

BIM 기반 모듈러 건축에서 샌드위치패널과 왕겨 기반 패널의 내재탄소 및 탄소 저장 효과 분석

김승한*, 문지원*, 이애진**, 조윤찬**, 최제호***, 진주완*
*건양대학교 방재보안학과, **건양대학교 재난안전소방학과, ***건양대학교 스마트농산업학과
e-mail:25858501@konyang.ac.kr

A BIM-Based Analysis of Embodied Carbon and Carbon Storage Effects of Sandwich Panels and Rice Husk-Based Panels in Modular Construction

SeungHan Kim*, Jiwon Moon*, Ae-Jin Lee**, Yun-Chan Jo**, Je-Ho Choi***, Juan Jin*
*Dept. of Disaster Prevention and Security, **Dept. of Disaster Safety & Fire Fighting,
**Dept. of Smart Agricultural Technology and Innovation, Konyang University

요약

건축 분야에서 내재탄소 저감의 중요성이 확대됨에 따라 설계 단계에서 재료 선택에 따른 탄소 영향을 정량적으로 검토할 필요성이 커지고 있다. 모듈러 건축은 공기 단축 및 폐기물 저감 효과를 기대할 수 있으나, 기존 샌드위치패널은 아연도금강판과 미네랄울 등 탄소 배출이 큰 재료로 구성되어 내재탄소 저감에 한계를 가진다. 이에 본 연구는 Revit 기반 BIM 모델을 활용하여 기존 샌드위치패널 모듈러와 왕겨 기반 패널 모듈러의 내재탄소 및 탄소 저장 효과를 정량적으로 비교하였다. 분석 대상은 총 88장의 모듈러 패널이며, 총 면적은 97.623 m², 기존 패널의 총 질량은 약 1,381 kg으로 나타났다. 기존 샌드위치패널은 약 2,486 kgCO₂의 배출탄소를 나타낸 반면, 왕겨 기반 패널은 배출계수와 탄소 저장계수를 함께 적용한 결과 순 탄소 영향이 약 -1,105 kgCO₂로 나타났다. 두 시나리오를 비교한 결과, 동일 질량 조건에서 약 3,591 kgCO₂의 탄소 저감 효과가 발생하는 것으로 분석되었다. 본 연구는 BIM 객체에 탄소 관련 파라미터를 설정하여 설계 단계에서 재료 대체에 따른 탄소 영향을 정량적으로 검토할 수 있는 방법을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

1. 서론

건축 산업은 전 세계 온실가스 배출량의 약 38%를 차지하며, 이 중 건축 자재의 생산 및 시공 단계에서 발생하는 내재탄소가 약 30% 이상을 차지하는 것으로 보고된다[1]. 이에 따라 설계 단계에서 재료 선택을 통한 탄소 저감이 핵심 전략으로 부각되고 있다.

모듈러 건축은 공장 생산과 반복적 구조를 기반으로 공사 기간 단축과 폐기물 감소를 통해 탄소 저감 가능성을 가지는 공법으로 평가된다[2]. 그러나 실제 적용되는 주요 외피 및 구조 패널은 아연도금강판과 미네랄울로 구성된 샌드위치패널이 대부분이며, 이러한 재료는 제조 과정에서 높은 에너지 소비와 탄소 배출을 발생시키는 특성을 가진다. 즉, 모듈러 건축은 공법 측면에서는 탄소 저감 효과를 가지지만, 재료 측면에서는 여전히 내재탄소 저감에 한계를 가진다[3].

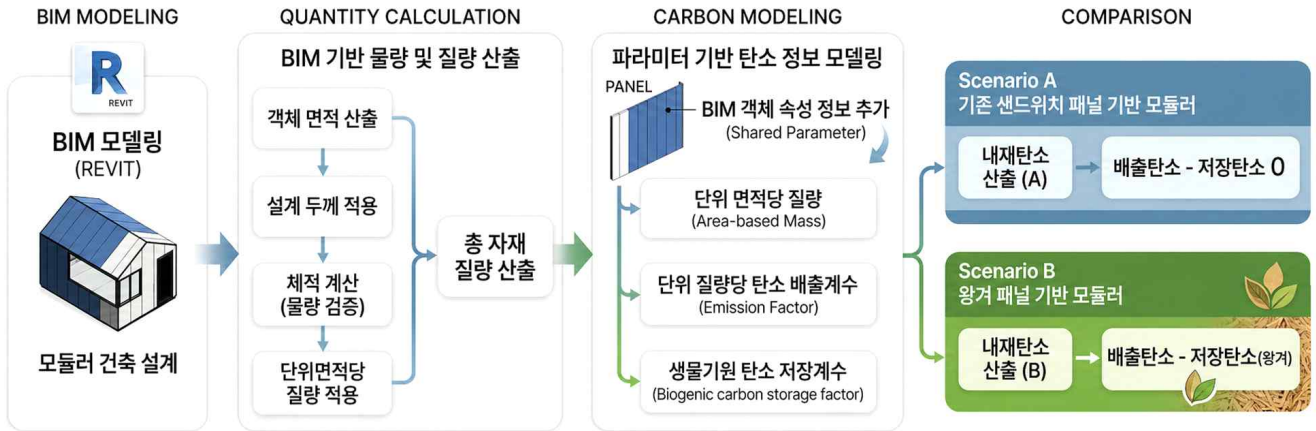
한편 BIM(Building Information Modeling)을 활용한 내재탄소 산출 연구에서는 자재 물량을 자동으로 추출하고 환경성적 데이터와 연계하여 탄소를 계산하는 방법이 제시되고 있으며, 설계 단계에서 탄소 평가가 가능하다[4]. 또한 국내 연구에서는 저

탄소 자재 적용 여부를 BIM 데이터 기반으로 자동 평가할 수 있는 구조가 제안되었으나, 이는 주로 인증 평가 자동화에 초점을 두고 있으며 재료 대체에 따른 탄소 변화 분석까지는 확장되지 않았다[5].

특히 왕겨와 같은 바이오 기반 재료는 생물기원 탄소를 포함하고 있어 건축물 적용 시 탄소 저장 효과를 기대할 수 있으나, 기존 탄소 평가에서는 이러한 저장 효과가 충분히 반영되지 못하고 있으며, 실제 BIM 모델 기반의 정량적 분석 사례는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 기존 샌드위치패널 기반 모듈러 건축을 BIM으로 모델링하고, 이를 왕겨 기반 패널로 대체한 시나리오를 구성하여 재료 변경에 따른 탄소 배출 및 저장 효과를 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 동일한 구조 조건에서 재료 선택이 내재탄소에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고, BIM 기반 설계 환경에서 재료 중심 탄소 저감 전략의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. BIM 기반 내재탄소 및 생물기원 탄소 저장 산출 방법



[그림 1] BIM 기반 모듈러 패널의 내재탄소 및 탄소 저장 통합 산출 흐름도

2.1 BIM 기반 모듈러 패널 물량 및 질량 산출 구조

본 연구에서는 모듈러 건축의 재료 변경에 따른 내재탄소를 정량적으로 평가하기 위하여 BIM 기반 물량 산출과 질량 기반 탄소 산출 구조를 적용한다. 내재탄소는 자체 생산 단계에서 발생하는 탄소 배출량으로 정의되며, 자체 질량과 단위 질량당 탄소 배출계수의 곱으로 계산된다.

이를 위해 Revit을 활용하여 모듈러 건축 모델을 구축하고, 외피 및 구조를 구성하는 패널을 객체 단위로 정의한다. 각 패널 객체에 대해 면적을 산출하고, 설계 두께를 적용하여 체적을 계산한다. 체적 계산은 면적과 두께 간의 일관성을 확인하기 위한 검증 과정으로 활용한다.

이후 단위면적당 질량을 적용하여 자체 질량을 산출한다. 면적 기반 질량 산출 방식은 BIM에서 제공되는 면적 데이터와 LCA에서 요구되는 질량 단위를 연결하기 위한 변환 과정으로 적용된다 [6]. 또한 동일한 형상과 물량 조건을 유지한 상태에서 재료만 변경하는 시나리오를 구성하여 재료 변수만을 독립적으로 분석할 수 있도록 설정한다.

2.2 BIM 파라미터 기반 탄소 정보 모델링

BIM 객체에 탄소 산출을 위한 속성 정보를 추가하여 물량 정보와 환경 정보를 통합한다. BIM 기반 탄소 평가에서는 자체 물량과 환경부하 계수를 동일 객체에 연결하는 정보 구조가 요구된다.

이에 따라 패널 객체에 단위면적당 질량, 탄소 배출계수, 탄소 저장계수를 파라미터로 정의한다. 단위면적당 질량은 면적 기반 물량을 질량으로 변환하기 위한 변수이며, 탄소 배출계수는 자체 1 kg당 발생하는 CO₂ 배출량을 나타낸다. 또한 왕겨 기반 패널에 대해서는 탄소 저장계수를 추가로 정의하여 자체에 포함된 탄소의 저장 효과를 반영한다.

이러한 파라미터는 Revit의 Shared Parameter를 통해 정의하고, 모든 패널 객체에 동일하게 적용한다. 이를 통해 동일한 모델에서 재료 속성만 변경할 경우 질량 및 탄소 관련 값이 자동으로 갱신되도록 설정한다.

2.3 질량기반 내재탄소 및 탄소저장 통합 산출 모델

질량 기반 탄소 산출 모델을 적용하여 배출탄소와 저장탄소를 동시에 계산한다. 배출탄소는 자체 질량과 단위 질량당 탄소 배출계수의 곱으로 계산되며, 이는 건축 분야 LCA에서 일반적으로 사용되는 산출 방식이다.

먼저 BIM에서 산출된 면적과 단위면적당 질량을 이용하여 자체 질량을 계산하고, 이를 기반으로 배출탄소를 산출한다. 이후 왕겨 기반 패널에 대해서는 자체 질량과 탄소 저장계수를 적용하여 저장탄소를 계산한다. 생물기원 탄소는 식물의 광합성 과정에서 대기 중 CO₂를 흡수하여 형성된 탄소로, 건축물에 적용될 경우 구조체 내에 저장된 상태로 유지된다[7].

최종적으로 순 탄소 영향은 배출탄소에서 저장탄소를 차감하여 정의한다. 그림 1과 같은 산출 구조를 통해 동일한 구조 조건에서 재료 변경에 따른 탄소 배출량과 탄소 저장량을 동시에 비교한다.

3. 모듈러 패널 재료 변경에 따른 내재탄소 및 탄소 저장 효과 정량 비교 분석 결과

3.1 패널 물량 및 질량 산출 결과

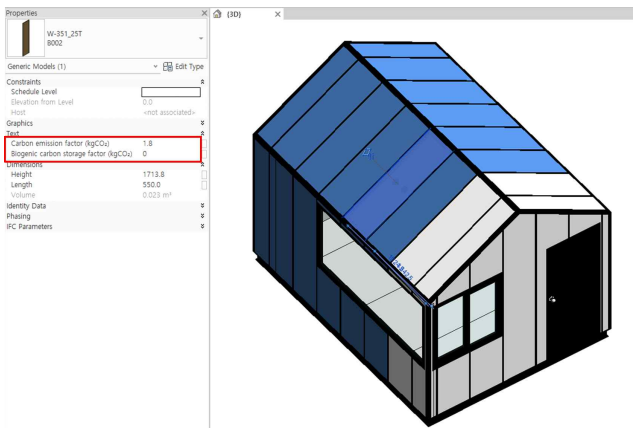
BIM 모델을 기반으로 산출된 모듈러 건축의 패널 총 88장을 대상으로, 총 면적은 97.623 m²로 나타났다. 패널 두께 25 mm를 적용한 기존 샌드위치패널의 총 체적은 약 2.44 m³로 계산되었다.

기존 샌드위치패널의 단위면적당 질량 14.15 kg/m²를 적용하여 산출한 총 자재 질량은 약 1,381 kg으로 나타났다.

한편, 왕겨 기반 패널은 두께 50 mm 기준 단위면적당 약 12~15 kg/m²의 질량 범위를 가지며, 이를 동일 두께 조건으로 환산할 경우 약 6~7.5 kg/m² 수준으로 나타난다.

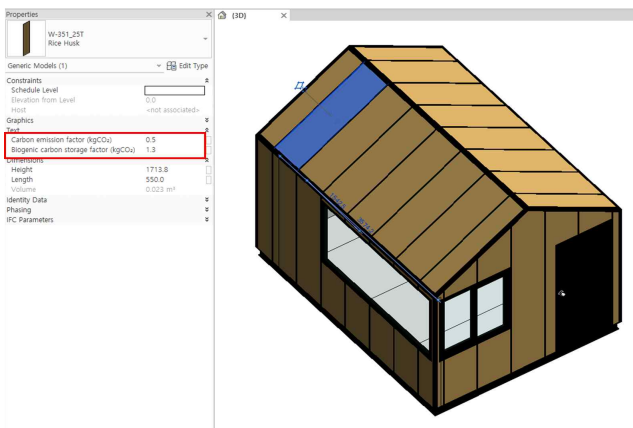
본 연구에서는 재료 변경에 따른 탄소 영향만을 비교하기 위하여 시나리오 A와 시나리오 B 모두 동일 질량 조건을 적용하였다. 이는 물량 변수를 통제된 상태에서 재료 특성에 따른 탄소 차이를 분석하기 위한 설정이다.

3.2 탄소 배출계수 및 산출 기준



[그림 2] 기존 샌드위치패널 적용 모듈러 BIM 모델의 탄소 정보 파라미터 설정

샌드위치패널의 탄소 배출계수는 강판 및 미네랄울 재료의 환경부하 계수를 기반으로 설정하였다. 강판은 약 1.8~2.2 kgCO₂/kg, 미네랄울은 약 1.0~1.5 kgCO₂/kg의 범위를 가지며, 그림 2와 같이 이를 고려한 평균값 1.8 kgCO₂/kg을 적용하였다[8].



[그림 3] 왕겨 기반 패널 적용 모듈러 BIM 모델의 탄소 정보 파라미터 설정

왕겨 기반 패널의 경우 기존 바이오 기반 재료 연구를 참고하

여 0.5 kgCO₂/kg의 배출계수를 적용하였다[8]. 또한 왕겨는 식물의 광합성 과정에서 형성된 생물기원 탄소를 포함하고 있어 탄소 저장 효과를 가지며, 이를 반영하기 위해 그림 3과 같이 1.3 kgCO₂/kg의 저장계수를 적용하였다[7].

이에 따라 같이 시나리오 A는 배출탄소만을 고려하고, 시나리오 B는 배출탄소와 저장탄소를 동시에 반영하는 구조로 설정하였다.

3.3 시나리오별 내재탄소 산출 결과

시나리오 A(기존 샌드위치패널)의 경우 자재 질량과 배출계수를 적용하여 내재탄소를 산출하였다. 그 결과 총 배출탄소는 약 2,486 kgCO₂로 나타났다.

시나리오 B(왕겨 기반 패널)의 경우 동일 질량 조건에서 배출탄소와 탄소 저장량을 동시에 고려하였다. 배출탄소는 약 690 kgCO₂로 감소하였으며, 탄소 저장량은 약 1,795 kgCO₂로 산출되었다.

이에 따라 순 탄소 영향은 약 -1,105 kgCO₂로 나타났다.

3.4 시나리오 비교 및 해석

시나리오 A와 시나리오 B를 비교한 결과, 동일한 구조 조건에서 재료를 변경하는 것만으로 약 3,591 kgCO₂의 탄소 저장 효과가 발생하는 것으로 나타났다.

기존 샌드위치패널은 금속 및 무기 단열재 기반 구조로 인해 생산 단계에서 발생하는 탄소가 전량 배출탄소로 작용하는 반면, 왕겨 기반 패널은 배출탄소가 상대적으로 낮고 동시에 탄소 저장 효과가 반영되는 구조를 가진다.

본 연구는 동일 질량 조건을 가정하여 비교를 수행하였으며, 실제 적용 시 질량 차이에 따른 추가적인 탄소 영향은 별도의 고려가 필요하다.

이 결과는 바이오 기반 재료가 기존 건축 자재와 달리 탄소 배출원이 아닌 탄소 저장 매체로 작용할 수 있음을 보여주며, 건축물의 탄소 저장 전략이 재료 선택 단계에서 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

4. 결론

본 연구는 기존 샌드위치패널 기반 모듈러 건축을 BIM으로 모델링하고, 이를 왕겨 기반 패널로 대체한 시나리오를 구성하여 재료 변경에 따른 내재탄소 및 탄소 저장 효과를 정량적으로 분석하였다.

분석 결과, 기존 아연도금강판 및 미네랄울 기반 샌드위치패널은 자재 생산 단계에서 배출탄소가 발생하는 구조인 반면, 왕겨

기반 패널은 배출탄소와 함께 탄소 저장 효과를 동시에 고려할 수 있는 구조를 가지는 것으로 나타났다. 동일 질량 조건에서 기존 패널은 약 2,486 kgCO₂의 배출탄소를 나타냈으며, 왕겨 기반 패널은 약 690 kgCO₂의 배출탄소와 약 1,795 kgCO₂의 저장탄소를 나타내어 순 탄소 영향은 약 -1,105 kgCO₂로 산출되었다.

이를 통해 동일한 모듈러 건축 조건에서 재료를 변경하는 것만으로 약 3,591 kgCO₂의 탄소 저감 효과가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 모듈러 건축의 탄소 저감 전략이 공법적 효율성 뿐만 아니라 패널 재료의 선택에 의해 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

또한 본 연구는 Revit 기반 BIM 모델에서 패널 면적, 단위중량, 탄소 배출계수, 탄소 저장계수를 속성 정보로 설정하고 이를 탄소 산출에 연계함으로써, 설계 단계에서 재료 선택에 따른 탄소 영향을 정량적으로 검토할 수 있는 방법을 제시하였다. 이는 기존의 사후적 LCA 평가 방식과 달리, 설계 과정에서 재료 대안의 탄소 영향을 사전에 검토할 수 있다는 점에서 의의가 있다.

다만 본 연구는 문헌 기반 탄소계수와 동일 질량 조건을 적용한 시나리오 분석으로 수행되었으므로, 향후 연구에서는 실제 왕겨 기반 패널의 환경성적표지, 공인시험 데이터, 생산공정 기반 LCA 자료를 반영한 정밀 분석이 필요하다. 또한 운송, 시공, 유지관리 및 폐기 단계까지 포함한 전과정 평가로 확장할 경우 왕겨 기반 모듈러 패널의 탄소 저감 효과를 보다 종합적으로 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 SW중심대학사업단 Lab-Corps 프로그램의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고문헌

[1] 강찬혁 외 4인, “건축물의 전과정평가 자동화를 위한 내재 탄소배출량 산출 모델 개발에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제 41권 9호, pp. 283-292, 9월, 2025년.

[2] 홍지완, 유재우, “근대 이후 모듈러 건축공법 주택의 디자인과 친환경적 특성에 관한 연구 - 모듈러 주택의 탄소 배출량에 대한 벽두께 변화를 중심으로 -”, 대한건축학회연합논문집, 제 26권 6호, pp. 211-222, 12월, 2024년.

[3] Hatmoko, Jati Utomo Dwi, et al., “Carbon Emissions Analysis of Modular House Construction”, E3S Web of Conferences, Vol. 448, 03040, 2023.

[4] 磯部孝行, 김종훈, “BIM을 이용한 내재탄소 평가의 검증 사례와 전망”, 대한설비공학회설비저널, 제 53권 11호, pp. 75-86, 11월, 2024년.

[5] 최중식, 강윤식, “BIM기반 녹색건축인증 저탄소 자재 사용 평가 자동화 연구”, 대한건축학회연합논문집, 제 27권 3호,

pp. 35-44, 6월, 2025년.

[6] Sara Parece, Ricardo Resende, Vasco Rato, “BIM-based life cycle assessment: A systematic review on automation and decision-making during design”, Building and Environment, Volume 282, August 2025

[7] Geoffrey Guest. et al, “Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems”, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 43, pp. 21-30, 2013.

[8] Hammond, G., Jones, C., “Inventory of Carbon and Energy (ICE) Version 2.0”, University of Bath, 2011.