

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

## 탄소저장형 목섬유 단열재의 열습기성능 향상을 위한 상변화물질 적용 평가

### Integration of phase change materials for hygrothermal improvement in wood fiber insulation

○ 남 지 희\*    최 지 용\*\*    김 수 민\*\*\*  
Nam, Jihee   Choi, Ji Yong   Kim, Sumin

#### Abstract

Wood fiber insulation is a renewable, carbon-storing alternative but is limited by low thermal resistance and moisture sensitivity. To overcome these drawbacks, microencapsulated PCMs (n-heptadecane, n-octadecane, 30 wt%) were integrated into low- and high-density boards via ultrasonic dispersion and heat pressing. Thermal conductivity, latent heat, and vapor diffusion resistance were experimentally measured, while five-year WUFI-Bio simulations assessed long-term hygrothermal performance. The high-density n-octadecane composite exhibited the greatest latent heat capacity, and dry cup tests showed improved vapor resistance while maintaining high permeability. Simulation results indicated reduced moisture accumulation and stable mold resistance across assemblies. Collectively, PCM-integrated WFI demonstrated multifunctional performance, enhancing thermal energy storage, moisture regulation, and durability, thereby supporting low-carbon, energy-efficient timber construction.

키워드 : 목섬유단열재, 상변화물질, 열습기, 엔탈피, 목조건축

Keywords : Wood fiber insulation; Phase change materials; Hygrothermal; Enthalpy; Timber

#### 1. 서론

\*전 세계적으로 건축 부문의 탈탄소화와 에너지 효율 향상은 기후위기 대응의 핵심 과제로 대두되고 있다. 건물 에너지 소비는 인구 증가와 팬데믹 이후 환기·공기질 관리 수요 증대 등 복합 요인으로 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따라 고성능 외피 기술 및 재생에너지 활용이 필수적으로 요구된다. 특히 외피의 단열 성능 확보는 에너지 절감과 건축물 내구성 보장의 핵심 요소이다. 전통적으로 단열재는 석유화학을 기반으로 하는 유기계/화합물(XPS, EPS, PU, PF)과 무기계(글라스울, 암면)가 주로 사용되었으나, 높은 탄소배출과 화석연료 의존성으로 지속가능성의 한계가 있다. 이에 비해 목섬유 단열재(Wood Fiber Insulation, WFI)는 목재 부산물을 활용한 저탄소 소재로 탄소저장(carbon storing) 기능을 가져 친환경 대안으로 주목받고 있다. 그러나 낮은 열저항과 습기에 대한 취약성은 보급 확산의 제약 요인이다. 이를 보완하기 위해 잠열량이 높아 축열/방열성능에 유리한 상변화물질(Phase Change Material, PCM)을 건축자재에 적용 미세캡슐화 상변화물질

(Microencapsulated PCM, MPCM)은 누출이나 과냉각 문제를 최소화하여 내장재와 단열재 적용 가능성을 보여주었다. 본 연구는 n-heptadecane과 n-octadecane 기반 MPCM을 WFI에 30 wt%로 통합하여 열습기 성능을 분석하고, WUFI-Bio 시뮬레이션으로 장기 벽체 거동을 평가하였다. 이를 통해 국부적 열부하 완화, 실내 환경 안정화, 곰팡이 억제 효과를 검증하고, 향후 탄소저장형 고기능성 단열재로서의 적용 가능성을 제시한다.

#### 2. 재료 및 방법

##### 2.1 재료

본 연구에서 사용된 목섬유는 Thermofibre(GUTEX, 독일)에서 수급하였다. 목재 산업 부산물을 원료로 하여 밀도는 약  $25 \text{ kg/m}^3$ , 열전도율은  $0.039 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로, 접착제와 난연제가 사전 처리된 섬유형태로 공급되었다. 상변화물질은 CELSIUS Korea 사 제품을 사용하였다. MPCM의 코어층은 파라핀계 유기물질인 n-heptadecane과 n-octadecane으로, 각각 약  $18^\circ\text{C}$ 와  $28^\circ\text{C}$ 의 상변화온도 범위의 특성을 가진다. 입자 크기는  $5\text{--}30 \mu\text{m}$  범위이며, 멜라민 수지 기반 고분자 쉘(shell)로 캡슐화되어 있어 PCM의 누출 및 장기적 열 안정성을 제공한다. 이러한 구조적 안정성 덕분에 MPCM은 다공성 목섬유 매트릭스와의 결합 시에도 기능적 손실이 적으며, 반복적인 상변화 과정에서 성능 저하가 최소화될 수 있다.

\* 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).

## 2.2 제조방법

MPCM이 통합된 목섬유 단열재의 제작 과정은 혼합-분산-성형의 단계로 이루어진다. 목섬유의 전체 건조 질량 대비 30 wt% 비율의 MPCM을 계량하여 목섬유와 1차 혼합하였다. 이후 초음파 처리기를 이용한 분산 과정을 거쳐, 미세캡슐 입자가 섬유 기공 내부에 균일하게 분포되도록 하였다. 제조된 목섬유-MPCM 복합재는 열압성형을 하여 저밀도(Low density-WFI, LWFI) 및 고밀도(High density-WFI, HWFI) 단열재 시편으로 제작하였다. LWFI 시편은 하판 120 ° C, 상판 130 ° C 조건에서 0.0001 Pa의 압력으로 약 30분간 성형하였으며, HWFI 시편은 하판 150 ° C, 상판 140 ° C 조건에서 0.002 Pa의 압력으로 약 10분간 성형하였다. 각각 혼합된 MPCM의 명칭을 참고하여 n-heptadecane 및 n-octadecane이 적용된 LWFI는 LWFI<sub>hep</sub>, LWFI<sub>oct</sub>, HWFI의 경우 각 HWFI<sub>hep</sub>, HWFI<sub>oct</sub>으로 명명하였다.

표1. 목섬유단열재-MPCM 시편 밀도정보

| Specimen                     | LWFI  | LWFI <sub>hep</sub> | LWFI <sub>oct</sub> |
|------------------------------|-------|---------------------|---------------------|
| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | 72.6  | 64                  | 74.14               |
| Specimen                     | HWFI  | HWFI <sub>hep</sub> | HWFI <sub>oct</sub> |
| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | 136.9 | 153.2               | 143.7               |

## 2.3 분석

열전도율은 열류계(Heat Flow Meter)를 사용하여 평균온도 20°C와 30°C 조건에서 측정하였다. 시편의 밀도 차이에 따른 전도 특성을 비교하고, PCM 도입이 열저항에 미치는 영향을 평가하였다. 반복 측정을 통해 평균값을 산출하였으며 오차는 0.02 이내이다. 수분 확산 저항성은 ISO 12572 기준에 따라 건식컵법(Dry cup test)을 통해 측정하였다. 시편을 23 ° C, 50% RH 조건에서 5일간 무게 변화를 기록하여 수증기 확산계수( $\mu$ )와 등가 공기층 두께(Sd)를 산출하였다. 측정된 Sd 값에 따라 투습성을 분류하고, PCM 도입 여부에 따른 습기 저항 특성 변화를 비교하였다. 시편의 열전도율과 수분투습 값을 WUFI 벽체에 적용하여 시뮬레이션에 활용하였다.

## 2.4 WUFI 시뮬레이션

WUFI Pro 5.3을 활용하여 WFI 및 MPCM 통합 단열재가 적용된 벽체의 열·습기 거동을 평가하였다. 외피는 경량 목구조 6층 구성으로 모델링하였으며, 목섬유 보드(15 mm)와 단열층(320 mm)에 대한 열·습기 특성은 실험 데이터를 반영하였다. 기후 조건은 서울기후데이터를 적용하여 장기적인 축열, 습기 축적, 곰팡이 발생 가능성을 검토하였다. 비록 설계 U-value가 국내 기준(0.21 W/m<sup>2</sup> · K)에 정확히 부합하지는 않지만, 실제 기후 조건을 근사하여 여름철 고온다습 환경에서의 내구성과 적용성을 평가하였다.

## 3. 결과 및 논의

단열재의 열전도율은 밀도에 크게 영향을 받으며, 공극률이 높을수록 낮은 값을 보인다. LWFI는 높은 기공률로 인해 낮은 열전도율을 보였고, HWFI는 밀도가 높아 상대

적으로 높은 열전도율을 나타냈다. MPCM을 도입하면 PCM 자체의 전도율 때문에 소폭 증가했으나, 축열 성능 향상 효과에 비해 영향은 미미하여 단열 성능 저하는 거의 없었다. HWFI의 경우  $\mu$  =6.18, Sd=0.09로 측정되었고, MPCM 도입 시 HWFI<sub>oct</sub>는  $\mu$  =7.87, Sd=0.12로 증가하여 투습 저항성이 개선되었다. LWFI는 높은 공극률로 인해 낮은  $\mu$  (4.89)와 Sd(0.07)를 유지하였으며, MPCM 일부가 기공 내 잔존하지 못해 효과가 제한적이었다. 모든 시편은 Sd < 0.5 m로 고투습성 재료에 해당하며, 이는 결로 위험을 줄이고 벽체의 열습기 안정성에 유리함을 보여준다.

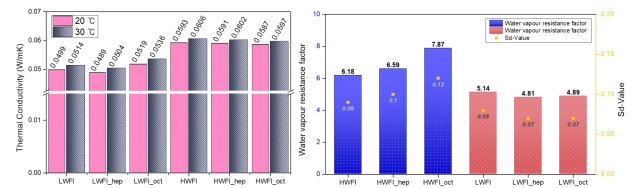


그림 1. 시편의 열전도율 및 수분저항계수, Sd-Value

WUFI를 이용한 분석 결과, 모든 벽체 사례에서 곰팡이 발아 임계 조건(LIM)을 넘지 않아 전반적으로 곰팡이 발생 위험은 낮게 나타났다. 다만 PCM이 없는 기준 사례는 LIM 곡선에 근접하여 상대적으로 취약성을 보였으며, 외측에 n-heptadecane, 내측에 n-octadecane을 적용한 조합은 LIM과의 간격이 가장 크게 유지되어 곰팡이 억제 효과가 가장 우수한 것으로 확인되었다.

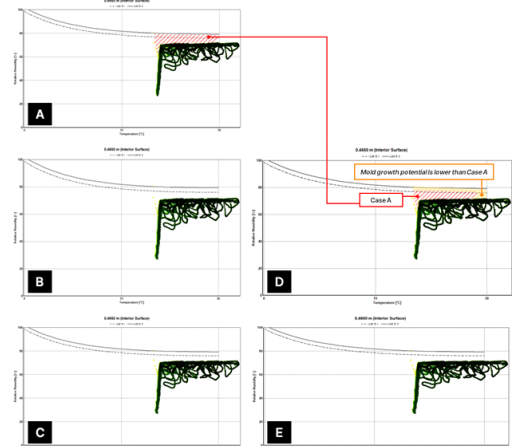


그림 2. WUFI의 LIM 분석 결과

## 4. 결론

본 연구는 목섬유 단열재에 상변화물질을 통합함으로써 열·습기 성능을 보완할 수 있음을 확인하였다. 이는 저탄소 건축을 위한 단열재의 기능적 한계를 극복하고, 쾌적성과 내구성을 동시에 확보할 수 있는 대안적 접근임을 보여준다.

## 참고문헌

1. C. Breton, P. Blanchet, B. Amor, F. Pomponi, A novel method to calculate SSP-consistent remaining carbon budgets for the building sector: A case study of Canada, Build. Environ. 269 (2025) 112474.