

2025년 추계학술발표대회 : 일반부문

마이크로캡슐화 상변화물질을 적용한 고성능 바닥난방 시스템의 열성능 및 에너지 효율 평가

Thermal Performance Evaluation and Building Energy Saving Effect of high performance floor heating system using micro-encapsulated PCM

○박건우*

Keonwoo Park

한상우**

Sangwoo Han

위승환***

Seunghwan Wi

Abstract

To enhance building energy efficiency, this study investigated the incorporation of microencapsulated phase change materials (MPCM 31 and 44) into cement-based mortar. MPCMs were added at 3-15 wt.%, and their thermal and mechanical properties were evaluated. DSC, TGA, SEM, FT-IR, and dynamic thermal tests were conducted. MPCM 31 reduced peak surface temperature by 2.74°C and delayed heat transfer by 4.62 hours. Compressive strength and workability remained viable up to 3 wt.%. The results confirm the potential of MPCM-integrated mortars for energy-efficient floor heating applications.

키워드 : 상변화물질, 건물 에너지 효율, 바닥난방시스템

Keywords : Phase Change Materials, Building Energy Efficiency, Floor Heating System

1. 서론

국내 주거 건축물은 에너지 사용 측면에서 난방 비중이 매우 높으며, 특히 바닥난방 시스템은 아파트 및 단독주택에서 가장 널리 사용되는 난방 방식으로 자리잡고 있다. 바닥난방은 복사열을 활용하여 쾌적한 실내 환경을 구현할 수 있으나, 구조체의 물리적 특성에 따라 에너지 효율성이 크게 좌우된다. 특히, 모르타르와 경량 기포 콘크리트로 구성된 기존 바닥 구조는 시공성이 우수하고 경제적이지만, 낮은 열용량과 열저항으로 인해 축열 성능이 부족하며, 난방 중 빠른 열 손실과 온도 편차 발생 등으로 에너지 낭비가 발생하는 문제가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 바닥 구조체에 열에너지 저장 기능을 부여하는 고기능성 소재의 적용이 활발히 검토되고 있다. 그 중 상변화물질 (Phase Change Material; PCM)은 특정 온도 구간에서 잠열을 흡수하거나 방출함으로써, 실내 온도 변화를 완화하고 에너지 소비를 절감할 수 있는 효과적인 수단으로 주목받고 있다. 그러나

기존 PCM은 액상 상태에서 누출 가능성이 높고, 시멘트 계열 재료와의 물리적 결합력 부족, 기계적 강도 저하 등의 문제가 동반되어 구조체 적용에 한계가 있었다.

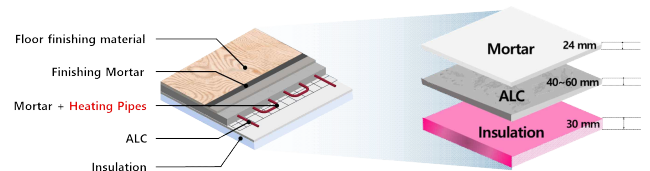


그림1. 국내 바닥난방 시스템 구조

이를 보완하기 위한 기술로, 마이크로캡슐화 상변화물질 (Microencapsulated PCM; MPCM)이 개발되어, PCM을 고분자 외피로 감싸 물리적 안정성과 내구성을 확보함과 동시에, 모르타르 등 시멘트 기반 재료 내 균일한 분산이 가능해졌다. 특히 MPCM은 기존 시공방식과의 호환성이 우수하고, 건식 바닥난방, 프리캐스트 바닥재 등 다양한 건설 기술과의 통합 가능성을 제시함으로써, 상용화 가능성도 높다고 판단된다.

선행 연구에서는 MPCM을 적용한 석고보드, 벽체, 콘크리트의 열적 성능 향상이 검증되었고, 일부는 바닥 구조 적용 가능성도 제시한 바 있다. 그러나 여전히 대부분의 연구는 정적 열전달 실험에 국한되어 있으며, 실제 바닥난방 작동 조건을 반영한 동적 열전달 분석이나, 열사이클 반복 조건에서의 장기적 성능 안정성 평가는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 MPCM을 적용한 모르타르 복합재를 바

* 서울과학기술대학교 건축학부 석사과정

** 서울과학기술대학교 안전공학과 학사과정

*** 서울과학기술대학교 건축학부 조교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Architecture,
Seoul National University of Science and Technology,
shwi@seoultech.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1C1C2010049)

탕으로, 국내에서 널리 활용되는 바닥난방 시스템의 성능 개선 가능성을 검토하고자 한다. 구체적으로는, 실제 바닥난방 조건을 반영한 동적 열전달 실험, 반복 열사이클 환경에서의 장기 안정성, 열전도율, 열용량, 압축강도, 시공성 등을 통합적으로 분석하여, 기술적 타당성과 실용성을 평가하고자 한다.

2. 연구의 방법

본 연구에서는 바닥난방 시스템의 에너지 효율을 향상시키기 위한 고성능 모르타르 복합재 개발을 목적으로 MPCM을 시멘트 모르타르에 혼합하여 열적 및 기계적 성능을 실험적으로 분석하였다. 실험에 사용된 MPCM은 상변화 온도와 잠열 특성이 상이한 두 가지 제품 (MPCM 31, MPCM 44)으로 구성되며, 이를 질량비 기준으로 3%, 6%, 9%, 12%, 15%로 각각 혼합하여 총 11종의 실험 시편을 제작하였다. 기준 시편 (Reference)은 MPCM을 혼합하지 않은 일반 모르타르로 구성되며, 모든 시편은 시방서 기준에 따라 150 mm × 150 mm × 24 mm 크기의 평판 형태로 제작되었다.

각 시편의 열적 특성 및 기계적 성능을 평가하기 위해 다양한 분석 장비 및 실험기법을 활용하였다. 열적 특성 분석을 위해 시차주사열량계 (Differential Scanning Calorimetry; DSC)를 이용하여 상변화 온도 및 잠열을 측정하였고, 열중량 분석기 (Thermogravimetric Analyzer; TGA)를 통해 열적 분해 거동을 분석하였다. 열적 안정성은 100~300회의 반복 열사이클 후 DSC로 분석하였다. 미세구조 분석은 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope; SEM)을 사용하였으며, 화학 결합 상태는 적외선 분광분석기 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR)를 통해 확인하였다.

열전달 특성은 항온수조를 활용한 동적 열전달 실험을 통해 시편의 피크온도 저감 효과 및 시간지연 효과를 정량적으로 평가하였다. 그림2는 동적 열전달 분석을 위한 실험 프로세스이다. 추가로 열전도율은 Heat Flow Meter (HFM)를 통해 25°C 및 65°C 조건에서 측정하였다. 기계적 성능 평가는 모르타르의 압축강도와 유동성을 측정하였다.

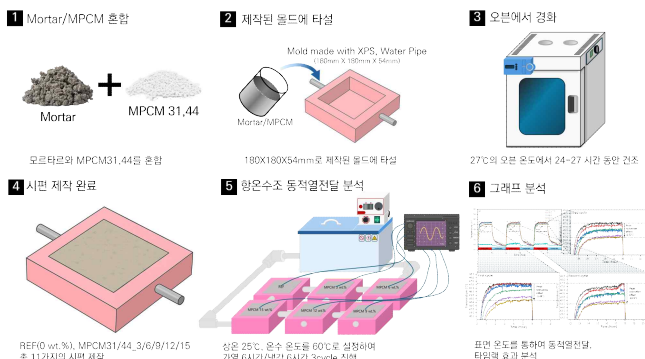


그림2. 동적 열전달 분석을 위한 실험 프로세스

3. 결과 및 분석

3.1 MPCM의 열적특성 분석

그림 3은 MPCM31 (M31) 및 MPCM44 (M44)가 혼입된 모르타르의 DSC 분석 결과이다. 그림3 (a)는 다양한 함량의 M31이 포함된 모르타르 시편에 대한 DSC 분석 결과이다. 기준 모르타르에서는 어떠한 상변화 피크도 관찰되지 않아, PCM이 없는 모르타르는 열 저장 및 방출 기능이 없음을 확인시켜 준다. 반면, M31_15는 명확한 상변화 피크를 나타내며, 발열 시 13.04 J/g, 흡열 시 14.33 J/g의 잠열 값을 기록하였다. 이는 M31이 모르타르에 열 저장 및 방출 기능을 부여하여, 바닥난방 시스템에서 효과적인 열 제어 소재로 기능함을 보여준다. 그림 3 (b)는 다양한 농도의 M44가 포함된 모르타르 시편의 DSC 분석 결과를 보여준다. M44_15 시편은 발열 과정에서 16.47 J/g, 흡열 과정에서 15.52 J/g의 잠열을 기록하였으며, 상변화 온도는 39.06°C 및 47.02°C로 측정되었다.

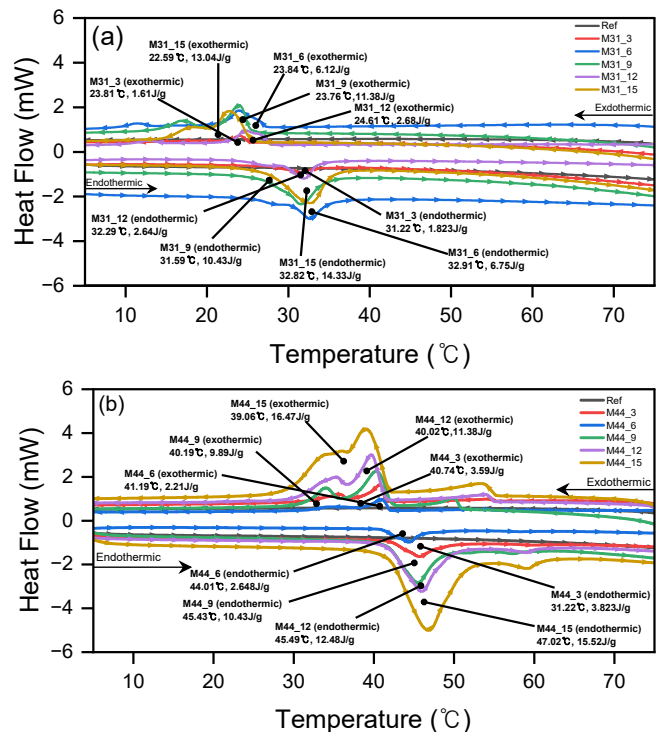


그림3. (a) MPCM31/Mortar 시편과 (b) MPCM 44/Mortar 시편의 DSC 분석 결과

3.2 MPCM의 열중량 분석

그림4는 M31 및 M44가 혼입된 모르타르 시편에 대한 TGA/DTG 결과를 나타낸 것이다. 그림 4 (a)의 분석 결과에 따르면, MPCM31을 3 wt.% 혼입한 M31_3 시편은 300°C 이상에서 약 3.7%의 중량 손실을 기록하였으며, MPCM31 함량이 증가함에 따라 중량 감소율도 비례적으로 증가하였다. 이는 모르타르 내에 혼입된 M31의 체적 비율 증가에 기인한 것으로 판단된다. 특히, 실제 혼입된 MPCM 비율과 열분해에 따른 중량 손실 비율이 유사하게 나타남으로써, 혼입량과 열분해 반응 사이의 정비례 관계

가 입증되었다.

그림 4 (b)에서는 MPCM44를 6 wt.% 혼입한 M44_6 시편에서 약 5%의 중량 손실이 관찰되었고, 15 wt.%를 혼입한 M44_15 시편에서는 약 14%의 중량 손실이 확인되었다. 이는 각 혼입비율과 유사한 결과이다. 또한, 두 MPCM 모두 열분해 이후에도 일정량의 잔류 물질이 남아 있는 것으로 확인되었으며, 이는 캡슐화된 외피가 높은 열적 내구성을 갖고 있음을 나타낸다.

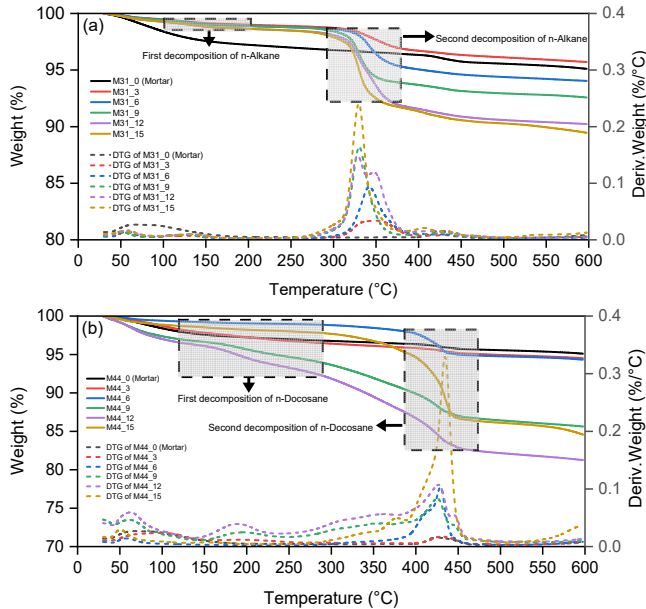


그림 4. (a) MPCM31/Mortar 시편과 (b) MPCM 44/Mortar 시편의 TGA 분석 결과

3.3 MPCM의 열전도율 분석

MPCM을 혼입한 모르타르의 단일 성능을 평가하기 위해 열전도율 분석을 진행하였다. 그림 5 (a)에 따르면, REF (기준 시편)의 열전도율은 25°C에서 0.256 W/m·K, 65°C에서 0.275 W/m·K로 측정되었다. MPCM31이 혼입된 경우, MPCM의 함량이 증가함에 따라 열전도율은 점진적으로 감소하였다. M31_3 시편은 기준 시편 대비 약 3.5% 감소하였으며, M31_6과 M31_9 시편은 각각 8.8%, 13.9%의 감소율을 나타냈다. 가장 낮은 열전도율은 M31_15 시편에서 확인되었으며, 65°C에서 0.196 W/m·K로 측정되어 기준 시편 대비 26.8% 감소하였다. 이는 MPCM의 본래 낮은 열전도율과 모르타르 매트릭스 내에 형성되는 공기층이 복합적으로 작용하여 열전달 경로를 차단하기 때문으로 해석된다.

그림 5 (b)에서 MPCM44를 혼입한 경우 유사한 경향이 관찰되었다. 기준 시편의 열전도율은 M31_0과 동일하였으나, MPCM44의 함량이 증가할수록 열전도율은 감소하였다. M44_3 시편은 7.7%, M44_6과 M44_9는 각각 15.7% 및 16.0% 감소하였으며, M44_15는 33.1%의 가장 큰 감소폭을 보여주었다. 이는 MPCM 입자가 단열재 역할을 하며, 복합재료 내의 열전도 경로를 효과적으로 차단하기 때문으로 해석된다.

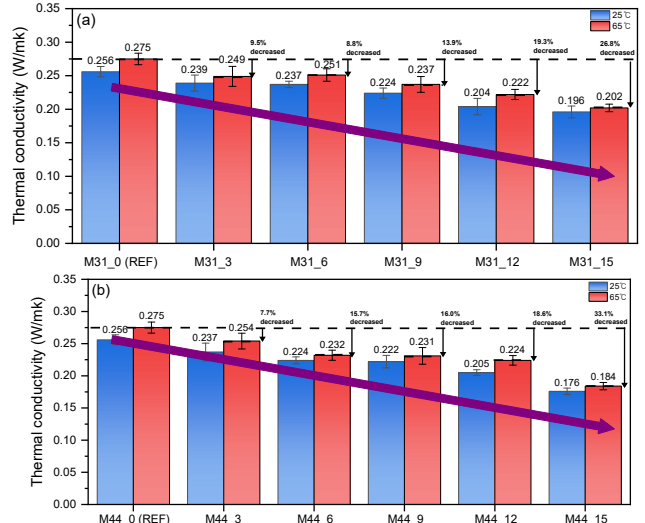
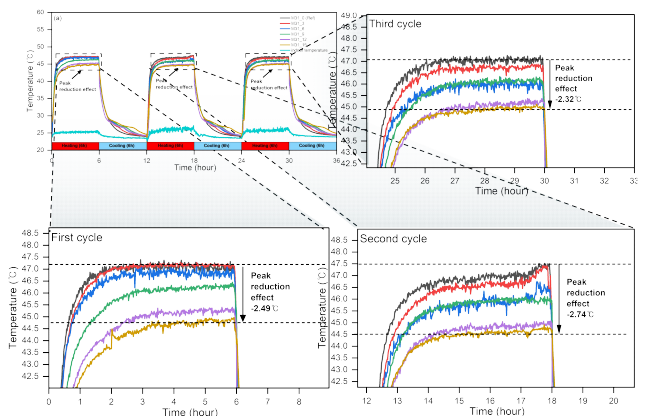


그림 5. (a) MPCM31/Mortar 시편과 (b) MPCM 44/Mortar 시편의 열전도율 분석 결과

3.4 MPCM/Mortar의 동적열전달 분석

그림 6 (a)에 제시된 MPCM31 모르타르의 동적 열전달 실험 결과를 보면, MPCM이 혼입된 시편에서 명확한 피크 온도 저감 효과가 관찰되었다. 1차 사이클에서 -2.49°C, 2차에서 -2.74°C, 3차에서 -2.32°C의 온도 저감이 나타났으며, 이는 MPCM의 흡열 상변화 과정이 급격한 온도 상승을 완화시키기 때문이다. 특히 MPCM 혼입량이 증가할수록 피크 온도 저감 효과가 더욱 뚜렷하게 나타나, 급격한 온도 상승을 방지하고 보다 균일한 열 환경 조성에 기여함을 확인할 수 있었다.

그림 6 (b)에 따르면 MPCM31 모르타르는 MPCM 혼입량이 증가함에 따라 시간 지연 효과가 점차 뚜렷하게 나타났다. 각 사이클의 시간 지연은 1차 4.62시간, 2차 4.60시간, 3차 4.45시간으로 측정되었다. 이는 MPCM이 가열 과정에서 효과적으로 열을 저장하고, 열원 차단 이후 이를 서서히 방출함으로써 실내 온도 안정화에 기여한다는 것을 의미한다. 따라서 MPCM31이 혼입된 모르타르는 우수한 열 저장 및 방출 성능을 보이며, 에너지 효율 향상과 실내 열 환경 안정화에 적합한 바닥난방 재료임을 확인할 수 있다.



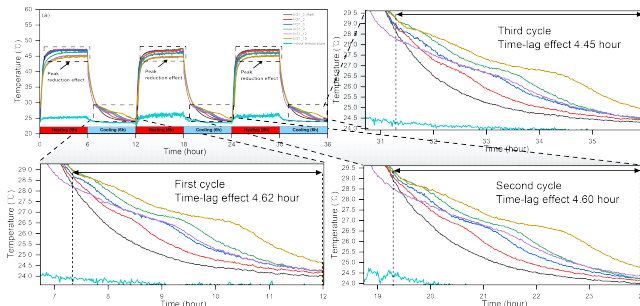


그림6. (a) MPCM31/Mortar 시편의 피크온도 저감 분석 결과,
(b) MPCM 31/Mortar 시편의 타임랙 효과 분석 결과

3.5 MPCM/Mortar의 압축강도 분석

모르타르의 기계적 거동을 평가하기 위해 ASTM C109 기준에 따라 압축강도를 측정하였으며, 결과는 그림 7에 제시하였다. M31 계열의 경우, 기준 시편인 M31_0의 압축강도는 27.1 MPa였으며, MPCM이 3 wt.% 첨가된 M31_3은 28.5 MPa로 소폭 증가하였다. 가장 높은 압축강도는 6 wt.%가 첨가된 M31_6에서 31.1 MPa로 나타났으며, 이는 MPCM 입자가 모르타르 내 미세공극을 효과적으로 충전하여 재료의 밀도와 구조적 연속성을 향상시킨 결과로 판단된다.

유사한 경향은 M44 계열에서도 관찰되었다. 기준 시편인 M44_0의 압축강도는 27.1 MPa였으며, M44_3에서는 29.4 MPa로 증가하였다. 가장 높은 값은 M44_6에서 측정되었으며, 33.7 MPa로 나타났다. 이는 M31과 마찬가지로 MPCM이 미세공극을 충전하며 모르타르 매트릭스의 밀도 및 기계적 성능을 향상시킨 것으로 해석된다.

하지만 MPCM 함량이 9 wt.%를 초과할 경우 압축강도는 다시 감소하였고, M44_12와 M44_15는 각각 16.1 MPa 및 12.5 MPa의 압축강도를 나타내었다. ASTM C109 기준에 따르면 모르타르의 최소 압축강도는 14.9 MPa 이상이어야 하며, 이를 기준으로 평가한 결과 M31_15를 제외한 모든 시편이 해당 기준을 만족하였다. 특히, 3 wt.% 및 6 wt.% 수준의 혼입률은 압축강도 및 시공성 측면 모두에서 우수한 성능을 나타내어 실용적 적용에 적합한 범위로 판단된다.

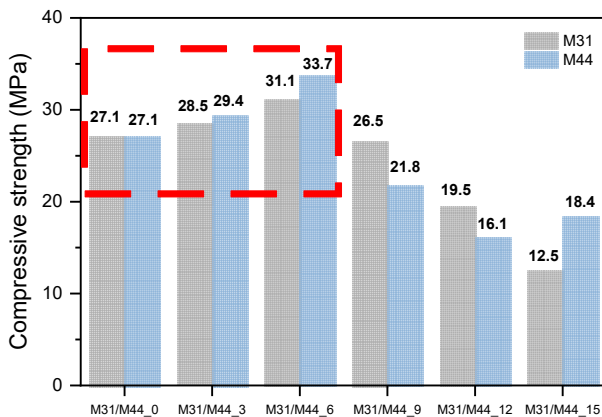


그림7. MPCM/Mortar의 압축강도 분석 결과

4. 결론

본 연구에서는 건물의 난방에너지 소비를 절감하고, 고효율 바닥난방 시스템에 캡슐형 PCM (MPCM)을 적용하여 얻은 TES 성능 및 에너지 사용량 절감 효과를 분석하는 것을 목표로 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) DSC 분석 결과, MPCM의 함량에 비례하여 잠열이 증가한 것을 나타냈다.

(2) TGA 분석 결과, 대부분의 건축물 온도범위인 150°C 이하에서 열안정성이 유지 되었고, 300-475°C에서 MPCM이 산화한 것으로 분석된다.

(3) FT-IR 분석결과, 동일한 피크의 관찰로 인하여 화학적 결합은 안정하다는 것으로 분석된다.

(4) 열전도율 분석 결과, MPCM이 혼입된 모르타르는 함량이 증가할수록 열전도율이 감소하는 경향을 보였으며, 특히 15 wt.% 혼입 시 최대 약 33.1%까지 열전도율이 감소하는 단일 성능 향상이 확인되었다.

(5) Thermal cycle 분석 결과, MPCM이 혼입된 모르타르는 300회의 열 사이클 후에도 상변화 온도와 잠열 값의 변화가 5% 이내로 유지되며, 열적 안정성이 우수하고 반복 사용에도 성능 저하가 거의 없는 것으로 나타났다.

(6) 동적 열전달 분석 결과, MPCM이 혼입된 모르타르의 동적 열전달 실험 결과, MPCM 31은 최대 2.74°C의 온도 저감과 4.62시간의 시간 지연 효과를 보였으며, MPCM 44는 높은 열저장 능력을 나타냈지만 시간 지연 효과는 상대적으로 미미하였다.

(7) SEM 분석 결과, 모르타르 내 MPCM이 균일하게 분산되어 있으며, 저함량일수록 입자 간 결합이 치밀하고 공극이 적어 구조적 밀도가 우수한 것으로 확인되었다.

(8) 압축강도 분석 결과, MPCM 31 및 MPCM 44 모두 3~6 wt.% 혼입 시 강도가 증가하여 최적의 성능을 보였으며, 9 wt.% 초과 시 강도 저하가 발생하였다.

(9) 유동성 분석 결과, 3~6 wt.% 수준에서는 플로우 값이 증가하거나 유지되어 작업성이 양호했으나, 9 wt.% 이상 혼입 시 점도 증가로 인해 유동성이 급격히 저하되었다.

참고문헌

1. Wi, S., Yang, S., Yun, B., Kim, S., 2021, Exterior insulation finishing system using cementitious plaster/microencapsulated phase change material for improving the building thermal storage performance, Construction and Building Materials, 299, 123932.
2. Yun, B., Yang, S., Cho h., Wi, S., Kim, S., 2019, Thermal Storage Effect Analysis of Floor Heating Systems Using Latent Heat Storage Sheets, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology(2019) 6:799-807.
3. Wi, S., Park, J.H., Kim, Y.U., Kim, S., 2021, Evaluation of environmental impact on the formaldehyde emission and flame-retardant performance of thermal insulation materials, Journal of Hazardous Materials, 2021, 402, 123463