

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

모르타르 장기 성능 확보를 위한 PCM 기반 축열 골재 코팅 기법 최적화

- 계면 결합력 및 열전도 성능 강화를 통한 실용화 가능성 검증 -

Optimization of PCM-Based Thermal Storage Aggregates Coating Techniques for Long-Term Performance of Mortar

- Enhancing Interfacial Bonding and Thermal Transfer for Practical Implementation -

○천 정 현* 정 수 광**
Cheon, Jeong-Hyeon Jeong, Su-Gwang

Abstract

This study introduces an xGnP-epoxy composite coating strategy to address two key issues that may arise when Phase change material (PCM)-impregnated thermal storage aggregates are applied in cement-based building materials: uneven thermal distribution and weak interfacial bonding. Viscosity analysis of the coating binder confirmed the development of a microscale thermal conductivity enhancement mechanism driven by the dispersion of xGnP, which was further validated at the macroscale through dynamic thermal transfer testing. Although thermal responses were similar across different coating configurations, the method embedding xGnP within the epoxy matrix—rather than exposing it on the surface—resulted in a more uniform coating with reduced nanoparticle agglomeration. This led to stronger interfacial bonding and improved compressive strength. These results indicate that the coating strategy itself, rather than xGnP exposure, plays a critical role in performance, and support the proposed approach as an effective aggregate-level modification technique for enhancing the long-term durability of PCM-integrated mortar.

키워드 : 상변화물질, 축열 골재, 에폭시 코팅, 열전달 성능, 장기 성능

Keywords : Phase change material (PCM), Thermal storage aggregate, Epoxy coating, Thermal transfer performance, Long-term performance

1. 서론

1.1 연구의 목적

최근 지속 가능한 건축 자재 개발이 강조되며, 장기 내구성 확보를 위한 전략이 요구되고 있다. 특히, 외벽 마감재로 사용되는 모르타르는 기후 변화에 취약하므로, 더욱 사용 수명을 고려한 성능 확보 전략이 요구된다. 이러한 맥락에서 PCM 기반 축열 골재는 온도 완충 효과를 통해 열적 스트레스에 의한 열화 억제 및 수명 연장에 기여할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 그러나, PCM은 열 분포의 불균일성으로 특정 부위에 열 응답이 누적되어 오히려 가속의 원인이 될 수 있다는 역설적인 한계를 지닌다.

이를 보완하고자, 우수한 열전도 특성을 지닌 분말 형태의 xGnP를 도입하고, 에폭시 수지를 결합재로 활용하여 축열 골재 표면에 코팅하는 방식을 제안한다. 이를 통해

xGnP의 정착성 및 분산 안정성을 확보함과 동시에, 시멘트 페이스트와의 계면 결합력 향상을 유도하고자 한다.

2. 재료 및 실험

본 연구에서는 축열 기능을 갖는 다공성 세라믹 골재 (PLB)를 기반으로 하여, PCM이 포함된 골재를 제작하였다. xGnP는 열전도성 향상을 위한 첨가제로 사용되었으며, 이를 에폭시 수지와 혼합하여 골재 표면에 복합 코팅하였다. 코팅 조건은 조성 및 처리 방식에 따라, 그림 1. 과 같이 세 가지로 구분되며, 코팅된 골재는 실온 경화 과정을 거쳐 모르타르 시편 제작에 사용되었다. 이 때, 코팅재의 분산 안정성 및 계면 접착력을 고려하여 에폭시 수지는 저점도의 비경화 상태에서 적용하였다.

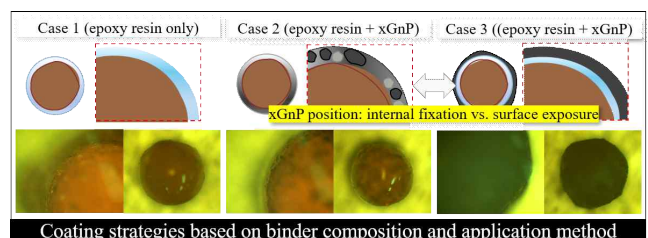


그림1. 코팅 골재 케이스 분류

* 숭실대 대학원 석사과정

** 숭실대 건축학부 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)

개발된 골재 코팅 시스템의 성능 평가를 위해 코팅 여부 및 방식에 따라 총 여섯 종류의 시편이 제작되었으며, 선행 연구와 동일한 함량으로 배합되었다 (Cheon, 2024). PLBM 0은 일반 모래를 적용한 기준 시멘트 모르타르이며, PLBM 60은 비코팅 PLB 골재를, PLBCM 60은 코팅된 PLB 골재(PLBC)를 60% 비율로 대체한 모르타르이다.

동적 열전달 시험은 열전대 및 IR 카메라를 통해 시편 내 온도 분포를 분석하였으며, 압축강도 및 SEM-EDS 기반 파단면 평가를 통해 계면 결합력 및 코팅재 분산 특성을 종합적으로 검토하였다.

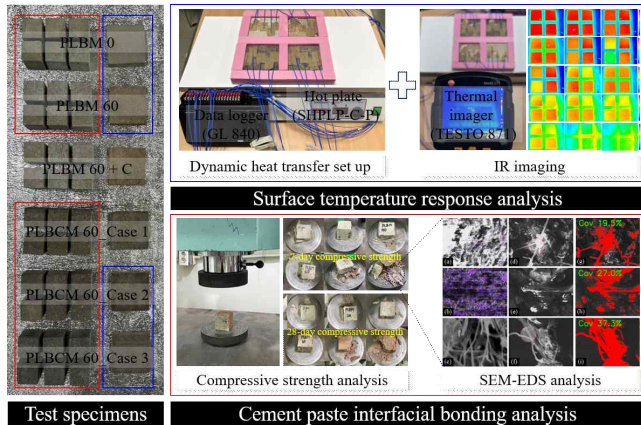


그림2. 시편 종류 및 최적의 골재 코팅 기법 선정 실험 플로우

3. 결과 및 고찰

3.1 시편 내 온도 분포 분석 결과

동적 열전달 시험 결과, PLB 골재가 포함된 모든 시편은 PLBM 0 대비 가열 구간에서 약 20분, 냉각 구간에서 약 80분의 뚜렷한 열 관성 효과가 확인되었다. 특히, PLBCM 60_Case 2 및 Case 3 모두 반복 사이클에서도 열 지연 효과를 유지하였으며, 채널 간 온도 편차가 상대적으로 균일하게 유지되었다. 즉, PCM 단독 적용 시 발생 가능한 국부적 열응력 집중 및 성능 저하의 한계를 극복한 것으로 해석된다. 이는 점도 분석을 통해 확인된 미세적 열전달 강화 메커니즘이 거시적 관점에서도 안정적인 열 응답 특성을 발현함을 입증한다.

반면, xGnP의 부착 방식에 따른 열 응답의 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 이는 열전달 성능에 있어 분산 방식보다 xGnP 적용 유무 자체가 주요 인자임을 시사한다.

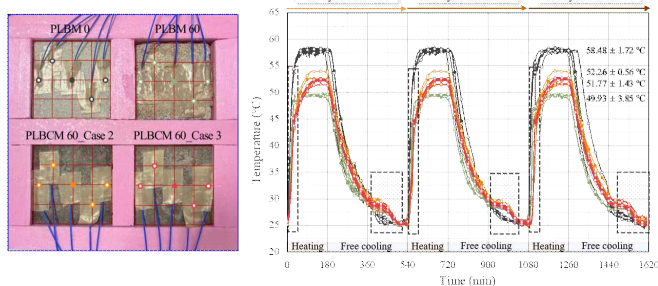


그림2. 동적 열전달 시험 결과

3.2 계면 결합력 및 코팅재 분산 특성 분석 결과

압축강도 분석 결과, xGnP가 혼입된 PLBCM 60_Case 2와 Case 3은 각각 31.22 MPa (피복률 27.0%), 23.22 MPa (피복률 37.3%)로 나타나, 응집도가 높을수록 강도는 저하되는 것으로 확인되었다.

이차 다항 회귀 분석 결과, 에폭시 피복률과 압축강도 간 $R^2 = 0.734$ 의 음의 상관관계가 도출되었으며, 피복률 25% 초과 시 강도 급감 현상이 관찰되었다. 이는 과도한 응집이 계면 결합 품질 저하로 이어짐을 입증한다.

표1. 양생 7일 및 28일 후 압축강도 측정 결과

Mortar specimens	Compressive Strength (MPa)	
	7일	28일
PLBM 0	9.6	14.5
PLBM 60	18.7	26.0
PLBM 60 + C	24.3	26.2
PLBCM 60_Case 1	32.7	35.9
PLBCM 60_Case 2	25.3	31.2
PLBCM 60_Case 3	19.1	23.2

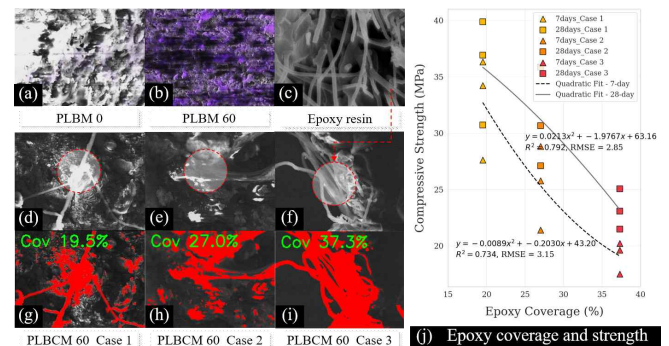


그림3. PCM 및 에폭시 수지 분포 특성 및 압축강도 상관 분석

4. 결론

본 연구에서는 xGnP-에폭시 복합 코팅을 통해 모르타르의 열전도 성능과 계면 결합력 강화를 동시에 도모하고자 하였다. 이를 위해 xGnP를 수지 내부에 고정하거나, 표면에 노출시키는 방식으로 서로 다른 코팅 구조를 설계하였다. 동적 열전달 성능 평가 결과, 두 방식 모두 열전도 경로 형성에는 기여하였으나, 전체 모르타르 내에서의 발현 수준은 유사하게 나타났다. 반면, 압축강도 분석에서는 xGnP가 수지 내부에 균일하게 고정된 구조가 보다 안정적인 계면 결합력을 확보하며, 물리적 성능 향상에 기여하는 것으로 확인되었다. 이 결과는 모르타르의 사용 수명 연장을 위한 최적의 골재 코팅 조건으로서, 내부 고정형 복합 코팅 기법이 더욱 적절한 전략임을 제안한다.

참고문헌

1. 천정현, 정수광. 황토 세라믹 축열 골재의 탄소중립 건축물 적용 가능성 및 에너지 성능 평가, 대한설비공학회 2024년도 하계학술발표대회, 633-636, 2024