

상변화 물질의 적층구조에 따른 열특성 변화

김동호, 박기덕, 유혜리, 최유정, 김광배, 송오성*

*서울시립대학교 신소재공학과

PCM Thermal Properties According to Stacked Structures

Dongho Kim, Kideok Park, Hyeri Yu, Yoojeong Choi, Kwangbae Kim, Ohsung Song*

*Dept. of Material Science and Engineering, University of Seoul

요약

본 논문에서는 PCM의 적층구조의 변화에 따른 열저감을 확인하였다. 실험에서 사용된 PCM은 Octadecane, Eicosane 그리고 Hexadecane이다. 실험을 통해 적층된 PCM 계면의 열전도도에 따라, 적층 순서에 따라 분류하여 모델간의 열저감 효과를 비교했다. 그 결과, 동일 PCM에 대해 계면의 물질이 높은 열전도도를 가질 때 높은 열저감 효과를 보였다. 이종의 PCM의 경우 상부에 배치한 PCM의 상변화 온도가 더 큰 모델이 우수한 열저감 효과를 보였다.

그리고 Hexadecane(이하 H, C₁₈H₃₄)의 정보를 보여준다. 파라핀계 PCM인 O, E 그리고 H은 다소 비싸지만 실온 부근의 상변화 온도를 갖는 PCM 중에서는 합리적인 가격대를 가졌다. 또한, 비슷한 잠열량을 가진다. 이러한 O, E 그리고 H의 효율을 극대화하기 위해 적층 순서와 패킹 소재의 열저항을 변수로 두어 어떤 조합으로 PCM을 적층한 구조가 모델 내부의 열저감에 뛰어난 효과를 보이는지 연구하였다.

[표 1] 실험에 사용된 PCM 정보 (구매처 : Celcius Korea)

PCM	Octadecane	Eicosane	Hexadecane
T _m (°C)	28°C	36°C	18°C
Molecular Weight (g/mol)	240	254	226
Latent Heat (kJ/kg)	220	200	220
Price (W/kg)	50,000	50,000	50,000

2. 실험방법

[그림 1]은 이 실험에서 사용된 PCM 팩의 모습이다. PCM은 한 면은 나일론 필름[그림 1(a)] 그리고 나머지 한 면은 알루미늄 필름[그림 1(b)]을 활용하여 150*150*5mm 크기로 제작하였다. 나일론 면이 광원과 마주할 때를 앞면(이하 F)으로 정의하고 알루미늄

1. 서론

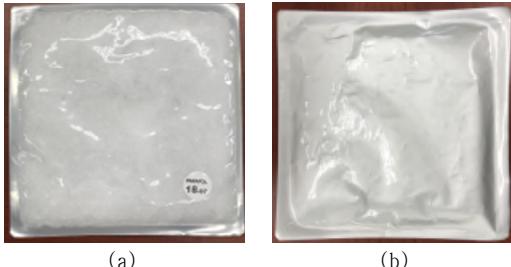
최근 상승하는 기온과 이상기후 및 지구온난화에 따른 대응으로, 효율적 에너지원 그리고 에너지소비 절감 방안에 대해 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 그 해결방안의 한가지로 상변화물질(이하 PCM)을 활용한 방식을 고려하였다. [1]

PCM(Phase change material)이란, 상변화를 통하여 온도에 따라 열을 흡수, 방출할 수 있는 소재이다. 즉, 냉방 시 별도의 에너지 사용 없이 열을 저장하여 온도를 낮추는 효율적인 열저감이 가능하다. [2] [3]

PCM은 크게 유기계와 무기계로 분류된다. 유기계 PCM은 대체적으로 화학적으로 안정하며 물질마다 상변화온도가 다양하다는 장점이 있지만 대체로 비싼 가격과 무기계에 비해 작은 잠열을 가졌다다는 단점을 보인다. 무기계 PCM 같은 경우는 일반적으로 잠열이 높고 가격대가 낮지만 화학적으로 불안정하여 상분리/상누출 현상이 빈번하다는 단점을 가졌다. 따라서 본 연구에서는 비교적 안정한 유기계 PCM 중 한 종류인 파라핀계 PCM의 열특성 극대화를 도모하고자 했다. [4]

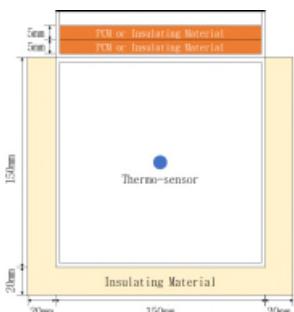
[표 1]은 본 연구에서 사용되는 PCM 물질 Octadecane(이하 O, C₁₈H₃₈), Eicosane(이하 E, C₁₈H₄₂)

면이 광원과 마주할 때를 뒷면(이하 B)로 정의하였다.



[그림 1] PCM 팩의 앞뒷면 ((a) 앞면(F)=나일론 필름, (b) 뒷면(B)=알루미늄 필름)

[그림 2]와 같이 150*150*150mm 아크릴 박스 4개를 준비하여 측면과 아랫면을 20mm 두께의 스티로폼으로 단열 처리하였다. PCM은 아크릴 박스 상부에 적층하였다. 또한 실험모델 상부에 빛 가림막(사포)을 이용해 빛을 차단하였다.



[그림 2] 실험에 사용된 실험모델의 설계도

[그림 3]은 실내 실험환경의 외형으로서 600*600*900mm 크기의 직육면체를 20mm 두께의 단열재를 이용해 밀폐공간을 제작하였다. 밀폐공간의 천장 가운데에 100W 열구를 설치하고 실험실은 24°C로 유지하였다. 실험모델과 광원의 거리는 약 500mm이다. 모델 내부의 온도를 측정하기 위해 4 channel data logger (CENTER 309, CENTER(Taiwan))를 이용하여 실험모델 내 중앙 바닥에서 70mm 높이에서 측정하였다. 데이터는 1분 간격으로 측정하였으며 오차 범위는 ±1°C이다. 실험은 PCM의 적층구조를 다르게 한 3개의 모델과 단열스티로폼을 적층한 REF모델, 총 4개의 모델을 활용하여 실험을 진행하였다. [5]



[그림 3] 실내 실험환경의 정면 모습

[표 2]는 실험 조건을 정리한 것이다. 가령 Experiment 3-1의 T2 모델 EO/FB는 나일론 면이 광원을 마주하게(F) E를 상부에 배치하고, 그 아래 알루미늄 면이 광원을 마주하게 (B) O을 두는 것을 의미한다.

[표 2] Experiment 1, 2, 3-1, 3-2 의 온도계 채널(T1, T2, T3, T4)에 해당하는 열전도도 설정

Experi- ment	In/out door	T1	T2	T3	T4
1	In	OO/FF	OO/FB	OO/BB	REF
2	In	OO/FB	OE/FB	EO/FB	REF
3-1	In	OO/FB	EO/FB	OH/FB	REF
3-2	Out	OO/FB	EO/FB	OH/FB	REF

Experiment 1은 나일론 필름과 알루미늄 필름의 열전도도 차이에 기인한 PCM의 상변화 양상을 확인하기 위해 O를 2개 적층하여 실험을 진행하였다.

Experiment 2는 T_m 이 다른 두 물질 중 어떤 PCM을 광원과 더 가까이 설치하였을 때, 효율이 좋은지를 확인하기 위해 O과 E의 적층 순서를 달리하여 실험을 진행하였다. 특히 Experiment 1에서 가장 높은 효율을 보인 FB 적층구조로 통일하였다. 또한 이종의 PCM을 적층하는 것의 효율을 확인하기 위해 OO/FB를 포함하여 실험을 진행하였다.

Experiment 3-1은 O와 H의 적층 효과를 비교하기 위해 높은 열저감 효율을 보인 모델들과 OH/FB를 함께 실험하였다. Experiment 3-2는 Experiment 3-1을 실외에서 동일한 조건으로 진행한 것이다.

3. 실험 결과 및 고찰

[표 3]은 PCM 샘플 계면의 상하부 열전도도 값을 보여 주고 있다. 열전도도는 단위 시간에 흐르는 열량을 단위 길이 당 온도차로 나눈 것이다. 모든 PCM 패킹 필름의 두께는 0.15mm로 일정하다. 모델 상부의 PCM 진공팩은 앞서 말한 것과 같이 한 면은 나일론으로, 다른 한 면은 알루미늄 필름으로 이루어져 있는데, 위 표에 따르면 알루미늄의 열전도도는 나일론의 약 1000배 높은 값을 보였다. 이에 따라 Experiment 1의 변수는 PCM샘플 계면의 열전도도 차이로 설정하였다.

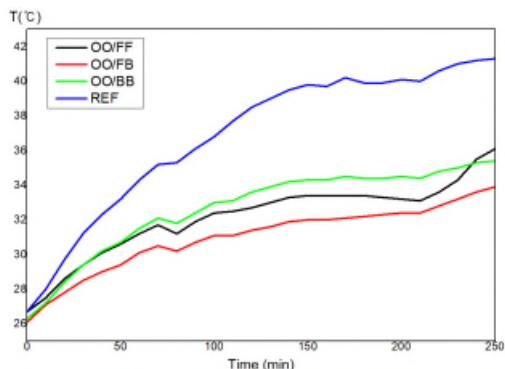
[표 3] 재료에 따른 열전도도

	Styrofoam	Nylon	Aluminium
Thermal Conductivity (W/(m·K))	0.034	0.25	237

[그림 4]는 Experiment 1의 결과이다. 그래프의 x축은 온도(°C), y축은 시간(min)을 나타낸다. 실험 결과 REF와 비교하면 OO/FF, OO/FB 그리고 OO/BB은 약 200분 정도

의 온도지연(Time-lag) 효과가 공통적으로 발생함을 확인할 수 있었다. 온도지연 효과란, 최고 온도에 도달하기까지의 시간을 지연시키는 것으로 외부열에 의한 내부 온도 상승이 더디게 진행됨을 말한다. 이러한 효과가 나타나는 원인은 적층된 PCM이 내부로 유입되는 열을 축열하였기 때문이다. 세 모델 중 OO/FB가 전반적으로 가장 우수한 열 저감 성능을 보였다. [6] [7]

Experiment 1의 분석결과, 해당 실험은 PCM 적층 시 계면의 열전도도 차이를 변수로 두며, 계면 사이 열전도도가 큰 FB가 열저감 성능이 가장 우수한 구조였다. 따라서 한 종류의 PCM을 사용한 Experiment 1에서는 적층한 PCM샘플 사이의 계면 제어가 열저감 효과에 있어 변수로 작용하는 것으로 판단된다. 다만 Figure 4의 4 모델 모두 60분 부근에서 모든 모델의 온도가 일제히 감소하는데, 당시 실내 용기 옆면에 위치한 냉방 장치의 작동으로 인해 발생한 실험상의 오차로 추측된다.

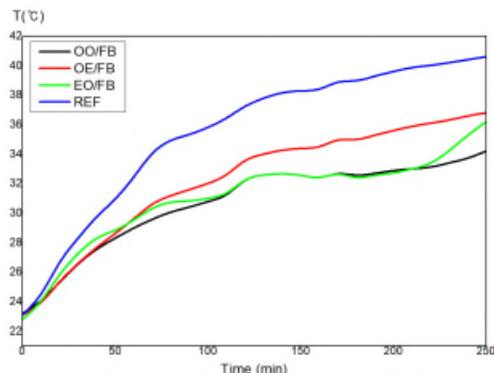


[그림 4] Experiment 1의 결과 (실내)

[그림 5]는 Experiment 2의 결과이며 상변화온도가 다른 O와 E의 상이한 적층 순서가 모델 내부의 열저감에 미치는 영향의 양상을 확인했다. 적층 구조는 Experiment 1에서 비교적 높은 성능이 확인된 FB로 하였다. 실험결과, 전반적으로 OO/FB와 EO/FB가 근소한 차이를 보이며 큰 열저감 효율을 나타낸다. 가장 우수한 결과를 보인 모델은 OO/FB이었으나 EO/FB 역시 실험 시작 후 200분 동안 그에 못지않은 우수한 열저감 효율을 나타냈다.

Experiment 2를 분석했을 때, OO/FB가 실험 전반에 걸쳐 가장 높은 효율을 보인다. 이는 상변화 온도가 더 낮은 O를 두 번 적층한 구조가 E와 O를 적층한 것보다 더 빠르게 열을 흡수하여 모델의 내부 온도 상승을 막은 것으로 보인다. 한편, OE/FB의 온도가 EO/FB의 온도를 90분이 경과하는 시점에서 역전하는 것을 확인하였다. 그 이유로는 EO/FB에서 상부로 들어오는 열이 상부에 적층되어있는 E를 거친 후 O로 전달되기 때문에, 상하부 적층이 반대인 OE/FB보다 O의 온도지연효과가 연장된 것으로 판단된다. 따라서 E가 보다 직접적으로 열을 전달받을 수 있는 EO 모

델이 더 큰 열저감 효과를 보인 것으로 판단된다. [8]

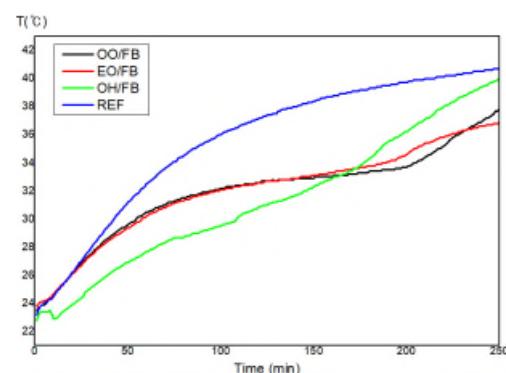


[그림 5] Experiment 2의 결과 (실내)

이 연구는 25°C 실온 부근부터 40°C가 넘는 고온까지의 환경에서 실험을 진행하였지만 실제 한여름 기온이 40°C를 넘는 경우는 흔치 않기 때문에, 현실적인 열저감 효과를 보기 위해서 더 낮은 상변화 온도를 갖는 H을 Experiment 3-1에 추가하여 실험을 진행하였다.

[그림 6]은 Experiment 3-1의 결과이다. Experiment 3-1은 앞선 실험에서 높은 열저감 효율을 보인 적층 구조였던 OO와 EO에 OH 적층 구조를 추가하여 모두 FB로 실험을 진행하였다. O보다 상변화온도가 낮은 H을 추가, 특히 Experiment 2의 결과를 반영하여 상변화온도가 비교적 더 높은 O을 상부에 오도록 적층한 OH/FB를 제작하였다. OH/FB는 실험 초반부터 170분까지 가장 큰 열저감 효과를 보였다. 하지만 170분이 초과된 후 빠르게 내부온도가 증가하며 REF의 내부온도와 가까워지는 양상을 보였다.

Experiment 3-1의 분석결과, OH/FB가 가장 큰 열저감을 보인 이유는 H의 상변화 온도가 O, E보다 낮기 때문에 실험 초반 먼저 축열을 한 것으로 판단된다. 170분 이후에 OH/FB의 내부온도가 추월하는 이유는 H가 상변화를 모두 마쳤기 때문이라 판단된다. 또한 실험 시작 전 상변화 온도가 실온보다 낮은 H를 냉각시켜 사용한 결과, 실온보다 차가운 H이 실험 초반 모델의 내부온도를 낮춰 실험 시작 10분 동안 OH/FB가 타 모델과 다른 경향을 보였다.

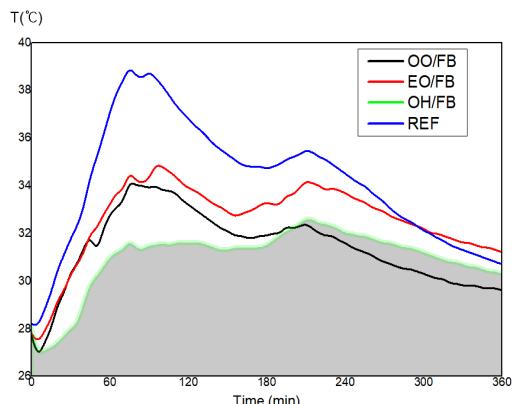


[그림 6] Experiment 3-1의 결과 (실내)

[그림 7]은 Experiment 3-2의 결과이다. OH/FB의 적분값을 음영으로 표시하였다. Experiment 3-2는 4개의 모델들의 실험조건을 Experiment 3-1과 같게 한 후, 낮 시간동안 실외에 4개의 모델들을 배치하여 실내 실험을 실제 외부에 적용하여 현실적 타당성을 확인하는 것이다. 예상과 같이 Fig. 7은 Fig. 6의 결과와 매우 흡사한 경향을 나타냈다. Fig. 7 역시 실험 진행 200분까지 OH/FB가 가장 큰 열저감을 보인 후, 200분을 기점으로 OO/FB보다 온도가 높아지면서 REF의 실험모델 내부 온도와 비슷해지는 양상을 보였다.

Experiment 3-2의 분석 결과, 초반 모든 실험모델들의 온도가 약간 감소하는 경향이 보인다. 이는 냉각된 PCM들이 일시적으로 모델 내부의 온도를 낮췄기 때문에 발생한 오차이다. EO/FB 와 OO/FB에 비해 OH/FB의 상변화온도 범위가 낮기 때문에 실험모델 내부 온도를 33°C 이하로 유지하며 가장 큰 효율을 보인 것으로 확인되었다.

[표 4]는 Experiment 3-2 결과그래프의 적분값을 수치가 큰 순서로 정리한 표이다. 각 모델들의 적분값과 REF의 적분값과의 차이를 비교했을 때, OH/FB의 적분값이 가장 큰 차이를 나타냈으며, 가장 열저감 효율이 높은 것으로 판단된다.



[그림 7] Experiment 3-2의 결과 (실외) 및 OH/FB의 그 래프를 적분한 모습

[표 4] [그림 7]의 그래프의 적분값과 REF 모델과 각 모델 적분값의 차이

Model	REF	EO/FB	OO/FB	OH/FB
Integral value of data	12,312	11,754	11,313	11,157
(REF) - (Each Model)	0	558	994	1155

4. 결론

에너지 절감을 위해 상업적으로 활용되고 있는 Octadecane, Eicosane 그리고 Hexadecane을 사용하여 적층구조에 따른 열특성 변화를 확인하였다. 그 결과, 동일

PCM에 대해 적층구조는 계면 물질의 열전도도가 높을수록 열저감 효과에 유리하였다. 한편, 이종의 PCM을 적층하는 경우 상부에 배치된 PCM의 T이 더 큰 조합이 상대적으로 우수하였다. 실제 여름기온을 고려하였을 때, 상변화 온도가 비교적 낮은 Octadecane과 Hexadecane을 적층한 구조가 가장 우수한 온도지연 효과를 보였고, 최고 기온이 29.5°C 까지 보인 야외에서 동일한 조건 하에 진행한 실험 결과에서도 동일한 양상을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 -현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017H1D8A1030582).

참고문헌

- [1] 지석호, 조일현, 2018 “국제 신재생에너지 정책 변화 및 시장 분석 기본연구보고서, 18-27
- [2] 김보현, 이한승, 2011 “PCM을 혼입한 시멘트 모르타르의 열적성능에 관한 연구”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 23, No. 4, Korea Concrete Institute, pp521–528
- [3] 김수민, “PCM을 이용한 에너지절약형 건축재료”, 2012, Journal of the KBG 0406, Vol. 13, No. 1, pp10–16
- [4] 최웅수, “상변환소재를 활용한 열에너지 저장 기술 개발 동향”, 2017, 한국환경산업기술원, 코네티리포트 (지속가능 환경자원)
- [5] 박진철, “도시열섬현상 저감을 위한 PCM Cool Roof System의 적용기술 개발”, 2017, 중앙대학교 산학협력단
- [6] 최성호, 김민영, 박진철, “바닥복사 난방시스템에서 PCM의 Time-Lag” 2019, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, Vol. 39, No. 1, pp308–309
- [7] Kim, Su-Min, “주거공간 성능개선을 위한 상변화 물질(PCM)의 건축물 적용 기술개발 기획”, 2017, 숭실대학교 산학협력단
- [8] 정찬진, “상변화물질을 이용한 축열장치 및 그 난방 시스템”, 10-0337689, 대한민국특허청, 1999