

# PCM 혼입 시멘트 모르타르의 잠열 특성에 대한 실험 및 수치해석 연구

Experimental and numerical study on latent heat characteristics of PCM-mixed cement mortar

우현재\*, 고규현\*\*

Hyeon-Jae Woo, Gyu-Hyun Go

\*국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 박사과정, \*\*국립금오공과대학교 건축토목환경공학부 부교수

## 서론

- 범지구적 기후 변화에 따른 극한 한파의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 계절 동토권인 국내에서도 지반의 동결-융해로 인한 구조물의 피해 사례가 증가하고 있다.
- 지반의 동결과 융해는 도로, 철도 노반 및 지반 구조물에 다양한 피해를 초래한다. 동결로 인해 지반이 부풀어 오르거나 균열이 발생할 수 있으며, 이후 융해 과정에서 수리역학적 물성이 변화하면서 강도 감소와 지지력 저하가 일어나 구조물의 안정성을 위협한다.
- 이러한 피해를 예방하기 위해 토목 및 건축 분야에서는 PCM(Phase Change Material)을 활용한 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 대부분 건축 구조물이나 도로 포장에 집중되어 있으며, 옹벽 등과 같은 지반 구조물에 적용된 사례는 드문 편이다.

## 연구방법

- 본 연구에서는 PCM을 활용하여 지반 구조물의 동결-융해 피해를 저감하고 장기적인 안정성을 확보하기 위해 PCM의 잠열 특성을 평가하였다.
- 실내 실험을 통해 PCM이 혼입된 시멘트 모르타르 내부의 온도 변화를 계속하고, PCM의 열적 특성이 온도 변화 저항성에 미치는 영향을 분석하였다.
- 이후 실험 결과를 기반으로 수치해석 모델을 구축하여, PCM 혼입 시멘트 모르타르의 열적 거동을 모사하여 실험 데이터와 비교하였다.

## 실내 실험

- PCM 혼입 시멘트 모르타르의 열적 특성을 평가하기 위하여, 유기계 PCM인 Tetra decane이 균질하게 혼입된 시멘트 모르타르 공시체를 제작하였으며, Tetra decane의 일반적인 물성은 Table.1 와 같다.
- 각각의 공시체는 PCM의 혼입률을 다르게 하여 제작하였으며, 각 공시체의 중량 혼입비는 Table.2을 따른다.
- 공시체 내부에는 열전대 (Thermo couple)을 10cm 단위로 설치하여 공시체 내부의 온도변화를 계속하였다.

Table1. Tetra decane의 물성

분자식	상변화점	열전도도	밀도	비열	잠열
CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> CH <sub>3</sub>	4.5℃	0.24 W/(m*K)	154 Kg/m <sup>3</sup>	1800 J/(Kg*K)	170000 J/Kg

Table2. 각 공시체의 PCM 혼입률

공시체	PCM 혼입률	PCM (Kg)	시멘트 (Kg)	모래 (Kg)	물 (Kg)
No.1	0%	0	2.2	4.4	1.8
No.2	23%	0.43	1.85	3.7	1.3
No.3	45%	0.68	1.5	3	1.3



그림1. PCM 혼입 시멘트 모르타르 공시체와 동결 챔버

## 수치해석

- 본 연구에서는 PCM 혼입 시멘트 모르타르 공시체를 시멘트 모르타르와 PCM의 혼합물로 간주하며, 각 물질의 구성은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\theta_{pcm,pre} + \theta_{pcm,post} + \theta_{mortar} = 1 \quad (1)$$

$$\theta_{pcm,pre} + \theta_{pcm,post} = n \quad (2)$$

$$\theta_{pcm,pre} = \omega * \frac{\rho_{mortar}}{\rho_{pre}} * (1 - n) \quad (3)$$

- 여기서,  $\theta_{pcm,pre}$  는 상변화 이전의 PCM의 체적률을 나타내며,  $\theta_{pcm,post}$  는 상변화 이후의 PCM의 체적률을 의미한다.  $\omega$  는 상변화 구간에서 온도에 따른 상변화율을 나타내는 함수로, 물질의 상변화시 발생하는 비열 및 잠열량에 관련한다.

- PCM 혼입 시멘트 모르타르 공시체 내부에서의 Eq.4의 열전달은 에너지 보존 방정식을 따르며, PCM의 잠열 특성 및 상변화에 따른 비열 증가를 반영한다.

$$C_a \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T) \quad (4)$$

$$C_a = C - L\rho_{pcm,post} \frac{\partial \theta_{pcm,post}}{\partial T} \quad (5)$$

- $C_a$  는 PCM 혼입 시멘트 모르타르의 겉보기 체적 열용량(Apparent volumetric heat capacity), 시멘트 모르타르의 체적 열용량(Volumetric heat capacity)과 상변화에 의한 비열증가분을 포함한다.  $L$  은 PCM의 잠열,  $\lambda_{eff}$  는 PCM 혼입 시멘트 모르타르의 유효 열전도도이다.

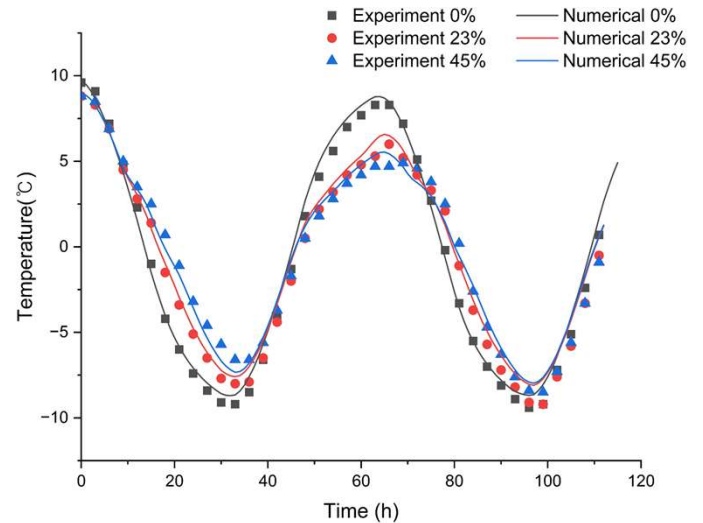


그림2. 실험 데이터와 수치해석 모델의 비교 및 검증 결과

## 결론

- 본 연구는 실험을 통해 PCM 혼입 시멘트 모르타르의 잠열 특성을 평가하였으며, PCM의 열적 특성으로 인해 발생하는 온도 변화 저항성을 고려한 수치해석 모델을 구축하여 계속된 실험 데이터와 비교, 검증하였다.
- Tetra decane의 상변화점인 4.5℃ 인근에서 PCM 혼입 시멘트 모르타르의 온도 변화가 지연되었고, PCM의 혼입률에 따른 온도 변화 진폭 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 경향은 동일 조건에서 수행된 수치해석결과에서도 동일하게 확인되었다.

## 감사의 글

- 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1C1C1006507)로 이에 감사드립니다.