

# PCM을 활용한 구체 축열시스템의 축열 및 방열 특성 연구

## Study on the Characteristics of Thermal Output and Thermal Storage in a Thermally Activated Building System with Phase Change Material

이현화(Hyunhwa Lee)<sup>1</sup>, 이수진(Soojin Lee)<sup>1</sup>, 송진희(Jinhee Song)<sup>1</sup>, 김수민(Sumin Kim)<sup>2</sup>,  
임재한(Jaehan Lim)<sup>1†</sup>, 송승영(Seung-Yeong Song)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>이화여자대학교 건축공학과, <sup>2</sup>숭실대학교 건축학부

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Republic of Korea

<sup>2</sup>School of Architecture, Soongsil University, Seoul 156-743, Republic of Korea

(Received August 5, 2013; revision received September 4, 2013)

**Abstract** TABS (Thermally Activated Building System) has recently applied by huge commercial buildings, airports, and convention centers in Europe. TABS provides night-time thermal storage by heating or cooling. The embedded water-based heating and cooling system uses the high thermal inertia of concrete in the building construction, in which a heating or cooling pipe is embedded. The aim of this study is to analyze the thermal storage and thermal output of TABS applied with PCM (Phase Change Material). To achieve this, prototypes of TABS and the thermal properties of various PCMs were investigated. By using the simulation program Physibel Voltra 6.0 W, the thermal storage and thermal output were evaluated according to a heating and cooling operation schedule.

**Key words** Thermally activated building system(TABS, 구체축열시스템), PCM, Phase change material(상변화물질), Thermal output(방열량), Thermal storage(축열)

† Corresponding author, E-mail: [limit0@ewha.ac.kr](mailto:limit0@ewha.ac.kr)

### 1. 서 론

콘크리트 구조체를 이용하는 구체축열 공조시스템은 배관을 콘크리트 내에 매설하여 건물 구조체를 축열(냉)함으로써 부하를 제거하거나 시간차에 의해 피크부하를 줄일 수 있는 시스템이다. 국내에서는 적용된 사례가 많지 않지만, 최근 유럽을 중심으로 저에너지 친환경 건축물 프로젝트에 에너지 절약기술로서 대형건물이나 공항, 컨벤션센터 등의 건물에 널리 사용되고 있다. 본 연구는 구체축열시스템을 폭넓게 보급시키는 것을 목표로 하여 건물구조체의 일부인 바닥슬래브의 콘크리트를 이용하고, 축열 능력을 향상시키기 위해 PCM(Phase Change Material, 상변화물질)을 적용함으로써 구체축열에 미치는 축열 및 방열 성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 축열 및 방열 성능과 관련하여 동적 거동을 평가하기 위해 전열해석 시뮬레이션을 수행하여 냉난방 운전시 축열 및 방열 특성을 분석하고자 하였다.

### 2. 기존 연구 동향 및 활용방안

#### 2.1 기존 연구 동향

국내에서는 주거건물에서 바닥복사 난방시스템의 난방성능을 개선하기 위해 1990년대 이래 PCM 재료를 활용한 연구가 수행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 기존 연구에서는 주로 습식 바닥복사 난방시스템에서 모르타가 갖는 축열 성능을 보완하기 위한 방안으로서 PCM 재료를 활용하였다. 유럽을 비롯하여 미국 등 선진국에서는 최근 건물에서 효율적인 에너지 활용을 위해 건물 구조체, 즉 슬래브나 벽체, 기초 등을 축열체로서 활용하여 저온난방, 고온냉방 시스템의 일환으로 구체축열시스템이 연구되었다. 구체축열시스템은 오피스나 박물관 등 다양한 건물에서 태양열이나 지열 등 신재생에너지와 통합 적용되어 공조시스템을 구축함으로써 건물에서의 효율적인 에너지 사용이 가능한 것으로 나타났다. 최근에는 구체축열시스템에 PCM 재료를 활용하여 구

조체의 축열성능을 향상함으로써 신재생에너지나 미활용에너지의 활용 가능성을 높이고, 축열성능을 고려한 예측제어 방식 등 에너지 절감을 고려한 다양한 설비 기술이 접목되고 있다. 뿐만 아니라, 축열에 따른 반응 시간 지연 효과를 고려하여 설계 단계에서부터 시공, 운전 단계에 이르기까지 건물에서 체계적으로 관리될 수 있도록 건물의 공조시스템이 구축되고 있다.

## 2.2 구체축열시스템에서 PCM의 활용 방안

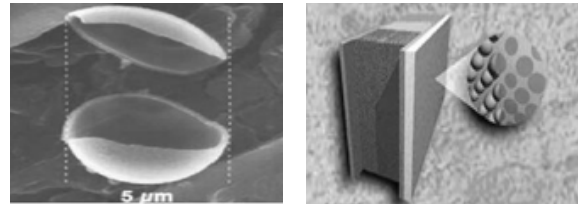
PCM은 고체에서 액체, 액체에서 고체 등 상이 변화하는 과정에서 에너지 저장능력이 큰 잠열의 형태로 열을 저장하거나 방출하는 물질을 말하며, 건축물의 에너지 절감기술로서 최근 20년간 건축 재료에 열에너지 저장물질을 적용하는 연구가 세계적으로 활발히 진행 중에 있다. PCM은 크게 상변화온도와 용융잠열에 따라 유기 PCM, 무기 PCM, 그리고 둘 이상의 혼합물인 공융 PCM으로 나뉘며, 각각 서로 다른 특징을 가지고 있다. 그러나 PCM은 물질 자체의 낮은 열전도율과 상변화과정에서 액체로 변환된 PCM이 유출되는 문제점 등으로 보완하여 건축물에 적용하는 것이 중요하다. 구체축열시스템에서 PCM을 적용함에 있어서는 PCM 물질을 콘크리트 구조체에 포함하기 위한 설계 대안 설정이 필요하다. 일반적으로 Fig. 1과 같이 구체축열시스템에서 PCM 물질을 적용함에 있어서는 크게 2가지의 적용이 가능하다. 구조체 내 PCM이 포함될 수 있는 물리적인 용기(container)를 매립하여 축열층을 계획하거나, 콘크리트 재료적인 측면에서 PCM 재료가 함침된 물질을 포함하는 것이다. 본 연구에서는 상용되는 다양한 PCM 재료를 이용하여 Fig. 1(a)와 같이 온수배관 부위에 축열층을 구성함으로써 구체축열시스템에 대하여 축열 및 방열 특성을 비교 평가하였다.

## 3. PCM을 적용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성 평가

본 연구에서는 Physibel Voltra 6.0W를 이용하여 PCM



(a) Macro-encapsulation



(b) Micro-encapsulation

Fig 1. Application method of PCM to TABS.

적용에 따른 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 활용 가능한 PCM 재료의 열적 특성을 실험을 통해 분석하고, 다양한 PCM 종류에 따른 축열 및 방열 성능을 파악하고자 하였다.

### 3.1 시뮬레이션 조건 및 방법

구체축열시스템의 시뮬레이션 평가 모델은 국내 E 대학 건물, 지하 2층 강의실(상하부 모두 강의실이며, 강의실 크기는 가로×세로 = 7 m×4 m임)에 적용되어 있는 시스템을 대상으로 하였으며, Fig. 2와 같이 PCM 물질을 기존 배관 사이에 일정한 레이어로 배치하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 3차원 비정상상태 전열해석 프로그램인 Physibel Voltra 6.0 W를 이용하여 구체축열시스템에 PCM 적용에 따른 축열 및 방열 특성을 분석하였다. 각 재료 물성치는 에너지관리공단 발행 에너지절약설계기준 해설서 및 ASHRAE Handbook Fundamental 2009를 참고하였으며(Table 1), 실내측 설정온도는 난방 운전시 20°C, 냉방 운전시 26°C, 실내측 표면열전달율은 11.63 W/m<sup>2</sup>K로 가정하였다. Fig. 3과

Table 1 Thermal properties of materials

Name	Conductivity (W/mK)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kgK)
Wood Flooring	0.170	700	2070
Plain Concrete	0.850	1600	930
Expanded Polystyrene	0.035	25	1470
Concrete Slab	1.700	1200	1470
PE-X Pipe	0.410	1200	1470
Water	-	1000	4200

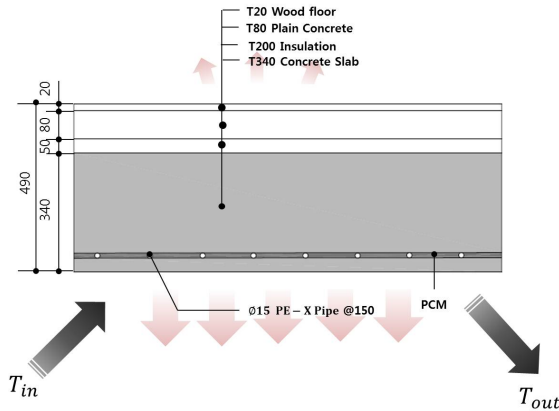


Fig. 2 Concept of TABS with PCM.

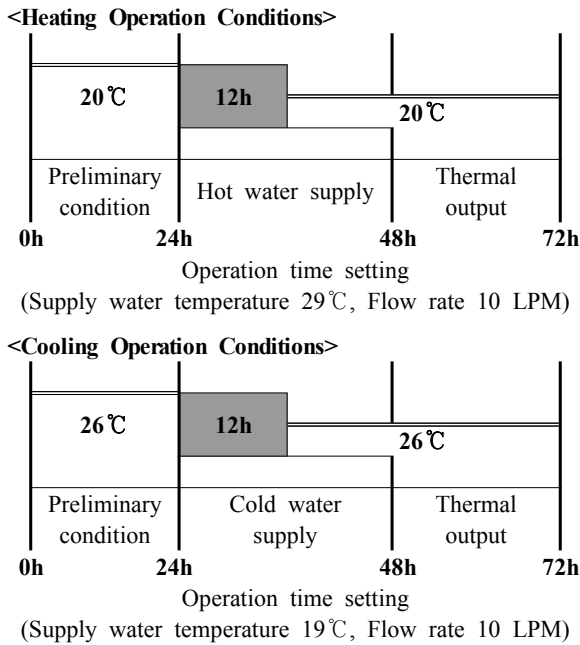


Fig. 3 Operation schedules in simulations.

같이 냉난방 운전 스케줄을 가정하여 냉온수의 공급 시간 변화에 따른 방열 및 축열 특성을 평가하는 것으로 하였다. 냉온수 유량 및 온도 조건은 기존 실측연구를 바탕으로 실제 구체축열시스템에서 운전되고 있는 현황을 감안하여, 난방 운전시 10 LPM, 29°C, 냉방 운전시 10 LPM, 19°C로 고정된 것으로 가정하였다.

### 3.2 PCM 물질의 열적 특성

본 연구에서는 실험을 통해 전열해석 시뮬레이션에 필요한 다양한 PCM 물질의 열전도율과 온도에 따른 비열값을 측정하였다. 열전도율은 TCi 열전도율 측정

Table 2 The melting point and density of each PCMs

	Melting Point (°C)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Classification
PCM①	22.0	777.0	Eutectic PCM
PCM②	24.0	853.0	Organic PCM
PCM③	64.0	0.88	Organic PCM
PCM④	21.0	773.0	Organic PCM
PCM⑤	20.0	777.0	Organic PCM
PCM⑥	29.0	777.0	Organic PCM
PCM⑦	26.0	0.98	Eutectic PCM

기(C-Therm Technologies 社)를 이용하여 측정하였으며, 온도에 따른 비열 값은 DSC(Differential Scanning Calorimeter) Q1000(TA Instrument 社)을 이용하여 열류량 측정을 통하여 산출하였다. 측정결과를 요약하면 Fig. 4와 Table 2와 같다.

Fig. 3과 같이 시뮬레이션 평가모델에 냉수와 온수를 각각 12시간 공급한 뒤 멈춘 경우, Fig. 6과 같이 온수(또는 냉수) 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방열(또는 방냉)된다고 가정할 수 있다. 비정상 전열해석을 수행하는 경우, 슬래브와 PCM의 열용량에 따라서 A구간에서의 축열량 및 방열량과 B구간에서의 축열량 및 방열량이 달라진다. 본 연구에서 구체축열시스템에 PCM 물질은 전체 슬래브 부피의 4.41%(0.42 m<sup>3</sup>)을 적용하였으며, 구체축열시스템에 공급되는 냉온수 온도 범위(19~29°C)에서 구체축열시스템이 갖는 열용량을 검토해 본 결과, Fig. 5와 같이 온도 범위에 따라서 다른 열용량특성이 나타나며, PCM 종류에 따라서 콘크리트의 열용량보다 작은 경우도 나타남을 알 수 있었다. Table 3과 같이 구체축열시스템의 열용량 평균 차는 -3.64~+5.76%이며, 열용량 차의 최소값의 범위는 -3.64~-1.51%이며, 열용량 차의 최대값의 범위는 -3.64~+21.20%로 나타났다.

### 3.3 시뮬레이션 결과 분석

#### 3.3.1 냉방조건

실온을 26°C로 가정하여 냉수를 12시간동안 19°C로 공급한 뒤 멈춘 경우, Fig. 7과 같이 냉수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방냉되고 있음을 알 수 있다. 냉방운전시, 배관 주위의 PCM의 온도범위 변화는 23.4~26.0°C인 것으로 나타났으며, Fig. 5와 같이 해당 범위에서는 PCM②의 열용량이 가장 큰 것을 알 수 있다. 방냉량의 평균 값은 PCM을 미적용한 경우가 5.40 W/m<sup>2</sup>로 가장 크게 나타났으며, PCM⑤, PCM②, PCM①, PCM③, PCM④, PCM⑥, PCM⑦의 순

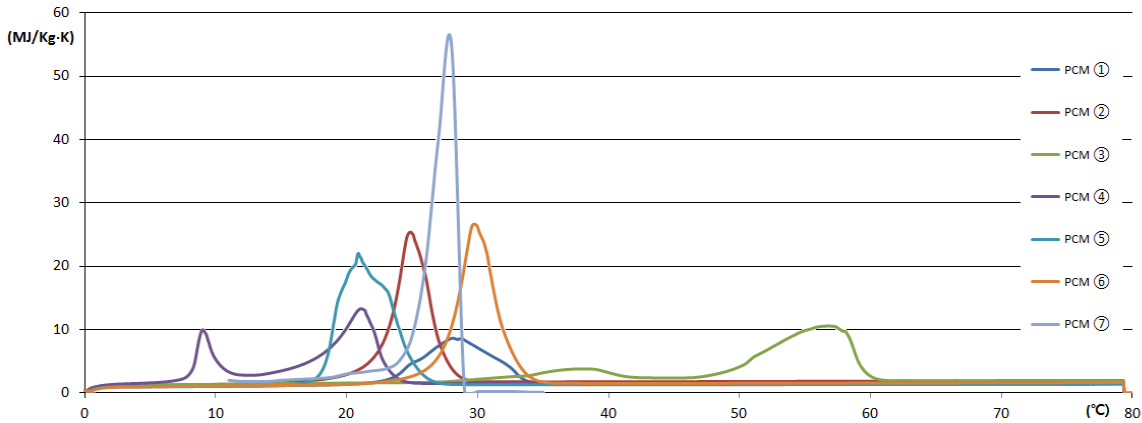


Fig. 4 Specific heat of each PCMs.

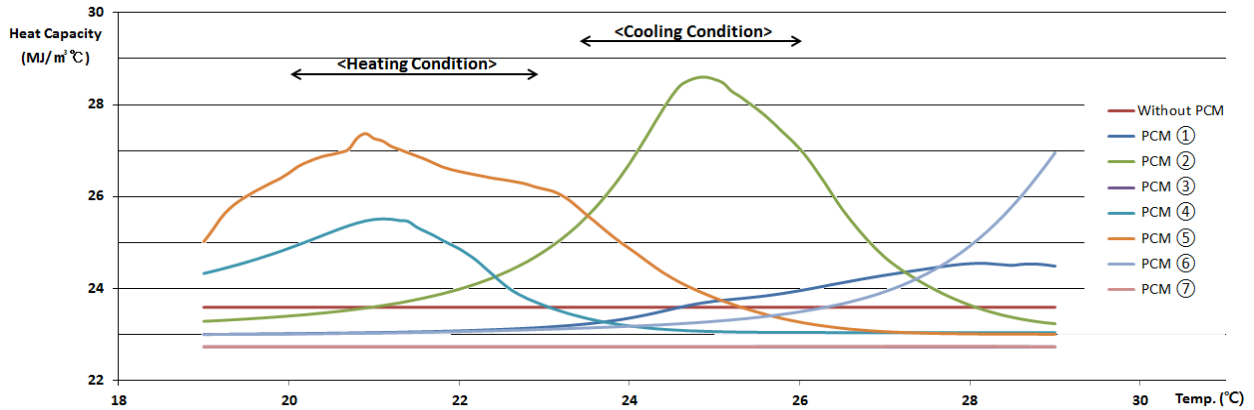


Fig. 5 The comparisons of heat capacity about TABS applied with PCMs.

Table 3 Average, Minimum and Maximum percentage values of heat capacity difference between with and without PCM

Category	Heat Capacity Difference between with and without PCM(%)		
	Average	Minimum	Maximum
Without PCM	-	-	-
PCM ①	0.00%	-2.50%	4.06%
PCM ②	5.76%	-1.51%	21.20%
PCM ③	-3.64%	-3.64%	-3.64%
PCM ④	0.85%	-2.34%	8.15%
PCM ⑤	5.36%	-2.48%	16.00%
PCM ⑥	0.01%	-2.51%	14.23%
PCM ⑦	-3.63%	-3.64%	-3.59%

으로 작게 나타났다. 냉방운전 시간동안 방냉량의 평균 값은 PCM③의 경우가 17.51 W/m<sup>2</sup>으로 가장 크게 나타

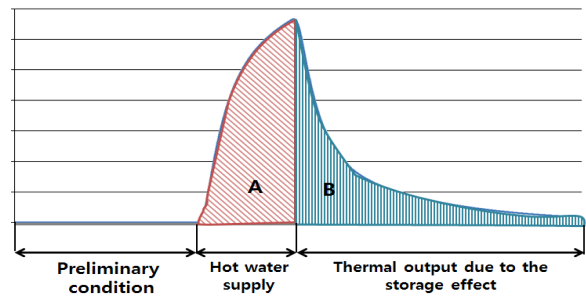


Fig. 6 Schematic diagram of thermal storage and thermal output in TABS with PCM.

났으며, PCM⑦, PCM 미적용, PCM⑥, PCM②, PCM④, PCM⑤, PCM ③의 순서로 낮게 나타났다. 방냉이 지속된 시간의 경우, PCM②의 경우가 10시간 31분으로 가장 길게 나타났으며, PCM⑤, PCM 미적용, PCM①, PCM ④, PCM⑥, PCM③, PCM⑦의 순으로 방냉 지속 시간이 짧게 나타났다. 이같은 결과는 냉방운전시 PCM②

Table 4. Characteristics of thermal output during cooling operation

	Average thermal output (W/m <sup>2</sup> )	Average thermal output during cooling operation(W/m <sup>2</sup> )	Duration time of thermal output during cooling operation
Without PCM	5.40	17.35	9 h 17 m
PCM①	5.28	17.12	8 h 35 m
PCM②	5.31	15.32	10 h 31 m
PCM③	5.28	17.51	8 h 17 m
PCM④	5.28	17.12	8 h 34 m
PCM⑤	5.35	16.37	9 h 21 m
PCM⑥	5.24	17.21	8 h 23 m
PCM⑦	5.23	17.50	7 h 56 m

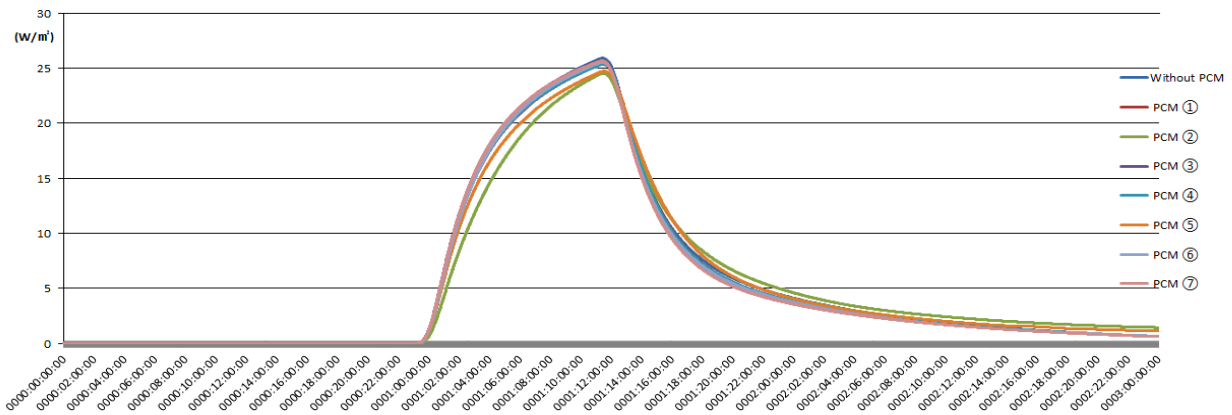


Fig. 7 Thermal output during cooling operation in TABS with PCMs.

를 적용한 경우, 가장 높은 열용량을 갖고 있기 때문에 방열 지속시간에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

### 3.3.2 난방조건

실온을 20°C로 가정하여 온수를 12시간동안 29°C로 공급한 뒤 멈춘 경우, Fig. 8과 같이 온수 공급 이후에도 축열된 열에너지가 실내로 지속적으로 방열되고 있음을 알 수 있다. 난방운전시, 배관 주위의 PCM의 온도범위 변화는 20.0~23.2°C인 것으로 나타났으며, Fig. 5와 같이 해당 범위에서는 PCM⑤의 열용량이 가장 큰 것을 알 수 있다. 방열량의 평균 값은 PCM 미적용 대안이 6.94 W/m<sup>2</sup>으로 가장 크게 나타났으며, PCM③, PCM①, PCM⑥, PCM⑦, PCM④, PCM⑤의 순으로 작게 나타났다. 난방운전시간동안 방열량의 평균 값은 PCM③의 경우가 22.54 W/m<sup>2</sup>으로 가장 크게 나타났으며, PCM⑦, PCM 미적용, PCM⑥, PCM②, PCM④, PCM③, PCM②의 순서로 낮게 나타났다. 방열이 지속된 시간의 경우, PCM⑤ 대안이 10시간 51분으로 가장 길게 나타났으

며, PCM 미적용, PCM④, PCM②, PCM①, PCM⑥, PCM③, PCM⑦의 순으로 방열 지속 시간이 짧게 나타났다. 이와 같은 결과는 난방운전시 PCM⑤를 적용한 경우, 가장 높은 열용량을 갖고 있기 때문에 방열 지속시간에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

### 3.3.3 종합결과분석

기존 실측연구를 바탕으로 실제 구체축열시스템의 실제 냉온수 유량 및 온도 조건을 반영하여 난방 시 29°C, 냉방 시 19°C의 저위의 열원조건에서 배관주위 PCM의 온도변화의 범위는 20~26°C일 때 구체축열시스템의 열용량이 커지며 방열(냉)하는 시간도 함께 길어지는 것으로 나타났다. 냉방운전시, 배관 주위의 PCM의 온도 범위는 23.4~26.0°C인 것으로 나타났으며, 이 범위에서는 PCM②의 열용량이 가장 크며 방열지속시간도 가장 긴 것으로 나타났으나, 냉방운전 시 평균 방열량은 15.32 W/m<sup>2</sup>으로 가장 작은 것으로 나타났다. 난방운전시, 배관 주위의 PCM의 온도범위는 20.0~23.2°C인 것

Table 5 Characteristics of thermal output in heating condition

	Average thermal output (W/m <sup>2</sup> )	Average thermal output during heating operation(W/m <sup>2</sup> )	Duration time of thermal output during heating operation
Without PCM	6.94	22.34	9 h 50 m
PCM①	6.76	21.85	9 h 19 m
PCM②	6.73	21.05	9 h 34 m
PCM③	6.79	22.54	8 h 47 m
PCM④	6.72	21.33	9 h 47 m
PCM⑤	6.71	20.08	10 h 51 m
PCM⑥	6.75	22.25	8 h 48 m
PCM⑦	6.73	22.53	8 h 24 m

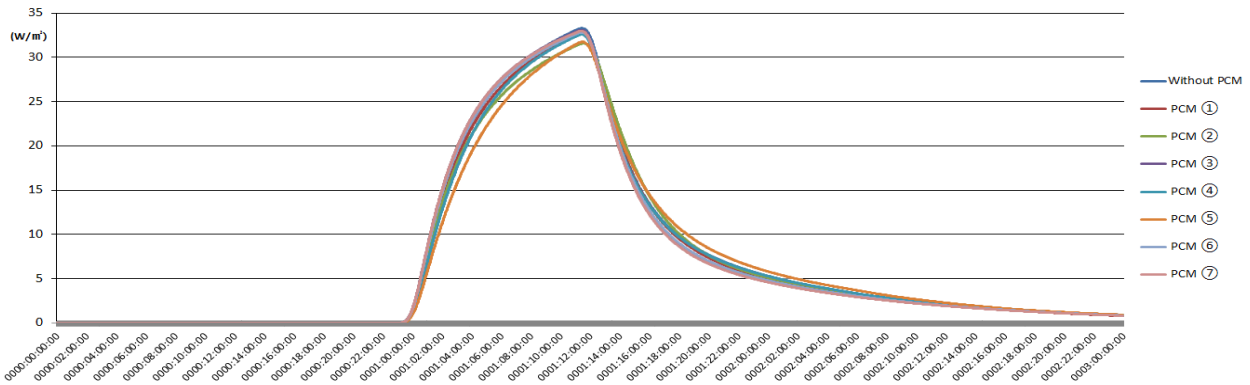


Fig. 8 thermal output in heating condition in TABS applied with PCMs.

으로 나타났으며, 이 범위에서는 PCM⑤의 열용량이 가장 크며 방열지속시간도 가장 긴 것으로 나타났으나, 난방운전 시 평균 방열량은 20.08 W/m<sup>2</sup>으로 가장 작은 것으로 나타났다. 구체축열시스템에 PCM을 적용하기 위해서는 설계시, 건물의 용도와 냉온수 유입 온도의 변화에 따라 PCM의 열용량 차이를 고려하여 최적화된 PCM을 선정해야할 것으로 판단된다. 또한 기존 구체축열시스템에 PCM을 적용하여 축열성능을 향상시켜 냉난방에너지를 절약하기 위해서는 적절한 PCM 적용이 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 PCM을 적용한 구체축열시스템의 축열 및 방열 특성을 분석하는 것으로서, 기존 연구를 바탕으로 구체축열시스템에서 PCM 적용 방안을 도출하고, 3차원 비정상 전열 해석 프로그램을 이용하여 PCM을 종류에 따라 적용한 구체축열시스템의 축열 및 방열특성을 분석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 구체축열시스템에서 축열성능을 향상하기 위해 PCM을 적용할 경우, 콘크리트 구조체 내에 별도 축열층을 구성하거나, Micro encapsulation 기술과 Composite을 이용한 SSPCM 재료의 적용이 가능하다.

(2) 본 연구에서는 PCM을 활용한 구체축열시스템에서 PCM 종류별 방열(방냉) 특성을 분석함으로써 최적의 PCM 재료를 선정하였다.

(3) 기존 구체축열시스템에 PCM 물질을 축열층으로서 적용한 경우, 냉난방운전시 냉온수 온도 변화 범위에 따라 열용량 값이 변화하며, 이에 따라 방열량 및 방열지속시간에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

향후 구체축열시스템의 설계안에 PCM을 적용할 경우, 구체축열시스템을 적용하기 위해서 설계시, 냉온수 유입 온도의 변화에 따라 PCM의 열용량 차이를 고려하여 최적화된 PCM을 선정해야할 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2012년 정부(국토해양부)의 재원으로 한

국건설교통기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 12첨단도시-07).

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0014060).

## Reference

1. Yoon, D. H., Choi, B. S., and Hong, H. K., 2006, Experiment and property study of Ondol panel based on phase change material, The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 122-125.
2. Cho, S. and Sohn, J. Y., 1992, Indoor air temperature distribution in a floor heating space with PCM panels, Journal of the Architectural Institute of Korea, pp. 81-88.
3. Cho, S., Yoo, J. I., and Chung, H. S., 1990, The characteristics of heat storage and emission of PCM in Ondol system, Solar Energy, Vol. 10, No. 2, pp. 38-43.
4. Choi, J. H., Sohn, K., Park C. H., and Hong, H. K., 2000, Consideration on the measurement method of heat of fusion and specific heat of PCMs used as latent heat storage materials, Proceedings of the SAREK 2000 winter annual conference, pp. 277-281.
5. Jeong, S. G., Jeon, J. S., Seo, J. K., and Kim, S. M., 2011, Consideration for application phase change material(PCM) for building energy saving, March of KIAEBS, Vol. 5, No. 1, pp. 7-15.
6. Celilia, C., Marc, M., Joan, R., Luisa, F. C., Maria, E. N., Ana, I. F., Ana, L., and Belen, Z., 2010, Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, Renewable Energy, Vol. 35, No. 10, pp. 2370-2374.
7. Kuznik, F. and Virgone, J., 2009, Experimental assessment of phase change material for wall building use, Applied Energy, Vol. 86, No. 10, pp. 2038-2046.
8. Lehmann, B., Dorer, V., and Koschenz, M., 2007, Application range of thermally activated building systems, Energy and Buildings, Vol. 39, No. 5, pp. 593-598.
9. Meierhans, R. and Olesen, B. W., 2002, Art museum in Bregenz-soft HVAC for strong architecture, ASHRAE Transactions 108 PART 2, pp. 708-713.
10. Pomianowski, M. Z., Heiselberg, P., and Jensen, R. L., 2011, Initial development of a combined PCM and TABS solutions for heat storage and cooling, Proceeding of the 9<sup>th</sup> Nordic Symposium on Building Physics Vol. 1, pp. 483-490.
11. Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S., and Haussmann, T., 2005, Micro-encapsulated phase change materials integrated into construction materials, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 89, No. 2/3, pp. 297-306.
12. Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., and Akiyama, T., 2011, Development of phase change materials based micro-encapsulated technology for buildings : A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 2, pp. 1373-1391.
13. Zhang, Y. P., Lin, K. P., Yang, R., Di, H. F., and Jiang, Y., 2006, Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, Energy and Buildings, Vol. 38, No. 10, pp. 1262-1269.
14. Mehling, H. and Cabza, L. F., 2008, Heat and cold storage with PCM, An up-to-date introduction into basics and applications.