

축열 성능 향상 SSPCM 혼합 콘크리트 제조 및 열적특성 분석

Preparation and Thermal-property Analysis of Heat Storage Concrete with SSPCM for Energy Saving in Buildings

정수광* · 장성진* · 임재한** · 김희선** · 류성룡*** · 김수민****†

Jeong Su-Gwang*, Chang Seong Jin*, Lim Jae-Han**, Kim Hee-Sun**, Ryu
Seong-Ryong*** and Kim Sumin****†

(Received 4 February 2015; accepted 23 February 2015)

Abstract : n-octadecane based shape stabilized phase change material (SSPCM) was prepared by using vacuum impregnation method. And an exfoliated graphite nanoplate (xGnP) which has high thermal conductivity properties is used as a PCM container. And then we made heat storage concretes which contains SSPCM for reducing heating and cooling load in buildings. In the preparation process, the SSPCM was mixed to a concrete as 10, 20 and 30wt% of cement weight. The thermal properties and chemical properties of heat storage concrete were analyzed from Scanning electron microscope (SEM), Fourier transformation infrared spectrophotometer (FT-IR), Differential scanning calorimeter (DSC), Thermogravimetric analysis (TGA) and TCi thermal conductivity analyzer. And we conducted surface temperature analysis of SSPCM and xGnP by using heat plate and insulation mold.

Key Words : 상안정 상변화물질(Shape stabilized Phase change material), 콘크리트(Concrete), 개질탄소(Exfoliated graphite nanoplatelets), 옥타데칸(n-octadecane), 축열(Heat storage)

****† 김수민(교신저자) : 송실대학교 건축학부
E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665
*정수광, 장성진 : 송실대학교 대학원 건축학과
**임재한, 김희선 : 이화여자대학교 건축공학과
***류성룡 : 금오공과대학교 건축공학과

****† Kim Sumin(corresponding author) : School of Architecture,
Soongsil University.
E-mail : skim@ssu.ac.kr, Tel : 02-820-0665
*Jeong Su-Gwang, Chang Seong Jin : School of Architecture,
Graduate school, Soongsil University.
**Lim Jae-Han, Kim Hee-Sun : Department of Architecture
Engineering, Ewha Womans University.
***Ryu Seong Ryong : Kumoh National Institute of Technology.

1. 서 론

국내에서의 전력 수요가 급증하면서 냉난방 에너지 수급에 큰 문제를 겪고 있다. 이를 해결하기 위해서는 냉난방 수요에 따른 전력 부하 평준화 기술, 즉 축열을 통한 최대 피크부하 이동기술이 필요하다. 상변화 물질(PCM; Phase change materials)을 이용한 건축물 에너지 저장 및 냉난방 피크이동에 관한 연구는 최근 국내에서 큰 관심을 일으키고 있다¹⁾. PCM은 잠열의 형태로 열을 저장하여 건물 외피에 적용 시 낮 시간동안 액화하며 태양열을 축적하고 밤 시간동안 고체로 변하면서 축적된 태양열을 방출시켜 건물 내부의 온도피크를 줄여줄 수 있다. 이러한 PCM을 이용한 축열시스템은 주변의 열원을 잠열의 형태로 저장함으로써, 열원 공급에 따른 최대 피크를 줄일뿐만 아니라 피크 지연효과를 가지고 있어 기존의 화석연료 사용에 대한 의존도를 낮출 수 있다. 하지만, PCM은 온도변화에 따라 상이 변하기 때문에 액체상태에서의 상누출의 우려가 있어 직접적으로 건축재료로 적용하기에 문제가 있다. 또한, 낮은 열전도율이라는 문제점을 가지고 있다²⁻³⁾. PCM이 가지고 있는 이러한 단점으로 인해 그동안 PCM 관련 연구는 상안정화에 대한 연구 및 열전도율 향상에 대한 연구가 주로 행해져왔다. 따라서 건축재료로 PCM을 활용시킬 수 있는 방법에 대한 연구는 미미한 것으로 분석하였다. 본 연구진은 이러한 PCM의 단점 개선과 더불어 건축재료로 적용하기 위한 연구를 수행하고자 한다. 선행연구에서 파라핀계열의 PCM을 개질 탄소의 한 형태인 xGnP (Exfoliated graphite nanoplatelets)에 함침시킴으로써 상안정 PCM (SSPCM; Shape stabilized PCM)을 제조하고 동시에 열전도율을 높이는 연구를 수행하였

다. 건축재료로 적용이 가능한 SSPCM은 다양한 형태로 가공되어 활용이 가능하다⁴⁻⁵⁾. 특히, 바닥복사난방을 통하여 열원을 공급하는 우리나라의 경우 바닥 및 천장을 형성하는 콘크리트 슬래브에 PCM을 적용함으로써 건축물에서의 냉난방부하 저감효과 및 실내 쾌적도를 향상시킬 수 있다⁶⁻⁷⁾. 슬래브에 적용되는 SSPCM은 잔골재 형태로 콘크리트에 혼합되어 적용될 수 있는데, SSPCM의 혼합량에 따라 물리적·열적 성능이 달라지는 것을 예측할 수 있다. 이에 본 연구에서는 SSPCM을 각각 다른 질량비로 콘크리트에 적용함으로써 제조된 축열 콘크리트의 물리적·열적 특성에 대하여 분석하고 SSPCM과 콘크리트의 호환성에 대한 검증을 실시하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 재료 및 제조 방법

실험에 사용된 SSPCM은 n-octadecane을 상변화 물질로 제조된 것을 사용하였으며, n-octadecane은 파라핀계열의 상변화 물질로 용융점이 28℃ 이고, 잠열량은 256.5J/g이다. n-octadecane을 xGnP에 진공함침시켜 제조된 SSPCM은 n-octadecane과 동일한 온도범위에서 상변화가 일어났으며, 이때의 잠열량은 110.9J/g이다. 축열 콘크리트는 설계강도 40MPa의 배합량을 갖도록 배합설계를 하고 SSPCM을 시멘트 질량대비 10wt%, 20wt% 그리고 30wt%를 혼합하였다. 축열 콘크리트 제조를 위하여 물시멘트비는 30%로 설정하였으며, 슬럼프치는 120mm, 최대 골재 사이즈는 25mm 그리고 공기량은 1.5로 설정하여 제작하였다. 축열 콘크리트 사이즈는 지름 6cm, 높이 12cm의 원통형 공시체 몰드를 사용하여 제작하였다. 혼합이후 28일 수중양생을 거쳐 최종적으로 축열 콘크리트를 제조하였다.

2.2 분석방법

본 연구에서는 SSPCM과 콘크리트의 호환성에 대한 분석을 위하여 Scanning electron microscope (SEM)을 통하여 미세구조를 분석하였으며, Fourier transformation infrared spectrophotometer (FT-IR)를 이용하여 SSPCM의 지속적인 축열성능 발현여부와 더불어 화학적 결합 유무를 확인하였다. 또한, 제조된 축열 콘크리트의 열적 성능을 분석하기 위하여 Differential scanning calorimeter (DSC)를 이용하여 제조된 축열 콘크리트의 용융점과 응고점 및 잠열량을 0-80℃에서 승온속도 5℃/min의 분석조건으로 확인하였다. 또한, 상온에서 600℃까지 온도를 승온시켜 Thermogravimetric analysis (TGA)를 이용하여 질량감소량에 따른 축열 콘크리트 내 SSPCM의 혼합량을 확인하였다. 또한 TCi (열전도율 분석 장비)를

이용하여 열전도율 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 콘크리트에 SSPCM을 적용함에 따른 실질적인 연구에 앞서 xGnP와 SSPCM의 열원 공급에 따른 열적 거동에 대한 분석을 수행하였다. 열적거동 전열해석 실험은 Heat Plate에서 열원을 공급하고 Heat Plate 상부에 실험체를 놓아 이에 대한 열적 거동을 평가하는 것으로 진행하였다. 실험체는 0.1m x 0.1m x 0.05m의 목재 몰드에 단열재를 0.05m 두께로 붙여 열량이 손실되지 않고 샘플로 전달될 수 있도록 하였다. 실험은 Heat Plate를 60℃로 맞추고 열원을 서서히 공급하여 60℃까지 도달 및 온도를 유지하는 시간을 총 4시간으로 설정하였으며, 열원 공급을 중단하고 20시간이 경과하는 시간을 포함하여 총 24시간동안의 xGnP와 SSPCM의 열적 거동에 대한 연구를 수행하였다. SSPCM과 xGnP의 전열해석에 대한 실험 모식도는 그림 1에 나타내었다.

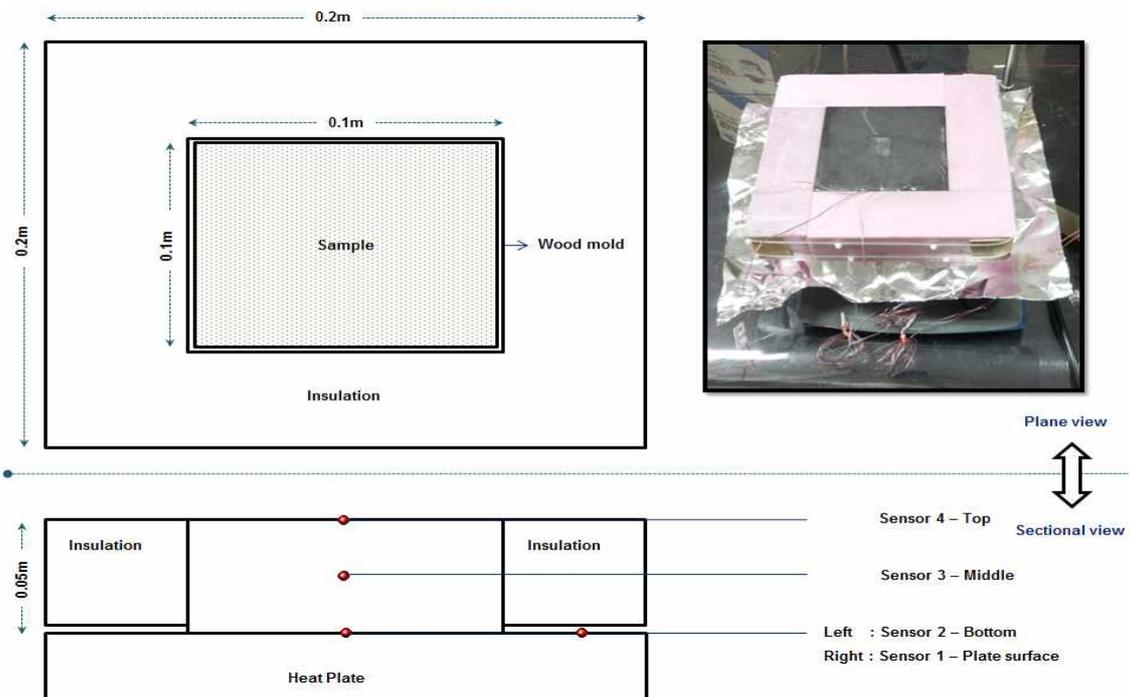
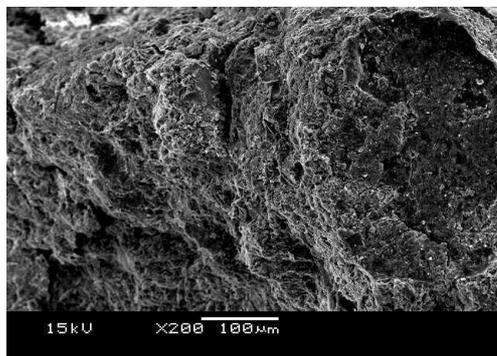


Fig. 1 Schematic image of thermal behavior analysis system

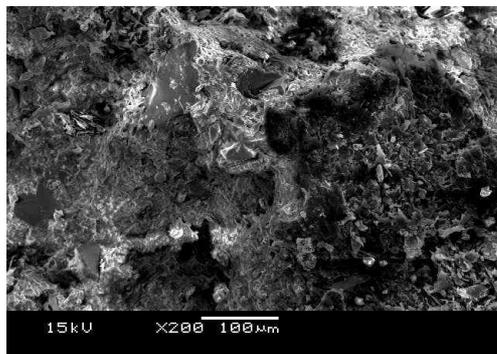
3. 결과 및 분석

3.1 축열 콘크리트의 미세구조 분석

축열능력이 향상된 SSPCM 콘크리트의 미세구조 분석 결과는 그림 2에 나타내었다. 미세구조 분석이기 때문에 SSPCM의 혼합율과는 별개로 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트와 일반적인 콘크리트를 대상으로 분석을 실시하였다. 그림에서 콘크리트는 단면이 매우 단단한 형태를 보여주는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 SSPCM이 들어간 콘크리트 역시 단단한 형태를 보여주는 것을 확인할 수 있다. SSPCM 콘크리트의 경우 SSPCM 알갱이가



(a) concrete (x200)



(b) SSPCM concrete (x200)

Fig. 2 Microstructure of concrete and SSPCM concrete

곳곳에 박혀있는 것을 확인할 수 있으며, SSPCM과 콘크리트 사이에 공극 및 균열이 없는 것을 미루어보아 SSPCM이 콘크리트에 잘 혼합되었음을 알 수 있다. 결론적으로 SSPCM의 형태로 상안정화 된 PCM과 콘크리트가 혼합 및 호환성이 좋음을 확인할 수 있다.

3.2 축열 콘크리트의 화학적 결합 분석

그림 3은 콘크리트와 SSPCM 콘크리트의 FTIR 스펙트럼을 보여준다. 콘크리트의 경우 콘크리트 및 골재의 구성에 따라 FTIR 피크가 달라질 수 있어 샘플 추출에 따른 FTIR 스펙트럼이 달라진다. 이러한 차이는 그림에서 1500cm⁻¹ 전후에서 보여지는 피크차이로 알 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 PCM이 대표적으로 나타내고 있는 FTIR 스펙트럼의 유무를 통해 PCM의 성능이 발현될 수 있는지를 평가하였다.

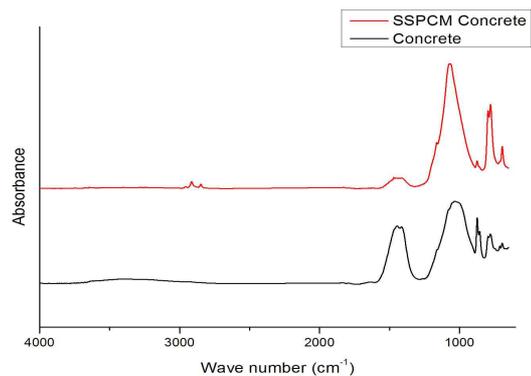


Fig. 3 FTIR analysis of concrete and SSPCM concrete

SSPCM은 n-octadecane을 xGnP에 함침하여 제조한 것으로 xGnP와 n-octadecane이 물리적 결합으로 이루어짐을 기존 연구를 통해 도출했다. n-octadecane은 C₁₈H₃₈의 분자식을 가지고 있어 C-H₂ 결합과 C-H₃ 결합으로 이루어져 있다. FTIR 스펙트럼에서 C-H₂ 결합은 대칭구조인 경우 2870, 2876cm⁻¹에서 피크

가 생기고 비대칭구조인 경우 2920cm^{-1} 에서 피크가 나타난다. C-H3 결합 역시, 대칭구조인 경우, $2870, 2876\text{cm}^{-1}$ 에서, 비대칭 구조인 경우 $2954, 2955, 2961\text{cm}^{-1}$ 에서 피크가 나타난다. 그림 3에서 콘크리트의 경우 위의 피크가 보이지 않는 반면에 SSPCM이 혼합된 콘크리트의 경우 위의 피크가 보임을 확인할 수 있다. 이는 SSPCM의 n-octadecane이 화학적으로 변하지 않고 여전히 물리적인 성능을 콘크리트 혼합 후에도 보여줄을 의미한다. 다만, 피크가 약하게 존재하는 이유는 FTIR 실험을 위하여 추출한 샘플이 매우 소량이며, 전체적인 콘크리트 질량에 비해 SSPCM의 질량 및 혼합량이 낮기 때문인 것으로 확인하였다.

3.3 축열 콘크리트의 축열성능 분석

축열성능이 향상된 SSPCM 콘크리트의 축열량을 분석하기 위하여 DSC를 이용하여 제조된 SSPCM 콘크리트의 용해점과 응고점, 잠열량을 분석하였다. SSPCM이 들어간 축열 성능 향상 콘크리트는 SSPCM의 혼합량의 증가에 따라 잠열량이 늘어나는 모습을 보여주었으며, 용해점과 응고점이 모두 비슷한 온도에서 일어남을 확인하였다. 용해점과 응고점이 동일한 것은 사용된 PCM이 n-octadecane으로서 28°C 내외에서 상변화를 일으키기 때문이다. 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 용해점이 27.08°C 이고 응고점은 24.54°C , 용해 시 잠열량은 5.272J/g , 응고 시 잠열량은 5.530J/g 을 보였다. 20wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트는 용해 시 잠열량이 16.33J/g 이고, 응고 시 잠열량이 14.56J/g 을 보여주었다. 10wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트와 비교했을 때, 약 3배의 잠열성능이 향상된 것을 확인하였다. 2배정도 늘어날 것으로 당초 예상하였으나 분석된 잠열량의 상승효과는 컸다.

반면, 30wt%의 SSPCM이 들어간 콘크리트의 경우 용해 시 잠열량은 26.68J/g , 응고 시 잠열량은 23.46J/g 으로 분석되었다. DSC 분석을 위한 시료 채취에서 다소 오차는 발생하였지만, 용융점 및 응고점은 비슷하게 발현한 것을 확인할 수 있으며, SSPCM의 질량비가 높아 질수록 축열성능이 더 좋아짐을 확인할 수 있다. DSC 결과 그래프는 그림 4에 나타내었다.

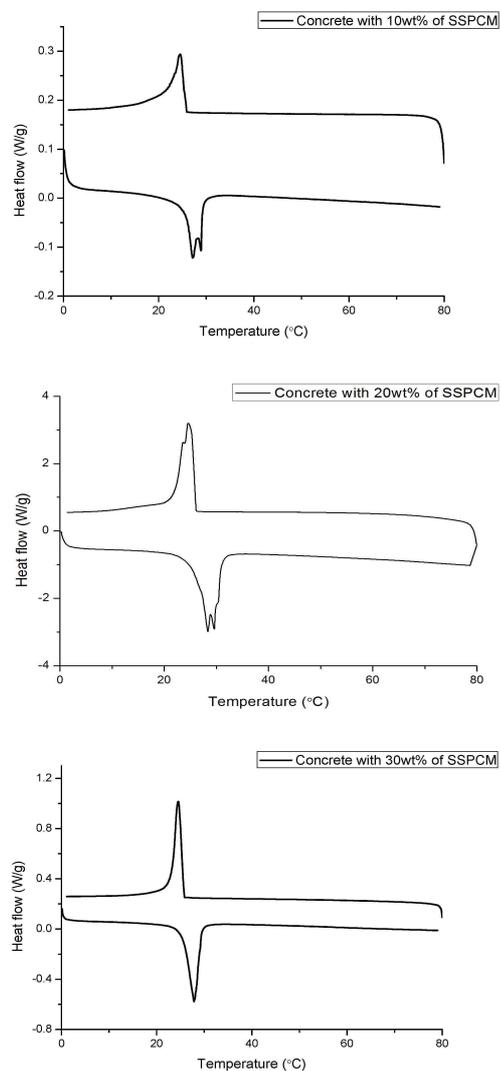


Fig. 4 Heat storage and thermal analysis of SSPCM concrete

3.4 축열 콘크리트의 열적 내구성 분석

TGA 분석을 통하여 콘크리트와 SSPCM의 열적 내구성을 분석하였다. 그림 5에서 콘크리트보다 SSPCM이 들어간 콘크리트의 질량 감소가 큰 것을 확인할 수 있다. 이것은 200°C 전후에서 n-octadecane이 산화하기 때문에 이에 대한 질량 감소가 생겼기 때문이다. 600°C까지 승온 시킨 결과 콘크리트의 경우 91.31%, SSPCM이 시멘트 질량대비 10, 20 그리고 30wt%가 들어간 경우 91.19, 86.82 그리고 81.77wt%임을 알 수 있다. SSPCM의 혼합량이 늘어남에 따라 600°C까지 승온 시킨 상태에서 축열 콘크리트의 질량 감소율이 늘어남을 확인할 수 있다. 하지만, 기존 연구에서 SSPCM 최소 50wt%에서 90wt%까지 질량 감소율을 보이는 것에 비해 SSPCM이 최대로 들어간 경우에도 20wt%의 질량 감소만을 보이는 것으로 보아 PCM이 혼합된 타 재료에 비해 열적 내구성이 우수하다고 판단한다.

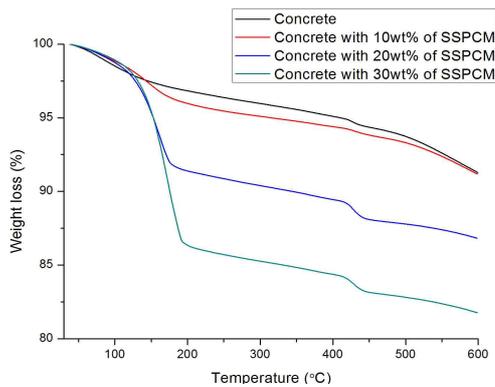


Fig. 5 Thermal durability analysis of SSPCM concrete

3.5 축열 콘크리트의 열전도율 분석

SSPCM 콘크리트의 열전도율 분석결과는 그림 6에 나타내었다. 연구에 사용한 콘크리트 공시체의 열전도율은 평균 2.01W/mK로

측정되었는데, 일반적인 콘크리트(1.2 - 1.6W/mK) 보다는 밀도 및 골재의 구성으로 인하여 비교적 높은 열전도율 값을 보였다. 축열 콘크리트의 경우, 10, 20 그리고 30wt%의 SSPCM이 혼합된 콘크리트의 열전도율은 각각 1.97, 1.69W/mK 그리고 1.60W/mK로 점점 열전도율이 낮아지는 경향을 보이는 것으로 확인하였다. 기 연구를 통해 SSPCM의 열전도율이 1.363W/mK인 것으로 확인한 바 있는데, SSPCM이 본 실험에 사용된 콘크리트보다 열전도율이 낮기 때문에 SSPCM의 혼합량이 증가할수록 열전도율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 하지만, n-octadecane이 0.26W/mK의 매우 낮은 열전도율을 가지고 있기 때문에 순수한 PCM을 적용했을 때보다는 열전도율의 감소가 덜 한 것으로 판단하였다.

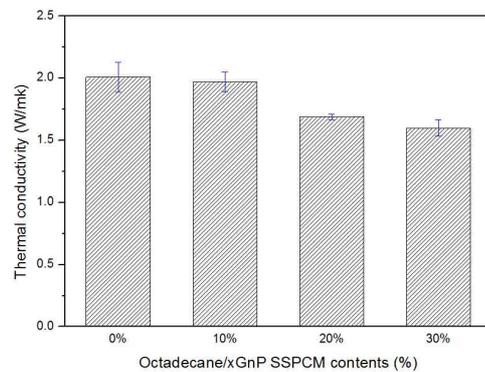


Fig. 6 Thermal conductivity analysis of SSPCM concrete

3.6 SSPCM의 전열해석 분석

다음의 그림 7은 SSPCM과 xGnP의 열원 공급에 따른 표면온도 차이를 분석한 그래프이다. 실내온도가 20°C 전후에서 실험이 시작한 이후에 지속적으로 변함없는 가운데, SSPCM과 xGnP 모두 열원이 제일 먼저 도달하는 하부에서 가장 높은 온도를 보이며, 상부로 올라

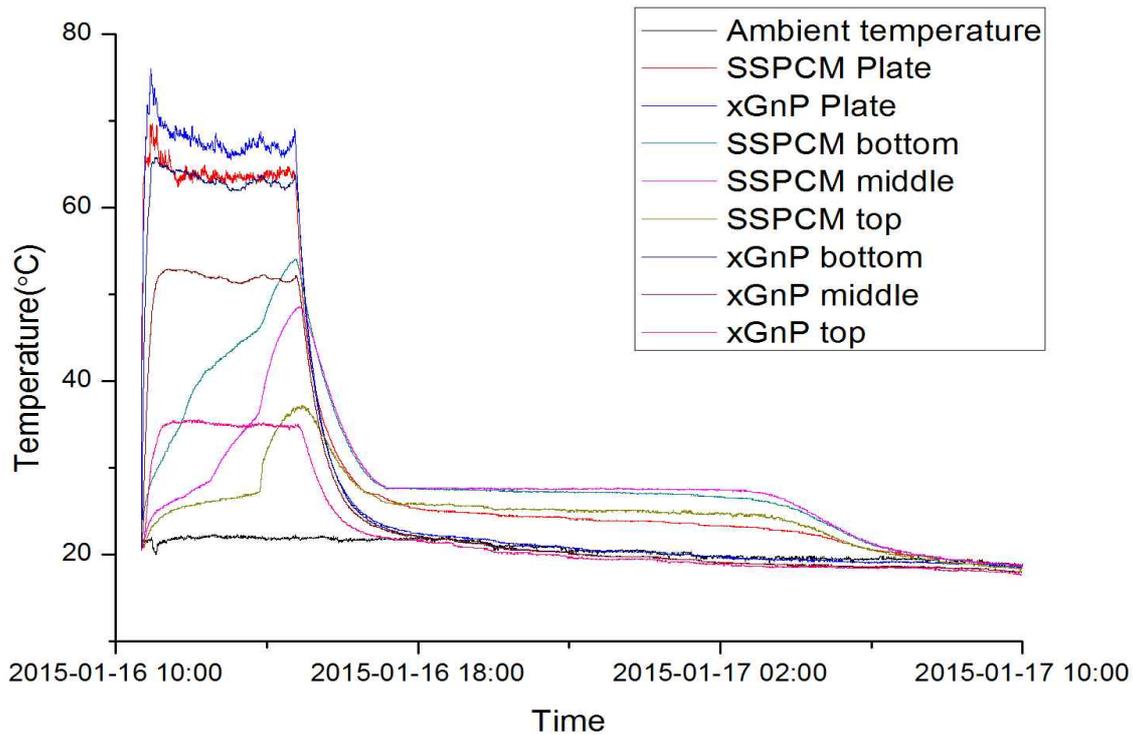


Fig. 7 Thermal transfer analysis of xGnP and SSPCM

갈수록 더 낮은 온도를 보였다. 중요한 것은 SSPCM과 xGnP가 동일하게 온도가 상승한 것이 아니라, xGnP가 초반에 급격한 온도상승을 보이는 반면에 SSPCM의 경우 xGnP보다 피크에 도달하는 시간이 하부에서 3시간 41분, 중간층에서 3시간 29분 그리고 상부에서 3시간 26분으로 나타났다. 전반적으로 3시간 30분 전후의 열전달 지연 효과가 있는 것으로 확인하였다. 열원 공급 시간을 더 늘릴 경우에는 지연효과가 더 크게 나타날 것으로 판단된다. 피크 온도 역시 SSPCM이 xGnP에 비해 상대적으로 낮은 온도를 보였는데, 하부에서는 xGnP가 65.8°C의 온도를 보이는 것에 비해 SSPCM은 54°C를 보였다. 중간층에서는 xGnP가 52.9°C, SSPCM이 48.6°C의 온도를 보이는 것으로 확인하였다. 상부에서는 xGnP

가 35.4°C, SSPCM은 37.2°C를 보여 오히려 xGnP가 더 낮은 온도를 보였다. 이것은 파우더 형태의 xGnP 내부에 있는 공기가 단열의 역할을 했기 때문인 것으로 판단된다. 중요한 것은 동일한 온도까지 도달하는 시간이 SSPCM이 오래 걸리기 때문에 축열에 따른 열전달 지연 효과가 있다는 것이다. 열원공급을 중단한 이후에도 xGnP의 경우 바로 실내온도와 동일한 온도로 냉각되는 반면 SSPCM은 축열효과로 인하여 실내온도와 동일한 온도까지 냉각되는 시간이 xGnP에 비해 최대 24시간 2분의 차이가 나는 것으로 확인하였다. 본 실험은 통하여 SSPCM의 축열성능 및 열전달 지연효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있었으며, 추후 SSPCM 콘크리트를 몰드로 제작하여 실험할 경우 일반 콘크리트에 비해 피크온도 저감효과, 열전달

지연효과 및 타임랙에 의한 축열효과를 기대할 수 있을 것으로 판단한다.

4. 결 론

본 연구에서는 SSPCM이 들어간 콘크리트의 물리적·열적 성능에 대한 평가를 하였다. 연구결과, SSPCM과 콘크리트의 호환성이 상당히 좋음을 확인하였으며, SSPCM의 축열 성능이 콘크리트와 혼합 이후에도 여전히 발현됨을 확인할 수 있었다. SSPCM의 혼합비율은 축열량 및 열적 내구성에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. SSPCM의 혼합량이 많은 콘크리트의 경우 실험에 사용된 콘크리트보다 낮은 열전도율을 보여주었지만, 일반적인 콘크리트 (1.2 - 1.6W/mK)보다는 열전도율이 더 높음을 확인할 수 있었다. 열전도율에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 끝으로 SSPCM과 xGnP의 열적거동 분석을 통해 SSPCM의 축열성과 열전달 지연효과가 매우 우수함을 확인할 수 있었으며, 추후 콘크리트 적용을 통한 실질적인 열적 효과를 확인하고자 한다.

후 기

본 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원 14CHUD-C061954-03에 의해 수행되었습니다.

Reference

1. Jeon, J, Lee. J. H, Seo. J, Jeong. S. G, Kim. S, Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 111, pp. 279-288, 2013.

2. 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.
3. Yu, S, Jeong. S. G, Chung. O, Kim. S, Bio-based PCM/carbon nanomaterials composites with enhanced thermal conductivity, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 120, pp. 549-554, 2014.
4. 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.
5. 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.
6. Kim, S, Paek. S, Jeong. S. G, Lee. J. H, Kim. S, Thermal performance enhancement of mortar mixed with octadecane/xGnP SSPCM to save building energy consumption, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 122, pp. 257-263, 2014.
7. Kim, S, Chang. S. J, Chung. O, Jeong. S. G, Kim. S, Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnP SSPCM and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings, Energy and Buildings, Vol. 70, pp. 472-479, 2014.