

미립잠열재를 이용한 축열 특성에 관한 실험적 연구

이 효 진[†], 이재 구^{*}

[†] 대전산업대학교 건축설비공학과, ^{*}한국에너지기술연구소 에너지환경연구부

Experimental Study on the Microencapsulated PCM as a Thermal Storage Medium

Hyo-Jin Lee[†], Jae-Goo Lee^{*}

[†]Department of Building Service Engineering, Taejeon National University of Technology, Taejeon 305-320, Korea

^{*}Energy and Environment Research Department, KIER, Taejeon 305-600, Korea

(Received August 10, 2000; revision received November 6, 2000)

ABSTRACT: Microencapsulated PCM particles are mixed with distilled water and utilized to evaluate its characteristics and performance as a thermal storage medium transporting heat. For the present study, tetradecane(C₁₄H₃₀, T_m=5.5℃) is capsulated in the core with the melamine of its surface. The size of particles is well-controlled under 10 μm in the way of in-situ polymerization with melamine-formaldehyde resin. For the experiment, the concentrations of slurries are prepared for 20 wt%, 30 wt%, and 40 wt%. The results are compared with those of water and 100% tetradecane oil. The pure water and tetradecane start solidifying within 20 minutes after introducing cooling water into the thermal storage tank whose flow rates are varied by 125 cc/min, 250 cc/min, and 500 cc/min. However, MicroPCM slurries are required relatively longer period of time for their phase change than pure phase change materials. That is, the entrained MicroPCM particles control its heat transfer in terms of natural convection and conduction to them.

Key words: Microencapsulated pcm(잠열미립자), Thermal storage(축열), PCM(잠열재)

기 호 설 명

C_p : 비열 [J/kg℃]
 G : 유량 [kg/s]
 h : 열 전달계수 [W/m²℃]
 k : 열 전도도 [W/m℃]
 Q : 축열률 [W]
 r_1, r_2 : 반경 [m], 식(4), (5)

T : 온도 [℃]
 U : 열 관류계수 [W/m²℃]

하첨자

1-9 : 열 전대위치
 c : 순환 냉각수
coil : 순환 냉각수 코일
inlet : 입구
out : 출구

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1181; fax: +82-42-821-1175

E-mail address: hyojin@hyunam.tnut.ac.kr

1. 서 론

축열을 하는 방법은 다양한 종류와 방식에 의해 소개되어지고 있다. 그중에서도 냉열을 축열하는 법은 물이나 상 물질인 왁스 또는 무기수화물을 주로 활용하여 냉방용 축열시스템에 활용하고 있다.⁽¹⁾ 그러나 대부분은 상 물질을 용기에 넣어 간접적으로 열을 회수하고, 회수된 열을 이차적인 작동유체에 의하여 수요처에 공급하는 방법이 가장 보편적으로 활용되는 방식이다. 이때 수송되는 열은 현열 형태로 전달된다. 최근에는 잠열을 수송하기 위한 방식으로 아이스 슬러리^(2,3) 및 고분자물질인 가교화된 HDPE(Cross linked High Density Polyethylene)⁽⁴⁾를 활용하는 방식이 실용화 연구되고 있다.

그러나 상기에 언급된 방식에는 여전히 해결해야 할 문제들이 있다. 특히 입자간에 서로 응결이 되는 현상이 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 상 물질은 고분자 막을 입힌 캡슐화(Microencapsulated Phase Materials : 미립잠열재)를 시키면 입자간의 응결이 발생되지 않으며, 내부에 함유된 상 물질에 의해 저장된 열을 직접 수송시킬 수 있는 장점이 있다.

미립잠열재를 활용하는 기술은 전자부품의 냉각시스템에^(5,6) 주로 활용되고 있으며, 이를 축열하여 냉난방에⁽⁷⁻⁹⁾ 활용하는 기술은 아직 초보수준에 있다. 미립잠열재에 의해 얻어지는 열의 유체역학적인 특성을 해석하는 데 있어서 많은 기초 물성을 나타내는 요소들을 필요로 한다. 이러한 연구에 있어서 Goel et al.⁽⁷⁾은 직접 수송할 때 얻어지는 열을 수치해석적인 방법으로 접근하였으나 상 변화 전후에서 물질이 고상이나 액상의 형태로 존재하기 때문에 이에 대한 정확한 해석이 요구되고 있다. Inaba et al.⁽⁸⁾은 잠열미립재를 작동유체인 물과 혼합하여 밀도, 잠열, 및 열전도율을 온도의 함수로써 측정하였고 Yamagishi et al.⁽⁹⁾은 상변화시 일어나는 과냉각 현상을 실험적으로 측정하였다.

본 논문에서 미립잠열재의 제조방법에 대하여 간략히 기술하고, 제조된 미립자의 열적특성 결과를 알아보고자 한다. 또한 10 μm 이하로 제조된 미립잠열재를 물과 혼합된 슬러리 형태로 20 wt%, 30 wt%, 40 wt% 등의 농도에 따른 축열성

능을 측정하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 잠열미립자의 제조 및 실험 장치

2.1 잠열미립자 제조

상 물질을 미립화시킨 캡슐은 열 흡수 및 방출이 이루어지더라도 상 물질간의 응집 및 응결이 방지됨으로써 내부의 핵 물질의 특성을 지속적으로 유지할 수 있다. 마이크로캡슐이란 작은 고체, 액체 입자나 기포의 외부에 피막을 형성하여 제조하는 것으로, 축열 및 전열효과를 극대화하기 위한 목적으로 벽 물질을 견고하게 유지하여 내부물질의 유출을 방지할 수 있는 내구성이 강조되는 특성을 지니고 있다. 즉, 상 물질을 둘러싸는 벽 물질은 캡슐의 내용물이 외부로 유출이 되지 않도록 하기 위하여 투과성이 없는 물질을 이용해야 하고 벽을 구성하는 고분자물질을 가교화시켜야 한다. 가교화가 일어난 벽 물질은 깨지기 쉬운 성질을 지니게 되어서 열 저장기술에 쓰이는 경우에는 상 변화에 수반하는 코어(core) 물질의 부피변화의 문제를 해결할 수 있어야 한다. 따라서 벽 물질은 이러한 부피변화를 수용할 수 있는 신축성이 있는 물질이어야 하며 요구되는 신축성을 주기 위해서는 가교밀도를 줄여서 가교간 거리를 늘려야 한다. 그러나 가교간 거리가 길어지면 내용물이 유출이 될 수 있으므로 가교 거리를 늘리는 데는 한계가 있어, 고분자를 구성하는 단량체를 신축성을 띠는 물질로 이용하게 되는데 이러한 고분자 물질로는 나일론, 우레아, 멜라민수지, 가교된 PVA 등이 있다.

본 연구에서 이용한 in-situ 중합법은 높은 수율 및 고농도의 캡슐화가 가능하며 제조비용이 저렴하고 캡슐화 단계를 쉽게 조절할 수 있는 장점을 지니고 있다.⁽¹⁰⁾ In-situ 중합법에 의한 마이크로캡슐 제조 공정은 내부물질의 유화공정과 겔질물질을 형성하는 중합공정에 의해 이루어진다. 유화공정에서 사용되는 계면활성제는 캡슐화된 물질을 분산 유화와 유화된 에멀전의 안정시킴과 동시에 캡슐벽을 형성하기 위한 촉진제로써 기능을 지니고 있어야 하는데, 내부와 겔질물질의 계면에서 배향하여 각 액적 주위에서 입체 및 전하 경계층을 만들어 분산된 액적간에 대한 장애물로 작용하여 균일한 입도분포 유지, 에멀전 안정성

을 유지하게 한다.

2.1.1 제조실험

냉방용 잠열물질로써 용융 온도가 5~6°C인 테트라데칸(CH₃(CH₂)₁₂CH₃)을 사용하여 벽 물질은 멜라민-포름알데히드 수지(MF), 유화를 위해서는 음이온 수용성 계면활성제인 SMA(styrene-maleic acid anhydride copolymer)를 사용하여 잠열미립자를 제조하였다. 승온 및 냉각이 가능한 이중 자켓형 반응기를 사용하여 멜라민 1.9 kg (15.079 mol/g), 포르말린(37% 포름알데히드) 3.1 kg(30.233 mol/g)으로 볼비 1 : 2.54의 비율을 유지하여 물 5 kg을 60°C에서 1시간에서 1시간 30분 동안 혼합, 교반하여 조제하였다. 반응온도인 60°C에서 3~4시간 동안 400 rpm을 유지하여 캡슐화된 슬러리를 제조하였다.

2.1.2 특성분석

제조된 잠열미립자의 열적 특성분석을 위하여 DSC(Instrument Specialists Incorporated 사)를 사용하였으며 유화된 내부물질의 액적 분포는 광학현미경(Olympus BX50)으로 분석하였고, 입도 분석은 FRITSCH analysette 22(Zerleinern Partikel messen Teilen Kartoffelstarke [Nr.482508]), 잠열미립자의 표면특성은 SEM(Scanning Electron Microscopy, Philips EX30)으로 관찰하였다.

2.2 축열 성능평가

축열장치는 직경이 10 cm이고 길이가 20 cm인

아크릴 용기와 내부에 1/4인치외의 구리튜브를 이용하여 냉각수가 순환하도록 하였으며 위로부터 5 cm, 10 cm, 15 cm 위치에 각 1 cm 간격으로 3개씩 총 9개의 T-type 열전대를 설치하였다. 축열조의 외부는 2 cm 두께의 유리섬유 단열재를 이용하여 열 손실을 억제하였다. 순환 냉각수 온도는 내부의 온도가 ±0.5°C에서 조절이 가능한 항온조에서 에틸렌글리콜 수용액(26.Vol%)을 사용하여 온도를 조절하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 축열 시스템의 모식도를 나타낸 것으로서 축열조에 위치한 열전대를 각 점으로 표시하였다. 실험은 100% 테트라데칸과 물(중류수)을 비롯하여 슬러리의 농도를 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%에 대하여 수행하였으며, 순환 냉각수의 공급유량을 각각의 상 물질에 대하여 125 cc/min, 250 cc/min, 및 500 cc/min의 변화를 주었다. 또한 결과의 신뢰도 확인을 위하여 주어진 순환 냉각수에 대하여 2회에 걸쳐 반복실험을 하였으며, 얻어진 온도분포가 95%의 신뢰도 범위에 모두 포함되는 것으로 나타났다.

냉각수에 의하여 공급되고 회수되는 열량은 코일 입구와 출구에 T-type의 열전대를 설치하여 다음과 같은 식에 의하여 환산하였다.

$$Q = UA \overline{\Delta T} \quad (1)$$

여기서 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference)는 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.⁽¹¹⁾

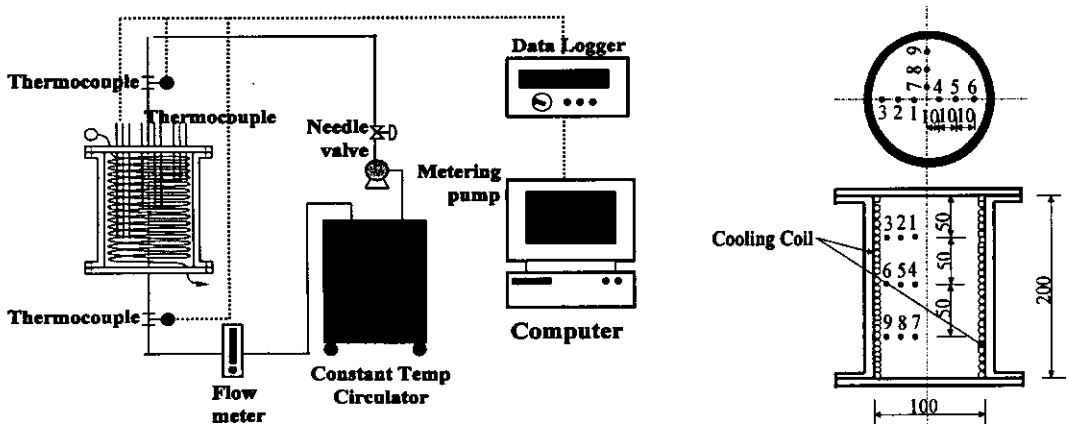


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental thermal storage system.

$$\overline{\Delta T} = \frac{(T_3 - T_{inlet}) - (T_9 - T_{out})}{\ln\{(T_3 - T_{inlet}) / (T_9 - T_{out})\}} \quad (2)$$

식(1)에 의하여 순환 냉각수가 축열조에 공급한 총 열량을 환산하고, 계산된 총 열량, Q 를 이용하여 열 관류계수 U 값을 구할 수 있다.

$$UA \overline{\Delta T} = G_c C_{pc} (T_{inlet} - T_{out}) \quad (3)$$

$$U = \frac{G_c C_{pc} (T_{inlet} - T_{out})}{2\pi r_1 L \overline{\Delta T}} \quad (4)$$

상기 식에서 G_c 는 냉각코일 순환수의 유량(kg/s), C_{pc} 는 냉각코일 순환수의 비열(J/kg°C), L 은 축열조 길이(0.2m)의 값을 넣어서 코일에서 내부로 전달되는 열 전달계수를 각각 계산한다.

$$h = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k_{coil}} - \frac{r_1}{r_2 h_c}} \quad (5)$$

3. 결과 및 토론

3.1 잠열미립자

수용성 음이온 계면활성제를 사용하여 잠열을 가진 파라핀계 오일(테트라데칸)을 유화시켜 벽 물질인 멜라민 수지를 이용하여 마이크로캡슐을 만들었다. 반응기내에서의 혼합은 교반기 형태, 크기, 축 방향에서의 위치가 중요한 운전 인자로 작용하며, 균일한 유화를 위하여 교반 속도를 적절하게 유지하였다.

마이크로캡슐의 제조에서 중요한 유화공정과 증합공정을 고찰해 보면 첫째, 계면활성제의 선택에 따른 결과로써 오일 액적의 균일한 크기를 가지며 다음 공정까지에 대해 안정성을 가지는 것이 중요하다. 또한 대량 생산을 할 경우 균일 교반기(homomixer)의 사용에서 요구되는 한계의 양에 대해 용액 자체가 가지고 있는 점도에 따라 유화시간이 달라지는 것을 알 수 있다. 두번째, 증합공정에서 미리 프리폴리머가 만들어지고 벽 물질이 유화된 오일 액적에 접근 후 반응시간이 짧도록 해야 한다.

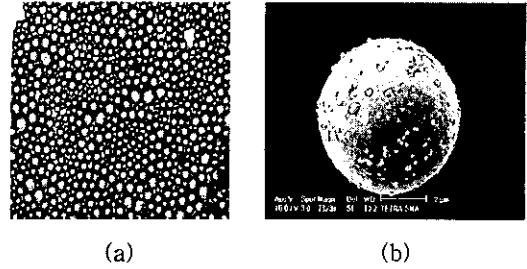
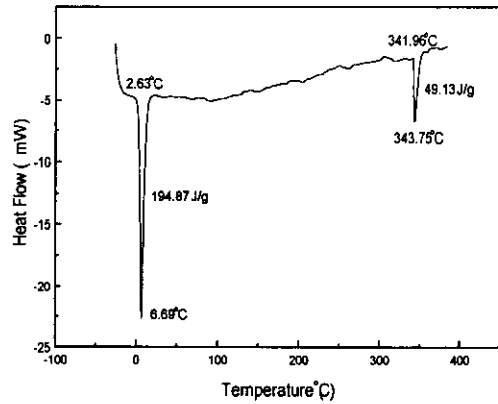
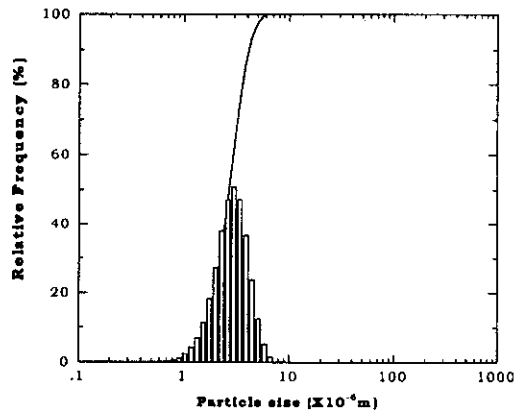


Fig. 2 (a) MicroPCM slurry with melamin-wall and (b) its magnified particle.



(a)



(b)

Fig. 3 (a) DSC results and (b) particle size distribution of MicroPCM.

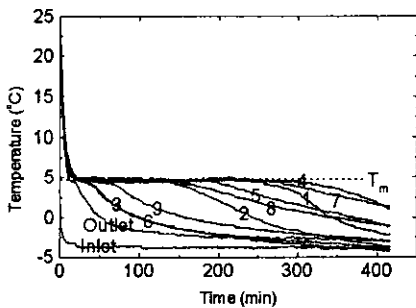
Fig. 2는 대량생산을 위한 공정으로 150l 크기의 반응기에서 만들어진 잠열미립자 슬러리를 나타낸 그림으로써 입자 크기는 1~10 μm 의 크기

를 갖으며, 만들어진 잠열미립자의 표면 모양을 SEM을 통하여 확인하였다. 표면이 울퉁불퉁한 표면을 가졌는데 멜라민 수지의 국부적인 중합에 의한 결과로 여겨진다. Fig. 3은 잠열미립자의 열 분석 결과를 나타낸 그림으로써 캡슐은 6.99°C에서 흡열피크를 나타내며 외피 물질인 멜라민의 피크도 확인하였다. 이러한 피크로 내부와 외부 물질로 구성된 이중구조의 캡슐 형성을 확인하였다. 또한 만들어진 잠열미립자의 입도크기 분포를 나타낸 그림이다. 평균 입도는 5 μm 정도

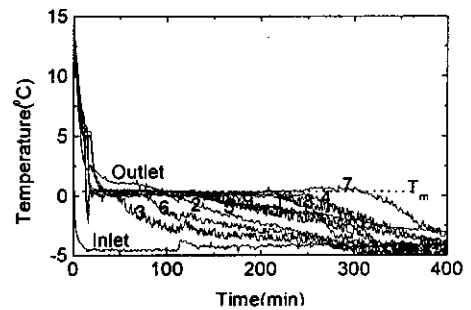
로 매우 작음을 알 수 있으며, 10 μm 이하의 매우 균일한 입도 분포를 보임을 알 수 있다.

3.2 축열실험

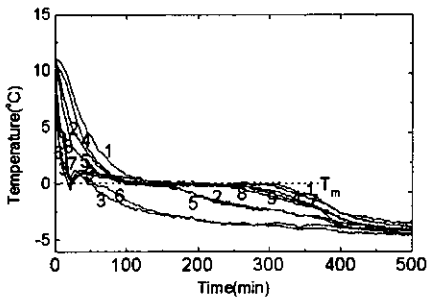
Fig. 4는 순환 냉각수의 공급유량을 125 cc/min로 하고, 100% 테트라데칸, 증류수, 미립잠열제 입자를 증류수와 혼합하여 농도를 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%로 변화시킨 혼합용액에 대한 실험 결과를 온도변화에 따른 시간의 함수로서 얻어진



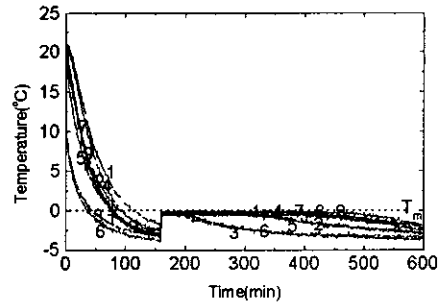
(a) Tetradecane 100%



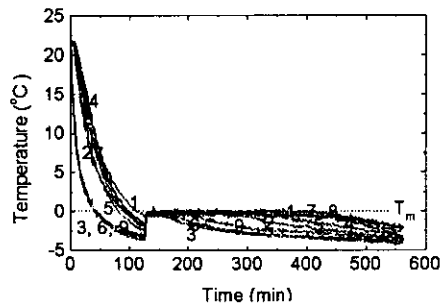
(b) Water



(c) MicroPCM 20 wt%



(d) MicroPCM 30 wt%



(e) MicroPCM 40 wt%

Fig. 4 Transient temperature variations for different thermal storage media at 125 cc/min of cooling water flow rate.

결과이다. 공급된 순환 냉각수의 온도가 -4°C 에 고정되었으며, 잠열미립자의 혼합액인 물($T_m=0^{\circ}\text{C}$)이나 테트라데칸의 용고점($T_m=5.5^{\circ}\text{C}$)보다 훨씬 낮은 온도로 공급되었기 때문에 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 실험이 시작된 후 일정한 시간이 지나면 과냉각상태(Supercooled)의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 순수한 테트라데칸과 물의 온도변화를 나타내고 있는데, (a)의 경우 하부에 위치한 T/C-7, 8, 9에서부터 용고가 시작되고 있으며, 과냉각은 냉각코일에 근접해 있는 T/C-3, 6에서 가장 먼저 시작되며, 중심에서 과냉각이 가장 늦게 발생하고 있다. 실험 후 약 200분이 지난 후 중심에 위치한 T/C-1, 4, 7에서 과냉각이 시작되고 있다.

Fig. 4(a)를 제외하고 모든 경우에 초기에 과냉각이 진행되다가 어느 순간 다시 온도가 용고 온도까지 상승되는 것이 나타나 있다. 이는 과냉각이 진행되다가 외부 및 내적인 어떤 원인에 의하여 발생하는 현상으로 특히 슬러리에서 뚜렷이 나타나는 것은 미립자가 마치 조핵제(nucleation agent) 역할을 하고 있는 것으로 추정되나 이에 대한 입자의 역할이 좀더 규명되어야 할 것이다. 잠열을 흡수하기 시작하는 착수 시간이 100% 테트라데칸과 물은 중심부에서 일시에 열이 전달되며, 두 가지 모두가 축열 시작 후 약 20분 내외에서 현열에 의한 축열 과정이 종료되고 잠열축열이 시작되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4(a) 및 (b)에서의 온도변화는 실험 시작 후 20분 내외에서 용고온도에 도달하는 것으로 나타났다. 반면에 Fig. 1(c)~(d)는 중심에 위치한 열전대인 T/C-1에서 100~180분 지난 후 용고점에 도달하고 있다. T/C-4, 7은 중심에 위치하고 있지만 자연대류에 의한 냉각류의 특성상 비교적 빨리 용고점에 도달하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 순환 냉각수의 유량에 대한 영향을 알아보기 위하여 125 cc/min 외에 250 cc/min과 500 cc/min를 실험한 결과 온도 분포의 형태는 Fig. 4와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 단지 축열을 위한 소요시간이 125 cc/min인 경우는 250 cc/min인 것과 500 cc/min보다 1.5~4배의 긴 시간이 요구되고 있다.

Fig. 5는 초기 현열 전달과정 중인 저장 시작 후 약 20분간의 열 전달계수의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 초기의 상 변화가 일어나기 전

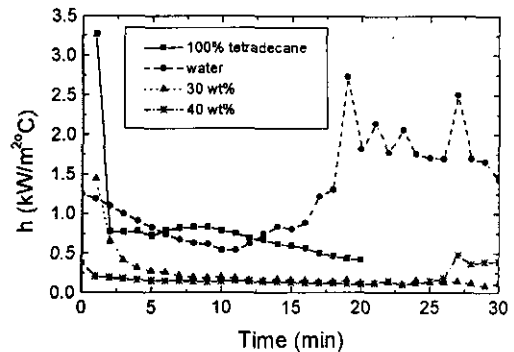


Fig. 5 Transient heat transfer coefficients for different thermal storage media.

단계에서 대류에 의한 열 전달이 지배되는 특성이 잠열입자의 첨가로 인하여 상당히 억제되고 있음을 나타내고 있다. 다시 말하면 슬러리의 열 전달은 초기에서도 전도와 대류가 복합적으로 작용하고 있으며, 농도가 높을수록 대류에 의한 열 전달기능은 축소되면서 전도에 의한 열 전달이 주도적인 역할로 전환되고 있음을 알 수 있다. 상기의 대류 열 전달의 감소를 Fig. 5에서 나타난 열 전달계수의 변화를 보면 더욱 명백해지고 있다. 100% 테트라데칸과 물의 경우 초기 슬러리에 비하여 월등한 열 전달 특성을 보여주고 있다. 물과 테트라데칸을 비교하면 테트라데칸은 초기에 상당히 높은 열 전달계수를 보이다가 급격히 감소하는 것이 관찰되었는데, 이는 저온($-3 \sim -4^{\circ}\text{C}$)의 코일표면온도로 표면에 테트라데칸의 용고에 의한 열 전달을 저해하는 역할을 함으로써 급격한 열 전달계수의 저감을 가져온다. 반면에 물은 현열 흡수기간인 초기 20분간은 점차적인 열 전달계수의 감소가 나타나다가 다시 상승을 시작하는데, 이는 코일 주위에 형성된 얼음이 열 전달을 상승시키는 역할을 하는 것으로 여겨진다. 반면에 슬러리는 전반적으로 낮은 열 전달계수를 나타내고 있다. 즉 앞에서 설명된 바와 같이 순수한 작동유체에 비하여 대류에 의한 열 전달이 상당히 저하됨을 입증하는 결과이다.

Fig. 6에서 축열을 시작하면서 최종 완료되는 시점까지의 축열조에 전달되는 총 공급열량을 매분마다 측정된 결과를 그래프로 그린 것이다. 물과 20 wt%은 축열 초기인 약 20분 경과 후 급격한 축열률이 상승하고, 30 wt% 및 40 wt%는 약 150분과 120분이 각각 경과한 후 축열률이 급격

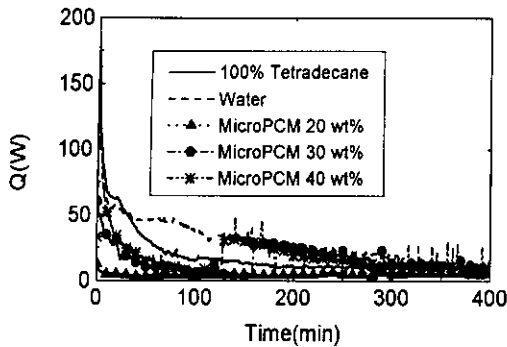


Fig. 6 Transient thermal stored rate for different storage media at 125 cc/min.

히 상승하는 원인은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 과 냉각이 일어나다가 어느 순간 상 변화가 일어나면서 급격한 잠열의 흡열 과정으로 공급열량의 증가를 보이고 있다. 물은 150~250분(중심부위)의 시간이 지난 후 잠열 흡열이 종료되고 있다. 그러나 슬러리의 경우에는 20 wt%인 경우 약 200분이 지난 후에 상 변화가 종료되어 가고 있으며, 30 wt% 및 40 wt%의 경우에는 300분이 지난 후에 잠열 흡열 과정이 종료되고 있다. 100% 테트라데칸은 약 150분경에 이미 잠열 흡열이 끝나고 있으며, 그러나 안정성에 도달된 100분 이후에는 순수한 물이 약간 높은 축열률을 나타내고 있다. 또한 40 wt%가 30 wt%에 비해 미소한 차이로 높은 축열률을 나타내고 있다. 결론적으로 슬러리는 초기에 과냉각이 발생하지 않도록 해야 축열 시간을 줄일 수 있으며, 40 wt%가 슬러리 중에 가장 높은 축열률을 보이고 있다. 즉 40 wt%는 잠열미립 슬러리로 제조할 수 있는 최대의 농도임을 감안할 때 최적의 농도임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 캡슐화된 잠열 미립자를 물과 혼합하여 축열을 하고, 축열된 미립자를 수요자까지 직접 수송하기 위한 연구단계 중 1단계인 미립자를 제조하고 슬러리의 축열체로서의 특성을 파악하기 위해 실험을 수행하였다.

수용성인 음이온 계면활성제를 사용하여 잠열을 가진 파라핀계 오일(테트라데칸)을 유화시켜 벽물질인 멜라민 수지를 이용하여 마이크로캡슐

을 만들었다. 입자 크기는 1~10 μm 의 크기의 분포를 확인하였다. 잠열미립자의 열 분석 결과 캡슐은 6.99°C에서 흡열피크를 나타내며 멜라민의 피크도 확인하였다. 이러한 피크로 내부와 외부물질로 구성된 이중구조의 캡슐 형성을 확인하였다.

미립잠열 슬러리 축열특성은 물과 100% 테트라데칸의 중간적인 성격을 갖고 있으며, 초기의 자연대류는 입자에 의하여 억제되는 특징을 나타내었다. 축열 시간의 단축을 위하여 과 냉각이 발생하지 않도록 순환 냉각수의 적절한 온도 조절이 요구된다. 총 축열량은 슬러리의 농도가 클수록 증가하지만, 본 연구 결과 슬러리로 제조할 수 있는 한계 농도와 펌프에 의한 수송 가능성을 고려해 볼 때 40 wt%가 가장 적합한 농도로 여겨진다.

참고문헌

1. Abhat, A., 1983, Low temperature latent heat thermal storage: Heat storage materials, *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.
2. Knodel, B. D., 1988, R&D Pilot Plant Project for Evaluate a Direct Freeze Ice Slurry Based District Cooling System, DOE/CE/26564.
3. Choi, U. S., France, D. M. and Knodel, B. D., 1992, Impact of advanced fluid on costs of district cooling systems, *Proceedings, Annual Conference of the International District Heating and Cooling Association*, pp. 343-359.
4. Liu, K. V., Choi, U. S. and Kasza, K. E., 1988, Measurement of Pressure Drop and Heat transfer in Turbulent Pipe, ANL-88-15.
5. Pal, D. and Joshi, Y. K., 1995, Application of phase change materials to thermal control of electronic modules: A Computational study, *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 10, No. 2, pp. 1307-1315.
6. Mulligan, J. C., Colvin, P. D. and Bryant, Y. G., 1994, Use of two component fluids of microencapsulated phase-change materials

- for heat transfer in spacecraft thermal systems, AIAA paper No. 94-2004.
7. Goel, M., Roy, S. K. and Sengupta, S., 1994, Laminar forced convection heat transfer in microencapsulated phase change material suspensions, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 4, pp. 593-604.
 8. Inaba, H., Fujisaki, M. and Morita, A., 1995, Evaluation of thermophysical properties of fine latent heat storage and water mixture, *The 16th Japan Symposium on Thermophysical Properties*, Vol. 16, pp. 245-248.
 9. Yamagishi, Y., Sugeno, T., Ishige, T., Takeuchi, H. and Pyatenko, A., 1996, An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium, *IECEC-96*, pp. 2077-2082.
 10. Thies, 1995, *How to Make Microcapsules*, Thies Technology, St. Louis, pp. 7.1-7.47.
 11. El-Dessouky, H. T., Bouhamra, W. S., Ettouney, H. M. and Akbar, M., 1999, Heat transfer in vertically aligned phase change energy storage system, *J. of Solar Energy Engineering*, Vol. 121, pp. 98-109.