

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 3, 1998

캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열조에서 열전달 특성 연구

윤영호*, 한귀영*, 강용혁**, 곽희열**, 이태규**, 전명석**

* 성균관대학교 화학공학과

** 한국에너지기술연구소

Heat Transfer Characteristics in a Fluidized bed Heat Storage System Using Encapsulated PCM

Y. H. Yoon*, G. Y. Han*, Y. H. Kang**, H. Y. Kwak**, T. K. Lee**, M. S. Jeon**

* *Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University*

** *Korea Institute of Energy Research*

요 약

태양열 응용을 위한 한 방법으로 캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열조에서 축열 및 방열과정에서 열전달 특성을 살펴보았다. 유동층 축열조는 원통형으로 높이는 40 cm, 직경은 5.0 cm 이었다. 축열물질은 무기염의 일종인 sodium acetate 였으며, 이것은 파라핀 왁스와 PMMA 로 코팅되었다. 캡슐화된 PCM 의 크기는 약 2~3 mm 였으며, 용융점은 58 °C 였다.

축열 및 방열과정시 유동층 축열조의 시간에 따른 온도분포, 순간 열저장 및 방출 속도를 측정하였으며 이로부터 유동층 축열조의 체적 열전달 계수를 도출하였다. 또한 유동층 축열조의 조업변수인 열전달 유체의 유속, 유입온도에 대한 열전달 계수의 영향도 관찰하였다.

Abstract

The heat transfer characteristics of a fluidized bed latent heat storage system using encapsulated PCM was investigated. The cylindrical test section has the dimension of 50 mm I.D. and 40 cm in height. The phase change material (PCM) was the sodium acetate and was encapsulated by the multiple layers of PMMA and paraffin wax. The size of encapsulated PCM was 2~3 mm and melting point was 58 °C.

The instantaneous heat storage and heat release rates were determined and the instantaneous heat transfer coefficient based on the fluidized bed volume was also determined. The effect of inlet temperature and velocity of heat transfer fluid on the heat transfer coefficient was also investigated.

1. 서 론

미세캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 열저장시스템은 기존의 전열관을 통한 열교환기 방식의 열저장 시스템에 비하여 축열용기의 부식문제, 그리고 축열 및 방열과정에서의 낮은 열전달등의 문제를 개선할 수 있는 새로운 열저장 방법으로 여겨진다.

현재 미세캡슐화된 PCM에 관한 응용연구는 주로 passive solar construction에 관련된 floor tile, dry wall 등에 적용하는 연구가 진행되고 있으나^[1], 미세캡슐화된 PCM을 열전달 유체와 직접 접촉시켜서 열저장 및 방출을 하는 축열시스템으로의 응용은 매우 미진한 상황이다. 현재 국내외적으로 태양열 응용의 한 분야로 연구되고있는 PCM을 이용한 잠열축열시스템은 bulk PCM과 열전달유체가 전열관을 통하여 열교환이 이루어지는 시스템으로서 열적 성능(축열, 방열)은 그다지 우수한 편이 아니며, 좀더 효율적인 열교환 방법이 요구되는 실정이다.

유동층 축열장치는 축열물질과 열전달 유체가 얇은 코팅 막을 사이에 두고 직접접촉을 하기 때문에 열전달 효과가 기존의 방식보다 우수할 것으로 기대되며, 아울러 유동층의 특징인 균일한

혼합특성으로 좀더 효과적인 열전달이 이루어질 것으로 예상된다.

본 연구는 태양열 집열기에서 승온된 온수를 미세캡슐화된 PCM이 채워져있는 유동층 형태의 열교환기에 통과시켜서 PCM과 온수간의 직접 접촉을 통한 열교환실험으로 성능평가를 수행하여 난방 및 온수공급을 위한 효율적인 유동층 축열조의 설계에 필요한 공학적 자료를 확보하고자 한다.

2. 실 험

미세캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열장치의 성능평가를 위한 장치도는 Fig 1에 나타내었다. 실험장치는 크게 유동층 축열조, 온수 및 냉수 공급탱크, 그리고 data acquisition unit 으로 구성되어 있다. 축열 및 방열실험에 사용된 축열조는 직경이 5 cm, 높이가 40 cm인 원통형 용기이며 아크릴 수지로 제작하였다. 유동층의 입구에는 다공판을 설치하여 열전달유체인 물이 균일하게 유동층으로 흐르게 하였고, 출구에도 다공판을 설치하여 PCM이 장치 밖으로 유출되는 것을 방지하였다. 축열조에는 열저장 및 방출과정시 온도

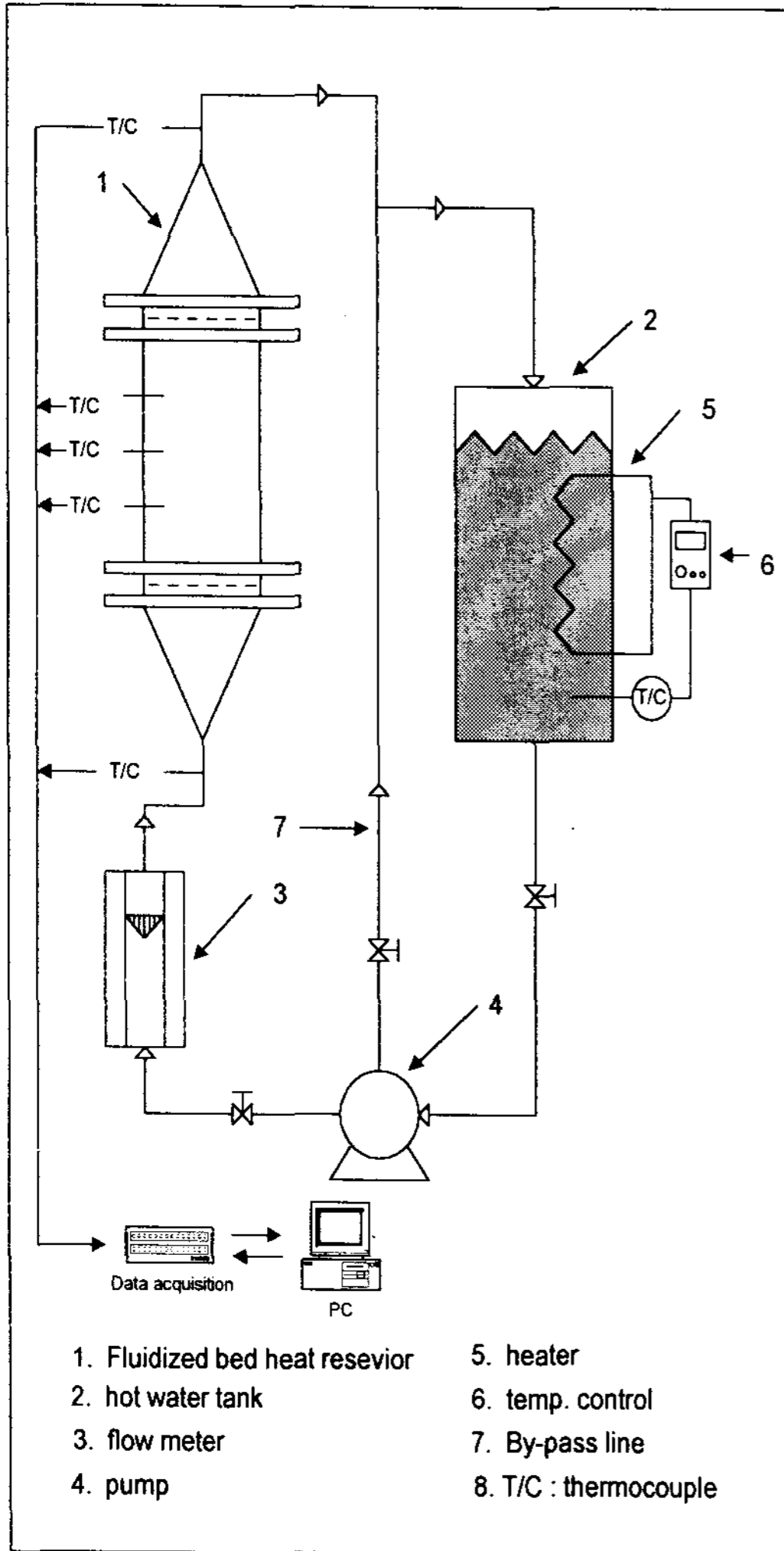


Fig. 1. 실험장치도

변화를 관찰하기 위하여 축방향 10 cm 간격으로 3개의 thermocouple을 설치하였고, 유동층 축열조의 입구 및 출구에도 thermo-couple을 설치하여 성능평가에 필요한 에너지 수지식에 사용하였다. 한편 축열 및 방열과정에서 공급되는 온수(축열 실험) 및 냉수(방열실험)는 온도조절기가 설치된 물탱크로부터 일정한 온도에서 유동층 축열기로 공급되도록 하였다. 축열 및 방열과정에서 얻어진 온도자료는 data logger를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

Table 1. Physical properties of PCM

| | |
|--|------------------------|
| melting point | 58 °C |
| mean diameter | 2.65 mm |
| spherity, ψ | 1 |
| heat of transition(ΔH) | 272.44 kJ/kg K |
| specific heat (solid), C_{ps} | 2.79 kJ/kg K |
| specific heat (liquid), C_{pl} | 3.68 kJ/kg K |
| thermal conductivity(solid), k | 0.55 W/m K |
| density(capsule), ρ | 1230 kg/m ³ |
| minimum void fraction, ϵ_{mf} | 0.36 |

본 실험에 사용된 PCM은 무기수화염의 일종인 CH₃COONa 3H₂O였으며, 증점제로는 gelatine, 조핵제로는 Na₂P₂O₇ 10H₂O를 사용하였으며, 고분자수지와 왁스로 3중 코팅을 하였다. 캡슐화된 PCM의 물리화학적 물성은 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 분포 특성

캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열조의 축열 및 방열실험에서 얻어진 유동층 내부와 유동층 입출구에서의 온도분포를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 축열 및 방열과정에서 얻어진 온도분포를 살펴보면, 유동층 상부와 하부간에 온도차가 매우 작음을 알 수 있으며 이것은 축열 조내에서 PCM과 열전달유체간의 혼합이 잘 되어서 온도구배가 그리 크지 않음을 보여주고 있다. 또한 축열 및 방열실험이 10분 정도에서 완결되는 것을 볼 수 있으며 이것은 비슷한 양의 PCM을 기존의 간접 접촉방식에 의한 축열 또는 방열시 40분 - 1시간이 소요되는 것과 비교하여 매우 효율적인 열전달이 이루어지고 있다고 볼 수 있다^[2,3]. 이와 같은 빠른 열전달은 첫째로 원활한 고체-액

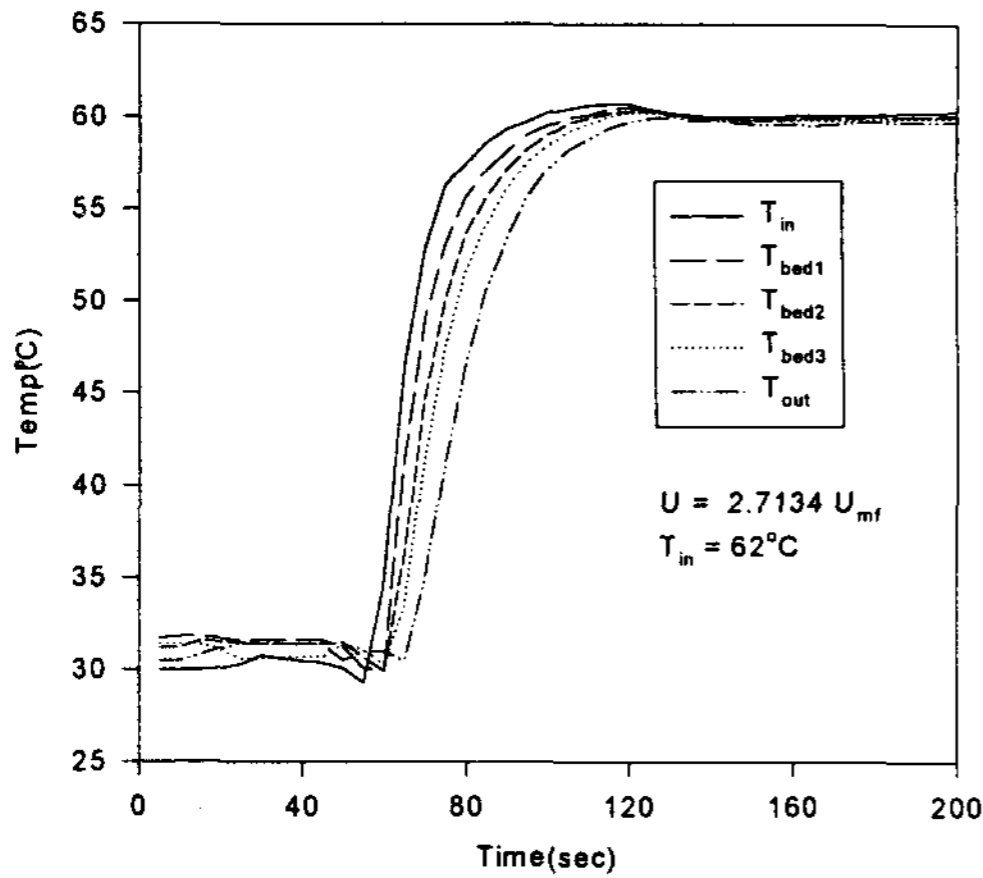


Fig. 2. Temperature profile during heat storage stage

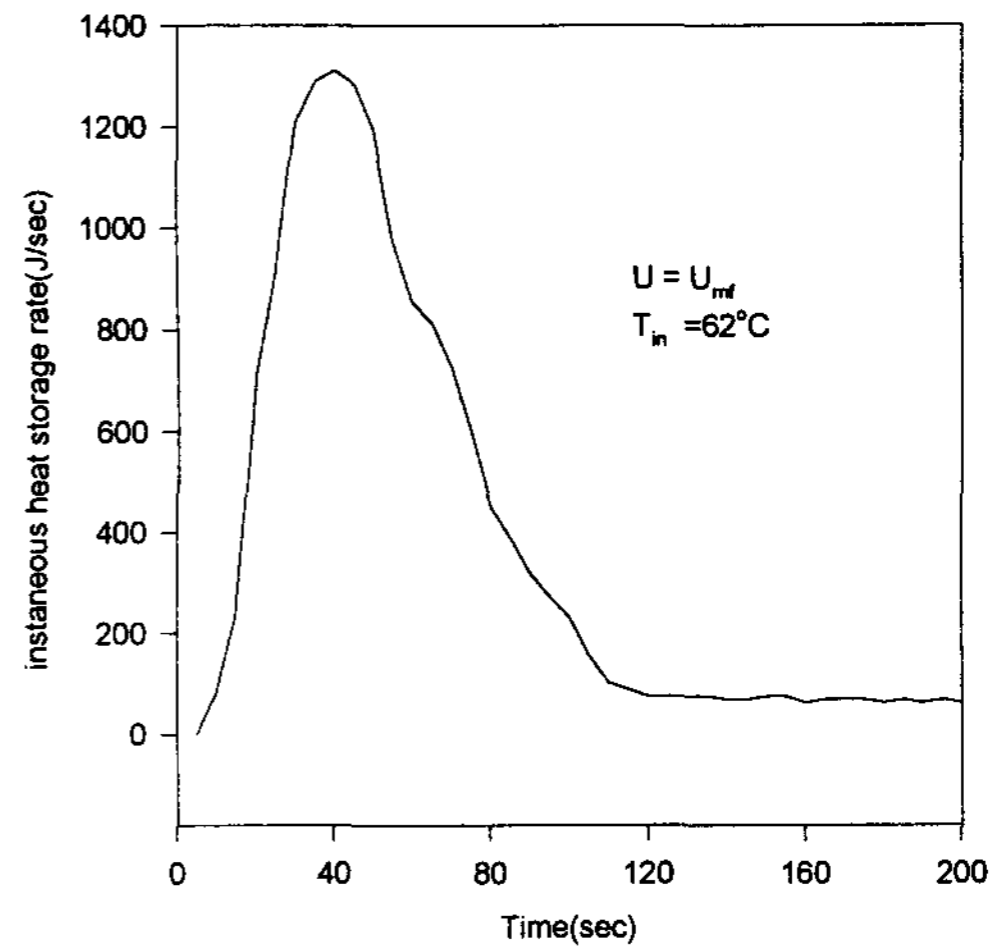


Fig. 4. Heat storage rate during heat storage stage

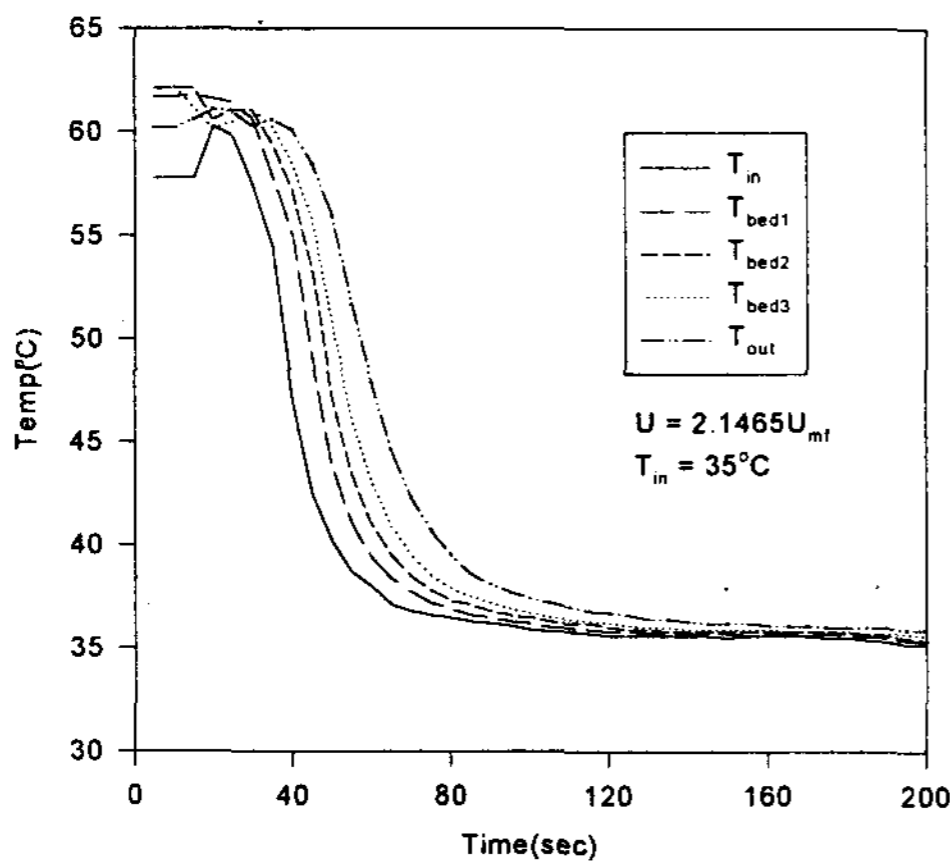


Fig. 3. Temperature profile during heat recovery stage

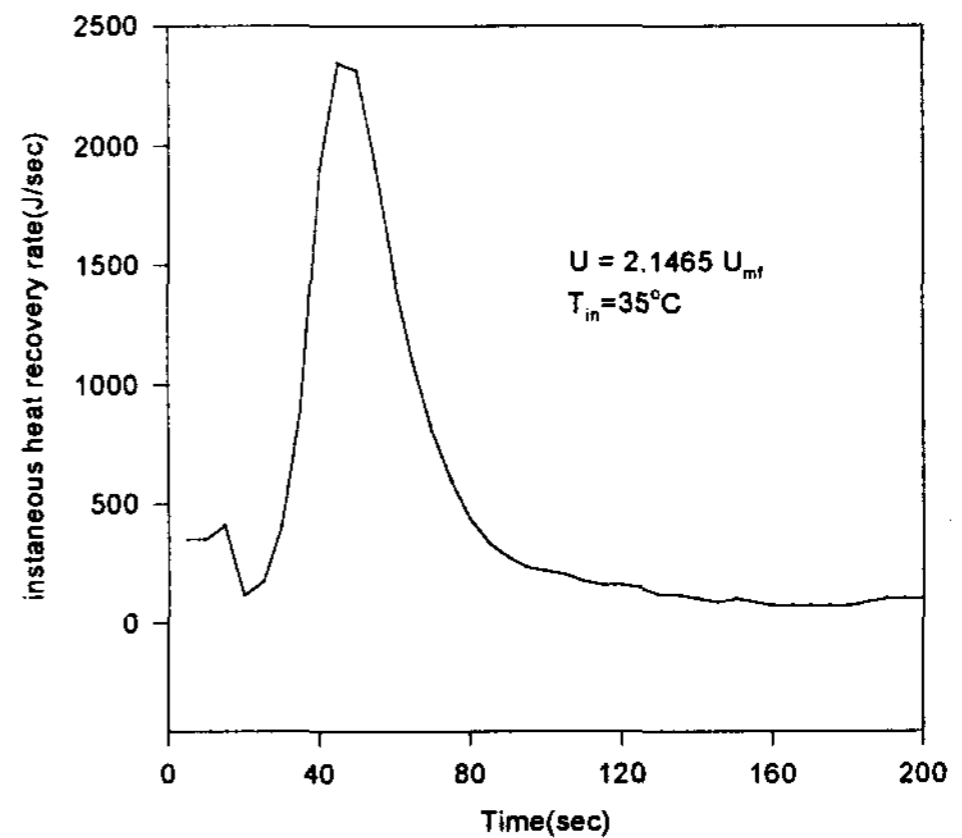


Fig. 5. Heat release rate during heat recovery stage

체의 접촉으로 대류열전달이 크게 증가하였기 때문이며, 둘째로 축열이나 방열과정시 열전달 저항으로 작용하는 고체층(방열시) 또는 용융층(축열시)의 두께가 입자의 반경 이내로 제한이 되었기 때문에 열전달의 효과가 매우 크게 나타난 것으로 여겨진다.

3.2. 축열 및 방열속도

유동층축열장치에서 축열 및 방열과정에서 얻

어진 시간의 경과에 따른 순간 열저장 및 방출속도를 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 열전달 유체와 PCM 간의 열교환이 시작되는 초기에는 순간 열저장 및 방출속도가 최고 값을 갖고 그 후 급격히 저장 및 방출속도가 감소되는 PCM간 열전달의 추진력인 온도차가 크기 때문에 높은 열전달이 이루어지는 것이며 그후 PCM의 온도가 용융점 또는 응고점에 도달하면서 상변화가 발생하여 서서히 열전달

이 이루어지는 것으로 여겨진다. 그림에서 보듯이 순간 열저장 및 방출속도는 100~2000 J/sec 이며 유동층에 채워진 PCM의 축열용량이 약 100 KJ인 점에 비추어보면 매우 짧은 시간에 축열 및 방열의 대부분이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 따라서 유동층 축열장치는 급탕용 온수공급에 활용하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

3.3. 체적열전달계수

축열이나 방열과정에서의 열전달계수는 축열시스템을 설계하는데 필수적인 공학적 자료이다. 본 실험에서는 열전달 유체와 입자형태의 수많은 PCM이 직접 접촉을 하며 열전달이 이루어지기 때문에 열전달 면적을 정의하기가 어렵다. 따라서 이러한 열전달 유체와 PCM이 직접접촉에 의한 열전달이 이루어지는 시스템에서는 열교환기 체적을 기준으로 한 체적 열전달계수(volumetric heat transfer coefficient, h_v)를 사용하는 것이 편리하다^[4]. 본 실험에서는 PCM이 채워져있는 유동층의 체적을 기준으로 한 체적 열전달계수를 이용하여 유동층 축열조의 열전달 특성을 살펴보았다. 본 연구에서 얻어진 체적 열전달계수 h_v 는 다음과 같이 정의하였다.

$$h_v = \frac{q/vol}{LMTD}$$

여기서 q 는 순간 열저장 및 방출속도이고, vol 은 PCM이 채워져있는 유동층의 체적 그리고 $LMTD$ 는 대수온도평균차이며, $LMTD$ 는 다음과 같이 정의하였다.

$$LMTD = \frac{(T_i - T_b) - (T_b - T_o)}{\ln\left(\frac{T_i - T_b}{T_b - T_o}\right)}$$

여기서 T_i , T_o , T_b 는 각각 입구, 출구 및 유동층내 평균온도를 나타낸다. Fig. 6은 축열과정에서 열전달유체의 유속변화에 따른 체적열전달계

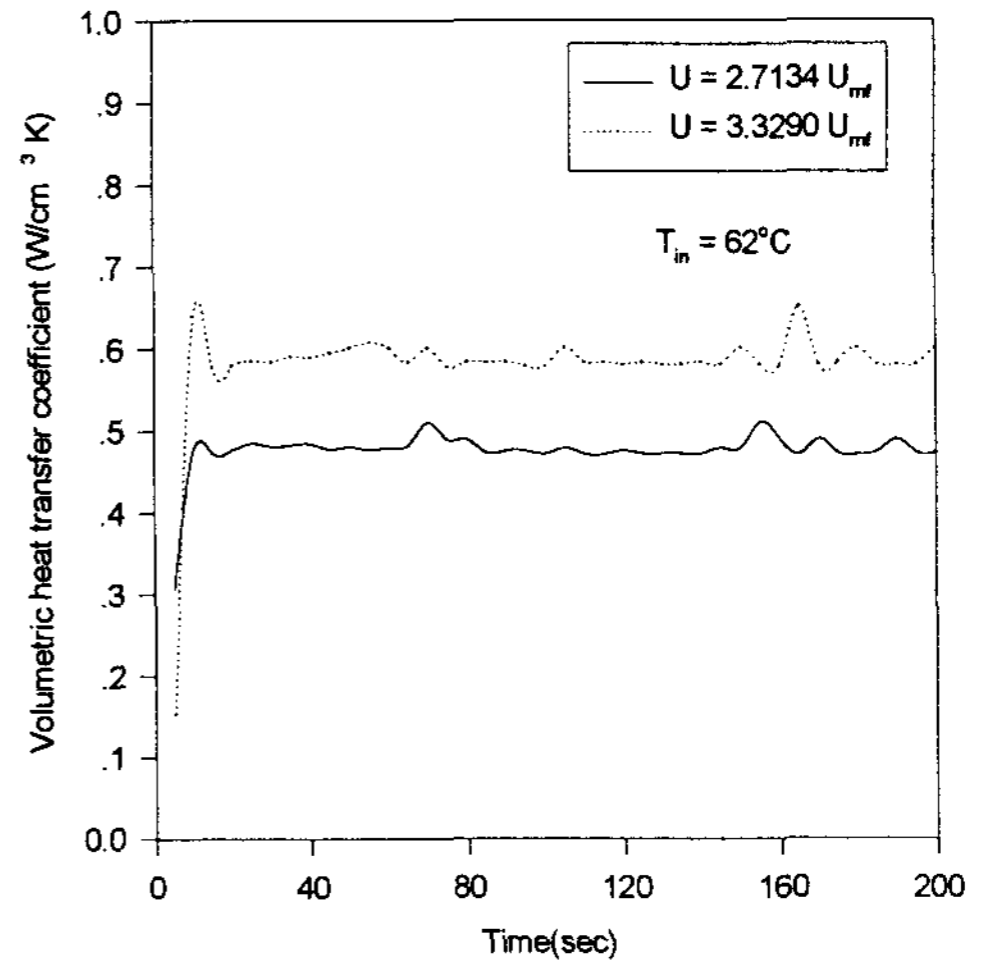


Fig. 6. Volumetric heat transfer coefficient heat storage stage

수의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 체적 열전달계수는 시간에 따라 그다지 크게 변하지 않은 경향을 보여주고 있으며 이것은 시간에 따라 용융층의 열전달저항이 커짐으로 해서 열전달 계수가 감소하는 기존의 간접축열방식과 다른 특징이라고 볼 수 있다. 이것은 열전달 유체와 PCM간의 열전달저항이 작고 또한 격렬한 혼합에 따른 균일한 온도차로 인한 결과라고 여겨진다. 또한 열전달 유체의 유속이 증가함에 따라 열전달계수가 증가함을 볼 수 있으며, 이것은 유속이 증가함에 따라 대류열전달이 증가하기 때문으로 여겨진다. 본 실험에서 얻은 체적열전달계수는 주어진 실험조건하에서 대략 $0.1 \sim 0.6 \text{ w/cm}^3 \text{ K}$ 이며 이것은 Fouada 등이 액-액 직접접촉방식에 따른 축열시스템에서 얻어진 체적열전달계수 $3.5 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-3} \text{ w/cm}^3 \text{ K}$ 보다 매우 큰 값이다^[5]. 따라서 미세캡슐화된 PCM을 이용한 잠열축열방식은 열전달 측면에서 매우 효율적인 방식이라고 할 수 있다. Fig. 7은 방열과정에서 얻어진 체적열전달계수를 나타내었다. 축열과정에서 관찰한 현상이 방열과정에서도 나타남을

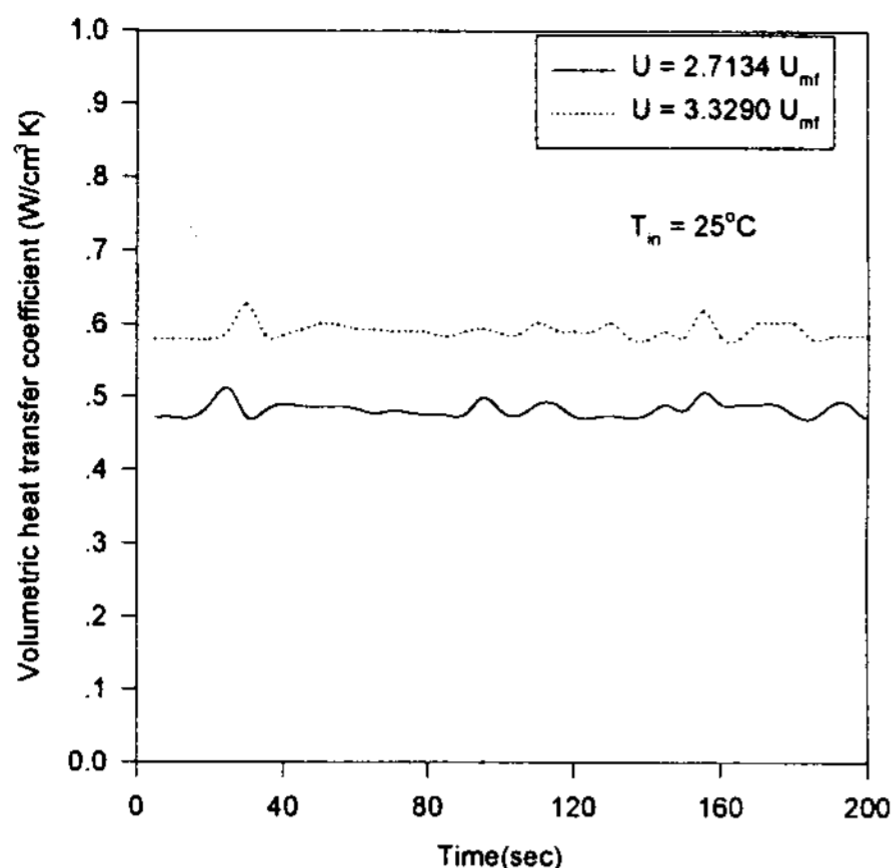


Fig. 7. Volumetric heat transfer coefficient heat recovery stage

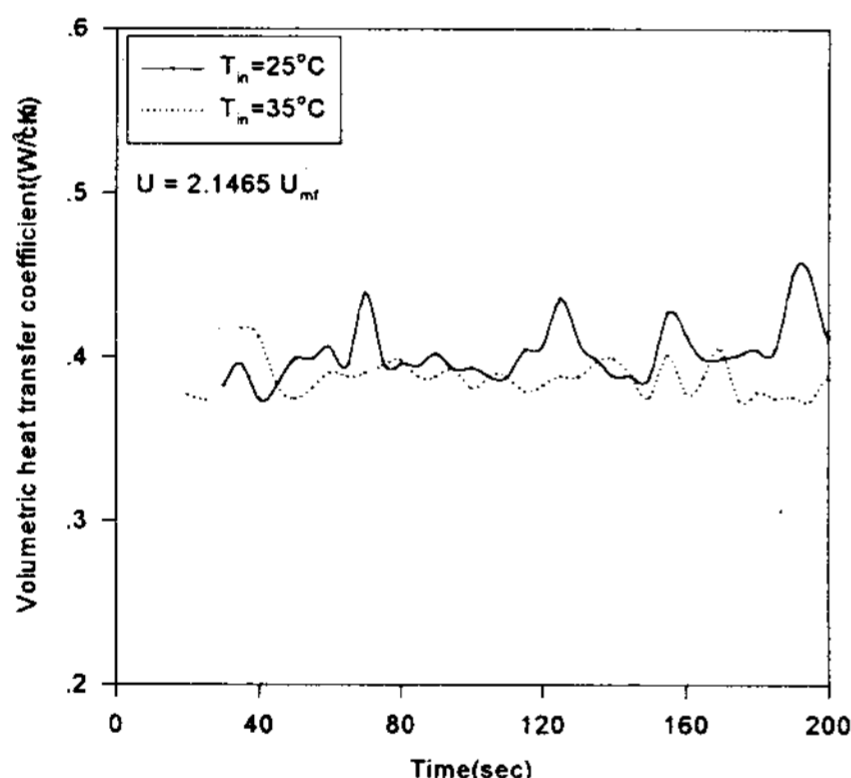


Fig. 8. Temperature effect on heat transfer coefficient during heat recovery stage

알 수 있으며, 이는 축열 및 방열과정에서 열전달은 모두 열전달 유체의 대류열전달과 PCM의 작아진 열저항에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 방열과정에서 유입되는 열전달 유체의 온도에 따른 열전달계수의 변화를 나타내었다. 예상한대로 유입온도와 PCM간의 온도차가 클수록 열전달이 활발히 이루어져서 온도차가 큰 경우에 열전달계수가 높은 값을 가짐을 알 수 있다.

4. 결 론

태양열을 이용한 잠열축열시스템의 한 방식으로 캡슐화된 PCM을 이용한 유동층 축열장치에서 축열 및 방열실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 축열 및 방열과정에서 유동층 내부에서의 온도분포는 유동층의 우수한 혼합특성으로 인하여 균일한 온도분포를 가짐을 알 수 있었다.
2. PCM을 소형의 구 형태로 제작함으로써 전도에 의한 열저항이 감소되고 또한 열전달 유체의 대류에 의한 열전달이 증가하여 축열 및 방열시 높은 열전달 속도를 가짐을 알 수 있었다.
3. 열전달 유체와 PCM 간의 온도차가 클수록, 그리고 열전달 유체의 유속이 증가할수록 체적열전달계수가 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Lane, G.A., Solar Heat Storage, CRC press, Florida(1986)
2. Choi, J.C., Kim, S.D. and Han, G.Y., KJChE, 12, 258~263(1995)
3. Choi, J.C., Kim, S.D. and Han, G.Y., Solar Energy Mat'l and Solar Cells, 40, 71~87 (1996)
4. Kang, Y.H., Jeon, M.S., Yoon, H.K. and Chun, W.G., Korean J. Solar Energy, 15, 3~14(1995)
5. Fouda, A.E., Taylor, J.B., and Capes, C.E., Solar Energy, 32 57~65(1984)

Heat Transfer Characteristics in a fluidized bed heat Storage System Using Encapsulated PCM

Y. H. Yoon^{*}, G. Y. Han^{*}, Y. H. Kang^{**}, H. Y. Kwak^{**}, T. K. Lee^{**}, M. S. Jeon^{**}

^{*} *Department of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University*

^{**} *Korea Institute of Energy Research*

Abstract

The heat transfer characteristics of a fluidized bed latent heat storage system using encapsulated PCM was investigated. The cylindrical test section has the dimension of 50 mm I.D. and 40 cm in height. The phase change material (PCM) was the sodium acetate and was encapsulated by the multiple layers of PMMA and paraffin wax. The size of encapsulated PCM was 2~3 mm and melting point was 58 °C.

The instantaneous heat storage and heat release rates were determined and the instantaneous heat transfer coefficient based on the fluidized bed volume was also determined. The effect of inlet temperature and velocity of heat transfer fluid on the heat transfer coefficient was also investigated.