

# 수평식 셸-튜브형 잠열축열조의 축열 및 방열특성에 관한 실험적 연구

권영만\* · 서해성\* · 모정하\*\*  
(1999년 5월 17일 접수)

## An Experimental Study on Heat Storage and Heat Recovery Characteristics of a Latent Heat Storage Tank with Horizontal Shell and Tube Type

Young Man Kwon, Hye Sung Seo and Jung Ha Moh

Key Words: Horizontal Shell and Tube Type(수평식 셸-튜브형), Staggered Circular Tube Bank(엇갈린 원관군), Baffle(배플), Cylindrical Capsule(원통캡슐), Heat Storage Rate(열저장률), Heat Recovery Rate(열방출률)

### Abstract

An experimental study has been carried out in order to investigate the heat storage characteristics for a latent heat storage tank with horizontal shell and tube type. The heat exchanger consisted of horizontal cylindrical capsules with a staggered tube bank layout. Based on the obtained data, the effects of flow rate and inlet fluid temperature on the melting time and heat storage rates were examined. It is found that the melting time decreased with increase of the flow rate and the inlet temperature. Results also show that at the initial stage of heat transfer the heat storage rate represents the maximum value and rapidly decreases.

### 기호설명

- |                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| $C_1$ : 관의 간격(mm)             | $Re_D$ : Reynolds 수     |
| $c_{p,w}$ : 물의 정압비열(J/kg°C)   | $S_D$ : 관군의 관피치(mm)     |
| $D_e$ : 상당직경(mm)              | $S_L$ : 관군의 종피치(mm)     |
| $D_o$ : 관의 외경(mm)             | $S_T$ : 관군의 횡피치(mm)     |
| $D_s$ : 셸의 내경(mm)             | $t$ : 시간(min)           |
| $L_b$ : 배플의 간격(mm)            | $T_{w,i}$ : 물의 입구온도(°C) |
| $\dot{m}_w$ : 물의 질량유량(kg/sec) | $T_{w,o}$ : 물의 출구온도(°C) |
| $q$ : 열저장률(J/sec)             | $W$ : 배플의 원도            |
| $\dot{Q}$ : 유량(L/min)         |                         |

- 그리스문자
- $\rho$  : 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
  - $\mu$  : 물의 점성계수(Ns/m<sup>2</sup>)

\* 회원, 원광대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 원광대학교 기계공학부  
E-mail : ghmoh@wonnms.wonkwang.ac.kr  
TEL : (0653)850-6684 FAX : (0653)850-6687

1. 서론

열에너지저장에 관한 연구는 에너지의 효율적 이용이라는 측면에서 과거 수십년간 많이 수행되어 왔다. 에너지 저장은 크게 물, 자갈 등을 이용하는 현열에 의한 방법 및 상변화물질(PCM : phase change material)의 잠열에 의한 방법이 있다. 현열에 의한 방법은 공정이 간단하여 여러 분야에서 활용되어 왔으나 장치의 부피가 크고 일정한 온도에서 열에너지를 회수하기가 어려운 단점이 있기 때문에 최근에는 잠열을 이용한 저장 방법에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다.

잠열을 이용한 에너지저장방법의 연구는 PCM의 용해 및 응고과정에서의 열전달현상 그리고 축열 및 방열장치를 포함한 시스템에서의 열전달 현상으로 대별할 수 있다.

평판, 원관, 구, 환이 부착된 관 등의 여러 가지 기하학적 형상에 대한 용해 및 응고과정 해석은 많은 연구자들<sup>(1~6)</sup>에 의하여 수행되어 왔다. 축열시스템에 대한 해석으로 Watanabe 등<sup>(7)</sup>은 직각용기내에 원관군이 정렬배열로 설치된 축열조 시스템에 대한 실험을 하여 전열특성을 조사하였으며 Majumdar와 Saidbakhsh<sup>(8)</sup>는 평행유동 채널로 구성된 축열시스템에 대한 열전달과정을 모델링하여 전열특성을 수치적으로 해석하였다. 한편 Yanado ri 와 Masuda<sup>(9)</sup> 및 임장순<sup>(10)</sup>은 수직식 셸-튜브형 축열시스템에 대하여 열전달현상을 고찰하였으며 이태규<sup>(11)</sup>는 미세캡슐화된 PCM이 충전된 원통형 용기에 대하여 축열 및 방열특성을 조

사하였다.

최근에 주야간에 발생하는 전기부하의 불균형<sup>(12)</sup>을 해소하기 위한 목적으로 22시부터 익일 08시 사이의 심야전력을 이용하여 밤에 축열하였다가 낮에 방열할 수 있는 에너지저장방법에 대한 관심이 고조되고 있다. 여름에는 빙축열시스템이 겨울에는 잠열에 의한 축열시스템이 이용되고 있다. PCM 저장은 주로 원통캡슐에 PCM을 충전한 후 캡을 씌워 완전밀봉하는 방법이 사용되고 있으며 재료의 퇴화방지를 위하여 캡슐속에 조핵제를 첨가한다. 조핵제와 PCM의 비중차이로 인하여 원통캡슐을 수직으로 설치할 경우 조핵제가 밑으로 가라앉는 현상이 발생하기 때문에 상용되고 있는 시스템의 형태는 일반적으로 수평식 셸-튜브형이다. 잠열이용형 축열장치의 설계를 위해서는 축열조내의 열전달 현상과 축열 및 방열 성능에 대한 충분한 해석이 이루어져야 하나 이에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다.<sup>(13,14)</sup>

따라서 본 연구의 목적은 심야전력을 이용한 잠열축열식 전기보일러의 설계 및 제작에 적용할 수 있는 기초 자료를 얻고자 하는데 있으며 이러한 목적을 위하여 배플(baffle)이 부착된 수평식 셸-튜브형(horizontal shell and tube type)의 축열조를 사용하였다. 그리고 유체의 유입온도 및 유량을 변화시켜 축열 및 방열시에 나타나는 축열조내의 온도변화 및 전열특성을 고찰하였다.

2. 실험

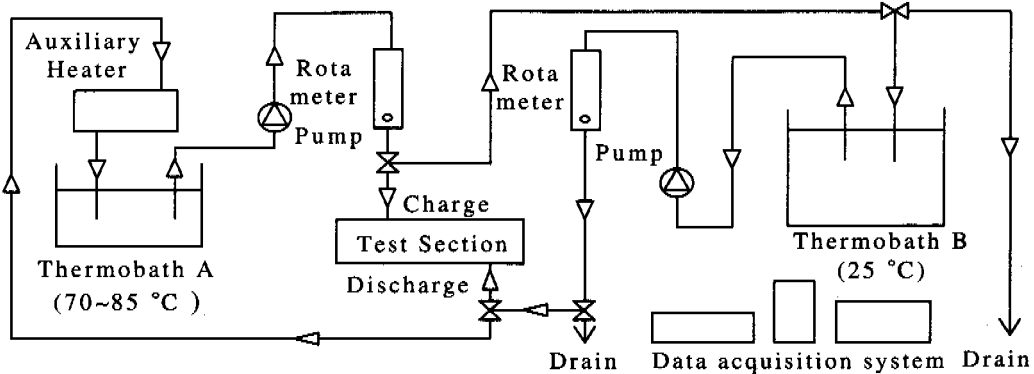


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 장치는 축열조, 항온조, 보조히터 및 데이터 획득장치로 구성된다. 열전달 유체로 물을 사용하였고 펌프로 물을 축열조에 공급하였으며 유량계로 유량을 제어하였다. Fig. 2는 축열조의 구조를 나타낸 것이며 TEMA (tubular exchanger manufacturers' association)<sup>(15)</sup>의 기준에 따라 원통은 단일유로인 E형태를, 배플은 평판 단일세그먼트형태로 결정하였다. 원통셀의 내경은 210mm, 길이는 490mm이다. 열전달 효과를 증진시키기 위하여 두 개의 배플을 등간격으로 배치하였으며 누수를 방지하기 위하여 원통셀 좌우에 오링을 삽입하고 볼트로 체결하였다. 배플간의 길이는 121mm이며 원통과 배플 사이에서의 누설을 방지하기 위하여 배플 주위에 오링을 설치하였다. 그리고 물의 온도 및 PCM온도를 측정하기 위하여 물인 경우 4개 지점(W1, W2, W3, W4)에, PCM인 경우 3개 지점(P1, P2, P3)에 열전대를 설치하였으며 열전대 지점을 Fig. 2에 표시하였다. 표시중에서 W는 물을, P는 PCM을 의미한다. 본 실험에서는 원관군으로 엇갈린 형태를 사용하였으며 기하학적 형상은 Fig. 3과 같다. 29개의 원형관으로 관군을 구성하였으며, 배플의 원도우는 30mm이다. Fig. 4는 엇갈린 원관군의 상세도로서 관군의 종피치 SL은 29mm, 횡피치 ST는 29mm, 관피치 SD는 32.4mm, 직경 D는 22mm이다. Fig. 5는 PCM을 저장하는 원통형 캡슐에 대한 상세도이다. 구리관의 길이는 380mm, 외경은 22mm, 내경은 20mm이며 관 끝을 밀봉하기 위하여 두 개의 오링이 삽입된 아크릴 캡을 사용하였다. 그리고 PCM온도의 측정을 위하여 세 지점에 스테인리스관을 이용한 T형의 열전대를 설치하였다. PC에 연결된 데이터 획득장치를 이용하여 1분 간격으로 각 지점의 온도를 측정하였으며 측정된 온도값을 PC에 저장하고, 동시에 PC의 모니터로 관찰하였다.

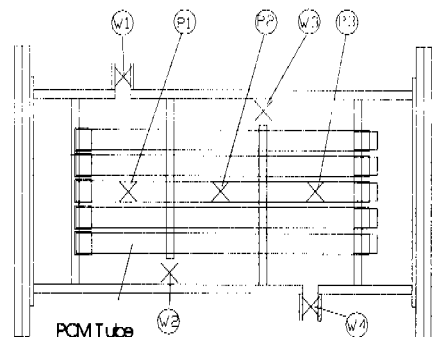
본 실험에서는 상용의 축열식 전기보일러에 이용되는 PCM을 사용하였으며 이는 '(주)그린에너지개발'에서 재료의 퇴화방지를 위한 목적으로 수산화나트륨수화물( $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ )에 조핵제를 첨가하여 개발한 PCM이다. 수산화나트륨수화물의 물성치는 Table 1과 같다.

**Table 1** Properties of sodium hydroxide hydrate ( $\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ )(S : Solid, L : Liquid)

Melting Point	Specific Heat(Kcal/Kg °C)	Latent Heat of Fusion(J/kg)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )
64 °C	0.63(S)	272000	1720
	1.09(L)		

### 2.2 실험방법

물의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 저온 항온조와 고온 항온조 두 개 그리고 보조히터를 사용하였다. 최초로 축열조의 초기온도 25°C를 유지하기 위하여 저온 항온조의 25°C의 물을 펌프를 이용하여 축열조의 아래 쪽에 위치한 관으로 공급한다. 이때 축열조의 온도는 입구와 출구 및 내부에 설치된 열전대를 이용하여 측정된 온도로서 확인한다. 초기온도 25°C를 확인한 후 저온 항온조에 연결된 펌프의 작동을 멈추고 동시에 고온 항온조에 연결된 펌프를 가동시켜 축열조의 윗 부분에 위치한 관으로 공급한다. 이때 공급유량은 유량계에 의해서 제어된다. 축열조의 출구에서 유출된 물은 다시 보조히터에 공급되며 1차적으로 가열된 후 고온 항온조에 공급되어 축열조에 유입하고자 하는 온도로 가열된다. 축열과정동안 축열조 7개 지점에 설치된 열전대에서 측정된 온도를 PC에 연결된 데이터 획득장치를 이용하여 매 1분 간격으로 PC에 저장하며 7개 지점의 온도차가 1°C 이하가 되면 펌프의 작동을 멈춰 물의 공급을 중단한다. 방열실험은 축열실험이 종료된 후 축열조 내부의 온도차가 1°C이하



**Fig. 2** Detail of heat storage module(x: Thermocouple position)

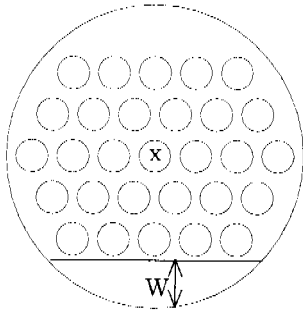


Fig. 3 Detail of staggered tube bank(x : Thermopile position, W : Window)

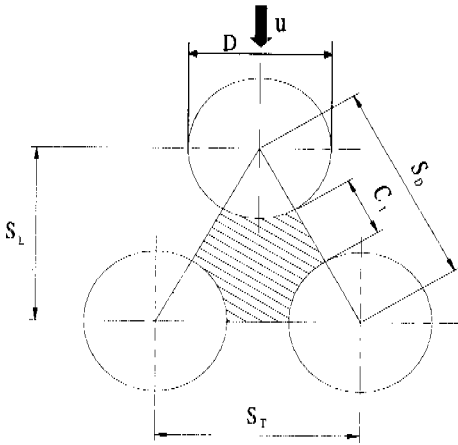


Fig. 4 Detail of tube arrangement

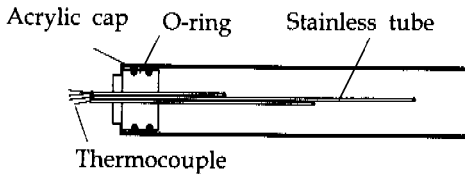


Fig. 5 Detail of cylindrical capsule

이상이 되면 펌프의 작동을 멈춰 물의 공급을 중단한다. 방열실험은 축열실험이 종료된 후 축열조 내부의 온도차가 1℃ 미만인 상태에서 저온 항온조의 25℃의 물을 축열조의 아래 쪽에 위치한 관으로 공급하여 축열조의 내부온도가 25℃로 일정하게 유지되었을 때 실험을 종결한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 물의 유입온도 및 유량을 변화시켜 축열 및 방열시의 온도변화 및 전열특성을 고찰하였다. 심야전력 이용 축열식 전기보일러<sup>(16)</sup>의 규정을 참조하여 온도범위를 다음과 같이 결정하였다. 원통셀내의 초기온도는 축열과정인 경우 25℃, 방열과정인 경우 70℃ 및 80℃로 일정하게 유지하였다. 물의 유입온도는 축열과정인 경우 70℃, 및 80℃, 방열과정인 경우 25℃이며, 각각의 유입온도에 대하여 유량은 1.0L/min, 1.5L/min 및 2.0L/min이다. Kern<sup>(17)</sup>이 제시한 방법을 사용하여 Reynolds 수를 정의하면 다음과 같다.

$$Re_D = \frac{(\rho \dot{Q} / S_s) D_e}{\mu}$$

여기서  $D_e$  및  $S_s$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$D_e = \frac{4 \times \text{flow area}}{\pi D_o}$$

$$S_s = \frac{D_s}{S_D} C_1 L_b$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 유량,  $D_s$ 는 원통셀의 내경,  $D_o$ 는 관의 외경,  $S_D$ 는 관피치,  $C_1$ 은 관간격,  $L_b$ 는 배플 사이의 길이이며,  $\rho$  및  $\mu$ 는 입구 및 출구 온도에서 물의 밀도 및 점성계수이다. 그리고 유동면적(flow area)은 Fig. 4에 표시된 빗금친 면적이다. 온도 25℃ 및 80℃에 대하여 1.0L/min에 대응하는 Reynolds 수는 각각 30 및 75, 1.5L/min에 대응하는 Reynolds 수는 각각 45 및 112 그리고 2.0L/min에 대응하는 Reynolds 수는 각각 60 및 150이다. 물은 축열시 원통셀 상단부(W1)에서 유입되고 방열시에는 원통셀 하단부(W4)에서 유입된다. 그리고 원통셀내에서 물의 체적에 대한 PCM의 체적비율은 28%이다.

#### 3.1 축열과정

##### 3.1.1 물의 온도변화

Fig. 6은 초기온도 25℃, 유입온도 70℃ 및 유량 1.5L/min에 대하여 원통셀의 네 지점(W1, W2, W3, W4)에서 물의 온도변화를 시간의 함수로 나

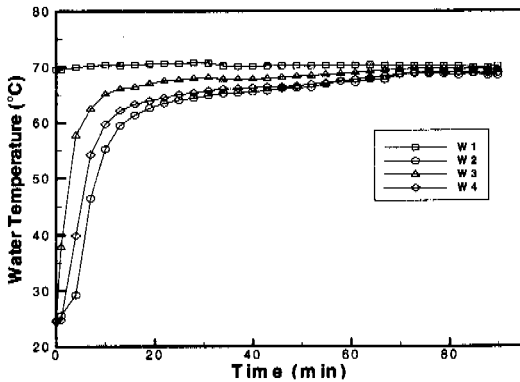


Fig. 6 Temperature histories of water for charge process (inlet water temp.; 70°C, flow rate; 1.5L/min)

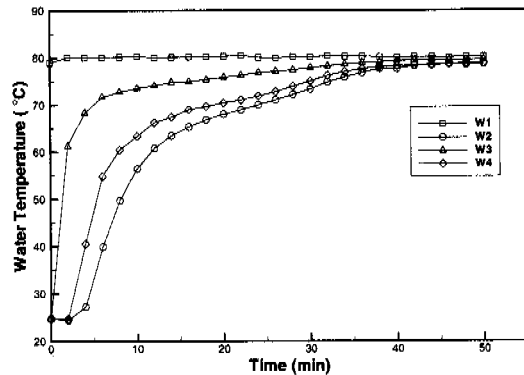


Fig. 7 Temperature histories of water for charge process (inlet water temp.; 80°C, flow rate; 1.5L/min)

타낸 것이다. 물의 온도측정지점은 원통셀의 입구, 왼쪽 배플 하단부, 오른쪽 배플 상단부 및 출구이며 네 지점의 위치를 Fig. 2에 표시하였다. W1을 제외한 나머지 지점에서의 온도는 초기에 급격히 상승하고 약 10분 후부터 서서히 증가하다가 80분 후에는 일정하게 유지되었다. 온도변화의 형태를 살펴보면 출구 쪽(W4) 온도보다 원통셀 왼쪽 하단부(W2)에서의 온도가 가장 낮게 나타나는 특이한 현상을 발견할 수 있다. 본 연구에서와 같이 온도차에 의한 부력과 유체의 유동에 의한 관성력이 공존할 때 물의 혼합화는 관성력에 대한 부력의 비에 따라 좌우된다. 부력과 관성력이 균형을 이루게 될 경우 물의 성층화가 형성되어 고온의 물이 입구로 들어와 배플이 설치된 원통셀내를 유동하는 과정에서 W2 근처에

있는 저온의 물과 잘 섞이지 못하기 때문에 다른 지점보다 늦게 70°C에 이르게 되며 반대로 원통셀 오른쪽 상단부(W3)에서는 고온의 물의 밀도차에 의한 상승작용으로 인하여 빠르게 70°C에 도달하는 것으로 사료된다. Fig. 7은 유입온도, 80°C 및 유량, 1.5L/min에 대하여 원통셀의 네 지점에서 물의 온도변화를 시간의 함수로 표현한 것이다. 전반적인 경향은 Fig. 6과 유사하며 약 45분 후에 일정한 온도를 유지하였다. 그러나 70°C인 경우에 비하여 부력이 강해진 결과로 W2와 W4에서의 온도가 완만하게 상승하며 또한 온도차가 더욱 커지는 현상을 나타내고 있다.

### 3.1.2 PCM의 온도변화

Fig. 8은 유입온도, 70°C 및 유량, 1.5L/min에 대하여 세 지점(P1, P2, P3)에서 시간의 경과에 따른 PCM의 온도변화를 표현한 것이다. PCM의 온도 측정지점은 원통셀의 중심선에 위치한 관이며 세 지점의 위치를 Fig. 2에 표시하였다. 온도변화의 전반적인 경향을 살펴보면, PCM 온도는 지점에 관계없이 초기에 급격히 상승하다가 용해점에 이르러 서서히 증가하였고 용해과정 완료 후에 다시 온도가 상승한 후 완만하게 증가하는 경향을 보였으며 약 80분 후에 일정한 온도를 유지하였다. P1의 경우, 빠른 용해과정을 나타내고 있으며 P2 및 P3의 경우, 축열과정 동안 온도가 거의 동일하였으며 P1의 경우에 비하여 상당히 긴 시간동안 용해과정을 거치고 있음을 관찰할 수 있다. P1에서 물과 PCM간에 열교환이 활발하게 이루어져 P2 및 P3의 온도는 P1보다 낮게 나타나며 또한 P2 및 P3지점에서는 긴 시간에 걸친 상변화과정을 겪은 후에 70°C에 이르게 된다. Fig. 9는 유입온도, 80°C 및 유량, 1.5L/min에 대하여 세 지점에서 시간의 경과에 따른 PCM의 온도변화를 나타낸 것으로서 70°C인 경우와는 상이한 양상의 온도변화를 보이고 있으며 약 48분 후에 일정한 온도를 유지하였다. P1의 경우, 매우 빠른 용해과정을 나타내고 있으며 P2 및 P3에서도 빠르게 상변화가 발생하고 있음을 알 수 있다. 70°C인 경우와 다르게 축열과정 동안 P2의 온도가 P3의 온도보다 낮게 나타나고 있다. 원통셀내의 중간구역은 오른쪽구역에 비하여 온도차가 크므로 부력에 의한 영향 및 상대적으로 약한 관성력의 영향으로 온도의 성층화가 강하게 나타나지만

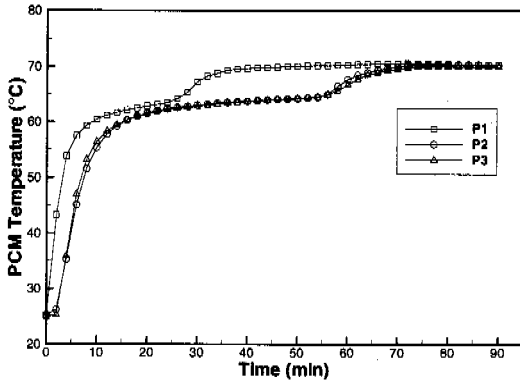


Fig. 8 Temperature histories of PCM for charge process (inlet water temp.; 70°C, flow rate; 1.5L/min)

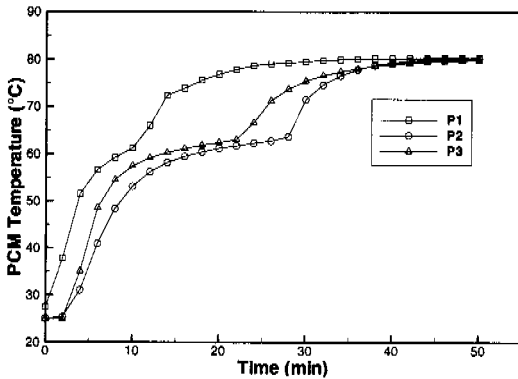


Fig. 9 Temperature histories of PCM for charge process (inlet water temp.; 80°C, flow rate; 1.5L/min)

오른쪽 구역에서는 출구 쪽의 유동면적 감소로 인한 재순환유동의 결과로 물의 혼합화, 즉 온도의 성층화가 덜 이루어져 온도가 높게 나타나는 것으로 판단된다

### 3.1.3 용해시간

Fig. 10은 유입온도, 70°C에 대하여 세 지점(P1, P2, P3)에서 유량의 변화에 따른 PCM의 용해시간을 나타낸 것이다. 용해시간은 유량의 증가에 반비례하였으며 유량이 1.5L/min 및 2.0L/min인 경우 각각의 유량에 대하여 P2 및 P3의 용해시간은 동일하였다. 그러나 유량이 1.0L/min인 경우 P2에서 가장 늦게 상변화가 발생하였다. 유입온도가 80°C로 증가하면 유량의 증가에 관계없이 P2에서 용해시간이 길게 나타나고 있음을 Fig. 11

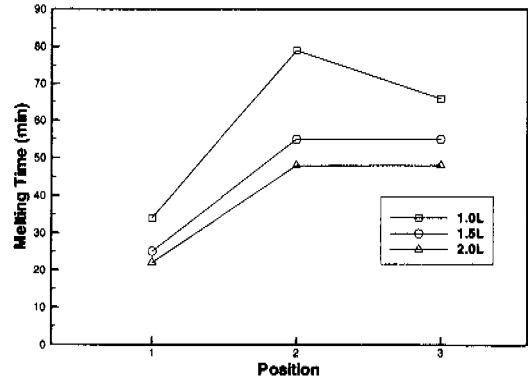


Fig. 10 Melting time of PCM for charge process (inlet water temp.; 70°C)

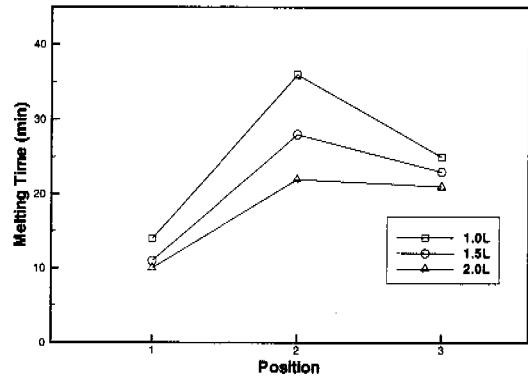


Fig. 11 Melting time of PCM for charge process (inlet water temp.; 80°C)

을 통하여 관찰할 수 있으며 이는 유입온도의 증가로 인하여 관성력에 대한 부력의 증가 영향 때문에 원통셀의 중간구역에서 온도의 성층화가 이루어져 용해시간이 길어지기 때문으로 사료된다. 용해시간은 유량에 따라서 유입온도 70°C인 경우 최소 24분에서 최대 78분이, 80°C인 경우 최소 10분에서 최대 36분이 소요되었다.

### 3.1.4 축열특성

실험에서 측정된 물의 입구(W1)온도 및 출구(W4)온도를 이용하여 시간의 경과에 따른 열저장률(heat storage rate)을 Fig. 12 및 Fig. 13에 표시하였다. 축열과정에서 시간의 흐름에 따른 열저장률은 다음 식과 같이 계산된다.

$$q = \dot{m}_w c_{p,w} (T_{w,i} - T_{w,o})$$

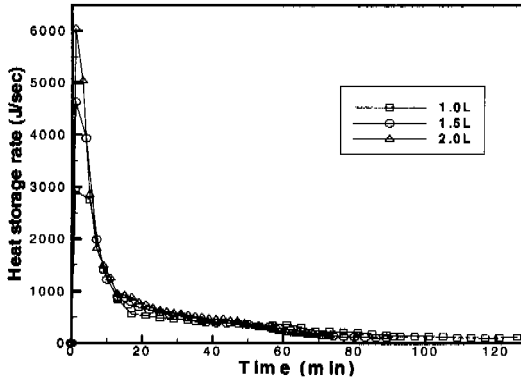


Fig. 12 Heat storage characteristics for charge process(inlet water temp.; 70°C)

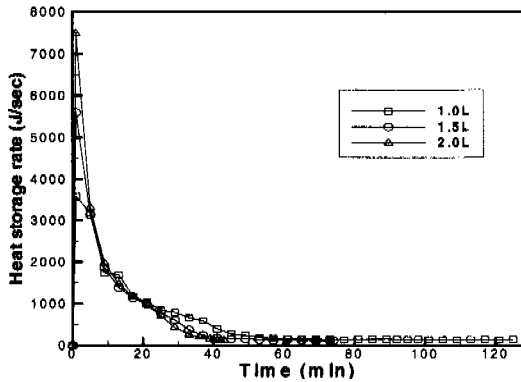


Fig. 13 Heat storage characteristics for charge process(inlet water temp.; 80°C)

여기서  $\dot{m}_w$ ,  $c_{p,w}$ ,  $T_{w,i}$  및  $T_{w,o}$ 는 각각, 물의 질량유량, 정압비열, 입구온도 및 출구온도를 나타낸다.

Fig. 12는 유입온도, 70°C에 대하여 유량의 변화에 따른 열저장률을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 열전달 유체와 PCM간에 열교환이 시작된 즉시 순간 열저장률이 최고값을 나타낸 후 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 초기에 유체와 PCM간의 열전달 추진력인 온도차가 크기 때문에 높은 열전달이 이루어지는 것이며 그 후 PCM온도가 용해점을 지나면서 상변화가 발생하여 서서히 열전달이 이루어지는 것으로 판단된다. 1.0~2.0L/min의 유량에 대하여 최대 열저장률은 2900~6000 J/sec이다. Fig. 13은 유입온도를 80°C로 증가시킨 경우에 대한 열저장률을 표시한 것이다. 70°C인 경우와 마찬가지로 매우 빠르게 열저장이 이루어짐을 알 수 있다.

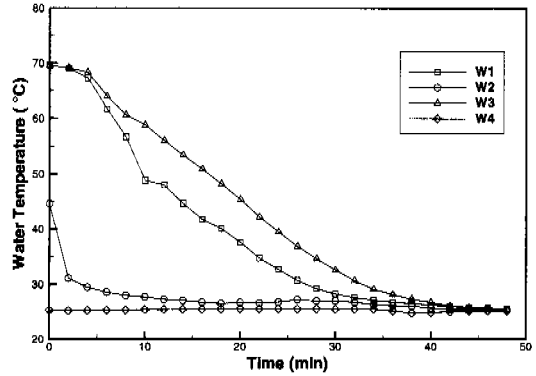


Fig. 14 Temperature histories of water for discharge process(initial water temp.; 70°C)

1.0~2.0L/min의 유량에 대하여 최대 열저장률은 3600~7500 J/sec이다.

### 3.2 방열과정

#### 3.2.1 물의 온도변화

Fig. 14는 초기온도, 70°C, 입구온도, 25°C 및 유량, 1.5L/min에 대하여 원통셀의 네 지점(W1, W2, W3, W4)에서 물의 온도변화를 시간의 함수로 나타낸 것이다. W1 및 W3에서는 온도가 서서히 감소하여 약 48분 후에 25°C에 도달하였고 W2에서는 온도가 초기에 급격히 감소한 후 거의 동일한 온도를 유지하였다. W2에서 온도가 급격히 떨어지는 이유는 오른쪽에 설치된 배플과 원통셀 사이로 저온의 물이 소량 누설되어 원통셀 하부로 유동하기 때문으로 사료된다. Fig. 14에서 발견할 수 있는 특이한 현상은 W3의 온도가 가장 늦게 감소하는 점이다. 저온의 물이 W3으로 유동하는 과정에서 W3에는 고온의 유체층이 형성되어 저온의 물과 충분히 섞이지 못하는 관계로 온도가 서서히 감소한다. 반면에 W1에서는 출구 쪽의 유동면적의 감소로 인하여 1구역 상단부 좌우측에 재순환유동이 발달되는 결과로 저온의 물과 고온의 물의 혼합이 활발하여지기 때문에 W1은 W3에 비하여 빨리 온도가 감소하는 것으로 생각된다.

Fig. 15는 초기온도, 80°C, 입구온도, 25°C 및 유량, 1.5L/min에 대하여 원통셀의 네 지점에서 물의 온도변화를 표현한 것이다. 전반적인 온도변화는 지점에 관계없이 Fig. 14와 유사한 형태를 보이고 있으며 W1과 W3 사이의 온도차가 70°C

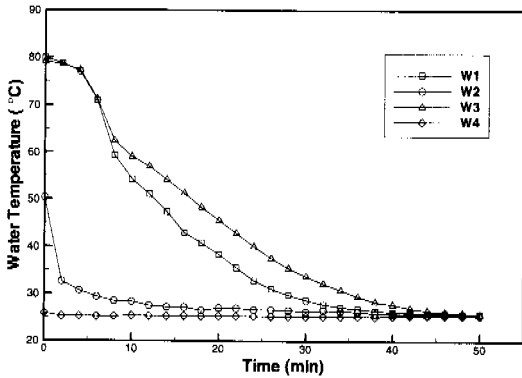


Fig. 15 Temperature histories of water for discharge process (initial water temp.; 80°C)

인 경우에 비하여 약간 줄어들었음을 알 수 있다.

### 3.2.2 PCM의 온도변화

Fig. 16은 초기온도 70°C, 입구온도 25°C 및 유량 1.5L/min에 대하여 세 지점(P1, P2, P3)에서 시간의 경과에 따른 PCM의 온도변화를 표현한 것이다. 온도변화의 경향을 살펴보면, PCM온도는 지점에 관계없이 초기에 급격히 감소하다가 응고점에 이르러 완만하게 감소하였고 응고점 이후에 온도가 다시 급격하게 감소하는 모습을 보였다. 축열과정에서는 P2 및 P3의 온도가 거의 동일하게 변화하였으나(Fig. 8) 방열시에는 P2의 온도가 가장 늦게 감소하며 또한 긴 응고과정을 겪는 특성을 나타냈다. 원통셀의 중간구역(P2)에서는 저온의 물이 원통셀 오른쪽구역을 통과하면서 온도가 높아진 물의 영향으로 느리게 상변화가 나타나며 왼쪽구역(P1)에서는 물의 유입시 원통셀과 오른쪽 배플 사이로 누설된 저온의 물의 영향으로 보다 빠르게 상변화가 나타나는 것으로 사료된다. Fig. 17은 초기온도를 80°C로 증가시킨 경우에 대하여 시간의 흐름에 따른 PCM의 온도변화를 나타낸 것이며 변화의 모습은 초기의 급격한 온도강하를 제외하고 Fig. 16과 유사하였다.

### 3.2.3 응고시간

Fig. 18은 초기온도 70°C, 입구온도 25°C에 대하여 세 지점(P1, P2, P3)에서 유량의 변화에 따른 PCM의 응고시간을 나타낸 것이다. 응고시간은 유량의 증가에 반비례하였으며 P2지점에서 가장 늦게 상변화가 발생하였다. 초기온도가 80°C로

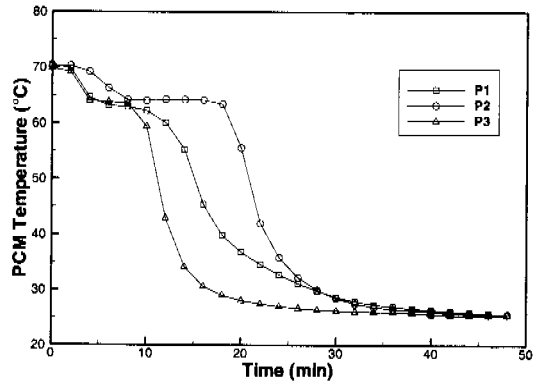


Fig. 16 Temperature histories of PCM for discharge process (initial water temp.; 70°C)

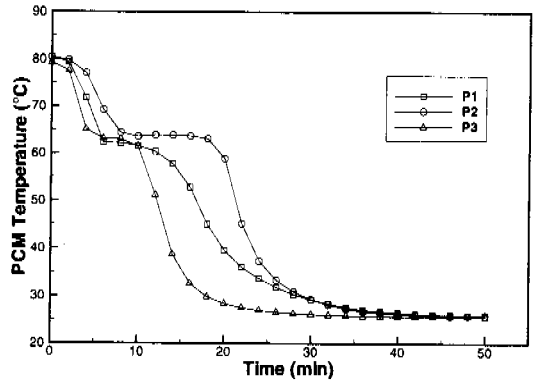


Fig. 17 Temperature histories of PCM for discharge process (initial water temp.; 80°C)

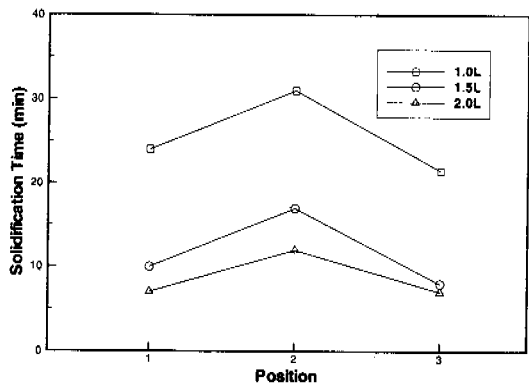


Fig. 18 Solidification time of PCM for discharge process (initial water temp.; 70°C)

증가하는 경우에도 응고시간의 변화양상은 70°C인 경우와 유사함을 Fig. 19을 통하여 확인할 수 있다. 응고시간은 유량에 따라서 초기온도 70°C



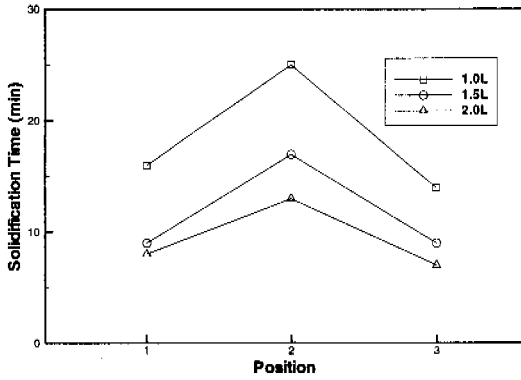


Fig. 19 Solidification time of PCM for discharge process(initial water temp.; 80°C)

인 경우 최소 7분에서 최대 31분이, 80°C인 경우 최소 7분에서 최대 25분이 소요되었다. 결과적으로 축열과정인 경우 유량보다는 입구온도가 용해에 미치는 영향이 상대적으로 크나 방열과정인 경우 초기온도보다 유량이 응고과정을 좌우하였으며 응고에 소요된 시간이 용해에 소요된 시간보다 훨씬 짧았다.

3.2.4 방열특성

Fig. 20은 초기온도 70°C 및 입구온도 25°C 그리고 Fig. 21은 초기온도 80°C 및 입구온도 25°C에 대하여 유량의 변화에 따른 열방출률을 나타낸 것이다. 열교환이 시작되자마자 열방출률이 최고값을 나타낸 후 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 열저장물 및 열방출률의 변화형태를 비교 고찰하면 축열과정(Fig. 12, Fig. 13)인 경우 급격한 변화를 보이는 초기를 제외하고 유량의 변화에 관계없이 거의 동일하게 열저장이 이루어졌으며 방열과정인 경우 유량이 증가할수록 열방출이 빨리 이루어졌다. 이상의 결과로부터 축열과정인 경우 입구온도의 영향이 지배적이며 방열과정인 경우 유량의 영향도 상당히 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 원통형 캡슐내에 PCM을 저장하고 엇갈린 원관군 및 배플로 구성된 수평식 셀-튜브형 축열조를 사용하여 유체의 유입온도 및 유량의 변화에 따른 축열 및 방열특성을 고찰하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

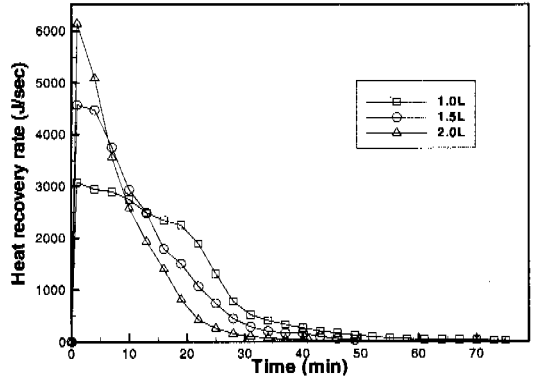


Fig. 20 Heat recovery characteristics(initial water temp.; 70°C)

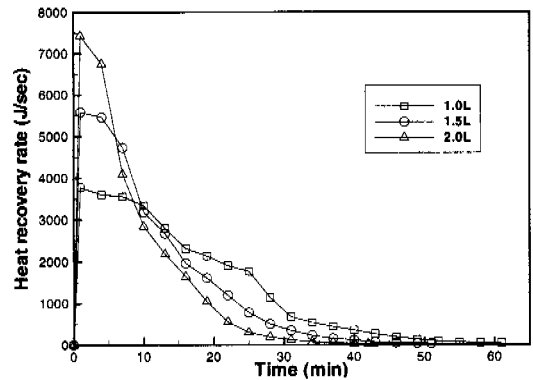


Fig. 21 Heat recovery characteristics(initial water temp.; 80°C)

축열과정에 대하여 물의 온도는 초기온도 70°C인 경우 초기에 급격히 상승한 후 서서히 증가하였으며 초기온도 80°C인 경우 초기의 상승정도가 70°C인 경우에 비하여 완만하였다. 물의 온도는 유입온도에 관계없이 원통셀내 왼쪽 하단부(W2)에서 가장 낮게 나타났으며 중간구역에서는 온도의 성층화가 형성되었다. 물의 유입온도가 70°C인 경우 P2 및 P3에서 동일한 PCM온도변화 및 긴 용해과정을 나타냈으며 유입온도가 80°C인 경우 P2지점에서 가장 느리게 용해과정이 발생하였다. 용해시간은 유량의 증가에 반비례하여 감소하였으며 유입온도 70°C인 경우 P2 및 P3에서 동일하였지만 유입온도 80°C인 경우 P2에서 가장 긴 용해시간이 소요되었다. 그리고 열저장물은 열교환이 시작된 즉시 최고값을 나타낸 후 급격히 감소하다가서서히 감소하는 특성을 보였다.

방열과정에 대하여 물의 온도는 초기온도에 관

계없이 W2 및 W4에서 급격하게 감소하였고 W1 및 W3에서는 서서히 감소하는 양상을 보였으며 특히 W3에서 가장 늦게 온도가 감소하였다. PCM온도는 초기온도에 관계없이 P2에서 가장 느리게, P3에서 가장 빠르게 감소하였으며, 특히 P2에서는 긴 응고과정을 보였다. 응고시간은 초기 온도에 관계없이 P2에서 가장 길었으며 P1 및 P3에서는 응고과정에 비슷한 시간이 소요되었다. 열방출률의 변화형태는 열저장률의 변화형태와 비슷하였다.

## 후 기

본 연구는 1998년 원광대학교 교비지원에 의하여 수행되었으며 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kalhori, B. and Ramadhyani, S., 1985, "Studies on Heat Transfer from a Vertical Cylinder, with or Without Fins, Embedded in a Solid Phase Change Medium," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 107, pp. 44~51.
- (2) Kishore V.V.N. and Katam, S., 1987, "Thermal Conductivity Improvement of Paraffin Wax for Thermal Storage Applications," *Alternative Energy Source VII 1*, pp. 313~320.
- (3) Radhakrishnan, K. B. and Balakrishnan, A. R., 1992, "Heat Transfer Analysis of Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials," *Heat Recovery Systems*, Vol. 12, No. 5, pp. 427~435.
- (4) 서정세, 김관중, 유제인, 노승탁, 1993, "수평 원관내 과냉각 및 자연대류가 용해과정에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집, 제17권 제8호, pp. 2079~2087.
- (5) 유호선, 1997, "등온가열에 의한 접촉용해의 초기과도과정에 대한 근사적 해석해," 대한기계학회논문집, 제21권 제12호, pp. 1710~1722.
- (6) Zhang, Y. and Faghri, A., 1997, "Analysis of Freezing in an Eccentric Annulus," *J. of Solar Energy Engineering*, Vol. 119, pp. 237~241.
- (7) Watanabe, T., Kikuchi, H. and Kanzawa, A., 1993, "Enhancement of Charging and Discharging Rate in Heat Storage System by Use of PCM with Different Melting Temperatures," *Heat Recovery Systems*, Vol. 15, No. 7, pp. 641~653.
- (8) Majumdar, P. and Saidbakhsh, A., 1990, "Heat Transfer Model for Phase Change Thermal Energy Storage," *Heat Recovery Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 457~468.
- (9) Yanadori, M. and Masuda, T., 1986, "Heat Transfereential Study on a Heat Storage Container," *Solar Energy*, Vol. 36, pp. 161~177.
- (10) 임장순, 1993, "축열시스템의 특성과 설계에 관한 기초연구," 한국과학재단.
- (11) 이태규, 1996, "태양에너지의 효율적 이용을 위한 상변화물질의 미세캡슐화," 한국에너지기술연구소보고서, 통상산업부.
- (12) 한국전력공사, 1999, 한국전력공사 홈페이지 ([www.kepco.co.kr](http://www.kepco.co.kr))/전력통계/발전통계/발전실적추이.
- (13) 권영만, 모정하, 1998, "셸-앤드-튜브형 축열조의 축열특성에 관한 기초적 연구," 공기조화냉동공학회 동계학술발표회 논문집(II), pp. 169~173.
- (14) 권영만, 서해성, 모정하, 1999, "셸-앤드-튜브형 열교환기의 방열특성에 관한 실험적 연구," 공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집(III), pp. 1161~1168.
- (15) 1978, *Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 6th Ed., TEMA, Inc., N. Y.
- (16) 한국전력공사, 영업처, 1997, "축열식 전기보일러 및 온수기의 심야기기 인정 및 사후관리 기준."
- (17) Hewitt, G., F., Shires, G., L. and Bott, T., R., 1994, *Process Heat Transfer*, Boca Raton, CRC Press, pp. 271~275.