

상변화물질을 이용한 바닥난방시스템의 축열성능 분석

Analysis of the Thermal Storage Performance of Radiant Floor Heating System Using Phase change material

김성은(Seong Eun Kim), 최성호(Seong Ho Choi), 박진철(Jin Chul Park)[†]

중앙대학교 박사과정, 중앙대학교 석사과정, 중앙대학교 건축학부 교수

Ph.D. Course, Graduate School, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

M.S Course, Graduate School, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea

Abstract This study is a basic step for developing a floor heating system using phase change material(PCM) with the high thermal performance, and aims to analyze the thermal performance of PCM floor heating system through a Mock-up test. The Mock-up Room was consisted of two rooms, each with the existing hot water floor heating system (Room1) and PCM floor heating system (Room2). And the temperature changes of the two rooms were compared after the boiler shutdown. The result of the test, room1 took 230 minutes for the floor surface temperature to drop from 35 °C to 30 °C, while room2 took 570 minutes. In other words, the time-lag of room 2 was about 2.5 times longer due to the thermal storage effect of PCM.. The floor surface temperature was 1.6 °C to 4.6 °C higher than room1 in room2. And when the four-hour boiler on-off schedule was applied repeatedly, the floor surface temperature of room 2 was higher than room 1 and the maximum difference was 1.5 degrees. Also, the room temperature difference was 0.1 degrees. This means that room 2 has a higher floor surface temperature under the same indoor temperature conditions. This study is a basic performance review for PCM for future research, and further studies will be conducted on the proper application location of PCM and the schedule of heating operation, energy saving and the improvement of indoor comfort through the expected mean temperature reduction (PMV).

Key words Phase change material(상변화물질), Radiant floor heating system(바닥 복사 난방 시스템), Thermal storage performance(축열성능), Time-lag(타임랙)

[†] Corresponding author, E-mail: jincpark@cau.ac.kr

1. 서론

공동주택에 주로 적용되는 기존의 난방시스템은 콘크리트 기반의 온수바닥난방 방식으로 균등한 실내온도 분포와 높은 쾌감도를 갖는다. 그러나 최근 제로에너지 주택이 공급되면서 고단열 및 고기밀성능으로 인해 적정 실내 온도가 유지되면서, 난방을 과거보다 덜 하게 됨으로써 표면온도가 낮아져 차가운 바닥으로 인해 불쾌적할 수 있다는 문제점이 제기되고 있다. 한국건설기술연구원⁽¹⁾의 연구에서도 이와 같은 점을 지적하였으며, 겨울철 실내 열환경을 살펴보면 실내 발열, 일사 등의 영향으로 실내온도는 안정적이거나 실내온도와 바닥온도가 매우 근접하는 결과가 나타나 고단열주택에서 바닥표면온도를 감안한 설계 대안이 검토될 필요가 있다고 하였다.

따라서 본 연구는 기존 바닥복사난방시스템에 축열재료인 PCM(Phase change material)을 적용하여 축열성능 및 쾌적도를 향상시키기 위한 기초연구로서 PCM 적용 바닥난방시스템의 축열성능을 분석하였다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다. Mock-up Room에서 기존 및 PCM을 적용한 바닥복사난방시스템에 대한 열용량에 따른 온도지연현상인 타임랙(Time-lag)의 비교를 통한 축열성능과 난방운영스케줄을 고려한 바닥표면온도와 실내공기온도 변화를 분석하였다.

3. Mock-up 구성 및 개요

Mock-up Room은 실내 바닥면적 3.5m^2 , 천정높이 2.15m 인 같은 크기의 실로 Fig. 1과 같이 구성하였다. 실1은 온수난방시스템, 실2는 PCM 바닥난방시스템으로 구성하였으며, 실1에 적용된 기존 온수바닥난방시스템의 구조는 Fig. 2와 같이 국토교통부의 ‘표준바닥구조 1-I’(콘크리트 슬래브 210mm - 완충재 20mm - 경량기포콘크리트 40mm - 모르타르 40mm)에 따른다. 또한 실2에 적용된 PCM 바닥난방시스템은 선행연구⁽²⁾⁽³⁾를 통해 제안된 방식으로 기존의 온수바닥난방시스템의 구조에서 온수배관 하부에만 경량기포콘크리트 10mm 를 PCM으로 대체 삽입한 방식이다. 각 실 사이에는 외부와의 열적 교류를 최소화하기 위해 200mm 단열층을 설치하였다.

적용된 PCM 총 20kg 으로 한시간당 축열량이 70Wh/kg 인 n-Paraffin 계열 44°C 인 제품이다. 실험용 PCM 샘플은 열전도율이 높은 레토르트용 포장재를 이용하여 진공포장 하였다. 또한 각 실에는 T-type 열전대 센서와 데이터로거를 이용하여 난방배관 온도, 바닥표면온도, PCM 온도, 실내온도를 1분 단위로 측정하였다.

1차 실험은 먼저 축열량의 단순비교를 위해 실시되었으며, 온수온도 70°C 로 난방을 가동하여 바닥표면온도를 $35\sim 40^\circ\text{C}$ 사이로 유지하였다가 정지한 후 온도감소 패턴을 검토하였다. 2차 실험은 이를 통해 타임랙 특성을 알아보고, 적정 난방스케줄을 고려한 보일러 운전시의 온도감소 패턴을 검토하였다.

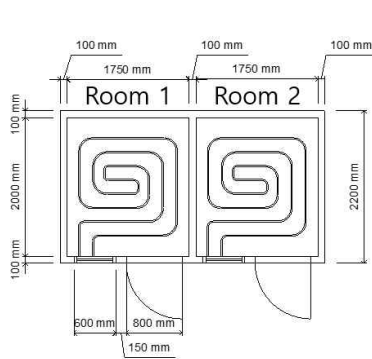


Fig. 1 Mock-up 평면도 및 PCM 설치 사진

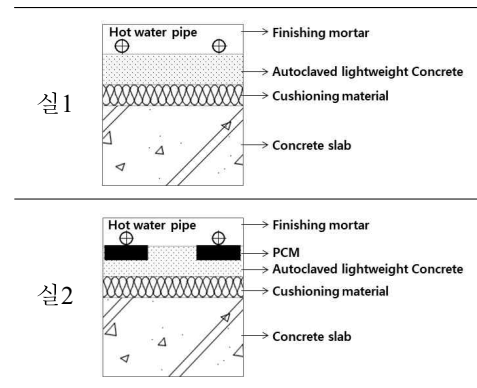


Fig. 2 실별 적용된 바닥구조

4. 실험 결과 및 분석

첫째, 각 시스템의 타임랙에 관한 단순 비교를 위한 1차 실험 결과는 Fig. 3과 같다.

기존연구⁽⁴⁾에 따라 최소 바닥표면온도를 30°C 로 설정하였고, 보일러 가동 시 상승한 바닥 표면온도가 35°C 에서 30°C 로 떨어지는데 걸리는 시간을 측정하였다. 측정결과, 기존 온수난방시스템이 적용된 실1보다 PCM이 적용된 실2가 $1.6^\circ\text{C} \sim 4.6^\circ\text{C}$ 높게 나타났으며, 35°C 에서 30°C 로 떨어지는데 걸리는 시간은 실1이 230분, 실2가 570분이 걸리는 것으로 나타났다. 즉, PCM의 축열량으로 인해 PCM 실2가 일반 실1 보다 타임랙이 약 2.5 배 길게 나타났다. 또한 실내공기온도는 PCM 적용 실2의 온도가 최고 1°C 정도 높게 나타났다.

둘째, 난방시스템의 반복 가동스케줄에 따른 결과는 Fig. 6과 같다.

1차 실험을 통해 보일러 가동 중지 후부터 3시간 경과 후부터 일반 실1과 PCM 실2의 실내온도가 역전되는 것을 확인하였는데, 이와 같이 실내온도가 역전되는 시간을 고려하여 30분 가동 4시간 대기, 다시 30분 가동 4시간 대기를 반복적으로 운전하였다. 실험결과, 바닥표면온도는 PCM 실2가 일반 실1보다 최고 1.5 °C까지 높게 유지되었다. 또한 실내공기온도는 PCM 실2가 일반 실 1보다 최고 0.1 °C 높게 나타났다.

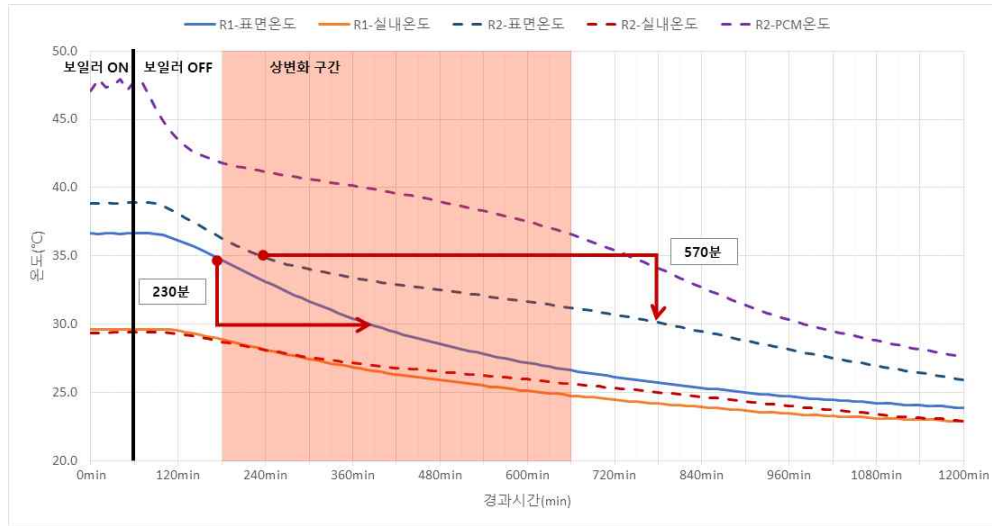


Fig. 5 보일러 가동 중지 후, 실1(R1)과 실2(R2)의 온도 변화

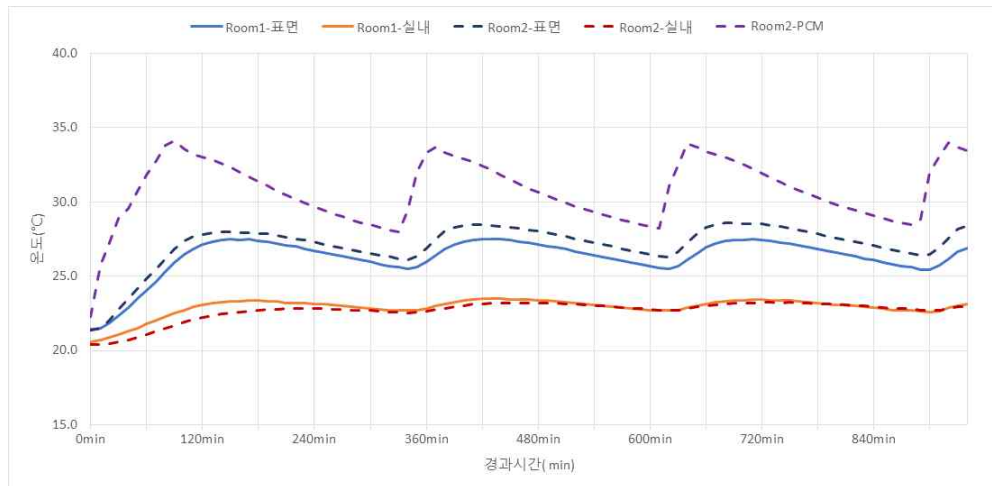


Fig. 6 스케줄 운영 시, 실1(R1)과 실2(R2)의 온도 변화

5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 바닥 표면온도가 35 °C에서 30 °C로 떨어지는데 걸리는 시간을 측정한 결과, 기존 온수난방시스템이 적

용된 실1보다 PCM이 적용된 실2가 타임랙이 약 2.5 배(실 1 230분, 실2 570분) 길게 나타났다. 또한 바닥표면온도는 PCM 실2가 1.6 °C ~ 4.6 °C 높게 나타났으며, 실내 공기온도도 1 °C 정도 더 높게 나타났다.

- (2) 보일러 가동 중지 후부터 3시간 경과 후부터 일반 실1과 PCM 실2의 실내온도가 역전되는 것을 고려하여 보일러 가동 스케줄을 30분 가동 4시간 대기, 다시 30분 가동 4시간 대기로 반복적으로 운전하였다. 그 결과, 바닥표면온도는 PCM 실2가 일반실1보다 최고 1.5 °C까지 높게 유지되었으며, 이때의 실내공기온도는 PCM 실2가 최고 0.1 °C 높게 나타났다.

본 연구는 앞으로 진행될 연구를 위한 PCM의 기본적인 성능 검토 단계로서, 추후 PCM의 적정 적용 위치 및 난방 운영 스케줄, 그에 따른 에너지 절감량, 예상평균온열감(PMV)을 통한 실내 쾌적성 향상 등에 관한 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

후기

이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 이공분야기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(NRF-2016R1D1A1B01015616)

References

1. 한국건설기술연구원, 제로카본 그린홈 기반구축 및 기술실용화(II), 미래창조과학부, 2014.12, p.152
2. 백상훈, PCM 바닥 복사 난방 시스템의 축열 및 에너지 성능 분석, 중앙대학교 박사논문, 2018
3. 김태원, PCM 바닥 복사난방 시스템의 축열성능 Mock-up Test, 중앙대학교 석사논문, 2019
4. 정광섭, 온돌난방에서 바닥표면온도의 변화에 따른 인체의 국부적 온열감 평가에 관한 연구, 한국생활환경학회, 한국생활환경학회지, Vol. 5, No. 2, 1998.12, pp. 33-38
5. Wenlong, C., Biao, X., et al., 2015, Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system, Applied energy, Vol. 144, No. 15, pp. 10-18.
6. Zhoua, G., He, J., 2015, Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes, Applied Energy, Vol. 138, No. 15, pp. 648-660.