

2025년 추계학술발표대회 : 대학생부문

기계적 성능 개선을 중심으로 한 CNC 보강 석고-MPCM 복합재의 특성 연구

Study of CNC-Reinforced Gypsum-MPCM Composites for Mechanical Performance Improvement

○박 민 서* 천 정 현** 정 수 광***
Park, Min-Seo Cheon, Jeong-Hyun Jeong, Su-Gwang

Abstract

This study fabricated composites by incorporating Microencapsulated Phase Change Materials (MPCM) into gypsum board to provide thermal performance and applying Cellulose Nanocrystals (CNC) to enhance mechanical strength. MPCM embedded in composites exhibited phase change at around 31°C, and the addition of CNC slightly reduced the heat storage capacity. In thermal behavior evaluation, a higher MPCM content resulted in more pronounced latent heat effects, and differences in sustained heat storage behavior were observed depending on CNC incorporation. Compressive strength decreased with increasing MPCM content; however, with CNC addition, P2.5C4 and P5C4 showed improvements of 27.92% and 67.36%.

키워드 : 마이크로캡슐화 상변화 물질, 셀룰로오스 나노크리스탈, 석고 복합재, 잠열 저장, 강도 보강

Keywords : MPCM(Microencapsulated PCM), CNC(Cellulose Nanocrystals), Gypsum composites, Latent heat storage, Strength reinforcement

1. 서론

마이크로캡슐화된 상변화 물질(Microencapsulated PCM; MPCM)은 상변화 물질(PCM)을 코어로 사용하여 마이크로 캡슐화한 것으로, PCM의 누수와 불필요한 상호작용을 억제하는 기술이다. PCM과 마찬가지로 열전도도가 낮고 잠열량이 커 우수한 열에너지 저장 성능을 가지지만, MPCM이 포함된 자재의 기계적 특성을 감소시킨다. 이는 MPCM의 내재적 연성 특성에 기인한다 (Balapour, M., 2021).

MPCM의 단점을 보완하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 그중 하나가 셀룰로오스 나노크리스탈(Cellulose Nanocrystals; CNC)이다. CNC는 바이오매스를 원료로 하여 폐기물 활용이 가능한 나노 구조의 친환경 소재로, 본 연구에서는 미세 구조적 특성이 기계적 성능을 보완할 수 있을 것이라고 추측하였다.

따라서 MPCM과 CNC의 복합화는 건축 자재의 열적·기계적 성능을 동시에 향상시킬 수 있는 가능성을 지닌다.

본 연구에서는 외부 적용을 목적으로 한 석고보드의 MPCM을 통한 열적 성능 향상과 동시에 발생하는 기계적 성능 약화를 보완하기 위해 CNC를 적용한 복합재를 제조했다.

2. 재료 및 실험

2.1 재료 및 제작

본 연구에서는 여름철 평균 기온이 30°C를 초과하는 점을 고려하여, 상변화 온도가 31°C인 n-Alkane을 코어로 한 Celsius Korea Inc.의 MPCM을 사용했고, 기계적 특성 보완을 위해 나노 스케일의 CNC를 적용했다 (나성준, 2024).

열적 및 기계적 특성을 연구하기 위해 석고-MPCM의 복합재를 제조하였다. 기존 복합재를 바탕으로 CNC를 첨가하여, 표1과 같이 복합재를 구성하였다.

표1. 복합재의 구성 비율

Samples	Gypsum(g)	Water(g)	MPCM(g)	CNC(g)
G	100	100	-	-
P2.5	97.5	97.5	5	-
P5	95	95	10	-
P2.5C4	93.5	93.5	5	8
P5C4	91	91	10	8

2.2 방법

본 연구에서는 복합재의 열적 특성을 평가하기 위해 Discovery TGA 5500을 이용한 열중량 분석, Discovery DSC 2500을 이용한 열에너지 저장 특성 분석, HFM 446 Lambda를 이용한 열전도율 분석을 수행하였으며, 이를 바탕으로 동적 열전달 실험을 진행하여 실제 복합재의 열적 거동을 확인하였다.

복합재의 기계적 특성을 평가하기 위해 KSU-100HSO를 이용한 압축강도 시험을 수행하였다.

* 숭실대 건축공학과 학부과정

** 숭실대 건축공학과 석사과정

*** 숭실대 건축공학과 조교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering, Soongsil University, sgjeong@ssu.ac.kr)

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No. RS-2023-00213034)

3. 결과

3.1 열적 특성 평가

열 중량 분석 결과, 총 세 개의 뚜렷한 피크가 관찰되었다. 각각 석고, CNC, MPCM에 의해 발생하였으며, MPCM과 CNC의 함량에 따라 일관된 경향을 나타내는 것을 확인하였다.

열에너지 저장성 분석 결과, P2.5, P5, P2.5C4, P5C4의 용융 시 엔탈피 값이 각각 1.026J/g, 17.06J/g, 0.6542J/g, 7.694J/g으로 MPCM의 중량 비율이 증가할수록 더 큰 엔탈피 값을 나타낸다. 이는 CNC의 유무와 관계없이 상변화 과정에서 안정적인 열에너지 저장이 가능함을 의미한다.

3.2 열적 거동 평가

그림1은 제조한 복합재의 실제 열적 거동을 평가한 결과를 나타낸 그림이다. 실험은 온도가 25℃로 유지되는 조건에서 수행하였다. 열원으로 할로젠 램프를 사용하였고, 복합재와의 거리를 60cm로 유지한 상태에서 열원을 공급하였다. 2시간 동안 가열한 후, 실험 공간과 동일한 온도에 도달할 때까지 자연 냉각을 진행하였다.

같은 MPCM의 질량 비율을 가진 P2.5와 P2.5C4, P5와 P5C4의 경향성을 확인하였다. 가열 시 열원으로부터 직접 열을 전달받는 외부 표면과 단열재로 둘러싸인 내부 표면의 온도 변화 추이가 유사하였으며, 이는 냉각 과정에서도 마찬가지였다.

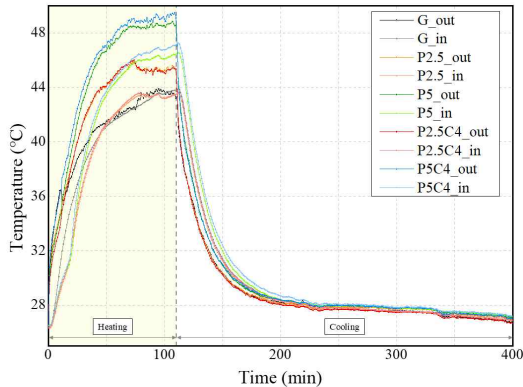


그림1. 복합재의 열적 거동 평가

실험 결과를 바탕으로 MPCM의 상변화 과정 중 액체화 진행 정도를 나타내는 액체분율을 분석하였다. 액체분율 분석을 통해 MPCM의 비율이 클수록 잠열 효과가 두드러지며, CNC가 포함되지 않은 순수 석고-MPCM 복합재인 P5가 가장 큰 잠열 효과를 나타냈다.

3.3 기계적 특성 평가

그림2는 제조한 복합재의 압축강도를 응력-변형률 선도로 나타낸 그림이다. 일반적인 석고보드와 동일한 G의 압축강도가 평균 7.04MPa로 측정되었고, P2.5와 P5, P2.5C4, P5C4 순서대로 평균 압축강도가 각각 3.59MPa, 2.55MPa, 4.59MPa, 4.27MPa로 측정되었다. MPCM 함량이 더 큰 P5,

P5C4의 압축강도는 P2.5, P2.5C4보다 낮게 나타났다.

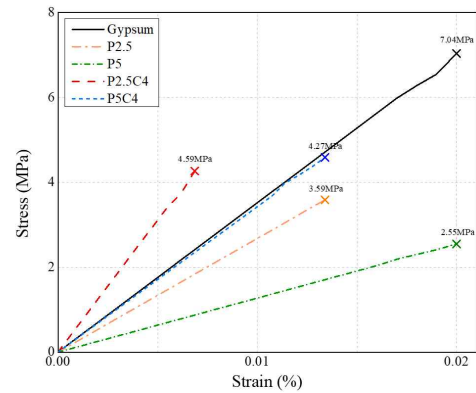


그림2. 압축강도의 응력-변형률 선도

표2는 각 복합재의 압축강도와 G 대비 감소율과 향상률이 정리되어 있다. P5와 P5C4는 G의 압축강도 대비 더 큰 감소율을 보였으며, 그 중 P5의 감소율이 가장 크게 나타났다. 또한 CNC가 첨가된 P2.5C4와 P5C4의 압축강도는 매우 근소한 차이를 보였다. 향상률을 확인한 결과, MPCM의 함량이 높을수록 CNC의 기계적 강도 보완 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

표2. 복합재의 압축강도와 감소율 및 향상률

Samples	Compressive Strength (MPa)	Reduction Rate (%)	Improvement Rate (%)
G	7.04	-	-
P2.5	3.59	49.03	-
P5	2.55	63.75	-
P2.5C4	4.59	34.79	27.92
P5C4	4.27	39.33	67.36

4. 결과

본 연구에서는 CNC의 유무에 따른 석고-MPCM 복합재의 특성을 분석하였다. MPCM의 함량이 클수록 CNC가 열적 특성을 약화시키는 경향을 보였으나, 동시에 기계적 성능을 효과적으로 강화시키는 것이 확인되었다. 이러한 상반된 결과를 통해 두 성능 간 균형을 고려한 최적 조성의 필요성이 제기된다. 따라서 CNC 첨가가 석고-MPCM 복합재의 열적·기계적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 확인했으며, 향후 이러한 균형점을 구체적으로 도출하기 위한 정량적 분석이 요구된다.

참고문헌

- Balapour, M., et al. (2021). "Evaluating the thermal efficiency of microencapsulated phase change materials for thermal energy storage in cementitious composites," Cement and Concrete Composites, 116, 103891.
- 나성준, et al. (2024). "2023년 여름철 폭염 집중관측을 통한 서울 도심환경 조건에 따른 기온 및 노면 온도의 변화 특성," 한국환경과학회지, 33, 75-85.