

도시 열섬현상 저감을 위한 MPCM 적용 축열도료 제조 및 열적성능 평가

Preparation and Thermal Performance Evaluation of Heat Storage paint with MPCM for Reducing Urban Heat Island Effect

정수광* · 강유진* · 위승환* · 장성진* · 김수민**†

Su-Gwang Jeong*, Yujin Kang*, Seunghwan Wi*, Seong Jin Chang* and Sumin Kim**†

(Received 04 June 2015; accepted 10 August 2015)

Abstract : The formation of heat islands causes high energy demand for space cooling and peak cooling loads in conditioned buildings. High-temperature fluctuations on a building roof may cause mechanical stress and increase surface deterioration. Thermal energy storage (TES) systems using microencapsulated phase-change materials (MPCMs) have been recognized as one of the most advanced energy technologies for enhancing the energy efficiency and sustainability of buildings. In this study, we prepared MPCM/paint composites for mitigating the heat island effect and reducing peak temperature. In addition, we carried out thermal and physical analysis of prepared MPCM composite samples by means of SEM, FTIR spectroscopy, DSC, and TGA. Further, we evaluated the dynamic heat transfer performance of heat-storage tiles painted with 10 g of heat-storage paint. From the obtained results, we deduced that MPCM/hydrophilic paint composites are more applicable to various fields, including the building sector, than MPCM/hydrophobic paint composites. On the basis of SEM and FTIR spectroscopy results, we concluded that materials with hydrophilic properties are more compatible with MPCMs than those with hydrophobic properties. In addition, DSC analysis results revealed that MPCM/hydrophilic paint composites have better compatibility, higher latent heat capacity, and better thermal properties than other composites. TGA results showed that hydrophilic-paint-based composites have higher thermal durability than hydrophobic-paint-based composites. Finally, a lot of MPCM-loaded heat-storage tiles showed lower peak temperatures at all measurement positions.

Key Words : 캡슐화 상변화물질(Microencapsulated Phase Change Material), 수성도료(Hydrophilic paint), 유성도료(Hydrophobic paint), 축열(Heat storage), 축열타일(Heat storage tile)

**† 김수민(교신저자) : 숭실대학교 건축학부
E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665

* 정수광, 강유진, 위승환, 장성진 : 숭실대학교 대학원 건축학과

**† Kim Sumin(corresponding author) : School of Architecture, Soongsil University.

E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665

* Jeong Su-Gwang, Yujin Kang, Seunghwan Wi, Chang Seong Jin : School of Architecture, Graduate school, Soongsil University.

1. 서 론

전 세계 기후변화에 따른 기온 상승과 더불어 도시 역시 인구 집중, 도시화의 진행으로 인한 도시의 열수지 변화로 인해 도시의 열섬 현상이 발생하고 있다¹⁾. 도시의 열섬현상은 기후변화로 인해 생긴 대표적인 문제로 도시의 기온이 교외보다 비정상적으로 높아지고 있는 현상으로 시민의 건강악화 및 경제적 손실 등을 유발하고 있다²⁾³⁾. 열섬현상으로 형성된 고온은 자연환경에 영향을 주게 되고 이는 주민 생활과 건강에도 영향을 미치기 때문에 최근 문제시 되고 있다. 이에 과도한 에너지 소비를 지양하고 온실효과를 저감하기 위해 전 세계적으로 많은 노력이 행해지고 있다. 특히 1970년대 에너지 자원 고갈로 인한 위기를 겪은 이후 재생가능하고 지속가능한 에너지는 더욱 중요하게 연구되어 왔다.

상변화물질(PCM; Phase Change Materials)은 온도의 변화에 따라 상이 변하는 물질로, 물질이 고체에서 액체, 혹은 액체에서 고체로 상이 변할 때 잠열의 형태로 열에너지를 축적하는 특성을 가진다⁴⁻⁷⁾. 잠열은 물질의 상태변화에 따른 흡수 또는 방출하는 열을 말하며, 온도변화에 따른 현열에 비해 열에너지 저장 효율이 매우 뛰어나다. 상변화물질은 양초와 같은 개념으로 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 이러한 PCM의 축열성능을 이용한 연구가 국내외에서 활발하게 이루어지고 있는 실정이다. 기존 PCM 연구에서는 PCM 재료 자체의 기반원천기술 확보를 위한 연구를 진행하였으나 본 연구에서는 건물 외피에 적용 가능한 도료의 형태로서 도시열섬현상을 저감하기 위한 연구를 진행하였다⁸⁻¹⁰⁾.

본 연구에서는 이러한 PCM을 건물외피에 외장도료로 사용되는 수성 도료와 옥상 방수

를 위해 사용되는 유성 도료에 혼합하여 최종적으로 축열도료를 제조하였다. 도료에 혼합하는 PCM은 상누출을 방지하기 위하여 캡슐화 PCM(MPCM; Microencapsulated PCM)을 사용 하였다. 실험으로 축열도료의 열적성능을 평가하고 이를 타일에 적용하여 실질적인 열원공급에 따른 표면온도 및 피크온도 저감 효과를 분석하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 재료 및 제조 방법

건축물에 적용하기 용이한 PCM은, 쾌적 온도 범위인 20-32°C 사이의 녹는점을 가져야 충분한 잠열을 저장할 수 있다. 따라서 본 실험은 Rubitherm사의 RT31이라는 PCM을 core material로 적용하고, 멜라민을 shell material로 제조된 MPCM을 실험 재료로 사용하였다. 사용된 MPCM의 상변화 온도는 27 - 31°C이며, 잠열량은 80.11J/g이다. 실험에 사용된 외벽용 수성 도료는 아크릴에멀전 수지와 고성능 실리콘 발수제를 주성분으로 하는 것을 사용하였으며, 옥상 방수용 도료는 아크릴계 우레탄 수지와 이소시아네이트를 주성분으로 하는 우레탄방수코트를 사용하였다. 수성 도료는 건조도막의 발수성으로 수분침투에 의한 건물의 노화와 부식을 방지하고 내후성과 내구성이 우수하여 오랫동안 변색이 없는 특징을 가진다. 유성 도료는 바닥재 상도도료로서 내마모성, 부착력, 건조성 및 내후성이 우수하다는 특징을 가진다. 본 논문은 위와 같은 건물 외부용 도료에 MPCM을 적용해 혼합 도료의 열적 성능 및 물리적 성능을 분석하였다.

본 실험은 건조된 MPCM에 외벽용 도료를 혼합해 열적 특성을 높이는 것을 목표로 하였다. 따라서 수성 도료와, 유성도료에 각각

MPCM 60g을 질량비에 따라 첨가하여 혼합된 MPCM을 제조하도록 한다. 질량비는 교반시의 점도를 통해 최대 교반이 가능한 질량비를 최대 선정하였다. 실험방법은 다음과 같다. 수성도료 60g에 물 5wt%(3g)을 희석한 후 MPCM을 수성도료의 질량비에 맞게 각각 5wt%(3g), 10wt%(6g), 15wt%(9g), 20wt%(12g) 첨가한 후, 500RPM의 속도로 5분동안 교반한다. 유성도료는 유성도료 45g에 경화제 15g을 혼합한 후 MPCM을 앞서 말한 혼합물의 질량비에 맞게 각각 10wt%(6g), 30wt%(18g), 50wt%(30g) 첨가하고 500RPM 속도로 5분간 교반하여 최종적으로 축열도료를 제조한다. 수성도료 및 유성도료와 MPCM의 혼합비율은 표 1에 나타내었다.

Table 1 Mixing ratio of MPCM/paint composites

No.	Sample
1	Hydrophilic paint (reference)
2	Hydrophilic paint + MPCM 5wt%
3	Hydrophilic paint + MPCM 10wt%
4	Hydrophilic paint + MPCM 15wt%
5	Hydrophilic paint + MPCM 20wt%
6	Hydrophobic paint (reference)
7	Hydrophobic paint + MPCM 10wt%
8	Hydrophobic paint + MPCM 30wt%
9	Hydrophobic paint + MPCM 50wt%

2.2 분석방법

본 연구에서는 MPCM과 수성 및 유성도료의 호환성에 대한 분석을 위하여 Scanning electron microscope (SEM)을 통하여 미세구조를 분석하였으며, Fourier transformation infrared spectrophotometer (FTIR)를 이용하여 축열도료의 지속적인 축열성능 발현여부와 더불어 화학적 결합 유무를 확인하였다. 또한, 제조된 축열도료의 열적 성능을 분석하기 위하여 Differential scanning calorimeter (DSC)를

이용하여 제조된 축열도료의 용융점과 응고점 및 잠열량을 0-80℃에서 승온속도 5℃/min의 분석조건으로 확인하였다. 또한, 상온에서 600℃까지 온도를 승온시켜 Thermogravimetric analysis (TGA)를 이용하여 열적 내구성을 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 실질적인 열적 거동을 확인하기 위하여 축열도료를 타일에 도포한 후 할로겐 램프를 조사하여 표면온도 및 피크온도 저감성능을 분석하였다.

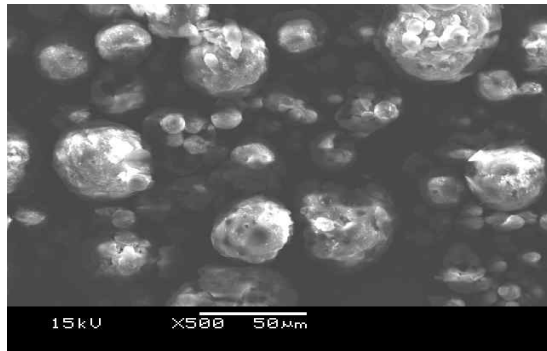
본 연구에서는 SEM, FTIR분석을 통하여 적용되는 MPCM이 도료와 어느 정도의 호환성을 가지는 것에 대한 검증과 더불어 추후, 에너지 효율 향상 연구를 수행하기 위한 기초 연구로서 활용하고자 한다. 또한, DSC와 TGA 분석을 통하여 축열도료의 축열량 분석 및 열적 내구성에 대한 평가를 하고자 한다. 끝으로 전열해석 분석을 통하여 MPCM이 적용된 건축재료의 실질적인 피크온도 저감 성능과 타임랙 효과가 어느 정도인지 MPCM이 적용되지 않은 도료를 도포한 타일과 MPCM이 적용된 도료를 도포한 타일을 통해 분석하고자 한다.

3. 결과 및 분석

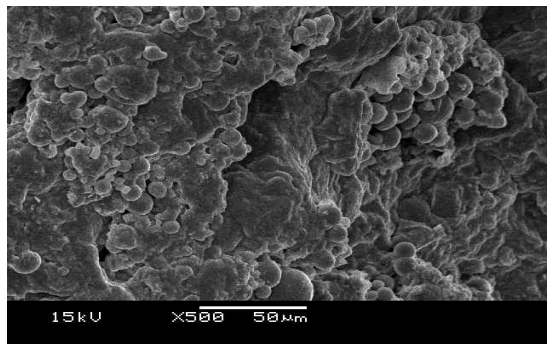
3.1 축열도료의 미세구조 분석

축열도료의 미세구조를 분석하기 위하여 본 연구에서는 SEM 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig 1에 나타내었다. Fig 1 (a)를 보면, MPCM이 구형의 형태를 띄고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 구형입자는 수성도료 및 유성도료와 혼합 시 캡슐의 형태가 유지되는가는 PCM의 축열성능 발현에 있어 중요한 요소가 된다. Fig 1 (b)는 20wt%의 MPCM과 수성도료가 혼합된 샘플의 미세구조를 보여준다. 그림에서 MPCM의 구형입자가 파괴되지 않고 여전히 수성도료 내부에서 잘 분산되어 있음을 보여준

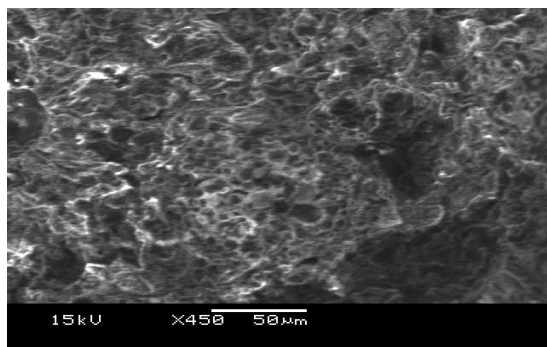
다. 반면에 Fig 1 (c)는 유성도료와 50wt%의 MPCM이 혼합된 샘플의 미세구조를 보여주는데, 상당한 양의 MPCM이 혼합도를 가늠하기 어려운 것을 알 수 있다. 결과 되었음에도 불구하고



(a) Microencapsulated PCM



(b) 20wt of MPCM + Hydrophilic paint composite



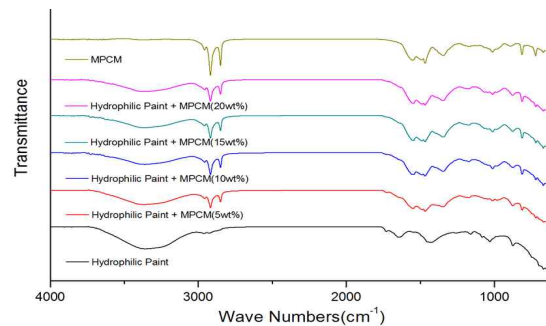
(c) 50wt of MPCM + Hydrophobic paint composite

Fig. 1 Microstructure of (a) MPCM, (b) 20wt of MPCM + Hydrophilic paint composite and (c) 50wt of MPCM + Hydrophobic paint composite

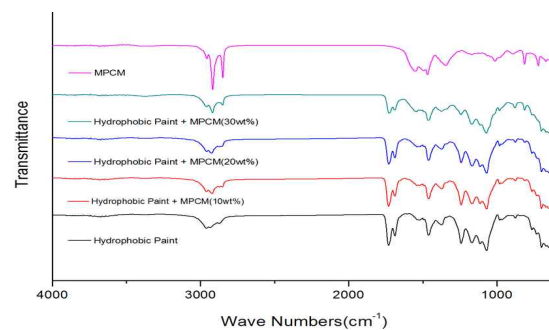
하고, 구형의 입자와 분산정적으로 MPCM은 유성도료보다 수성도료에 적용해야 그 성능을 잘 파악할 수 있음을 확인하였다.

3.2 축열도료의 화학적 결합 분석

MPCM과 도료의 호환성을 알아보기 위하여 MPCM 혼합물의 구조 간 화학적 결합을 FTIR 분석을 통해서 알아보았다. Fig 2는 수성도료 및 유성도료에 MPCM을 첨가한 혼합물의 FTIR 스펙트라를 나타낸다. MPCM의 대표적인 피크점은 2926, 2855, 2872, 2962, 1379 그리고 725cm^{-1} 에 나타나는데 이는 CH_3 , CH_2 를 분자결합으로 갖는 물질임을 보여준다. 이를 통하여 MPCM이 파라핀과 같은 알칸계열의 물질로 이루어져있음을 확인할 수 있다.



(a) MPCM + hydrophilic paint composites



(b) MPCM + hydrophobic paint composites

Fig. 2 FTIR spectra of (a) MPCM + hydrophilic paint composites and (b) MPCM + hydrophobic paint composites

또한, MPCM의 경우 벽물질이 멜라민으로 구성되어 있는데, FTIR 분석을 통하여 멜라민과 파라핀의 결합을 나타내는 N-CH₃ 결합이 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 피크는

Table 2 DSC analysis of MPCM/hydrophilic paint composites

Sample	Melting point (°C)	Latent heat capacity (J/g)	Freezing point (°C)	Latent heat capacity (J/g)
MPCM	31.46	80.37	32.05	80.11
Hydrophilic paint + MPCM 5wt%	29.70	3.823	26.77	3.676
Hydrophilic paint + MPCM 10wt%	29.68	6.854	26.81	6.384
Hydrophilic paint + MPCM 15wt%	29.73	9.547	26.72	9.629
Hydrophilic paint + MPCM 20wt%	30.01	12.78	26.63	12.25

Table 3 DSC analysis of MPCM/hydrophobic paint composites

Sample	Melting point (°C)	Latent heat capacity (J/g)	Freezing point (°C)	Latent heat capacity (J/g)
MPCM	31.46	80.37	32.05	80.11
Hydrophobic paint + MPCM 10wt%	31.63	4.826	25.27	3.935
Hydrophobic paint + MPCM 30wt%	31.51	4.922	26.08	3.956
Hydrophobic paint + MPCM 50wt%	32.76	15.97	25.79	10.51

2825-2810cm⁻¹상에 나타나있다. 여기서 수성도료 및 유성도료에 MPCM을 혼합한 샘플의 FTIR 분석결과를 보면, 수성도료와 혼합된 MPCM의 경우 혼합이후에도 MPCM이 가지고 있는 PCM 피크, 즉 2900cm⁻¹대의 FTIR 피크가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 MPCM을 유성도료에 혼합한 경우, PCM의 성질을 나타내는 피크가 변형 및 사라졌음을 확인할 수 있다. 이는 MPCM이 유성도료와 혼합하는 과정에서 PCM의 성질이 변형되거나 사라졌기 때문인 것으로 분석하였다.

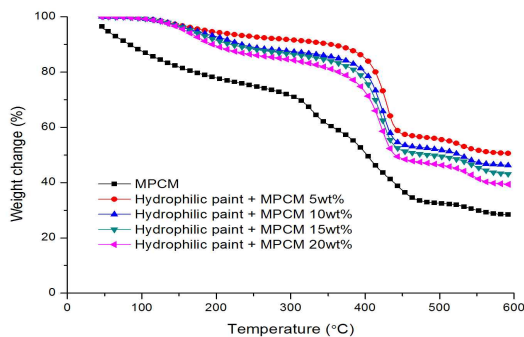
FTIR 분석결과 MPCM의 혼합량과는 별개로 MPCM이 혼합되는 유무에 따라 MPCM과 각각의 도료와의 호환성을 확인할 수 있는데, 결과적으로 유성도료보다는 수성도료에 MPCM을 혼합하는 것이 MPCM의 성능발현에 유리함을 알 수 있다.

3.3 축열도료의 축열성능 분석

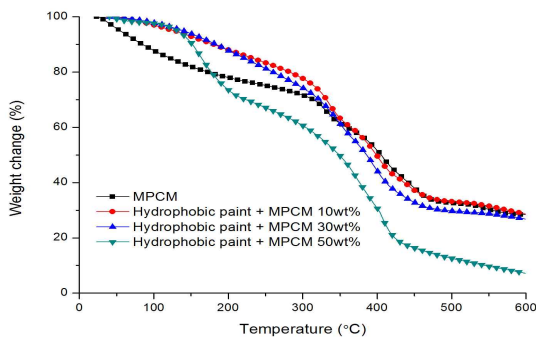
본 연구에서는 MPCM과 도료간의 열적 특성을 확인하기 위하여 DSC분석을 통해 MPCM 혼합도료의 녹는점, 냉각점, 잠열량 등의 열적 성능을 평가하였다. 수성도료 및 유성도료와 MPCM 혼합물의 열적 특성에 대한 결과는 표 2와 3에 각각 나타내었다. 실험에 사용된 MPCM의 상변화 온도는 27 - 31°C이며, 잠열량은 80.11J/g을 갖는다. 표를 살펴보면, MPCM 혼합물의 녹는점은 질량비와 상관없이 MPCM의 녹는점과 비슷하게 나타났다. 하지만 냉각시 상변화가 MPCM보다 더 낮은 온도에서 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 MPCM이 도료와 혼합함에 따라 과냉각현상이 더 심해졌음을 보여준다.

또한 MPCM의 질량비가 증가함에 따라 수성도료와 MPCM 혼합물의 잠열량이 비례적으로 증가함을 확인하였다. 하지만 유성도료

의 경우, 더 많은 양의 MPCM이 혼합되었음에도 불구하고 특히 30wt%가 들어간 경우 10wt%가 들어간 경우와 비슷한 잠열량을 가지는 것을 확인하였다. 이러한 차이를 보이는 이유는 유성도료와 MPCM이 30wt%가 혼합될 때까지는 화학적인 반응에 따라 열적 성능을 잃어버린 것으로 확인하였다. MPCM을 50wt%로 혼합한 경우에는 MPCM과 유성도료가 화학반응을 한 이후 남은 MPCM이 열적 성능을 발휘한 것으로 확인하였다.



(a) MPCM + hydrophilic paint composites



(b) MPCM + hydrophobic paint composites

Fig. 4 Thermogravimetric analysis of (a) MPCM + hydrophilic paint composites and (b) MPCM + hydrophobic paint composites

3.4 축열 도료의 열적 내구성 분석

도료와 MPCM 혼합물의 열적 내구성은 TGA분석을 통해 평가할 수 있다. TGA분석

은 온도를 가해 산화되는 시편의 질량을 파악함으로써 열적 내구성을 분석하는 것으로 질량변화가 작은 것이 열적 내구성이 뛰어난 것으로 평가할 수 있다.

Fig 4에 나타난 그래프 결과를 보면, 전반적으로 MPCM에 비해 축열도료의 열적 내구성이 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한, 수성 축열도료가 열적 내구성이 유성 축열도료보다 높은 것을 알 수 있다. 유성 축열도료의 경우 실질적인 질량감소가 150°C 전후에서 일어나는데 비해 수성 축열도료는 370°C 부근에서 일어난다. 이는 수성 축열도료는 370°C까지는 온도상승으로 인한 산화가 일어나지 않음을 의미한다. 또한, MPCM 자체가 낮은 열적 내구성을 가지고 있기 때문에 MPCM의 혼합량이 증가할수록 수성 및 유성 축열도료의 열적 내구성이 떨어짐을 확인할 수 있다.

결과적으로, MPCM의 혼합량은 도료의 열적 내구성에 부정적인 영향을 끼침을 확인하였다.

3.5 축열도료가 도포된 축열타일의 전열 해석 분석

축열타일의 전열해석을 위해 200mm × 200mm × 7mm (l × w × t) 크기를 갖는 타일에 수성 축열도료 10g을 도포하여 축열 타일을 제조하였다. 제조된 축열도료는 5mm 두께의 단열재 위에 설치하였으며, 열원을 공급하기 위하여 50W의 할로겐램프를 470mm 떨어진 곳에 위치시킨 후 램프를 조사하였다. 온도센서는 단열재 하부, 타일과 단열재 사이, 타일 상부에 위치시키고 열의 공급에 따른 온도를 측정하였다. 열원 공급은 4시간 동안 유지하였으며, 이후 램프의 전원을 끄고 자연 냉각을 16시간 동안 유지하였다. 또한, 데이터 로거 (GL800 Logger; Graphtec)를 사용하여 온도센서를 통한 온도변화를 기록하였다.

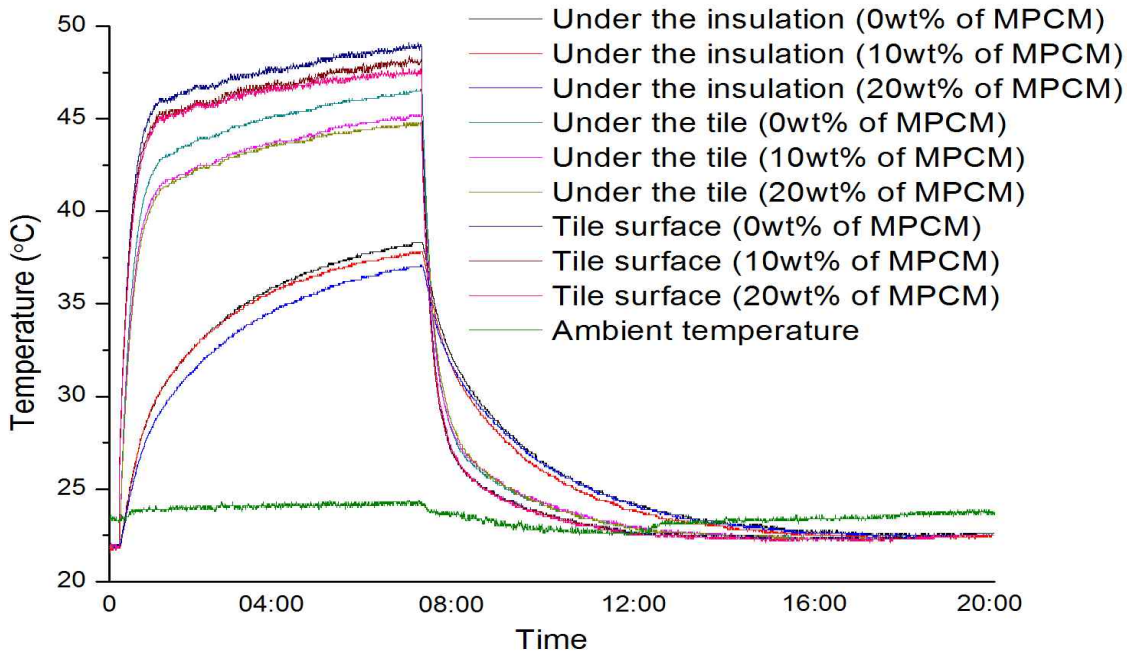


Fig. 5 Dynamic heat transfer analysis of MPCM loaded heat storage tiles

Fig 5는 MPCM이 0, 10 그리고 20wt%가 혼합된 수성도료를 도포한 타일의 전열해석 결과를 보여준다. 우선 타일 표면의 피크온도를 살펴보면, MPCM이 0, 10 그리고 20wt%가 들어갈 때 각각 49.1, 48.3 그리고 47.7°C임을 확인하였다. 타일 하부에서는 각각 온도가 46.6, 45.2 그리고 44.8°C로 나타남을 확인하였고 최종적으로 단열재 하부에서는 38.3, 37.8 그리고 37.1°C임을 확인하였다. 전체적으로 MPCM이 많이 들어간 경우 더 낮은 온도를 보이는 것으로 확인하였다. MPCM이 20wt% 들어간 경우, MPCM이 혼합되지 않은 경우보다 평균 1-2°C 정도의 온도저감 효과가 있는 것을 확인할 수 있다.

하지만, 자연냉각 시 MPCM으로 인한 타임랙 효과는 그리 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 실질적으로 MPCM이 20wt%가 혼합되었더라도 DSC 결과를 통해 알 수 있듯이 실제

잠열량은 매우 낮기 때문인 것으로 확인된다. MPCM 자체가 순수한 PCM이 아니기 때문에 잠열량이 낮은 편이고, 도료에 다량 혼합되더라도 원래 가지고 있던 잠열량의 일부만 축열성능으로 발현하기 때문에 축열성능을 개선하기 위한 추가적인 노력이 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시 열섬현상을 저감시키기 위하여 MPCM 적용 축열도료를 제조하였다. 제조된 도료는 SEM, FITR, DSC 및 TGA 분석을 통하여 물리적, 열적 성능을 분석하였다. 또한 축열도료를 타일에 도포하고 이를 할로겐램프 조사를 통하여 전열해석 분석을 실시하였다.

결과적으로 MPCM과 도료간의 호환성은 수성도료에 적용했을 때 우수하였으며 열적

성능발현에 유리하다는 것을 도출하였다. 이는 전열해석 분석을 위한 축열도료의 선택에 있어 중요한 근거로 사용되었다. SEM 분석을 통하여 MPCM이 도료에 잘 분산되었음을 확인하였고 FTIR 분석을 통해 MPCM이 수성도료와 호환성이 좋으며, 유성도료와는 혼합과정에서 화학적 반응이 일어나 축열성능 발현에 있어 호환성이 좋지 않음을 검증하였다. DSC 및 TGA 분석을 통하여 수성도료에 적용한 경우, 축열성능 발현 및 열적 내구성이 우수함을 확인할 수 있었다. 끝으로 수성 축열도료를 도포한 축열타일의 경우 MPCM이 많이 혼합된 축열타일이 피크온도 저감에 효과적임을 도출하였다. 하지만, 타임랙 효과에 있어서는 그다지 큰 차이를 보이지 못한 것을 확인하였다.

본 연구를 통하여 MPCM을 적용하기 위한 도료로서 수성도료가 적합함을 확인하고 열적 효율 향상이 있음을 검증하였으나 축열성능의 향상 및 실질적인 건축적용을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(15CTAP-C078014-0 2)에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Santamouris. M, A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 682 - 703, 2014.
2. Santamouris. M, Heat island research in Europe: the state of the art, *Advances in Building Energy Research*, Vol. 1, pp. 123 - 150, 2007.
3. Costanzo. V, Evola. G, Marletta. L, Gagliano. A, Proper evaluation of the external convective heat transfer for the thermal analysis of cool roofs, *Energy and Buildings*, Vol. 77, pp. 467 - 477, 2014.
4. Zhang. Y, Zhou. G, Lin. K, Zhang. Q, Di. H, Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook, *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 2197-2209, 2007.
5. Sun. X, Zhang. Q, Medina. M.A, A study on the use of phase change materials (PCMs) in combination with a natural cold source for space cooling in telecommunications base stations (TBSs) in China, *Applied Energy*, Vol. 117, pp. 95-103, 2014.
6. Memon. S.A, Phase change materials integrated in building walls: a state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 31, pp. 870-906, 2014.
7. Pomianowski. M, Heiselberg. P, Zhang. Y, Review of thermal energy storage technologies baed on PCM application in buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 56-69, 2013.
8. Chung, O, Jeong. S. G, Yu. S, Kim. S, Thermal performance of organic PCMs/micronized silica composite for latent heat thermal energy storage, *Energy and Buildings*, Vol. 70, pp. 180-185, 2014.
9. Jeong, S. G, Chung. O, Yu. S, Kim. S, Kim. S, Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nanoplatelets, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 117, pp. 87-92, 2013.
10. Jeong, S. G, Cha. J, Kim. S, Seo. J, Lee. J. H, Kim. S, Preparation of thermal-enhanced epoxy resin adhesive with organic PCM for applying wood flooring, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 117, No. 3, pp. 1027-1034, 2014.