



BIM과 LCA를 이용한 건축물 리모델링에 따른 온실가스 배출량 분석 - 건축물 외장재를 중심으로 -

Analysis of Greenhouse Gas Emissions from Building Remodeling using BIM and LCA - Focused on Building Exterior Materials -

김소현* · 남궁환** · 오경석*** · 정광복**** · 이재욱*****

Sohyun Kim* · Hwan Namgung** · Kyungseok Oh*** · Kwangbok Jeong**** · Jaewook Lee*****

* Main Author, Graduate Student, Deep Learning Architecture Research Center, Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ., South Korea (thgus960221@sju.ac.kr)

** Coauthor, Graduate Student, Deep Learning Architecture Research Center, Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ., South Korea (whn6204@sju.ac.kr)

*** Coauthor, Graduate Student, Deep Learning Architecture Research Center, Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ., South Korea (ogs8608@sju.ac.kr)

**** Coauthor, Professor, Deep Learning Architecture Research Center, Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ., South Korea (kbyeong7@sejong.ac.kr)

***** Corresponding author, Professor, Deep Learning Architecture Research Center, Dept. of Architecture Engineering, Sejong Univ., South Korea (jaewook@sejong.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: As the construction industry accounts for a significant portion of global carbon dioxide emissions, the importance of reducing carbon emissions through the remodeling of existing buildings is being emphasized. This study proposes a method to evaluate the greenhouse gas emissions of each building material in the remodeling process of existing buildings by integrating BIM and LCA, and visualizing this in a BIM model. **Method:** Using BIM models, the quantity and cost of each material are calculated, and the greenhouse gas emissions are evaluated through LCA. Then, these are visualized in the BIM model using a Dynamo-based parametric algorithm. This study analyzed the total greenhouse gas emissions of five types of exterior materials, including the existing exterior material, through a case study. **Result:** The study results showed that stucco has the lowest greenhouse gas emissions, while exposed concrete has the highest. This suggests that remodeling with stucco could be an effective strategy to minimize greenhouse gas emissions when considering the entire life cycle of a building. Additionally, the process of visualizing the environmental impact of each exterior material in the BIM model, where the colors of BIM objects change automatically based on their impact, provides a way for even non-experts to easily understand LCA data. This approach can significantly contribute to the selection of sustainable building materials and the improvement of environmental impacts of buildings.

KEYWORD

건물정보모델링
전과정평가
리모델링
건축자재
다이나모

BIM
Life Cycle Assessment
Remodeling
Building Material
Dynamo

ACCEPTANCE INFO

Received Dec. 5, 2023

Final revision received Jan. 3, 2024

Accepted Jan. 10, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

건설 산업에서 발생하는 이산화탄소는 전 세계 총 이산화탄소 배출량의 약 37%를 차지한다[1]. 이에 따라, 건축물의 전 생애주기 동안 발생하는 이산화탄소의 양을 감소시키기 위한 다양한 정책과 기술이 전 세계적으로 도입되고 있다. 특히, 건축물의 설계, 시공, 유지 관리, 폐기단계에서 발생하는 오염물질의 양을 정량화하고 그 환경적 영향을 분석하는 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)의 중요성이 강조되고 있다. 하지만, LCA는 복잡하고 상세한 데이터를 요구하며, 다양한 환경적 지표를 고려해야 하므로 비전문가가 다루기엔 한계가 있다. 이에 건설 산업에서는 건축물의 지속가능성을 고려하여 LCA와 건축물의 정보를 포함하고 있는 BIM(Building Information modeling)을 통합하여 LCA의 접근성과 이해도를 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다. Forth et al.(2023)은 IFC(Industry Foundation Classes)와 BCF(BIM Collaboration

Format)를 활용하여, LCA와 연계된 초기 설계 단계에서의 의사결정 지원 시스템을 제안하였다[2]. Röck et al.(2018)은 LCA 데이터와 BIM 데이터를 통합하여 초기 설계 단계에서 건축자재의 환경적 영향을 평가하고, 그 결과를 BIM 모델로 시각화하였다[3]. Wiberg et al.(2019)는 BIM과 ZEB(Zero Energy Building) tool을 사용하여 다양한 설계에 따른 환경 영향을 고려할 수 있는 시스템을 제안하였다[4]. 그러나 이러한 연구는 주로 신축 건축물의 설계 단계에 초점을 맞추고 있으며, 기존 건축물이 환경에 미치는 영향은 충분히 고려하기에 한계가 있다.

국토교통부는 2050년까지 온실가스 배출량을 2018년 대비 88.1% 감축하기 위한 ‘국토교통 탄소중립 로드맵’을 발표하였으며, 기존 건축물의 경우 그린 리모델링을 통한 탄소배출량 감소를 목표로 한다[5]. 국토교통부의 건축물 통계에 따르면, 2017년~2021년 연평균 전체 건축물 7,256,229 동 중에서 신축 건축물은 0.65%이고, 기존 건축물의 비율은 99.35%를 차지한다[6]. 이러한 상황에서, 새로운 건축물을 건설하는 것보다 기존 건축물의 리모델링을 통한 환경적 영향 최소화가 우선적인 과제로 인식되고 있다. 즉, 기존 건축물을 환경적 영향을 고려하여 리모델링하는 것은 탄소 중립 목표 달성에 있어 중요한 전략이 될 수 있다. 특히, 기존 건축물에 사용되

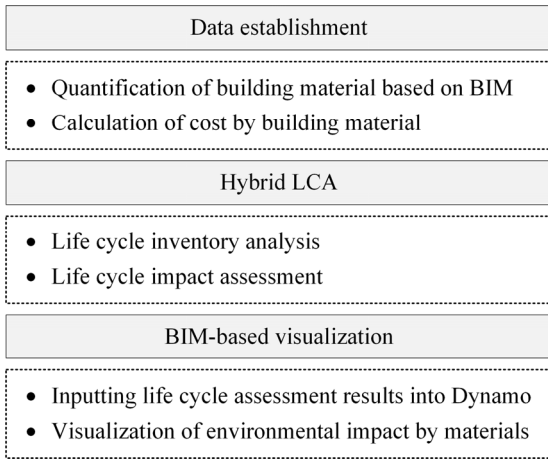


Fig. 1. Overview of proposed method

는 건축자재 생산과정에서 발생하는 온실가스는 전체 산업부문에서 배출되는 온실가스의 약 11%를 차지한다[7]. 즉, 전체 건축물 중 99% 이상을 차지하는 기존 건축물의 유지관리 단계에서 사용되는 건축자재에 대한 체계적인 관리가 필요하다.

한편, 건축물에서 발생하는 이산화탄소는 건축자재 생산, 운송, 건축 시공, 폐기과정에서 발생하는 내재 탄소와 건축물 운영단계에서 냉난방, 조명, 전력 사용 등으로 배출하는 운영 탄소를 나뉜다[8]. Patiño-Cambeiro(2017)는 BIM과 Design Builder를 사용하여 기존 건축물의 운영단계에서 사용되는 에너지 성능을 평가하고, 그에 따른 탄소배출량을 분석하였다[9]. Kim(2018)은 기존 건축물의 에너지의 성능을 BIM을 기반으로 분석하고, 에너지 효율성을 높일 수 있는 리모델링 방법을 제안하는 시스템을 제안하였다[10]. Zhao et al.(2021)은 제로 에너지 건물 개념을 기반으로 기존 건축물의 에너지 효율을 높이기 위한 리모델링 방법을 평가하였다. 해당 연구는 사례연구를 통해 건축물의 에너지 소비를 7.52% 줄이고, 이산화탄소 배출을 85.9% 감소시킬 수 있었다[11]. 기존 건축물의 탄소배출량을 줄이기 위해 선행연구들은 주로 운영단계에서의 에너지 사용으로 배출되는 탄소를 중점적으로 고려하였다. 하지만, 기존 건축물의 탄소 배출을 줄이기 위해서는 운영 탄소뿐만 아니라 내재 탄소의 관리도 중요하다. 이와 함께, LCA에 대한 전문지식이 없는 비전문가도 LCA의 접근성과 이해도를 높여 내재 탄소에 의한 환경적 영향을 효과적으로 관리하고 개선할 필요가 있다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 기존 건축물의 리모델링 과정에서 내재 탄소를 고려한 환경적 영향을 평가하기 위해 BIM 기반 리모델링 건축물의 자재별 온실가스 배출량 분석 방법을 제안한다(Fig. 1). 첫째, 기존 건축물의 BIM 모델을 사용하여 환경 영향 분석을 위한 자재의 양과 비용을 산출한다. 둘째, 산출된 자재의 양에 따라 LCA를 수행하여 온실가스 배출량을 계산한다. 셋째, 자재에 따른 온실가스 배출량을 Dynamo를 사용하여 BIM 모델로 시각화한다.

건축물의 자재 중 외장재는 종류와 특성에 따라 서로 다른 자재 생산단계를 거치며, 리모델링 시 선택되는 외장재에 따라 온실가스 배

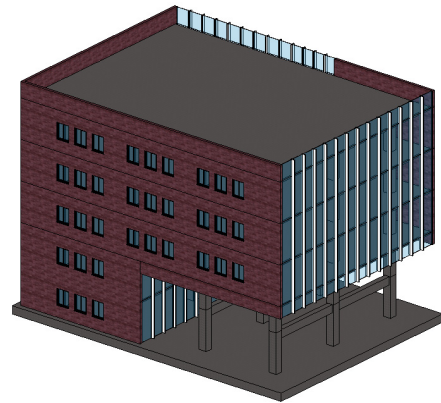


Fig. 2. Target building for life cycle assessment

출량에 큰 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구는 기존 건축물의 리모델링을 고려하는 대표적인 사례로 외장재 교체 과정을 중심으로 온실가스 배출량을 분석하고자 한다. 대상 건축물은 Fig. 2와 같이 지상 5층 규모의 벽돌 타일 외장재를 사용한 가상의 건축물로 선정하였다.

2. 전과정평가를 통한 온실가스 배출량 분석

2.1. 목적 및 범위 정의

본 연구의 목적은 리모델링 과정에서 환경 영향을 고려할 수 있도록, BIM을 기반으로 건축자재의 온실가스 배출량을 분석하는 것이다. 이를 위해, LCA는 외장재를 교체하는 경우에 초점을 맞추어, 다양한 외장재의 환경 영향을 분석한다. LCA의 범위는 건축 자재의 생산단계와 수선 및 교체 단계로 설정하였다. 또한, 한국물가정보 [12]에서 제공하는 건축자재의 비용과 한국은행[13]에서 제공하는 산업연관표를 사용하여 LCA를 분석하였다. 분석 기간은 50년으로 설정되었으며, 온난화 지수(Global Warming Potential, GWP)를 환경 영향 평가의 주요 지표로 선정하였다.

2.2. 전과정 목록분석

건축물의 리모델링 과정에서 외장재의 환경 영향을 평가하기 위해서는, 전과정목록(Life Cycle Inventory; LCI) 분석을 활용하여 건축 자재의 생산단계와 수선 및 교체 단계에서 사용되고 배출되는 모든 원자재를 산출해야 한다. 본 연구는 개별적 산정 방식과 산업연관 방식을 결합한 혼합방식인 Hybrid-LCA를 기반으로 분석을 수행하였다.

첫째, 산업 연관 방식을 통해 건축 자재 생산단계에서 사용되는 직접 및 간접 에너지원의 양을 계산한다. 직접 에너지원은 자재의 직접적인 생산에 필요한 에너지를, 간접 에너지원은 원자재의 채굴, 운송 등 자재 공급망에 필요한 에너지를 의미한다. 자재 생산에 직접 사용되는 에너지원은 건축 자재의 금액 단위당 직접 사용되는 에너지의 양을 나타내는 에너지 사용 계수(Energy Utilization Coefficient; EUC)와 자재 비용(Material Cost; MC)을 곱하여 산정한다(Eq. 1).

$$E_{dir.} = EUC \times MC \quad (Eq. 1)$$

간접 에너지원은 에너지 사용계수(EUC), 생산유발계수(Leontief inverse matrix: $(I-A)^{-1}$), 자재비용(MC)을 곱하여 산정한다(Eq. 2). 생산유발계수는 특정 산업부문이 1원 단위로 변화할 때 관련된 모든 산업부문에서의 직간접적인 변화의 정도를 나타낸다. 즉, 생산유발계수를 통해 건축 자재 생산단계에서 다양한 산업에 의해 사용되는 간접 에너지원을 산출할 수 있다[12].

$$E_{indir.} = EUC \times (I-A)^{-1} \times MC \quad (Eq. 2)$$

둘째, 개별 적산 방식을 통해 LCI 데이터베이스를 기반으로 직간접 에너지원의 생산 및 연소 과정에서 발생하는 환경 영향 물질을 산정한다. 이처럼, Hybrid-LCA를 기반으로 건축 자재별로 생산, 수선 및 교체 단계에서 사용되고 배출되는 환경 영향 물질을 양을 계산할 수 있다.

2.3. 전과정 영향평가

리모델링 건축물의 잠재적인 환경 영향을 평가하기 위해, 전과정 목록분석을 통해 산출된 다양한 물질들을 환경 영향으로 변환해야 한다. 변환하는 과정은 분류화, 특성화, 정규화, 가중화로 총 4단계로 구성되어 있다. 본 연구는 4단계 중 필수단계인 분류화와 특성화를 기반으로, 리모델링 건축물의 환경 영향을 평가한다. 분류화는 전과정 목록분석을 통해 산출된 물질들을 환경 영향 범주별로 분류하는 과정이며, 특성화는 물질들이 해당 환경 영향 범주에 미치는 영향을 정량화하는 과정이다. 이 과정에서는 각 물질에 대한 특성화 계수(Characterization Factor; CF)를 전과정 목록분석을 통해 산출된 배출량(Emissions; E)과 곱하여 특성화된 환경 영향(Environmental Impacts; EI)을 산출한다(Eq. 3). 특성화 과정을 통해 산출된 환경 영향은 건축 자재에 따라 Excel 형식으로 출력된다.

$$EI = E \times CF \quad (Eq. 3)$$

3. Dynamo기반 자재별 온실가스 배출량 시각화

건축물의 환경적 영향을 평가하기 위한 LCA는 비전문가가 분석하고 해석하기엔 어려움이 있다. 이에 본 연구는 Dynamo를 사용하여 환경 영향을 건축 자재별로 BIM 모델에 시각화하였다. Dynamo는 Revit 모델의 데이터를 조작하고, 복잡한 형태나 구조를 생성하며, 사용자 정의 워크플로우를 자동화할 수 있다. 특히, Drag and Drop 방식의 인터페이스를 제공하여, 사용자가 코드를 작성하지 않고도 프로그래밍 논리를 구성할 수 있다. 즉, 전문적인 코드 구현 지식이 없는 비전문가도 쉽게 프로그래밍을 수행할 수 있다.

본 연구는 Dynamo를 기반으로 건축 자재별 환경 영향을 자동으로 시각화하기 위한 parametric algorithm을 개발하였으며, 프로세

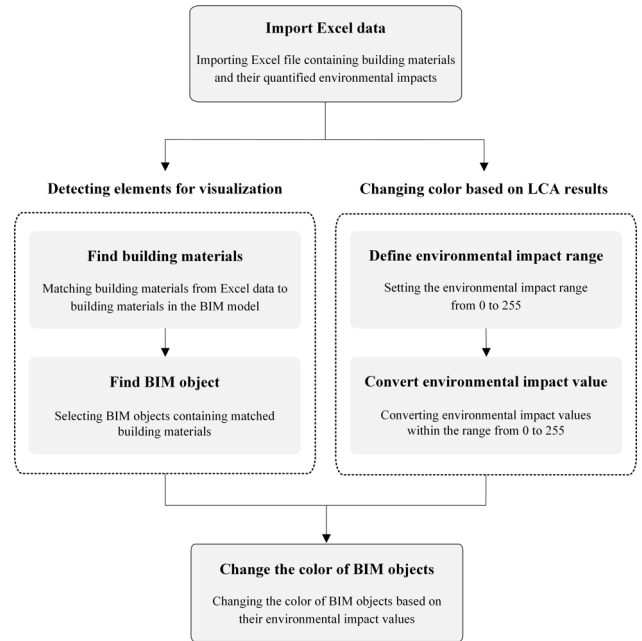


Fig. 3. Parametric algorithm process

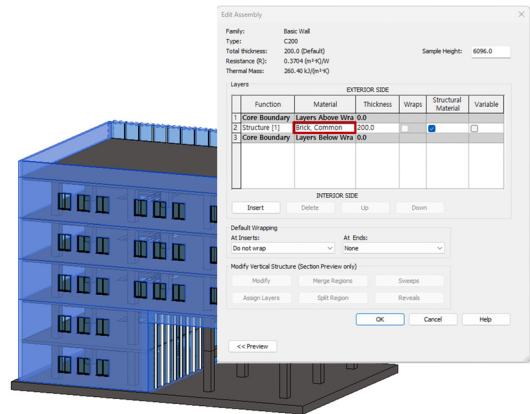


Fig. 4. BIM objects for visualization

스는 Fig. 3.과 같다. 우선, LCA를 통해 산출된 환경 영향이 건축자재별로 정리된 Excel 데이터를 parametric algorithm에 입력하면, parametric algorithm은 시각화를 위한 요소(건축 자재, BIM 객체)들을 탐색하고, LCA 결과를 기반으로 색상 값을 변경한다. 이후, BIM 객체별로 환경 영향에 따른 색상 값을 적용하여 시각화를 수행한다.

3.1. 시각화를 위한 요소 탐색

LCA를 통해 산출된 환경 영향을 BIM 모델로 시각화하기 위해, 시각화 대상요소들을 탐색하는 과정이 필요하다. Excel data에는 건축자재에 따른 환경 영향이 정량적 수치로 정리되어 있다. 이 정보를 바탕으로 건축자재의 명칭을 BIM과 매치하여 BIM 모델 내에서 해당 건축자재들을 찾아낸다. 이후, Excel 데이터와 매치된 건축자재를 포함하는 BIM 객체를 탐색한다. 이를 통해, 시각화를 적용할 대상을 선정할 수 있다. Fig. 4.는 Excel 데이터에서 외장재 중 벽돌을 포함하고 있는 BIM 객체를 나타낸다.

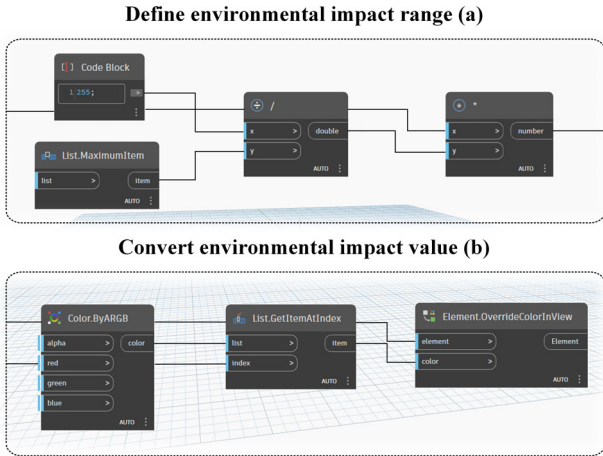


Fig. 5. Dynamo node

3.2. LCA 결과 기반 색상 변경

건축물의 환경 영향을 정량적 수치로 나타낸 결과를 BIM 객체별로 시각화하기 위해, 색상변경 과정이 필요하다. RGB는 빨강, 녹색, 파랑의 세 가지 색상 채널을 조합하여 0에서 255까지의 값으로 다양한 색상을 생성하는 색상 표현방식이다. 본 연구는 RGB를 통해 BIM 모델의 시각화를 수행하기 위하여, 환경 영향 값의 범위를 0에서 255까지의 범위로 설정하였다. 0에서 255까지의 범위에 따라 실제 환경 영향 값을 변경하여 BIM 객체에 시각화를 수행할 수 있다. Fig. 5.는 색상변경을 위한 parametric algorithm에 사용된 노드들을 나타낸다. 해당 노드들을 통해 Excel 데이터로부터 추출한 환경 영향 수치를 BIM 객체로 시각화하여 건축자재별로 환경 영향 정도를 비교할 수 있다.

4. BIM 기반 온실가스 배출량 분석결과

본 연구에서 제안하는 방법을 검증하기 위하여, 5층 규모의 벽돌 타일을 외장재로 사용한 가상의 건축물을 대상으로 사례연구를 진행하였다. 리모델링 과정에서 기존 외장재와 새로운 외장재의 온실가스 배출량을 비교하기 위하여 우선, 기존에 사용된 벽돌 타일 외장재의 온실가스 배출량을 분석하였다. 벽돌 타일 외장재의 경우, 50년 동안 수선 및 교체를 통해 총 $4.43 \times 10^4 \text{kg-CO}_2\text{eq.}$ (수선: $1.48 \times 10^4 \text{kg-CO}_2\text{eq.}$, 교체: $2.95 \times 10^4 \text{kg-CO}_2\text{eq.}$)의 온실가스를 배출하였다. 본 연구는 수치로 산출된 온실가스 배출량을 비전문가도 쉽게 접근하고 이해할 수 있도록 Dynamo 기반 parametric algorithm을 통해 시각화하였다. Fig. 6.은 건축물의 기존 외장재인 벽돌 타일의 환경 영향을 BIM 모델로 시각화한 결과이다. 본 연구에서 개발한 Dynamo 기반 parametric algorithm을 통해 시각화 대상 객체인 벽체는 0에서 255까지의 범위 중 실제 환경 영향 값을 대입하여 색상을 나타내었으며, 벽체를 제외한 나머지 객체는 투명한 색상으로 변환되었다. 이를 통해, 벽돌 타일의 환경 영향을 BIM 모델을 사용하여 시각적으로 확인할 수 있다.

기존 벽돌 타일에서 새로운 외장재로 교체하기 위해, 시중에 널리 사용되고 있는 노출 콘크리트 패널, 목재 패널, 금속 패널, 스타코 등

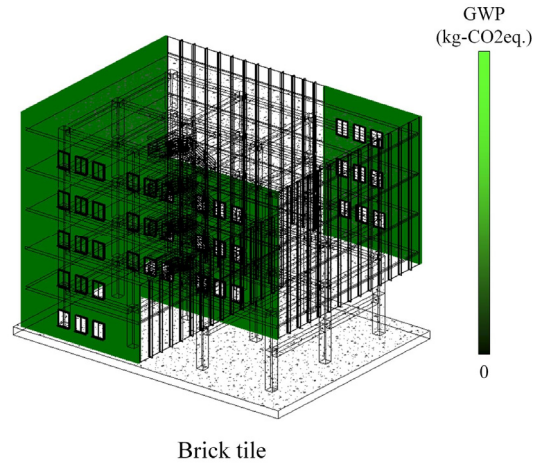


Fig. 6. Visualization of existing exterior material

Table 1. Results of environmental impacts by exterior materials

Exterior material	Repair	Replacement	Total
Exposed concrete panel	3.45×10^4	6.91×10^4	1.04×10^5
Wood panel	6.63×10^3	1.33×10^4	1.99×10^4
Metal panel	2.67×10^4	5.34×10^4	8.01×10^4
Stucco	2.30×10^3	6.13×10^3	8.42×10^3

Unit: kg-CO₂eq.

Table 2. Comparison of greenhouse gas emissions with brick tile

Exterior material	Greenhouse gas emission ratio	
	Evaluation formula	Δ%
Exposed concrete panel	$(1.04 \times 10^5 / 4.43 \times 10^4 - 1) \times 100\%$	(+) 234.76
Wood panel	$(1.99 \times 10^4 / 4.43 \times 10^4 - 1) \times 100\%$	(-) 55.08
Metal panel	$(8.01 \times 10^4 / 4.43 \times 10^4 - 1) \times 100\%$	(+) 180.81
Stucco	$(8.42 \times 10^3 / 4.43 \times 10^4 - 1) \times 100\%$	(-) 81.00

총 4가지 주요 건축자재를 고려대상으로 선정하였다. Table 1.은 건축물의 유지관리단계에서 50년 동안 외장재에 따라 수선 및 교체되면서 배출되는 총 온실가스 배출량을 비교한 결과이다. 4가지 외장재 중 노출 콘크리트 패널이 $1.04 \times 10^5 \text{kg-CO}_2\text{eq.}$ 로 가장 많은 온실가스 배출량을 나타냈으며, 스타코가 $8.42 \times 10^3 \text{kg-CO}_2\text{eq.}$ 로 가장 적은 온실가스 배출량을 나타냈다.

이러한 결과를 기반으로 본 연구는 기존 외장재인 벽돌 타일과의 상대적인 온실가스 배출량을 비교하였다. Table 2.는 벽돌 타일의 총 온실가스 배출량을 기준으로 노출 콘크리트 패널, 목재판넬 패널, 금속 패널, 스타코의 상대적인 온실가스 배출량을 수식에 따라 직접 산정한 결과이다. 벽돌 타일과 비교하여 노출 콘크리트 패널은 234.76% 더 많은 양의 탄소를 배출하는 반면, 스타코는 81% 적은 양의 온실가스를 배출하는 것으로 분석된다. 즉, 건축물의 전 생애 주기를 고려했을 때 기존의 벽돌 타일에서 스타코로 외장재를 교체하는 방법이 가장 적은 양의 탄소를 배출하는 것을 의미한다. 하지만, 이러한 비교 분석을 위해서는 각 외장재의 상대적인 온실가스 배

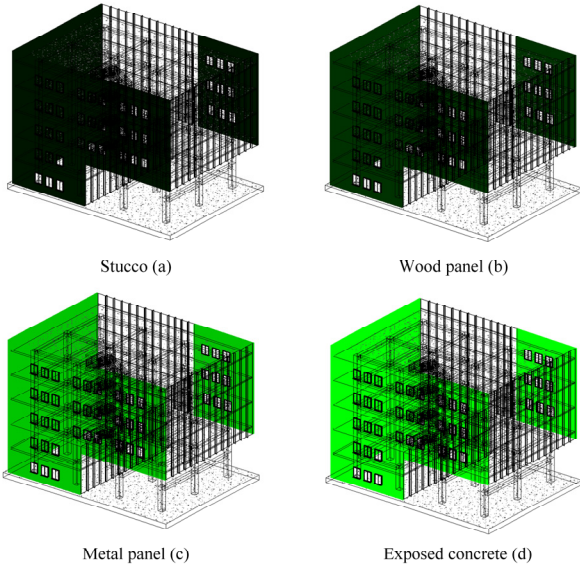


Fig. 7. Visualization of environmental impact by exterior materials

출량을 수식에 따라 정확하게 산정하는 반복적이고 시간이 많이 소요되는 수동 계산 과정이 요구되었다.

Fig. 7.은 노출 콘크리트 패널, 목재 패널, 금속 패널, 스타코를 대상으로 환경 영향을 분석한 결과(Table 1.)를 반영하여 parametric algorithm을 통해 BIM 모델에 시각화한 것이다. BIM 모델로 시각화한 결과를 보면, 스타코, 목재 패널, 금속 패널, 노출 콘크리트 패널 순으로 색상이 밝아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 2.와 같이 수작업으로 상대적인 온실가스 배출량을 산정하는 것이 아닌, 본 연구에서 제안한 방법을 통해 자동으로 건축자재별 온실가스 배출량의 비교가 가능함을 의미한다. 이를 통해, LCA에 대한 전문지식이 없는 비전문가도 건축자재들이 환경에 미치는 영향을 쉽게 이해할 수 있으며, 이는 지속 가능한 건축 자재를 선택하는 데 있어 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

건설 산업은 전 세계 총 이산화탄소 배출량의 상당 부분을 차지하기 때문에, 건축물의 전 생애주기 중 발생하는 탄소를 줄이기 위한 노력이 증가하고 있다. 특히, 기존 건축물을 대상으로 한 리모델링에서의 탄소 감축은 탄소 중립을 달성하기 위한 중요한 전략으로 인식되고 있다. 더욱이, 운영 탄소 뿐만 아니라 내재 탄소를 고려하여 환경 영향을 분석할 필요가 있으며, LCA의 복잡성을 단순화하여 비전문가도 용이하게 이해하고 관리할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 BIM을 기반으로 리모델링 건축물의 자재별 온실가스 배출량을 분석하여 그 결과를 BIM 모델에 시각화하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 유효성을 검증하기 위하여, 벽돌 타일 외장재를 사용한 건축물의 리모델링 과정에서 외장재를 교체하는 방법을 중심으로 온실가스 배출량을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 노출 콘크리트 패널, 목재 패널, 금속 패널, 스타코 등의 네

가지 외장재를 대상으로 50년의 기간 동안 발생하는 총 온실가스 배출량을 비교 분석하였다. 그 결과, 벽돌 타일에서 스타코로 외장재를 교체할 시, 온실가스 배출을 81%까지 줄일 수 있는 것으로 분석되었다. 둘째, parametric algorithm을 사용하여 LCA로 분석된 외장재별 환경 영향에 따라 BIM 객체의 색상이 자동으로 변경되도록 하였다. 이를 통해, LCA에 대한 전문지식이 없는 비전문가들도 LCA 데이터를 직관적으로 이해하여 환경에 미치는 영향을 명확하게 인식할 수 있도록 하였으며, 이는 지속 가능한 건축 자재 선택과 건축물의 환경적 영향 개선에 있어 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구는 다음과 같이 몇 가지 한계가 있다. 첫째, 본 연구에서 고려한 건축자재는 노출 콘크리트 패널, 목재 패널, 금속 패널, 스타코, 벽돌 총 5가지로 한정되어 있다. 둘째, LCA는 시공단계, 폐기단계 등을 포함한 전 생애주기가 아닌 건축자재의 생산단계와 수선 및 교체 단계만을 고려하였다. 따라서, 향후 연구에서는 다양한 종류의 건축 자재를 포함하여 전 생애주기에 따른 LCA 분석이 필요하다. 본 연구에서 제시하는 방법은 BIM과 LCA를 통합하고, LCA 결과를 시각화함으로써 건축물의 소유자와 관리자가 환경적 영향에 대한 직관적 이해를 바탕으로 기존 건축물의 개선 방안을 결정할 수 있도록 하여, 건축물의 환경적 성능을 향상시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2023-00271991).

References

- [1] United Nations Environment Programme, 2022 Global status report for buildings and construction, 2022.
- [2] K. Forth, A. Hollberg, A. Borrmann, BIM4EarlyLCA: An interactive visualization approach for early design support based on uncertain LCA results using Open BIM, *Developments in the Built Environment*, 16, 2023.12, 100263.
- [3] M. Röck et al., LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages, *Building and Environment*, 140, 2018.08, pp.153-161.
- [4] A. Wiberg et al., Life cycle assessment for zero emission buildings - A chronology of the development of a visual, dynamic and integrated approach, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 352, 2019.10, 012054.
- [5] 국토교통부, 국토교통 탄소중립 로드맵, 2021. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2050 Carbon neutral strategy of the Republic of Korea, 2021.)
- [6] 국토교통 통계누리, <https://stat.molit.go.kr/portal/main/portalMain.do>, 2023.11.16. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Statistics on Buildings, <https://stat.molit.go.kr/portal/main/portalMain.do>, 2023.11.16.)
- [7] X. Zhong et al., Global greenhouse gas emissions from residential and commercial building materials and mitigation strategies to 2060, *Nature Communications*, 12, 2021.10, pp.1-10.
- [8] 이세연, 정찬우, 안용한, 모듈러 공동주택과 RC 공동주택의 전과정 탄소배출량 비교·분석, *대한건축학회논문집*, 제39권 제5호, 2023.05, pp.225-232. // (S.Y. Lee, C.W. Jung, Y.H. Ahn, A comparative analysis of the life cycle assessment of modular apartments and RC Apartments,

- Journal of the Architectural Institute of Korea, 39(5), 2023.05, pp.225-232.)
- [9] F. Patiño-Cambeiro et al., Multidisciplinary energy assessment of tertiary buildings: Automated geomatic inspection, building information modeling reconstruction and building performance simulation, *Energies*, 10(7), 2017.07, 1032.
- [10] S.H. Kim, Assessing the needs and gaps of building information technologies for energy retrofit of historic buildings in the Korean context, *Sustainability*, 10(5), 2018.04, 1319.
- [11] L. Zhao et al., Digital-twin-based evaluation of nearly zero-energy building for existing buildings based on scan-to-BIM, *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021.04, 6638897.
- [12] 한국물가정보, <https://www.kpi.or.kr/www>, 2023.10.01. (Korea Price Information, <https://www.kpi.or.kr/www>, 2023.10.01.)
- [13] 한국은행, <https://www.bok.or.kr/portal/main/main.do>, 2023.10.11. // (Bank of Korea, <https://www.bok.or.kr/portal/main/main.do>, 2023.10.11.)