 투입·산출물의 정량화가 이루어져야 한다. LCI를 위한 방법론은 직접조사법, 산업연관분석법, 그리고 혼합법이 있으며, 각 방법론에 대한 내용은 다음과 같다[21~25].

1) 직접조사법

직접조사법은 건물에 투입되는 모든 재료의 종류와 물량, 그리고 해당 재료가 가지는 환경영향을 현장에서 직접 조사하는 방식이다. 해당 방법은 수많은 자재가 사용되는 건축산업의 특성상 원료채굴, 가공, 생산 등 투입되는 자재의 전과정을 조사하는 데에는 많은 시간과 비용이 필요한 한계점이 존재한다. 그러나, 취득한 데이터의 신뢰도가 높은 측면에서 장점을 가진다.

2) 산업연관분석법

산업연관분석법은 산업연관표를 사용하여 분석 범위의 투입·산출물량을 간접적으로 추계할 수 있는 방법이다. 산업연관표는 산업간일정기간 내 국민경제 내에서 생산·처분과정에서 발생하는 모든 거래에 대해 일정한 원칙과 형식에 따라 기록한 종합적인 통계자료로, 국내에서는 한국은행에서 연 단위로 제시하는 표를 사용한다. 해당 방법은 광범위하고 복잡한 산업에 적용할 때 유리하나, 산업구조와 생활활동이 단순화 되어 있어 개별적인 제품 및 기술에 대해서는 불충분할 수 있다. 또한, 산업연관표 상에 배제되어 있는 항목에 대해서는 평가할 수 없거나, 유사한 항목으로 추측하여 해석에 오류가 생기는 등의 한계점이 존재한다[26].

3) 혼합법

혼합법은 직접조사법과 산업연관분석법을 혼용한 하이브리드 방식의 분석법으로, 부문 구분을 상세히 할 수 있으며 포괄적이다. 이

Table 2. Comparison between LCI methodologies

Category	Process analysis	Input-output analysis	Hybrid analysis
Accuracy of results	●	◐	●
Time efficiency	○	●	○
Analysis range	○	●	●
Deviation between analysis range	○	●	◐
Information updating	◐	●	◐

● : Good / ◐ : Normal / ○ : Bad

와 같은 특성으로 LCI의 신뢰도를 높일 수 있으며, 산업연관분석법의 단점인 데이터 누락과 세부 정보에 대한 문제를 해결할 수 있다. 다만, 제품 생산 단계에서의 공정에 대해서 정량적으로 분석해야하기 때문에 직접조사법의 한계점을 공유한다.

4) 소결

앞서 언급된 직접조사법, 산업연관분석법, 혼합법은 모두 건축물의 전생애주기적 차원에서 에너지와 이산화탄소 배출량을 추정할 수 있는 LCI 방법론이며, 비교·분석하면 Table 2.와 같다[27~30].

우선, 정확성 측면에서는 건축물에 투입되는 재료의 전과정을 현장조사를 통해 데이터를 수집하는 직접조사법을 이용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 두 번째로, 산업연관분석법은 산업연관표를 이용하여 투입·산출 물량을 정량화하기 때문에 직접조사법에 비해 소요시간 측면에서 효율적일 것으로 사료된다. 분석 범위와 분석 범위의 편차의 경우, 직접조사법은 분석 대상의 수가 산업연관분석법에 비해 극도로 좁고, 현장조사를 할 수 있는 한계가 존재하기 때문에 해당 측면에서는 불리한 조건을 가지고 있다. 반면, 산업연관분석법의 경우, 다수의 산업부문의 데이터와 전체 평균 수준에서의 분석이 가능하다. 마지막으로 데이터의 최신화 측면에서는 연마다 정기적으로 최신화되는 산업연관분석법에 비해 직접조사법은 조사 시간이 비교적 높게 소요되어 데이터 수집 및 최신화에 어려움이 존재한다.

해당 방법론 간의 특징을 비교한 결과, 산업연관분석법을 이용하는 것이 타 방법론 대비 효율적일 것으로 판단된다. 그러나, 산업연관분석법의 한계점인 결과의 정확성을 보완하기 위해서는 직접조사법을 부분적으로 활용하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

3. 국내 연구동향

건물 분야의 탄소배출량 저감을 위해 국내에서도 건축물의 에너지소비량 및 탄소배출량 원단위 산출 등 전과정평가에 대한 연구가 이루어지고 있다. 우선 국내 LCA 및 LCI 관련 문헌 조사를 위해 'DBPiA'를 기반으로 2000년부터 2024년까지 건축공학 분야에서 다룬 문헌은 Fig. 2와 같이 LCA 관련 285개, LCI 관련 348개로 조사되었다. Fig. 3.에는 건축공학 분야에서 건축물과 관련된 문헌을 선정하여 주제 분류에 따른 문헌수에 대해 표현하였다. LCA의 경우 탄

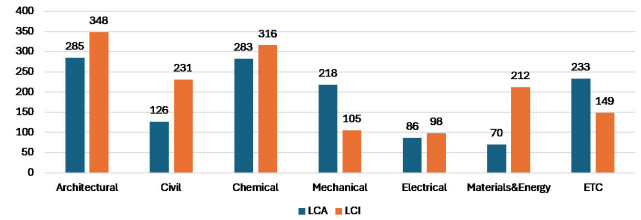


Fig. 2. Number of LCA & LCI literature by engineering field (Domestic)

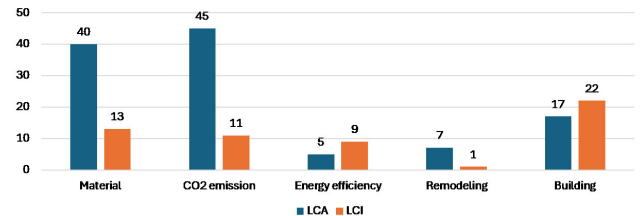


Fig. 3. Number of literature about building LCA & LCI (Domestic)

소배출량과 재료에 관한 문헌이 타 주제 대비 많은 것으로 나타났으며, LCI의 경우 건축물의 LCI DB 구축에 관련된 문헌이 많은 것으로 나타났다. 이후, 해당 문헌들 중 일부에 대해 분석하였으며, 어떠한 LCI 방법론을 사용하였는지에 대해 파악하였다.

임효진 외 2인(2018)은 업무용 건축물을 대상으로 전과정평가 기법에 기반하여 건축물의 단계별 온실가스에 대한 배출량 분석을 수행하였다[31]. 해당 연구에서는 업무용 건축물에 사용되는 주요 건축자재를 도출하고, 해당 재료들의 기여도 데이터를 수집하여 에너지 소비량 및 탄소 배출량 분석을 수행하였다. 데이터를 수집하고 분석하는 과정에서 LCI 방법론으로 산업연관법을 사용하였으며, 생산, 운송, 시공, 운영, 해체 및 폐기과정에 걸쳐 전생애주기 차원에서의 분석을 실시하였다.

김소현 외 4인(2024)은 건축물 리모델링 시 발생하는 온실가스 배출량 중 건축물 외장재를 통해 발생하는 온실가스 배출량을 중심으로 LCA 분석을 실시하였다[32]. 건축자재의 생산단계와 시공, 유지보수 및 교체 단계에 사용되고 배출되는 원자재에 대한 정보를 산정하기 위해 혼합법을 기반으로 분석을 수행하였으며, 이를 통해 환경 영향이 적은 외장재 적용에 대한 결과를 도출하였다. 조강희 외 3인(2021)의 연구에서는 리모델링 건축물의 전과정평가 방법을 제안하는 연구를 수행하였으며, 각 단계별로 수집해야 할 데이터와 범위, 이를 통해 평가해야 할 항목에 대해 도출하였다[33].

선행연구에서 강조하듯 건축물의 전과정평가는 필수적이며, 특히 기축건축물의 리모델링에 대한 중요도가 높아지고 있음을 말하고 있다. 그러나, 앞선 선행연구 결과와는 달리 현재 이루어지고 있는 LCA 평가들은 신축건축물을 대상으로 한 경우가 월등히 높으며, 기축건축물의 LCA 평가에 대한 연구의 대부분도 운영단계의 탄소배출량 감축에 초점을 맞추고 있다. 또한, LCA 평가를 수행하였더라도 어떠한 LCI 방법론을 사용하였는지 명시하지 않은 경우도 다수 존재한다. 이에 더해, 우리나라의 건물 분야 온실가스 감축을 위한 녹색건축인증제도(G-SEED) 등은 신축건축물만을 대상으로 하고 있어, 리모델링 건축물 평가에 적용할 수 있는 제도적인

측면도 미비한 상태이다.

4. 국외 연구동향

IEA의 연구에서는, 노후 건축물, 산업플랜트, 교통수단 등과 같은 기존 인프라에 대해 에너지 절감에 대한 조치가 없을 경우, 탄소저감 목표치에 도달할 수 없을 것으로 예상하였다. 이에 따라 많은 국가에서 건물에너지 효율 개선 및 탄소 저감을 위해 우리나라의 그린리모델링과 유사한 방식의 리모델링에 대한 관심이 증가하고 있다. 또한, 국외 연구에서는 보다 정량적인 평가를 위해 LCA 기법을 적용하여 기존 건축물을 리모델링 후 환경적 기능에 대한 평가가 이어지고 있다. 또한, LCA 기법만을 사용하여 분석하는 데 그치지 않고, 지속가능한 건축을 위한 제도와 관련하여 기축건축물의 성능을 개선하고 이를 분석하는 연구들도 다수 존재한다.

Hussien 외 8인(2023)에 따르면 'Web of Science' 데이터베이스를 기반으로 리모델링 건물의 LCA에 관한 다룬 논문이 1994년부터 2022년까지 총 169개가 출판되었다고 밝혔다[34]. Fig. 4.와 같이 리모델링 건물의 LCA 논문은 크게 3가지의 소주제로 분류할 수 있는데, 이 중 건물 LCA를 수행한 논문이 114개, LCA 방법론 개발 논문 41개, LCA 평가 검토 논문이 14개로 나타났다. 특히, 건물 LCA를 수행한 논문의 구체적인 주제는 Fig. 5.와 같으며, 이를 통해 국외에서는 리모델링 건물의 LCA에 관한 논문 중 에너지 효율성과 탄소 배출량에 대한 연구가 가장 많이 이루어지고 있다고 판단하였다. 다음으로는 국외 건물 LCA 수행 관련 논문들에서 사용한 LCI 방법론에 대해 조사하였다. Oregi 외 3인(2015)은 LCA를 수행한 대부분

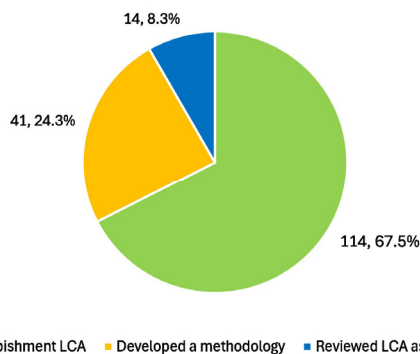


Fig. 4. Number of literature about refurbishment building LCA (International)

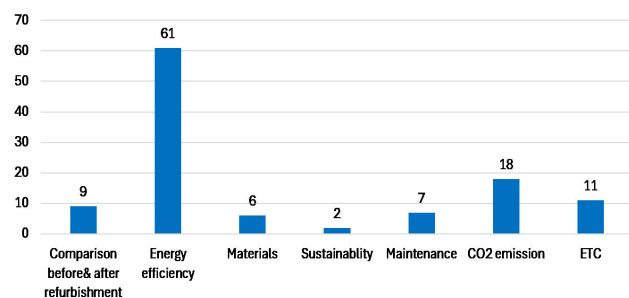


Fig. 5. Number of publications about refurbishment LCA (International)

의 논문에서 소수의 연구를 제외하고는 일반적으로 직접조사법을 사용한 접근 방식이 사용된다고 언급하였다[35]. 또한 Fahlstedt 외 4인(2024)은 LCI 접근 방식을 명시한 논문들에서 직접조사법 > 혼합법 > 산업연관분석법 순으로 많이 사용하고 있음을 확인하였다[36]. 해당 예시로, Hasik 외 5인(2019)은 직접조사법을 사용하여 전생애주기 차원에서 신축 건물과 리모델링 건물의 환경영향을 분석하였으며, Potrč Obrecht 외 4인(2021)은 리모델링 유무에 따라 환경에 미치는 영향을 LCA 측면에서 분석하였다[37,38]. 또한, Azari and Abbasabadi (2018)는 Table 3.과 같이 3가지의 LCI 방법론 중 직접조사법을 이용한 LCA 분석 도구와 데이터베이스가 다른 2개의 LCI 방법론에 비해 더 많은 인프라가 구축되어 있음을 알리고 있다[39].

앞선 조사를 통해 직접조사법을 사용한 LCA 방식이 대부분을 차지하고 있는 것을 확인하였으나, 공통적으로 직접조사법의 특성상의 한계점을 언급하고 있다. Crawford (2008)와 Stephan 외 2인(2012)은 직접조사법 기반의 LCA 평가에 사용된 일부 데이터의 출처(ex. Ecoinvent, GaBi database 등)와 LCI 구축 과정에서 발생하는 절단 오류에 따라 데이터 계산값의 차이가 존재한다고 판단하고 있다[40,41]. 이와 같은 오류를 최소화하기 위해 Stephan 외 2인(2013)과 F.Kofoworola and H.Gheewala (2009)의 연구와 같이 혼합법을 사용하여 건물 LCA를 평가하는 연구가 이어지고 있으며, 최근에는 해당 연구가 증가하는 추세이다[42,43].

국외에서는 LCA 기법만을 사용하여 분석하는 데 그치지 않고, 지속가능한 건축을 위한 제도와 관련하여 기축건축물의 성능을 개선하고 이를 분석하고 있다[44]. 미국에서는 LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)와 같은 지속 가능한 건축 인증 프로그램을 통해 리모델링을 지원하고 있으며, 이를 평가하기 위해 LCA 기법을 활용한다. 영국의 경우, 패시브 하우스와 같은 제로 에너지 건축물을 목표로 한 리모델링 연구가 활발하며, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) 인증 제도를 통해 이를 활성화하고 있다. 유럽의 경우 ILCD (International Reference Life Cycle Data System) 데이터베이스에 LCA를 접목하여 건축물의 환경적 영향을 평가하고 분석하고 있다.

Table 3. LCA tools and database by LCI methodologies

Category	Process analysis	Input-output analysis	Hybrid analysis
Tools and databases	- Athena IE (North America) - AusLCI (Australia) - CMLCA (Europe) - Ecoinvent (Europe) - ELCD (Europe) - GaBi (Germany, US, Europe) - GREET (US) - Inventory of Carbon and Energy (UK)	- US economy database - ciolca.net	Combines tools and data sources available to use in process analysis and input-output analysis

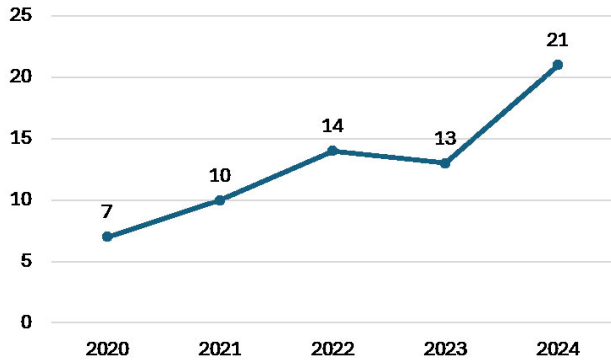


Fig. 6. Number of LCA literatures in Korea (focusing on the last 5 years)

5. 분석 결과

국내 연구동향 분석 결과, 공학 분야의 LCA 및 LCI 관련 문헌 중 건축공학 분야에 관한 문헌이 각각 21.9%, 23.9%로 가장 많은 것으로 나타났다. 또한, Fig. 6.과 같이 최근 5년간 건축물 관련 LCA 연구가 상승되고 있음을 확인하였다. 국외 연구동향 분석 결과, 건물 LCA에 관한 논문 1,505개 중 리모델링 건물에 대한 LCA 논문은 약 11.2%에 불과하여, 이를 통해 현재 이루어지고 있는 건물 LCA 평가는 기존건축물 보다 신축건축물에 대한 평가가 대부분인 것으로 사료된다. 리모델링 건물의 LCA에 관한 논문 169개 중 69.2%(79개)가 에너지 효율성과 탄소 배출량에 대해 분석하고 있는 것으로 파악하여, 대부분이 환경적 측면에서의 연구가 주요 관심사임을 확인하였다.

또한, LCA 평가를 위한 데이터 수집 방법을 결정하는 LCI 기법은 직접조사법이 대부분이며, 이는 직관적인 데이터 수집이 가능하고, 분석 도구 및 데이터베이스와 같은 인프라가 구축되어있기 때문에 판단된다. 그러나, 분석 범위의 한계점과 LCI 구축 과정에서 발생할 수 있는 절단 오류 등의 한계점을 극복하기 위해 혼합법의 사용 빈도가 점점 증가하고 있는 점은 LCA 평가의 정확성에 대한 관심이 높아지고 있는 것으로 사료된다.

이를 통해 그린리모델링 건축물의 LCA 분석 필요성에 대해 확인하였다. 다만, 신축 건물과 달리 그린리모델링 건물의 경우 기존 건축물에 투입된 재료 및 물량 정보를 활용하여야 할 것으로 판단되는데, 30년 이상 경과된 건물의 경우 도면의 부재 같은 문제가 발생할 것으로 예상된다. 이 경우, 산업연관분석법을 활용하여 기존 건축물에 투입된 재료 및 물량에 대한 DB를 산정하고, 리모델링 후 투입되는 재료 등에 대해서는 직접조사법을 활용하는 것이 적합하다고 판단된다. 이와 같은 활용방안과 국내외 연구동향으로 미루어보았을 때, 향후 그린리모델링 LCA 평가 시에 적합한 LCI 기법으로 혼합법을 사용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

앞선 연구동향 조사와 김종엽(2005)의 연구를 바탕으로 그린리모델링 단계별로 적용해야 할 LCI 적용 방법을 고려하였을 때, 기존 건물에 사용하고 있던 자재 중 폐기해야 할 물량에 대하여 폐기물 재활용업체 등 현장조사를 기반으로 구축해야 할 것으로 판단된다[45]. 건설자재 생산단계에서는 산업연관표를 이용하여 에너지

Table 4. Domestic and international LCA&LCI trends and linkage with existing systems

Category	Domestic	International
LCA&LCI status	• Increase in LCA research due to strengthening of eco-friendly building policy • National LCI DB construction and standardization research in progress (ex. KLICI)	• Possession of multiple LCA tools • Continuous updating of LCI DB used for LCA • Discussion of global data sharing and standardization plan in progress
Linkage with existing policy	• Environmental Product Declaration (EPD) and Green Building Certification (G-SEED) are planned to be carried out in parallel with LCA evaluation	• LCA applied to global eco-friendly building certifications such as LEED, BREEAM, and DGNB • LCA evaluation criteria reflected in Japan's CASBEE and China's 3-star green building certification

소비량 및 탄소 배출량 DB를 구축하고, 시공단계의 경우 대상 건물의 내역서나 견적서 등을 이용하여 해당 과정에서 투입되는 재료에 대한 DB를 구축하는 것이 적합할 것으로 사료된다. 건물의 운영 및 유지보수단계에서는 교체주기 및 교체율 등을 기준으로 대상별 필요물량을 파악하는 것이 핵심일 것으로 생각된다. 이 단계에서는 패시브 기술의 교체 주기와 액티브 기술의 교체 주기도 차이가 있을 것으로 예상되어, 해당 특성에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로, Table 4.와 같이 국외의 경우 친환경 인증제도와 연계하여 LCA를 진행하고 있다는 점에서, 건축물의 성능과 지속가능성을 높이는 데 기여하고 있음을 확인하였다[46]. 이를 통해, 그린리모델링 LCA 평가 시에도 국내 친환경 건축인증제도인 녹색건축물 조성지원법, ZEB (Zero Energy Building) 인증, 건축물에너지효율등급 등의 제도와의 연계성을 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 그린리모델링 건축물의 LCA 평가 중 핵심단계인 LCI 방법론 산정을 위해 국내외 연구동향을 분석하였으며, 결과는 다음과 같다.

- (1) LCA의 핵심단계인 LCI 방법론의 특성 분석 결과와 국내외 연구동향 분석 결과를 종합적으로 평가하였을 때, 그린리모델링 시 적합한 LCI 방법론은 혼합법으로 사료된다.
- (2) 혼합법을 통해 그린리모델링 시 에너지 소비 및 탄소배출을 최소화할 수 있는 최적의 자재 조합을 도출하고 이를 통해 자재 생산 및 시공단계의 탄소저감 효과를 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 그린리모델링 건물의 운영 및 유지보수단계에서는 혼합법을 활용하여 장기적 측면에서의 에너지 절감 효과와 탄소 배출 감소량을 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다.

최근 국외에서는 리모델링 건축물의 탄소배출량을 정량적으로 평가하기 위해, 철거·폐기·재사용, 자재생산, 시공, 리모델링 후 운영 단계 등 실질적으로 전과정에 걸친 LCA 연구가 증가하고 있다. 또한, 전과정 평가 결과의 정확성 및 신뢰성을 확보하기 위해 건축자재 LCI 데이터베이스 개발 및 지속적인 최신화가 요구되고 있다. 이러한 추세는 국내에서도 그린리모델링 건축물의 전과정평가의 중요성이 올라가고 있음을 시사한다.

다만, 본 연구의 결과를 통해 혼합법을 적용하여도 모든 건축자재에 대한 LCI 데이터베이스를 구축하는 것은 현실적으로 불가능한 한계점을 가질 것으로 예상된다. 이러한 한계점을 극복하고, 그린리모델링 건물의 효과적인 탄소저감을 위해 건축물 종류 및 용도별로 주로 사용되는 건축자재와 해당 건축물의 환경성에 중요한 영향을 미치는 건축자재별 기여도 분석이 필요할 것으로 판단된다. 이에 환경 영향을 최소화할 수 있는 자재를 우선적으로 사용하는 것이 그린리모델링 시 이점이 극대화 될 것으로 예상되며, 혼합법을 사용하여 건축자재 LCI 데이터베이스 구축 우선순위를 결정하는 연구를 추후 진행할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호: No. RS-2023-00217322, 2023R1A2C1006066)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- [1] IEA (International Energy Agency), Global ABC roadmap for buildings and construction 2020-2050, France: United Nations Environment Programme, 2020, pp.16-19.
- [2] K. Abbass et al., A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 2022, pp.42539-42559.
- [3] Z. Wenlong et al., Impact of energy efficiency, technology innovation, institutional quality, and trade openness on greenhouse gas emissions in ten Asian economies, *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 2023, pp.43024-43039.
- [4] F. Chien et al., The role of renewable energy and urbanization towards greenhouse gas emission in top Asian countries: Evidence from advance panel estimations, *Renewable Energy*, 186, 2022, pp.207-216.
- [5] M.L. Rivera, H.L. MacLean, B. McCabe, Implications of passive energy efficiency measures on life cycle greenhouse gas emissions of high-rise residential building envelopes, *Energy and Buildings*, 249, 2021, 111202.
- [6] 관계부처 합동, 2030 국가 온실가스 감축 목표(NDC) 상향안, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18. // (Jointly with Relevant Ministries, 2030 National Return Goal (NDC) return-final, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>, 2021.10.18.)
- [7] 관계부처 합동, 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획 요약, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000037588>, 2023.04.12. // (Jointly with Relevant Ministries, Summary of carbon neutrality/green growth national strategy and 1st national basic plan, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000037588>, 2023.04.12.)
- [8] 국토교통부, 국토교통 탄소중립 로드맵, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000030444>, 2021.12.23. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Land, Infrastructure and transport carbon neutral roadmap, <https://nsp.nanet.go.kr/plan/subject/detail.do?nationalPlanControlNo=PLAN0000030444>, 2021.12.23.)
- [9] 국토교통부(주택정책과), 도시 및 주거환경정비법 시행령 제2조제3항제1호, <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9%EB%8F%84%EC%8B%9C%EB%B0%8F%EC%A3%BC%EA%B1%B0%ED%99%98%EA%B2%BD%EC%A0%95%EB%B9%84%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9>, 2024.12.17. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport(Housing Maintenance Division), Article 2, Paragraph 3, Item 1 of the Enforcement Decree of the Urban and Residential Environment Improvement Act, <https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9%EB%8F%84%EC%8B%9C%EB%B0%8F%EC%A3%BC%EA%B1%B0%ED%99%98%EA%B2%BD%EC%A0%95%EB%B9%84%EB%B2%95%EC%8B%9C%ED%96%89%EB%A0%B9>, 2024.12.17.)
- [10] 국토교통부, 주택 통계 발표: 보도자료, https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95089604, 2024.03.29. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Housing statistics announcement: Press release, https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95089604, 2024.03.29.)
- [11] 이한솔, 최경석, 그린리모델링을 통한 에너지 성능 개선 효과 분석 - 공공건물의 패시브 기술을 중심으로, *한국생활환경학회지*, 제29권 제3호, 2022, pp.281-288. // (H.S. Lee, K.S. Choi, Analysis of the effect of improving energy performance through green remodeling - Focusing on passive technology in public buildings, *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 29(3), 2022, pp.281-288.)
- [12] 우수진, 이상윤, 탄소중립을 위한 공공건축물 그린리모델링 에너지 절감 효과 분석 - 국공립 어린이집, 보건소, 공공의료시설을 중심으로, *한국생태환경건축학회지*, 제22권 제5호, 2022, pp.19-26. // (S.J. Woo, S.Y. Lee, An analysis of energy saving effect of green remodeling in public buildings for Net-Zero, *KIEAE Journal*, 22(5), 2022, pp.19-26.)
- [13] 조정흠 외 3인, 노후 보건소의 그린리모델링을 통한 에너지 및 탄소배출 저감효과 분석, *한국지역·수명에너지학회논문집*, 제19권 제4호, 2023, pp.18-26. // (J.H. Cho et al., Analysis on the energy and ghg emissions reduction effect of old public health centers through Green-Remodeling, *Transactions of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy*, 19(4), 2023, pp.18-26.)
- [14] 윤범열 외 4인, 노유자시설의 그린 리모델링을 통한 에너지 및 탄소 저감 평가, *대한설비공학회 학술발표대회논문집*, 2022, pp.35-38. // (B.Y. Yun. et al., Energy and carbon reduction evaluation through green remodeling of facilities for the elderly and children, *Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineering of Korea*, 2022, pp.35-38.)
- [15] M. Finkbeiner et al., The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 2006, pp.80-85.
- [16] R. Crawford, *Life cycle assessment in the built environment*, UK: Routledge, 2011, p.34.
- [17] M.A. Wolf et al., *International reference Life Cycle Data system (ILCD) handbook-general guide for life cycle assessment-detailed guidance*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010, pp.54-59.
- [18] L. Cabeza et al., Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 2014, pp.394-416.
- [19] 홍태훈, 정광복, 지창윤, 전과정평가(LCA)를 이용한 친환경 인증 건축물과 일반 건축물의 환경영향 비교 사례 연구, *한국건설관리학회논문집*, 제15권 제3호, 2014, pp.58-65. // (T.H. Hong, K.B. Jeong, C.Y. Ji, Comparison of environmental impacts of green and traditional buildings using life cycle assessment, *Journal of the Korean Construction Management Association*, 15(3), 2014, pp.58-65.)
- [20] 홍태훈, 지창윤, 정광복, 전과정평가(LCA) 방법을 이용한 건축물에 대한 환경영향 평가 방법, *한국건설관리학회논문집*, 제13권 제5호, 2012, pp.84-93. // (T.H. Hong, C.Y. Ji, K.B. Jeong, Environmental impact assessment of buildings based on Life Cycle Assessment (LCA) Methodology, *Journal of the Korean Construction Management Association*, 13(5), 2012, pp.84-93.)
- [21] 김치백 외 3인, 공동주택 재건축과 리모델링의 친환경성 비교분석 -CO₂배출량 분석을 중심으로-, *한국건설관리학회 논문집*, 제15권 제1호, 2014, pp.87-100. // (C.B. Kim et al., Comparison analysis of environmental performance between reconstruction and remodeling alternatives for aged -Focused on CO₂ emissions analysis-, *Journal of*

- the Korean Construction Management Association, 15(1), 2014, pp.87-100.)
- [22] 최두성, 전홍찬, 조균형, 단순화 기법을 통한 공동주택 LCA에 관한 연구, 대한건축학회 논문집-계획, 제29권 제1호, 2013, pp.307-316. // (D.S. Choi, H.C. Chun, K.H. Cho, A study on the LCA of an apartment house through a simplified technique, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 29(1), 2013, pp.307-316.)
- [23] 고명진 외 3인, 주상복합 건물의 투입자재에 대한 LCI DB 구축, 한국생활환경학회지, 제22권 제6호, 2015, pp.884-890. // (M.J. Ko et al., A study on LCI DB construction for input materials of residential-commercial building, Journal of the Korean Society of Living Environmental System, 22(6), 2015, pp.884-890.)
- [24] V. Venkatraj, M.K. Dixit, Life cycle embodied energy analysis of higher education buildings: A comparison between different LCI methodologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144, 2021, 110957.
- [25] G. Verbeeck, H. Hens, Life cycle inventory of buildings: A calculation method, Building and Environment, 45(4), 2010, pp.1037-1041.
- [26] 최두성, 전홍찬, 조균형, 산업연관분석법을 이용한 학교 건물에서의 환경영향평가: 경기지역의 초등학교를 대상으로, 한국생태환경건축학회지, 제16권 제3호, 2016, pp.57-62. // (D.S. Choi, H.C. Chun, K.H. Cho, Environmental impact assessment at a school building using input-output table -Focused on elementary school in Gyeonggi-do-, KIEAE Journal, 16(3), 2016, pp.57-62.)
- [27] 이강희, 양재혁, 주요 건축자재의 에너지소비와 이산화탄소 배출원단위 산정 연구, 대한건축학회 논문집-계획, 제25권 제6호, 2009, pp.43-50. // (K.H. Lee, J.H. Yang, A study on the functional unit estimation of energy consumption and carbon dioxide emission in the construction materials, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 25(6), 2009, pp.43-50.)
- [28] 이강희, 건축물의 LCA 적용방안, 대한설비공학회 설비저널, 제34권 제12호, 2005, pp.15-20. // (G.H. Lee, How to apply LCA in buildings, The Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 34(12), 2005, pp.15-20.)
- [29] J. Reinhard et al., Contribution-based prioritization of LCI database improvements: Method design, demonstration, and evaluation, Environmental Modelling & Software, 86, 2016, pp.204-218.
- [30] 홍태훈, 지창운, 산업연관분석법 기반 LCA 모델과 Hybrid LCA 모델의 건축물이산화탄소 배출량 평가결과 비교, 한국건설관리학회 논문집, 제15권 제4호, 2014, pp.119-127. // (T.H. Hong, C.Y. Ji, Comparison of the CO₂ emissions of buildings using input-output LCA model and hybrid LCA model, Journal of the Korean Construction Management Association, 15(4), 2014, pp.119-127.)
- [31] 임효진, 김낙현, 태성호, 건축물 전과정평가 기법에 기반한 업무용 건축물의 단계별 온실가스 배출량 분석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제38권 제2호, 2018, pp.470-473. // (H.J. Lim, R.H. Kim, S.H. Tae, An analysis of greenhouse gas emissions per step of the office building based on method of the building life cycle assessment, Proceedings of the Korean Institute of Architects, 38(2), 2018, pp.470-473.)
- [32] 김소현 외 4인, BIM과 LCA를 이용한 건축물 리모델링에 따른 온실가스 배출량 분석 -건축물 외장재를 중심으로-, 한국생태환경건축학회지, 제24권 제1호, 2024, pp.77-82. // (S.H. Kim et al., Analysis of greenhouse gas emissions from building remodeling using BIM and LCA -Focused on building exterior materials-, KIEAE Journal, 24(1), 2024, pp.77-82.)
- [33] 조강희 외 3인, 리모델링 건축물 전과정평가 방법 제안에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제41권 제2호, 2021, pp.443-444. // (K.H. Jo et al., A study on the proposal of remodeling buildings life cycle assessment method, Proceedings of the Korean Institute of Architects, 41(2), 2021, pp.443-444.)
- [34] A. Hussien et al., A statistical analysis of life cycle assessment for buildings and buildings' refurbishment research, Ain Shams Engineering Journal, 14(10), 2023, 102143.
- [35] X. Oregi et al., Integrating simplified and full life cycle approaches in decision making for building energy refurbishment: Benefits and barriers, Buildings, 5(2), 2015, pp.354-380.
- [36] O. Fahlstedt et al., Building renovations and life cycle assessment - A scoping literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 203, 2024, 114774.
- [37] V. Hasik et al., Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction, Building and Environment, 161, 2019, 106218.
- [38] T.P. Obrecht et al., An LCA methodology for assessing the environmental impacts of building components before and after refurbishment, Journal of Cleaner Production, 327, 2021, 129527.
- [39] R. Azari, N. Abbasabadi, Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends, Energy and Buildings, 168, 2018, pp.225-235.
- [40] R.H. Crawford, Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method, Journal of Environmental Management, 88(3), 2008, pp.496-506.
- [41] A. Stephan, R.H. Crawford, K. De Myttenaere, Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings, Energy and Buildings, 55, 2012, pp.592-600.
- [42] A. Stephan, R.H. Crawford, K. De Myttenaere, A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses, Applied Energy, 112, 2013, pp.23-34.
- [43] O.F. Kofoworola, S.H. Gheewala, Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand, Energy and Buildings, 41(10), 2009, pp.1076-1083.
- [44] C. Wang et al., The evolution and future directions of green buildings research: A scientometric analysis, Buildings, 14(2), 2024, 345.
- [45] 김중엽, 국내 건축물 LCA를 위한 환경부하 원단위 개발동향, 대한설비공학회 설비저널, 제34권 제12호, 2005, pp.36-45. // (J.Y. Kim, Development trends of environmental impact source unit for LCA of domestic buildings, The Magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 34(12), 2005, pp.36-45.)
- [46] 김형석, 이다은, 박희일, 국제 Life Cycle Inventory(LCI) Database(DB) 구축 현황 조사 및 국가 LCI DB 구축방향 제언, 전과정평가학회지, 제18권 제1호, 2017, pp.57-69. // (H.S. Kim, D.E. Lee, H.I. Park, Investigation on the development status of international Life Cycle Inventory (LCI) Database (DB) and suggestion of direction for national LCI DB development, Korean Journal of Life Cycle Assessment, 18(1), 2017, pp.57-69.)