

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

LCA 기반 폐 HDPE-WPC 외장재의 난연제 적용에 따른 제조단계 탄소배출 영향 분석

LCA-based assessment of manufacturing-stage carbon emissions from recycled HDPE-WPC cladding with flame retardants

○ 최 환 호* 최 지 용** 김 수 민***
Choi, Hwanho Choi, Jiyong Kim, Sumin

Abstract

The environmental impact of flame-retardant WPC cladding was evaluated through life cycle assessment. Two systems were analyzed: physical intumescent using expanded graphite with an ionic liquid, and chemical intumescent using APP with lignin. The functional unit was 1 m² siding, evaluated under ISO 14040/14044 and EN 15804+A2 standards. Results indicated that the physical intumescent system had a lower carbon footprint, while both cases showed flame retardants as the main contributors. These findings demonstrate that flame-retardant selection influences climate performance and underline the need to integrate environmental criteria with fire safety in sustainable construction material design.

키워드 : 목재 플라스틱 복합재, 재활용, 생애주기평가, 난연제, 환경영향

Keywords : Wood plastic composite, recycling, Life cycle assessment, Flame retardant, Environmental impact

1. 서론

WPC(wood plastic composite)는 건축분야에서 데크재, 펜스, 인테리어 자재, 가구 등 다양한 제품으로 활용되고 있으며, 건축물 외장 마감재로의 적용 가능성도 논의되고 있다. 그러나 우리나라 건축법규는 건축물 외장재에 대해 KS F ISO 5660-1 및 KS F 2271 기준에 따라 총방출열량 8 MJ/m² 이하, 평균 열방출률 200 kW/m² 이하, 지속연소 20초 이하를 충족하는 난연 성능을 의무화하고 있다. WPC는 폐 HDPE와 목분 등 유기성 재료를 주성분으로 하여 가연성이 높기 때문에 이러한 법규 기준을 만족하기 위해 난연 보강이 필수적이며, 동시에 친환경 건축자재로서 기능을 확보할 수 있는 대안 마련이 요구된다.

건축자재의 난연 성능을 강화하는 방법은 크게 물리적 팽창성 난연제와 화학적 팽창성 난연제로 나눌 수 있다. 팽창성 흑연과 같은 물리적 난연제는 열을 받으면 부피가 팽창해 차열성 탄화층을 형성하여 열과 산소의 전달을 차단한다. 반면 APP, PER, MEL 등 인계·질소계 성분으로

구성된 화학적 난연제는 고온에서 반응하여 발포와 동시에 치밀한 char 층을 형성하고, 라디칼 억제 및 탈수 반응을 통해 연소를 억제한다. 이 차이는 단순한 난연 효과뿐 아니라 자재의 기계적 성능, 내구성에도 영향을 미친다.

난연제의 적용은 화재 안전성을 높이는 동시에 환경영향이라는 과제를 수반한다. 물리적 난연제는 흑연의 산화 처리와 열팽창 공정을 거치지만, 합성 기반의 화학적 난연제(IFR)에 비해 제조 과정이 단순하고 에너지 요구량이 상대적으로 낮다. 반면 화학적 난연제는 인계·질소계 화합물 합성 과정에서 높은 에너지와 화학물질 투입이 필요하며, 사용 후 폐기 시 재활용성이 저하되고 유해 부산물이 발생할 수 있다. 따라서 난연 성능 확보와 환경영향 최소화 사이의 상충 관계를 정량적으로 규명하는 것이 필요하며, 생애주기평가(LCA)는 이를 평가하는 효과적인 도구가 된다. 또한, 최근 ESG 경영, 탄소중립 정책, 녹색 건축인증제도의 확산은 건축 자재 선택 시 환경성 검증을 필수적으로 요구하고 있으며, 이는 난연 성능과 환경성 평가를 통합적으로 수행하는 연구의 필요성이 더욱 부각된다.

기존 연구는 팽창성 흑연이나 인계·질소계 난연제를 적용하여 WPC의 난연 성능을 향상시키는 데 집중해왔다. 이 과정에서 열방출 억제, 탄화층 형성, 기계적 성능 변화 등에 관한 다수의 실험적 연구가 보고되었으나, 난연제 적용에 따른 환경영향까지 포함한 연구는 매우 제한적이다. 특히 물리적 난연제와 화학적 난연제 간 환경영향 차이를 LCA를 통해 정량적으로 비교한 사례는 드물다. 따라서 본 연구는 법규 충족을 위한 난연제 적용 방식에 따른 환경영향을 LCA로 비교·분석하고자 한다.

* 연세대 대학원 박사과정

** 연세대 대학원 석박통합과정

*** 연세대 건축공학과 교수

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering,
Yonsei University, kimsumin@yonsei.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02263517)

2. 연구방법

본 연구에서는 난연제를 적용한 WPC의 환경영향을 정량화하기 위해 LCA 방법론을 사용하였다. 해당 환경영향 평가는 ISO14040 & ISO14044에 제시한 절차에 따라 정량화하였다. 기준단위는 넓이 1m^2 외장재로 설정하였다. 재료 생산에 따른 환경영향을 분석하기 위해 EN 15804+A2:2019에서 제시하는 환경제품선언(EPD) 규격 중 Product stage만을 고려하였다. 물리적 팽창형 난연제를 적용한 WPC의 물질투입량은 Li et al.(2020)의 연구를 인용하였다. Li et al.(2020)에서는 치아인산염 기반 이온성 액체(BMP)를 합성하여 팽창성 흑연(EG)와 함께 WPC의 난연 성능을 향상하고자 하였다. 화학적 팽창형 난연제를 적용한 WPC의 물질투입량은 Wei et al.(2022)의 연구에서 인용하였다. Wei et al.(2022)에서는 WPC의 난연 성능을 향상하기 위해 폴리인산나트륨(APP)과 APP의 탄화층 형성 능력을 향상시키기 위해 리그닌 소재가 활용되었다. 본 연구에서 사용된 Life cycle inventory database (LCI DB)는 에코인벤트에서 제공하는 LCI DB를 사용하였다. 환경영향 평가 방법론은 유럽위원회가 제시하는 Environmental Footprint (EF) 3.1이 사용되었으며, 본 연구에서는 EF 3.1에서 제시하는 16가지 환경영향범주 중 탄소발자국이 고려되었다.

표 1. 물리적 팽창성 난연제가 적용된 WPC의 조성비 (Case 1)

Wood fiber (%)	recycled High-density polyethylene (rHDPE) (%)	Maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) (%)	BMP (%)	EG (%)	Total (%)
35	30	5	20	10	100

표 2. 화학적 팽창성 난연제가 적용된 WPC의 조성비 (Case 2)

Wood fiber (%)	rHDPE (%)	Lignin (%)	APP (%)	MAPE (%)	Zinc stearate (%)	Total (%)
10	37	25	25	1.5	1.5	100

3. 연구결과

WPC 외장재에 적용된 두 가지 난연 시스템(Case 1: 물리적 팽창성 난연제, Case 2: 화학적 팽창성 난연제)의 온실가스 발생량을 산정하였다. Case 1의 경우, 1m^2 WPC 사이딩 생산 시 총 $28.45\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 이 배출되었으며, 이 중 BMP가 약 62%를 차지하여 절반 이상을 기여하는 것으로 나타났다. 이어서 rHDPE와 EG가 각각 15% 내외의 비중을 보였으며, Wood fiber 등 다른 재료들의 기여도는 상대적으로 낮았다. 반면 Case 2에서는 총 $40.90\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 이 배출되었으며, APP가 전체의 54%로 가장 큰 비중을 차지하였다. 다음으로 rHDPE가 23%, 리그닌이 17%를 차지하여 주요 기여 요인으로 확인되었고, Zinc 및 기타

재료들의 영향은 제한적이었다. 두 시스템 모두 난연제의 비중이 매우 높게 나타나, WPC 외장재 생산 시 난연제의 환경적 부담이 총 배출량을 결정하는 핵심 요인임을 알 수 있다.

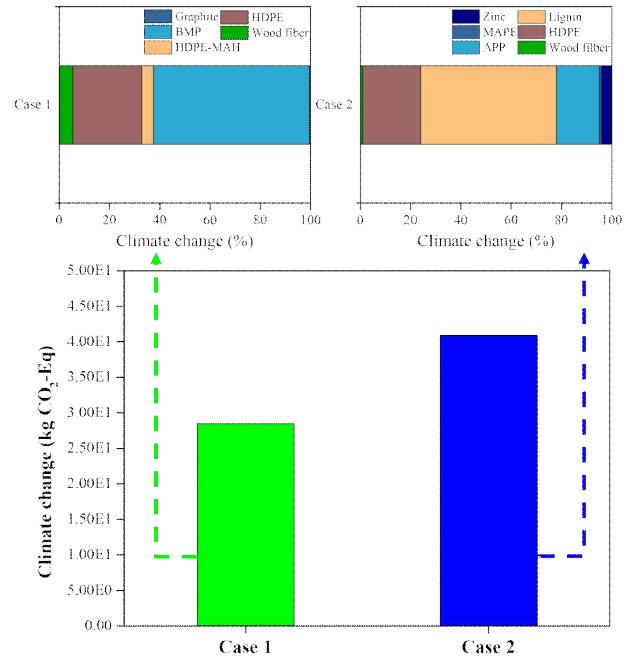


그림1. 물리적 팽창성 난연제 (Case 1)와 화학적 팽창성 난연제 (Case 2)를 적용한 WPC 생산에 따른 온실가스 발생량

4. 결론

본 연구는 WPC 외장재에 적용되는 물리적 및 화학적 난연제의 환경영향을 LCA 방법론으로 비교하였다. 분석 결과, 물리적 팽창성 난연제는 화학적 난연제보다 기후변화 영향이 낮게 나타났으며, 두 경우 모두 난연제가 총 환경부담을 결정하는 핵심 요인임이 확인되었다. 따라서 WPC의 난연 성능 확보 과정에서는 법규 충족과 함께 난연제의 환경성을 고려한 선택이 필수적이다. 이러한 결과는 친환경 건축자재의 적용 확대를 위한 연구와 산업적 의사결정에 기초 자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- Li, X. & Liang, D. & Li, K. & Ma, X. & Cui, J. & Hu, Z. (2021). Synergistic effect of a hypophosphorous acid-based ionic liquid and expandable graphite on the flame-retardant properties of wood-plastic composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145, 2343–2352
- Wei, T., Yang, X., Huo, Y., & Jia, X. (2022). Lignin/ammonium polyphosphate-modified wood flour/high-density polyethylene composites. *Materials Chemistry and Physics*, 290, 126594.