

탄소재료 적용 방법에 따른 PCM 골재 기반 모르타르의 열적 특성 분석

Thermal characterization of PCM aggregate-based mortars based on carbon material application methods

○김 영 옥*
Young Uk Kim

정 재 혁**
Jae Hyuck Jung

김 수 민***
Sumin Kim

Abstract

Experiments were conducted to improve the thermal performance of PCM-based mortar using carbon materials. To apply the carbon materials, two methods were used. dispersing the carbon materials sufficiently in liquid PCM and then impregnating them into porous aggregates, and mixing the carbon materials with mixing water to prepare specimens. Considering the heat absorption and release behavior of the mortar, the experimental results showed that specimens using carbon/PCM aggregates exhibited excellent temperature retardation, making them more advantageous for indoor temperature control. The CNT_S specimen, characterized by its rapid heat absorption and high maximum temperature, is particularly effective for indoor applications.

키워드 : 상변화물질, 탄소재료, 모르타르

Keywords : Phase change material, Carbon material, Mortar

1. 서론

2050년을 기준으로 우리나라를 포함한 세계 각국에서 탄소중립을 달성하고자 하는 노력이 이루어지고 있으며, 전세계 에너지 배출량의 약 35%를 차지하는 건물에서의 에너지 절감은 필수적이다. 국내의 경우 건물외피의 성능은 지속적으로 강화되어 높은 수준의 외피단열 기준을 가지고 있는 실정이다. 건물에너지를 줄이는 방법 중 하나는 상변화물질(Phase change material, PCM)을 통한 열에너지 저장 시스템을 사용하는 것이다. 상변화물질은 높은 잠열량의 특성을 가진 물질로 PCM을 건축물에 적용할 경우 낮에는 상을 변화시켜 열을 흡수하고 밤에는 발열과정으로 열을 방출하여 실내 온도진폭을 낮추고 최고온도를 이 동시켜 실내 재실자의 열적쾌적성을 증가시킬 수 있는 효과적인 방법으로 간주되고 있다. 시멘트질 건축자재는 현대건축에서 구조적, 비구조적으로 널리 사용되고 있는 재료로 실내측에서는 장식재, 마감 등에 사용되고 있다. 본 연구에서는 건물에너지 부하를 줄이기 위해 높은 잠열특성을 가지고 있는 PCM을 건물 내장용 축열 모르타르에 적용하였으며, PCM 열전달 성능을 증진시키기 위해 높은

열확산 성능을 가지고 있는 활성탄 (activated carbon, AC), carbon nanotube (CNT), exfoliated graphite nano-platelets (xGnP), and graphene의 4가지 탄소재료를 사용하여 열적특성을 분석하였다.

2. 실험계획

실험에 사용된 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시편제작에 사용된 PCM은 상안정화를 위해 다공질로 형성되어있는 인공경량골재에 진공함침되어 사용되었다. PCM은 상변화온도 28℃, 잠열량 240J/g 수준의 *n*-Octadecane을 사용하였다. 시편의 배합은 물, 시멘트, 골재를 0.5 : 1 : 2.5의 중량비로 혼합하였다. 배합은 PCM 및 탄소재료가 사용되지 않은 Plain 시편, PCM함침 경량골재가 사용된 PLS시편(PCM-lightweight sand)이 제조되었으며, 각각의 탄소재료를 사용한 AC, CNT, xGnP, Graphene 시편을 제조하였다. 이때 탄소재료의 혼합방법에 따른 성능을 검토하기 위해 탄소재료를 PCM에 분산시켜 골재에 함께 함침시키는 방법 및 탄소재료를 배합수에 분산시켜 혼합하는 방법의 두가지 방법으로 실험을 진행하였다. 탄소재료가 PCM골재에 적용된 시편은 S, 탄소재료가 배합수에 적용된 시편은 W로 명명하였다. 각 탄소재료는 PCM 중량의 0.5% 비율로 사용되었으며, 탄소재료의 분산은 초음파 분산기를 사용하여 20분간 충분히 분산시킨 후 실험을 진행하였다. 제조된 시편은 재령 28일간 수중양생이 진행되었으며, 열적성능을 평가하기 위한 열전도율, DSC, 동적열전달 시험이 진행되었다. 동적열전달시험

* 연세대학교 건축공학과 박사후연구원

** 연세대학교 건축공학과 석사과정

*** 연세대학교 건축공학과 교수

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

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2025-02263517).

표1. PCM 및 탄소재료 적용 모르타르의 기계적, 열적 특성 시험 결과

Mix	Unit weight (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Latent heat (J/g)	Thermal conductivity (W/m · K)	Dynamic heat transfer	
					Time-lag (h)	Peak temperature (℃)
Plain	2,177	34.6	-	0.8487	-	-
PLS	1,861	21.47	26.87	0.6886	3.92	+2.1
AC_S	1,725	21.41	20.03	0.8029	3.3	-2.5
CNT_S	1,714	19.42	22.83	0.8286	3.3	-0.5
xGnP_S	1,765	22.41	22.43	0.7440	3.3	-3
Graphene_S	1,689	20.91	18.22	0.6902	3.3	-2.4
AC_W	1,745	15.36	26.78	0.8228	2.1	-2
CNT_W	1,687	16.84	25.98	0.8010	2.1	-1.2
xGnP_W	1,698	16.47	26.11	0.7543	2.1	-2.2
Graphene_W	1,716	14.21	26.45	0.8001	2.1	-1.3

은 20 ℃ 온도의 실험실에서 가열필름을 사용하여 50 ℃ 온도에서 6시간 가열, 6시간 자유냉각 과정을 진행하여 온도 데이터를 측정하였으며, 온도지연효과 및 피크온도 특성을 분석하였다.

3. 실험결과

PCM 및 탄소재료를 사용한 축열 모르타르의 경우 Plain 시편보다 다소 낮은 압축강도를 나타내었다. 탄소재료를 사용한 시편의 경우 골재에 적용한 시편에서 배합수에 적용한 시편보다 비교적 높은 강도수준을 나타내었다. 잠열량의 경우 PCM골재에 탄소재료를 적용한 시편에서 다소 낮은 잠열량을 나타내고 있다. 이는 DSC 시험에서 골재에 적용된 탄소재료로 인해 비교적 낮은 잠열량 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 열전도율 시험결과 PCM을 사용한 PLS시편에서 0.6886 W/m · K 수준의 열전도율을 나타내었다. 골재에 탄소재료를 적용한 시편의 경우 0.6902 ~ 0.8286 W/m · K 수준을 보이고 있으며, 배합수에 탄소재료를 적용한 시편에서는 0.7543 ~ 0.8228 W/m · K 수준으로 열확산율이 높은 탄소재료를 사용함에 따라 PCM만을 사용한 시편보다 높은 열전도율을 나타내었다. 열전달 시험의 경우 PLS 시편에서 3.92 시간 정도의 열지연효과를 나타내었으며, 탄소재료를 골재에 적용한 시편에서는 3.3시간, 탄소재료를 배합수에 적용한 경우 2.1 시간의 열지연효과를 나타내었다. 또한 탄소재료를 적용할 경우에는 모르타르 표면의 피크온도가 감소되는 효과를 나타내었다. PCM골재에 탄소재료를 적용한 시편의 경우 비교적 우수한 강도를 나타내고 있으며 피크온도 저감 및 우수한 열지연효과를 보이고 있다. 특히 CNT 시편의 경우 사용된 탄소재료중 가장 높은 열확산율을 가지고 있으며, 혼입 시 배합수보다 PCM골재에 같이 적용되는 것이 적합한 것으로 나타났다. 이러한 CNT_S 시편의 피크온도 저감 특성은 실내 내장재로 적용되는 것이 적합하며 빠른 흡열 및 방열반응은 바닥난방의 효율을 증진시킬 수 있을것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 상변화물질(PCM)을 진공함침한 경량골재와 탄소계 첨가제(AC, CNT, xGnP, Graphene)를 적용한 축열 모르타르의 열적, 기계적 성능을 분석하였다. 실험결과, 탄소재료를 PCM 골재에 적용한 경우 20 MPa의 소요의 압축강도를 나타내었으며, 특히 CNT를 PCM 골재와 함께 적용한 CNT_S 시편에서 가장 우수한 피크온도 저감과 열지연 효과가 나타났다. 탄소재료의 적용에 따른 효과는 배합수에 분산한 경우보다 PCM 골재에 직접 적용한 경우가 기계적, 열적 성능 모두에서 우수하한 것으로 나타났다. 이는 탄소재료가 시멘트 매트릭스에 적용된 것 보다 PCM과 같이 적용되었을 경우 열저장, 방출 과정에서 더 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 판단된다. 탄소재료 및 PCM 적용 모르타르의 경우 높은 열전도율 특성 및 빠른 흡열반응을 기반으로 바닥난방 모르타르에 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Akarsh, P. K., Shrinidhi, D., Marathe, S., & Bhat, A. K. (2022). Graphene oxide as nano-material in developing sustainable concrete – A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 60.
2. Atinafu, D. G., Yun, B. Y., Wi, S., Kang, Y., & Kim, S. (2021). A comparative analysis of biochar, activated carbon, expanded graphite, and multi-walled carbon nanotubes with respect to PCM loading and energy-storage capacities. *Environmental Research*.
3. Djamaï, Z. I., Salvatore, F., Si Larbi, A., Cai, G., & El Mankibi, M. (2019). Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars. *Cement and Concrete Research*.