

## 판형 상변화 물질 용기의 2상 열교환 현상 연구

### A Study on Two Phase Heat Exchange of Plate Type PCM Container

김 석 현\*, 조 성 우\*\*, 이 채 수\*\*  
S. H. Kim, S. W. Cho, C. S. Lee

**Key words** : Latent cold storage(잠열축냉), Phase change materia(PCM, 상변화물질), PCM container(잠열재 용기), Phase change(상변화)

#### Abstract

This work studies qualitative thermal characteristics of PCM cold storage medium container and its surrounding streams. Experimental parameters are initial PCM temperature and cold water flow rate. A mathematical modeling was established to estimate temperature distribution and the cooling process. We found that the phase-change temperatures of PCM varies from 6 to 8°C which is constant for other materials and that the dominant heat transfer resistance is that on the container side taking about 3/4 of the total resistance. The one dimensional mathematical model predicts experimental data quit well.

#### 기 호 설 명

$C_p$  : 비열 [kJ/kg°C]

$h$  : 열전달계수

$k$  : 열전도도 [W/mK]

$L$  : 용기 길이 [m]

$\dot{m}$  : 브라인 질량 유량 [kg/s]

$Nu$  : Nusselt 수

$Pr$  : Prandtl 수

$P$  : 컨테이너 폭 [m]

$q$  : 열전달량 [kW]

$Re$  : Reynolds 수

$T$  : 온도 [°C]

$t$  : 시간 [sec]

$U$  : 총괄열전달계수 [W/m<sup>2</sup>k]

그리스 문자

$\epsilon$  : 축열효율

$\rho$  : 축열재 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

하 첨 자

$i$  : 축열조 입구

$o$  : 축열조 출구

$p$  : 축열재

$w$  : 브라인

\* 정회원, 국민대학교 기계공학부

\*\* 국민대학교 기계공학부 대학원

### 1. 서 론

생활수준의 향상과 산업발전에 따라 국내 에너지 소비량은 매년 증가하여 왔으며 특히 쾌적 환경을 추구하는 하계 냉방수요가 급증하고 있다. 건물 냉난방용 에너지 사용량이 국가 에너지 수급에 있어 점차 큰 비중을 차지하게 됨에 따라 하절기 공조용 전력수요의 집중현상으로 인한 계절간, 그리고 주야간의 전력수급 불균형이 에너지 정책상 심각한 문제를 제기하게 되었다. 주간의 냉방부하를 전력 소비가 적은 심야시간대로 이동함으로써 전력부하 평준화를 도모하는 축냉식 건물 공조시스템의 도입이 그 대책중 하나로써 현재 기술적 주목을 받고 있다.

이와같은 축냉 시스템의 도입은 신규발전설비의 추가 건설을 억제하며 고품질의 냉방을 보장하는 등 공급자와 사용자 모두에게 여러가지 이익을 제공한다. 축냉시스템은 크게 물을 이용하는 현열 축열방식과 상변화 물질을 이용하는 잠열 축열방식으로 구분한다. 수축열은 냉방뿐 아니라 난방을 위한 축열을 병행할 수 있고 상변화없이 현열을 이용하기 때문에 높은 온도에서 운전하여 냉동기 성능을 높일 수 있으나 단위체적당 축열밀도가 낮아 큰 축열공간이 필요하고 열손실이 큰 단점을 가지고 있다. 물의 용해잠열을 이용하는 빙축열 방식의 도입으로 일정한 온도의 냉수공급은 물론이고 현열 축열의 최대 문제인 축열공간을 획기적으로 줄임으로 설비규모를 대폭 소형화할 수 있다. 그러나 이러한 방식은 제빙을 위하여 -5~-10℃의 냉매 증발온도가 필요하기 때문에 냉동기 성능저하와 이에 따른 운전비 상승 문제를 안고 있다. 이와같은 빙축열 시스템의 단점을 보완하기 위해서 적절한 잠열을 가지면서도 건물 공조에 적합한 온도(5~7℃정도)에서 상변화하는 물질을 적용하는 축냉시스템이 제안되었다. 이러한 특성을 가진 상변화 물질로 포접화합물계와 공용염계 등이 있는데, 물질의 특성상 포접화합물계는 축열조내에 그대로 충전하여 슬러리를 형성시키는 동적 제빙방식을, 공용염계쪽은 밀봉한 용기에 담아 축냉조에 충전하여 제빙하는 정적방식을 주로 사용하고 있다.

공용염 축열에 관련된 분야의 연구는 상당히 오

래된 것으로써 최근 Masuda 등<sup>(1)</sup>은 상변화 물질 용기의 열전달현상에 관한 연구를 수행하였고, Watanabe 등<sup>(2)</sup>은 서로 다른 상변화온도를 가지는 상변화물질을 사용한 축열모듈의 열성능에 관하여 연구하였다. 임<sup>(3)</sup>과 길<sup>(4)</sup>은 공용염계 물질에 대한 상분리 현상 및 온도변화, 구형용기를 이용한 공용염 축열조의 전열 특성 등을 연구하였다. Chen 등<sup>(5)</sup>과 서<sup>(6)</sup>는 축열재 용기 내외의 전열특성 등을 연구하였다.

본 연구에서는 김 등의 연구<sup>(7),(8)</sup>에서 제안된 관형 축열재 용기 내외부의 열전달저항의 특성을 파악하기 위하여 축열재 자체의 물성과 용기의 열특성, 그리고 축열조내의 열 특성을 냉수 유동측의 대류열전달 저항을 결정할 냉수유량과 축열조내 초기온도 등을 실험변수로 하여 고찰하였고 축열조 설계에 중요한 자료를 제시하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

#### 2.1 실험장치

본 실험장치는 잠열재 용기 내외부의 열전달특성을 파악하기 위한 것으로써 소형 실험조(test section)와 냉동기, 항온조, 냉수펌프 및 브라인펌프로 구성되어 있다. 냉열원으로는 3RT급 왕복동식 수냉식냉동기(경원세기 모델 CR-303AL)와 20liter 용량의 저온 항온조를 사용하였다. 시스템의 구성도를 Fig.1에 나타내었다.

실험조는 5개의 PCM용기를 적재할 수 있도록 설계하였고, 5mm 두께의 아크릴을 2중으로 사용

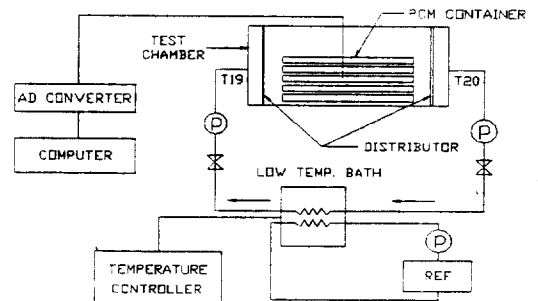


Fig.1 Schematic diagram of pcm system

하여 5mm 두께의 공기층을 사이에 두고 밀봉, 제작하여 조내 유동을 관찰할 수 있도록 하는 동시에 벽체를 단열하였다. 또한 출입구에는 두 개의 열전대(T19, T20)를 Fig.1과 같이 설치하였다.

판형 축냉재 용기로는 상용화된 Transphase System Co.의 Transphase 47을 사용하였는데 이것은  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ 에 특정한 첨가제가 포함된 것으로 그 물성치가 Table 1에 주어져 있다. 경계 부분의 효과를 제거하기 위하여 5개의 적층된 용기중 중간의 2개에서 온도를 취득하였다. 이 용기는 얇은 고밀도 폴리에틸렌으로 제작되어 있어 강도 등 물성이 좋으나 불투명하므로 측정용 용기중 하나는 내부의 축냉과정을 육안 관찰할 수 있도록 같은 크기의 투명 아크릴로 제작 설치하였다. Fig.2와 같이 용기에는 각 3개씩의 T-type 열전대를 내장한 5개의 센서봉을 이용하여 상하 온도 변화와 좌우로의 상변화 선단의 이동과정을 계측하도록 하였다. 또한 실험조 및 PCM 용기의 제원은 Table 2 및 3에 나타나 있다.

유량계측에는 적산용적식 유량계(최대 유량 1~2liter/min)를 사용하였으며, 용기내부 및 브라인 온도측정은 T-type 열전대를 이용하였고, Schlum-

Table 1 Properties of the PCM( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ )

Freezing point	8.3°C
Latent heat	95,366J/kg
Specific heat (liquid)	1,675J/kg°C
Specific heat (solid)	1,256J/kg°C
Density	1,489.7kg/m <sup>3</sup>

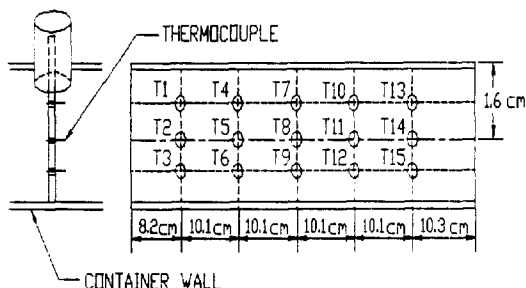


Fig.2 Sensor installation (side view)

berger Electronics사 제품인 model 35951A analog measurement IMP와 PC를 연결하여 데이터를 취득, 처리하였다.

2.2 실험방법

PCM 용기내의 상변화 과정을 관찰하기 위하여 PCM의 초기온도와 냉수의 순환유량을 인자로 하여 실험을 수행하였다. 실험과정은 다음과 같다.

- (1) 축열재 용기내의 온도가 실험 초기온도 12°C 이상으로 유지되는지 확인한다.
- (2) 축열조내의 순환 냉수온도와 유량을 실험조건에 도달시킨다.
- (3) 축열재 용기를 축열조 실험조 내에 넣고 데이터 취득을 시작한다.
- (4) 축열재 용기내 온도가 순환 냉수온도에 근접하여 축열조 출입구 온도차가 0.2°C 이하로 되면 실험을 종료한다.

3. 실험결과 및 분석

Fig.3은 시간에 따른 축열재 용기내의 길이방향의 온도분포를 나타낸 것이다. 상변화 선단부분이 앞쪽에서부터 점차 뒤쪽으로 전파되어 가는 것을 알 수 있으며, 실험결과 얻어진 상변화온도는 일반적인 물질이 일정한 상변화 온도특성을 갖는 것과는 달리 대체로 6~8°C로써 냉수 유동방향으로 앞

Table 2 Specification of test chamber

Material	Acryl
Dimension	1,000 × 204 × 315mm
Water level	215mm
Number of container	5ea
Volume of water	0.023m <sup>3</sup>

Table 3 Specification of container

Material	High density polyethylene
Dimension	609.6 × 203.2 × 43.2mm
Gross weight	5.58kg/container
Volume	4.16 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /container

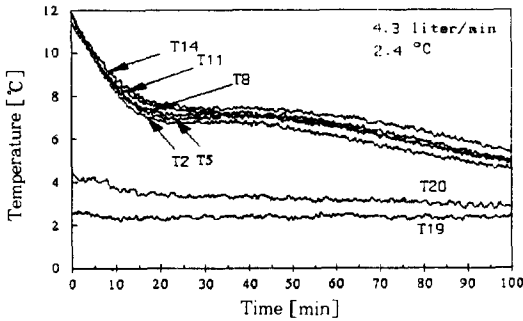


Fig.3 Cooling curves of PCM (axial location)

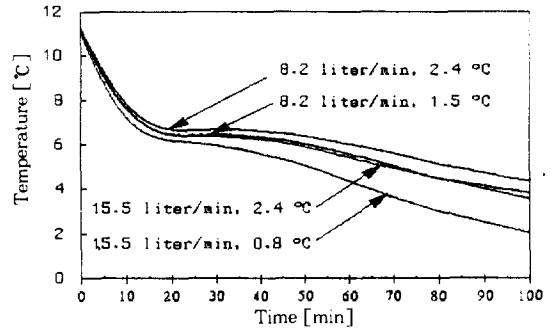


Fig.5 Effects of flow rate and inlet temperature of water

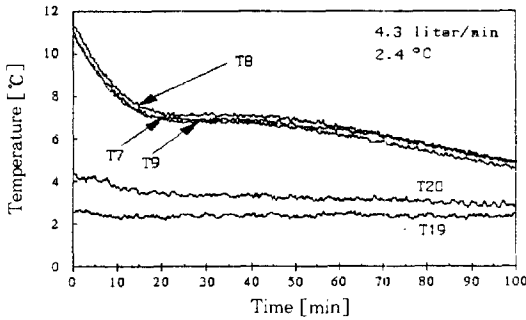


Fig.4 Cooling curves of PCM (transverse location)

쪽이 상변화를 먼저 시작하고 있다. 이때 용기의 하류측에 온도변화가 없는 것은 상변화 과정이 아니라 냉수와 온도차가 작음으로 열교환이 없기 때문인 것으로 사료된다. 이어서 차례로 상변화 선단이 후방까지 진행된다. 한편 Fig.4에 주어진 수직방향 온도센서(T7-9)의 측정결과를 보면 상하의 표면쪽 온도는 거의 같으며 중심부보다는 다소 낮은 상태이다. 따라서 용기내에 PCM의 자연대류는 일어나지 않으며 열전도에 의하여 응고/용해과정이 진행되는 것으로 판단할 수 있다. 여기서 T19 및 T20은 각각 실험조의 입구 및 출구온도를 가리킨다. 현재의 실험범위에서 검토할 때 편형용기의 상변화는 외부 유동에 수직한 방향으로 열전도가 지배적이고 유동방향으로 상변화 선단이 거의 1차원적으로 이동하므로 단순화된 1차원 열교환기 문제로 실용적 해석이 가능하며, 이에 따라 1

차원 전산모델을 가정하고 전산시뮬레이션을 수행할 수 있다.

Fig.5는 유량과 냉수의 입구 온도변화에 따른 축열재의 평균온도를 나타낸 것이다. 평균온도는 용기내에 배치한 15개의 열전대로 측정된 온도의 평균치이다. 적용된 공용열 축열재의 상변화 온도는 일정치 않으며 순환냉수의 온도가 높을수록, 유량이 적을수록 다소 높아짐을 알 수 있다. 이런 특성은 냉동기 성적계수의 향상 및 펌프용량의 선정에 유리한 조건을 판단된다. 이러한 축냉 시스템에서 축냉시간을 고려한 경제성 분석을 위한 초기자료로 앞서 서술한 1차원 전산모델의 가정이 사용될 수 있을 것으로 판단된다. Fig.6에서는 냉수 유량변화에 따른 축열조 유용도를 나타내었으며 저 유량에서 유용도가 좋은 것을 알 수 있으나 그 값의 차이는 전반적으로 낮아서 용기의 내부 저항이 큰 것으로 예상할 수 있다.

Table 4는 상변화가 발생하기 전구간(zone 1)과 후구간(zone 2)으로 구분하여 총괄 열전달계수(U)를 계산한 것이며 유량에 따라 대체로 60~80W/m<sup>2</sup>K의 값을 나타내며 냉수온도의 감소에 따라 다소 감소한다. 계산되어진 총괄 열전달계수는 용기내의 온도분포와 축열과정을 고찰하기 위한 전산시뮬레이션을 수행하기 위해 사용되었다. 또한 내부의 상당 열전달계수(h)를 Table 5에 나타내었으며 축열시 지배저항은 용기내측의 열저항(1/h<sub>i</sub>)이며 전체 열저항(1/U)의 3/4정도임을 알 수 있었다. 따라서 축열재용기의 설계에 관점을 둔 검증이 필요하다.

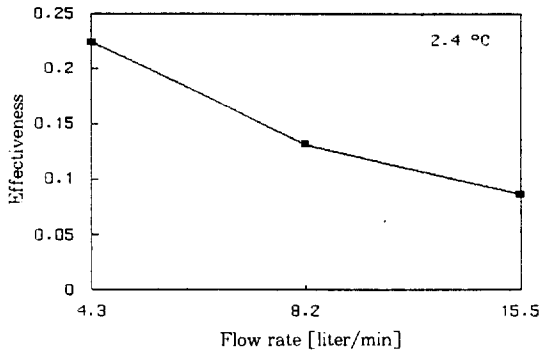


Fig.6 Effects of flow rate on thermal storage effectiveness

Table 4 Overall heat transfer coefficient,  $U$  ( $W/m^2K$ )

Flow rate (liter/min)	Water temperature ( $^{\circ}C$ )	$U$	
		zone 1*	zone 2**
4.3	2.35	63.2	54.3
	2.35	66.8	67.7
8.2	1.49	61.6	60.5
	2.35	66.8	67.7
15.5	0.76	70.6	94.0
	2.35	80.1	82.0

\* before the phase change

\*\* after the phase change

Table 5 Internal thermal conductance  $h_i$  ( $W/m^2K$ )

Flow rate (liter/min)	Water temperature ( $^{\circ}C$ )	$h_i$	
		zone 1*	zone 2**
4.3	2.35	84.2	69.4
	2.35	88.1	91.9
8.2	1.49	79.8	79.1
	2.35	88.1	91.9
15.5	0.76	92.4	147.4
	2.35	110.2	125.8

\* before the phase change

\*\* after the phase change

#### 4. 전산모델

앞서의 실험결과로부터 용기 내외부의 열저항 분석과 온도분포의 예측을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) PCM 및 water측 1차원으로만 해석한다.
- (2) 축열과정중 축열재 물성치는 일정하다.
- (3) 용기내의 축방향 전도 및 대류는 무시한다.
- (4) 축열조는 평형상태의 단류형 열교환기(single stream heat exchanger)이다.

단위시간당 축열조에서 저장 또는 방출되는 열량은 축열조 입출구의 냉수온도와 질량유량으로부터 다음과 같이 구한다.

$$q = \dot{m} c_p (T_i - T_o) \quad (1)$$

한편 단류형 열교환기에 대하여 열교환기 유용도(effectiveness)와 전달단위수(NTU)는 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\epsilon = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_f} \quad (2)$$

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m} c_p)_{\min}} = \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (3)$$

이로부터 총괄 열전달계수는

$$U = + \frac{\dot{m} c_p}{A} \cdot \ln \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (4)$$

이다. 한편 냉수측 열전달계수는

$$h_o = \frac{Nu_{Dh} k}{D_h} \quad (5)$$

이며 용기 외벽사이의 평행평면으로 구성된 틈새를 유동하는 경우 Nusselt 수는 본 실험과 같은 층류 유동에 대하여

$$Nu_{Dh} = 7.54 + \frac{0.03(D_h/L)Re_{Dh}Pr}{1 + 0.0016[(D_h/L)Re_{Dh}Pr]^{2/3}} \quad (6)$$

로 주어지므로<sup>(9)</sup> 구하고자 하는 내부 컨덕턴스는 다음과 같다.

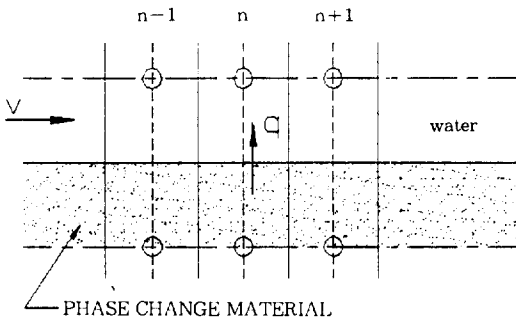


Fig.7 Node scheme for difference equation

$$h_i = \left[ \frac{1}{U} - \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (7)$$

한편 축열재 용기의 일정위치에 대한 열평형식은 냉수측 및 축열재측에 대하여 각각 식 (8) 및 식 (9)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta q &= \dot{m} c_p (T_w(x + \Delta x) - T_w(x)) \\ &= UP(T_w(x) - T_p) \Delta x \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta q &= \rho c_p A \Delta x (T_p(t + \Delta t) - T_p(t)) \\ &= IP(T_w(x) - T_p) \Delta x \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

유한차분식은 다음과 같다.

$$\frac{T_w^{n+1} - T_w^n}{\Delta x} = - \frac{UP}{\dot{m}_w c_{pw}} (T_w^n - T_p^n) \text{ at } k \quad (10)$$

$$\frac{T_p^{k+1} - T_p^k}{\Delta t} = \frac{UP}{\rho A c_{pp}} (T_w^k - T_p^k) \text{ at } n \quad (11)$$

여기서 n은 Fig.7에 나타난 바와같이 유동방향 좌표의 node를 k는 시간방향 좌표의 node를 나타낸다.

온도예측을 위한 계산은 순환 냉수유량 및 앞에서 구한 열전달계수와 축열재 상변화온도, 비열, 밀도, 축열재 잠열량 등의 열물성치를 입력하여 수행하였으며 시간의 전체구간을 액체 현열구간, 잠열구간, 그리고 현열구간의 세부분으로 나누어 계산을 수행하였다.

Fig.8 및 Fig.9는 냉수유량 15.5liter/min, 냉수 공급온도 2.4℃의 실험조건에서의 축열재 용기내

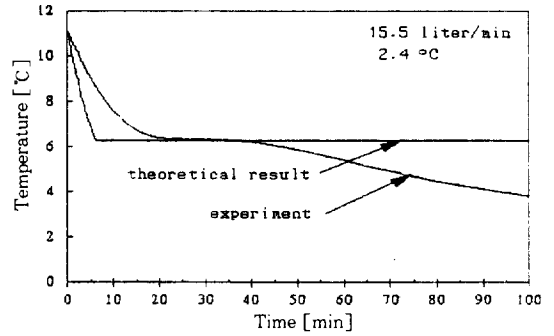


Fig.8 Simulation for cooling curve of the PCM

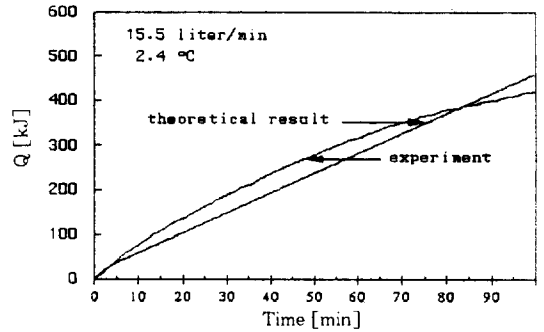


Fig.9 Simulation for the total amount of cold storage

의 평균 온도변화와 총축열량을 수치모델에 의한 계산결과와 비교한 것이다. 이로부터 전단한 1차원 전산시뮬레이션 결과가 실험결과와 실용범위안에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 냉수유량과 조내 초기온도 등을 변수로 하는 실험을 통하여 관형 축열재 용기 내외부의 열전달저항의 특성을 파악하였고, 이를 근거로 수치모델을 구성하여 열교환특성을 실용범위에서 적절히 예측하는 방안을 제시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 일반적인 물질이 일정한 온도에서 상변화하는 것과는 달리 이 실험에 적용된 공용염 잠열재의 상변화온도는 6~8℃로 일정하지 않은 것으로 나

타났다.

2) 판형 용기내의 공용염 잠열재의 경우 액상이더라도 용기내에서의 자연대류는 무시할 만하다.

3) 축열시 지배저항은 용기내측의 열저항으로 전체 열저항의 3/4정도이다.

4) 수학적 모델로 제시한 1차원 수치해는 실험 결과와 잘 일치한다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기공학 : ME94-A-01)에 의하여 연구되었습니다. 도와주신 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다. 본 연구에서 부족한 점들은 계속되는 연구를 통하여 보완해나갈 예정입니다.

## 참 고 문 헌

1. Michio Yanadori and Takashi Masuda, 1986, "Heat transferential study on a heat storage container with phase change material", Solar Energy, Vol. 36, No. 2, pp. 161~177.
2. Takayuki Watanabe and Hisashi Kikuchi and Atsushi Kanazawa, 1993, "Enhancement of charging and discharging rates in a latent heat storage system by use of PCM with different melting temperature", Heat

- Recovery System & CHP, Vol. 13, No. 1, pp. 57~66.
3. Mohammed M. Farid, Yongsik Kim and Atsushi Kansawa, 1990, "Thermal performance of a heat storage module using PCM's with different melting temperature: Experimental", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 112, pp. 133~149.
4. 임장순 등, 1992. 2, "상변화 물질을 이용한 잠열축열조에 관한 기초연구", 동력자원부 연구보고서.
5. 길현용, 1994, "공용염 축냉시스템의 성능에 관한 연구", 아주대학교 석사학위 논문.
6. Chen, S. L. and Yue, J. S., 1991, "Thermal performance of cool storage in packed capsules for air conditioning", Heat Recovery Systems & CHP Vol. 11, No. 6, pp. 551~561.
7. 서정세, 1994, "수평원통형용기 및 구형용기내에서 상변화물질의 용해과정", 서울대학교 석사학위 논문.
8. 최형식, 김석현 등, 1994. 6, "심야전력을 이용한 방축열 기술개발", 한국전력공사 연구보고서.
9. 김석현 등, 1994. 6, "신형 축냉 시스템 개발 및 성능평가", 한국전력공사 연구보고서.
10. Edwards, D. K., Denny, V. E. and Mills, A. F., 1979, Transfer Processes, McGrawHill, NY.