

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

폐EPS와 마이크로캡슐형 상변화물질(mPCM)을 활용한 경량 단열 축열 모르타르의 열적 성능 평가

Thermal performance evaluation of lightweight, insulating, and thermal storage mortar
utilizing waste EPS and microencapsulated phase change material (mPCM)

○정 재 혁* 김 영 욱** 김 수 민***
Jae Hyuck Jung Young Uk Kim Sumin Kim

Abstract

A multifunctional cement mortar was developed and evaluated for building energy efficiency and lightweighting by incorporating recycled expanded polystyrene(EPS) and a phase-change material(mPCM). The thermal cycle test results confirmed that the optimal specimen exhibited an excellent thermal time lag effect of approximately 8 minutes during heating and 20 minutes during cooling. This performance is the result of two functions working effectively in tandem: EPS acts as an insulator to delay heat transfer, while mPCM simultaneously stores latent heat to buffer thermal energy. This demonstrates that the developed mortar has potential to enhance energy efficiency by simultaneously reducing the self-weight of buildings and stabilizing indoor temperatures.

키워드 : 경량콘크리트, 발포 폴리스티렌, 마이크로캡슐화 상변화 물질, 열에너지 저장

Keywords : Lightweight concrete, Expanded polystyrene, Microencapsulated phase change material, Thermal energy storage

1. 서론

건물 및 건설 부문은 전 세계 에너지 소비와 탄소 배출의 주요 원인이다. 또한 건물의 고층화는 구조물의 자체의 무게 부담을 가중시키며, 이는 부재 단면 증가와 자재 비용 상승 등 경제적 부담으로 이어진다. 이에 본 연구는 폐기된 발포 폴리스티렌(EPS)을 재활용하여 구조물의 하중을 저감하고 열 손실을 최소화한다. 동시에, 실내 쾌적 온도 범위에 최적화된 상변화 온도를 갖는 마이크로캡슐형 상변화물질(mPCM)을 적용하여, 잠열을 통해 외부의 급격한 온도 변화에 대응하고 실내 환경을 안정적으로 유지하는 축열 성능을 부여한다. 최종 목표는 이 두 재료를 시멘트 모르타르에 최적으로 배합하여 경량, 단열, 축열 성능이 융합된 건축자재를 개발하는 것이다. 더 나아가, 개발된 복합재료의 동적 열전달 특성을 분석하여 실제 건축환경에서의 적용 가능성과 그 유효성을 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를, 경량골재는 직경 2-4 mm의 폐기된 발포 폴리스티렌(EPS) 비드를 사용하였다. 마이크로캡슐형 상변화물질(mPCM)은 n-옥타데칸(n-Octadecane) 코어를 폴리메타크릴산 메틸(PMMA) 셸로 감싼 형태이며, 상변화 온도는 약 28 °C이다.

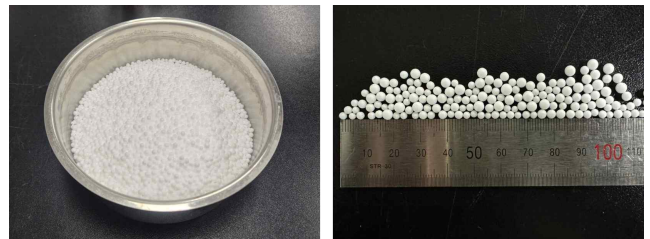


그림 1. 발포 폴리스티렌(EPS) 비드

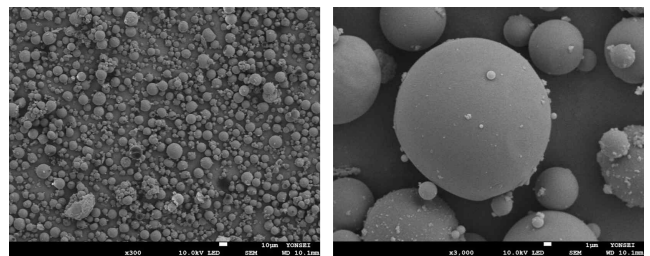


그림 2. 마이크로캡슐형 상변화물질(mPCM)

* 연세대 대학원 석사과정

** 연세대 대학원 박사후연구원

*** 연세대 건축공학과 교수

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

이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국
연구재단(RS-2025-02312833)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에
감사드립니다.

2.2 시편 제조 방법

기준 시험체(Plain)의 시멘트와 모래 비율은 1:3으로 설정했다. EPS15와 EPS30 배합에서는 모래 부피의 각각 15%와 30%를 EPS 비드로 대체하였으며, mPCM30 배합에서는 모래 부피의 30%를 mPCM으로 대체하였다. EPS15mPCM30 배합은 EPS 15%와 mPCM 30%를, EPS30mPCM30 배합은 EPS와 mPCM을 각각 30%씩 모래 대신 사용하였다. 모든 배합에서 물시멘트비는 50%로 고정하였으며, 감수제는 시멘트 질량의 0.2%를 사용하여 적절한 유동성을 확보하고 EPS 비드의 부상을 방지하고자 하였다.

표1. 시편의 배합비

구분	물시멘트비 (%)	단위량(kg/m ³)					
		물	시멘트	모래	EPS	mPCM	감수제
Plain	50	254	507	1522	-	-	1.01
EPS15	50	254	507	1294	1.76	-	1.01
EPS30	50	254	507	1065	3.51	-	1.01
mPCM30	50	254	507	1065	-	175.60	1.01
EPS15mPCM30	50	254	507	837	1.76	175.60	1.01
EPS30mPCM30	50	254	507	609	3.51	175.60	1.01

2.3 동적 열전달 시험

동적 열전달 성능은 20 ℃의 항온 조건에서 평가하였다. 시편을 60 ℃로 설정된 열판 위에서 6시간 동안 가열한 후, 6시간 동안 자연 냉각시키는 12시간 사이클로 실험을 진행하였다. 이 과정에서 시편 상부 표면의 온도 변화를 데이터 로거(Graphtec, GL840)를 이용해 측정하였다. 또한, 열화상 카메라(Testo, 890)를 사용하여 표면의 온도 분포와 변화를 시각적으로 분석하고 데이터를 추출하였다.

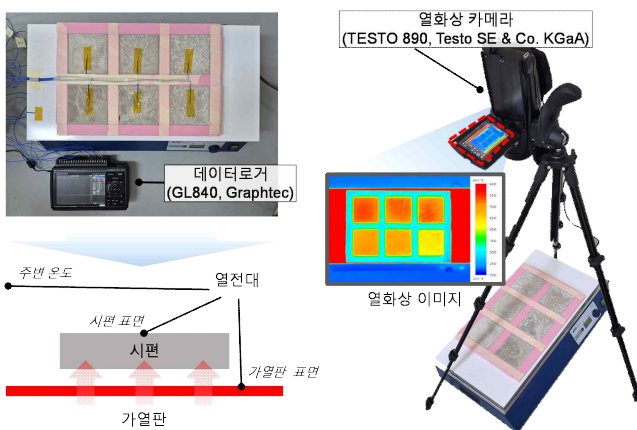


그림 3. 동적 열전달 시험 개요

동적 열전달 시험 결과, mPCM을 혼합한 모든 시편에서 뚜렷한 열 지연 효과가 나타났다. 특히 EPS30mPCM30 시편은 가열 시 약 8분, 냉각 시 약 20분의 최대 시간 지연을 보였다. 이는 EPS의 단일 성능과 mPCM의 축열 성능이 복합적으로 작용한 결과이다.

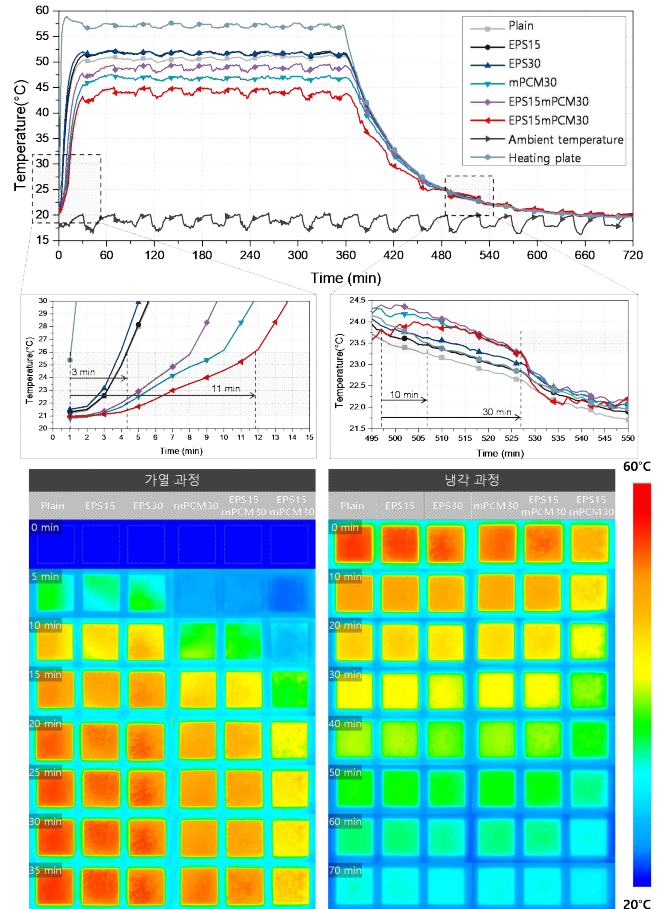


그림 4. 동적 열전달 시험 결과

3. 결론

건물의 경량화와 에너지 효율 향상을 목표로, EPS와 mPCM을 시멘트 모르타르에 복합 적용하고 동적 열전달 특성을 분석하였다. 시험 결과, EPS30mPCM30 시편은 가열 시 약 8분, 냉각 시 약 20분의 열 지연을 각각 나타내며 우수한 축열 성능이 입증되었다. 연구를 통해 이 복합 재료는 EPS의 적용으로 건물의 자중을 줄일 수 있는 가능성을 제시하며, mPCM의 효과로 외부 열변화에 대한 실내 온도 안정성을 높일 수 있음이 확인되었다. 향후 연구는 실제 건물 환경에 적용하여 장기 내구성 및 에너지 절감 효과를 실증적으로 검증하는 방향으로 진행될 수 있다.

참고문헌

1. A. Dixit, S.D. Pang, S.H. Kang, J. Moon, Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation, Cem. Concr. Compos. 102 (2019) 185–197.
2. I. Asadi, G. Ji, G. Steiner, M. hajmohammadian baghban, Impact of microencapsulated phase change materials (PCMs) on the thermal and mechanical performance of cement mortar, Dev. Built Environ. 21 (2025) 100594.