냉열잠열축열조의 성능해석†

Performance of the Cold Latent Storage System

윤 호 식,* 노 승 탁**
Ho Sik Yoon, Sung Tack Ro

ABSTRACT

The performance of the cold latent heat storage is investigated by experiment and by a simplified analytic approach. The heat storage tank has eight horizontal circular tubes and one path of refrigerant evaporating tube. The phase change material in the heat storage tank is water which is frozen by evaporating refrigerant of refrigeration system and melts by the warm air in the heat storage tank.

In the experiment, the performance has been studied by the various conditions including the initial water temperature on solidification and flow rate and temperature of air. The rate of recovered heat has been simulated by a simplified model and the results shows a good agreement.

In solidification process, initial water temperature causes time delay corresponding to the sensible heat and it is found that the shape of evaporator is important.

In melting process, the recovered heat rate from the heat storage tank is proportional to $Re^{0.8}(T_{bi}-T_f)$ of air where T_{bi} and T_f indicate temperatures of inlet air and phase change, respectively. And the deminishing rate of the recovered heat is higher for the higher heat rate.

기 호 설 명

Cp : 상변화 물질의 정압비열
Cpa : 유체의 정압비열
d_i : 내관의 안지름
Fo : Fourier 수, $\alpha t/r_o^2$
h_f : 상변화 물질의 잠열
h_i : 유체와 내관 사이의 열전달 계수
h_o : 내관과 상변화물질 사이의 열전달 계수
k : 상변화 물질의 열전도율
L : 축열조의 길이
$\dot{m}$: 유체의 질량 유량
Nu : Nusselt 수, hr_0/k
P : 내관의 평균 원주 길이

† 이 논문은 1986년도 문교부 자유과제(태양열에 의한 냉방 및 난방 시스템의 성능향상) 학술연구조성비에 의하여 연구되었음
* 한국과학기술원 기계공학부 연구원
** 정회원, 서울대학교 기계공학과

q : 내관의 단위길이당 열전달량
Ra : Rayleigh 수
Re : Reynolds 수, $\overline{u}di/\nu$
r : 반경 방향 좌표
r_i : 내관의 안 쪽 반지름
r_o : 내관의 바깥 쪽 반지름
r_f : 상변화 면의 반지름
Ste : Stefan 수, $Cp(T_w - T_f)/h_f$
T : 온도
T_b : 유체온도
T_{bi} : 유체의 입구 온도
T_f : 상변화 물질의 상변화 온도
T_o : 상변화 물질의 초기 온도
T_w : 내관의 벽면 온도
t : 시간
$\overline{u}$: 유체의 평균 유속
x : 축 방향 좌표

α : 상변화 물질의 열확산율
ν : 유체의 동점성 계수
ρ : 유체의 밀도
ρPCM : 상변화 물질의 밀도
τ : 무차원 시간, Ste Fo

1. 서 론

연중 전력소비의 최고값을 나타내는 계절이 겨울철에서 여름철이 됨에 따라 여름철의 전력소비의 최고값을 줄이는 방법들이 강구되어 왔다. 그 방법들 중 하나가 전력 소비량이 적은 심야에 냉동기를 사용하여 냉열을 저장하고, 이 열을 낮에 사용하는 방법이다. 하지만 이 경우 냉열을 저장하는 문제가 발생하는데, 상변화 물질의 잠열을 이용한 축열장치는 작은 부피로도 많은 열량을 저장할 수 있고, 부피가 작아짐에 따라 표면적이 작아짐으로써 열손실을 줄일 수 있다는 점에서 주목받고 있다.

수평 이중 동심 원관 사이에서 상변화 과정이 이루어지는 축열조에 대하여 Bejan과 Schultz[1]는 열을 회수하는데 사용되는 최적 유량에 대하여 연구하였으며, Saxena, Subrahmaniyam 과 Sarker[2]는 각-관형의 축열조에서 벽면 온도가 길이방향으로 일정하다고 가정한 모델로써 원관 안을 흐르는 유체의 유량과 입구 온도가 주어졌을 경우의 시간에 따른 축열량을 구하였다.

본 연구에서는 상변화 물질로서 물을 사용하고, 수평 원관 내에 유체를 통과시킴으로써 열을 회수하는 냉열 잠열축열조를 제작하고, 실험에 의하여 수평 원관 내를 통과하는 유체의 유량과 입구 온도가 시간당 회수열량에 미치는 영향을 알아보고, 수평 원관의 축방향 온도 변화를 구하였다. 또한 실험에서 얻은 결과를 예측할 수 있는 모델을 만들어 계산하였다.

2. 실험 장치

본 연구에서는 냉동기로 직접 축열조의 물을 응고시키고, 축열조 내에 원관을 수평으로 배열하고 이 관에 공기를 통과시켜, 얼음이 녹을 때 필요한 잠열을 공기로부터 직접 빼앗아 공기를 냉각시키는 방식의 축열조를 연구 대상으로 삼았다. 실험 장치의 전체적인 냉매와 공기의 계통도는 Fig.1에 표시하였다.

축열조는 Fig.2와 같은 모양으로 수조 내에 8개의 아연도 강관이 수평으로 배열되어 있고 냉동기의 증발기관이 통과한다. 상변화 물질로는 물을 사용하였고 축열조 내에 들어간 양은 10 kg 이다.

온도측정을 위하여 직경 0.5 mm의 T 형 (Copper – Constantan) 열전대를 사용하였

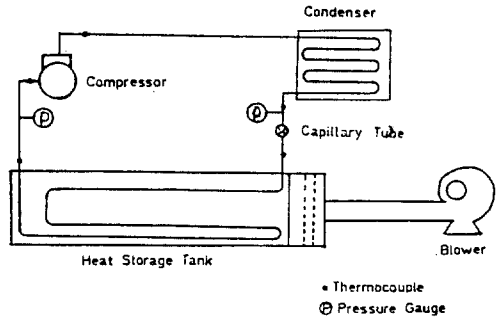

Fig.1 Schematic diagram for refrigerant and air flow

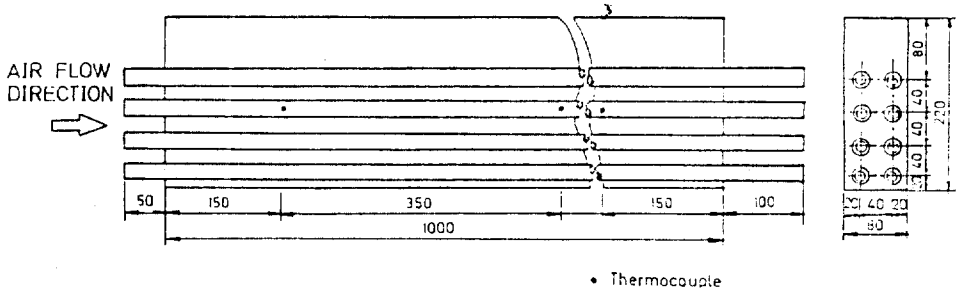

Fig.2 Heat storage tank used for experiment

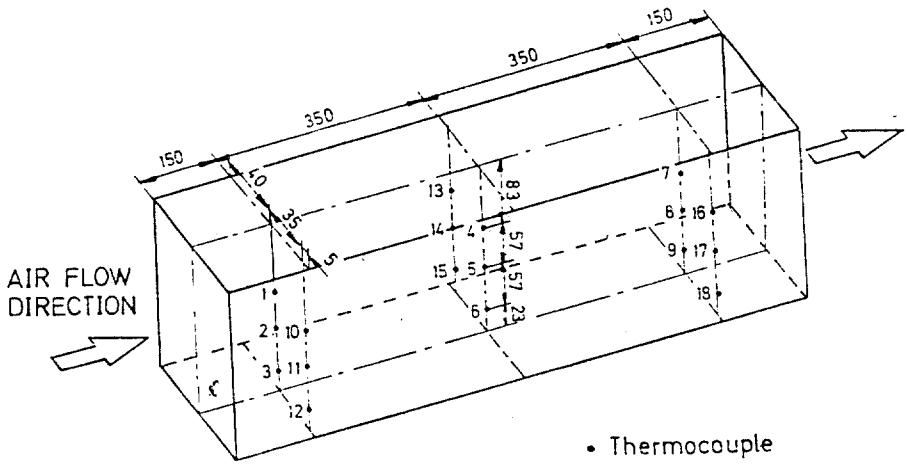

Fig.3 Thermocouple positions in heat storage tank

다. 축열조 내의 수온을 측정하기 위하여 열전대를 설치한 위치는 Fig. 3에 표시한 것처럼 모두 18개 장소이다. 또한 융해 과정동안 강관의 벽면 온도와 관 내부를 흐르는 공기의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 2에 표시한 위치에 관 벽면과 관 중심에 열전대를 부착하였으며 관의 입구와 출구에 열전대를 두어 공기의 온도변화를 측정하였다.

실험에서 사용한 냉동기의 성능을 알아보기 위하여 축열조를 열량계로 사용한 예비 실험을 하였다. 그 결과로부터 사용한 냉동기의냉동 능력이 180 W이라는 것을 알았다. 이실험에서는 증발기로 외경 7.8 mm의 구리관 2900 mm를 사용하였다.

실험에 사용된 송풍기는 회전수 3443 rpm으로 최대풍량 13 m^3/min 이고 최대 풍압 118 mAq 이다. 열전대에 의한 온도측정은 24개소를 동시에 측정할 수 있는 디지탈 기록계(Multi－Channel Digital Recoder)를 사용하여 측정하였으며, 측정한 자료를 IEEE-488 인터페이스 카드를 통하여 마이크로 컴퓨터에 전송하여 처리하였다.

3. 실험 방법

냉동기의 냉동 능력이 일정하므로 응고 과정에서는 초기 온도의 영향을 보는 것을 목적으로 하였다. 응고 과정의 실험은 초기온도가 5.2℃, 11.3℃, 15.3℃인 경우에 실시하였다. 응고된 물의 질량비는 고체와 액체의 밀도차에서 발생하는 자유 표면의 높이 변화로써 구하였다. 실험은 축열조 내의 각 측정 위치의 온도가 모두 －1℃이하로 내려갈 때까지 실험을 진행하였다.

Table 1 Experiments of Meliting

Case	1	2	3	4	5
Air Inlet Temperature (℃)	20	20	20	17.8	23
Air Flow Rate (m^3/s)	0.00806	0.0126	0.01896	0.011315	0.013785
Re	6430	9666	15124	9026	10997
Total Operating Time (min)	304	243	209	296	200

융해 과정의 실험은, 초기 온도가 0℃근처에서 녹을 경우, 시간당 회수열량에 대한 내관을 흐르는 유체의 유량과 입구 온도의 영향을 보는 것을 목적으로 하였다. 따라서 응고과정이 끝날 경우 축열조의 평균 온도는 -12℃정도가 되므로, 약 2시간 정도 그대로 두어 축열조 내의 측정 온도가 평균 -0.5℃일 때부터 실험을 시작하였다. 융해 과정의 실험 조건은 Table 1에 표시하였다.

공기의 유량은 공기를 내경 49.5mm의 아크릴관을 통과시켜 이 때의 정압과 전압을 피토관에 의해 디지탈 액주계(Digital Manometer)를 사용하여 구하였으며 이것에 의해 유량을 구하였다. 피토관으로 측정한 위치는 반경방향으로 2mm간격으로 13지점이다.

4. 해 석

크기가 다른 축열조나, 입구조건이 다른 경우에 대하여도 성능을 예측하기 위하여 수치모사를 하였다. 해석의 모델은 Fig. 4와 같은 형상으로 설정하였다. 외관의 지름은 다른 강관들 간의 대칭선으로 이루어진 사각형과 같은 면적을 갖는 원의 지름으로 결정하였다.

본 연구 대상과 같은 축열조는 3차원 현상이 일어나므로 이것을 다음과 같은 가정에 의하여 단순화하였다.

1. 축 대칭 형상으로 원주방향의 온도 변화는 없다. 즉 θ방향의 변화는 무시한다.
2. 축방향 길이는 반경보다 상당히 커서 축방향 온도 구배는 반경방향 온도 구배에 비해 작으므로 축방향으로의 열전달은 무시한다.
3. 상변화 물질의 물성치는 일정하다.
4. 금속관의 전도 저항은 무시한다.
5. 액체 상태 상변화 물질의 온도 분포 변화에 따른 현열 효과는 무시한다. 즉, 내관으로부터 전달된 열량은 상변화 과정 중에 필요한 잠열로만 사용된다.

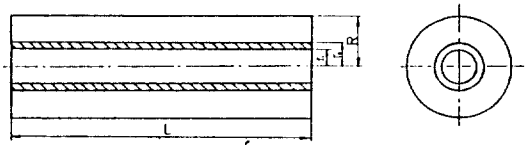

Fig.4 Model of the analytic approach

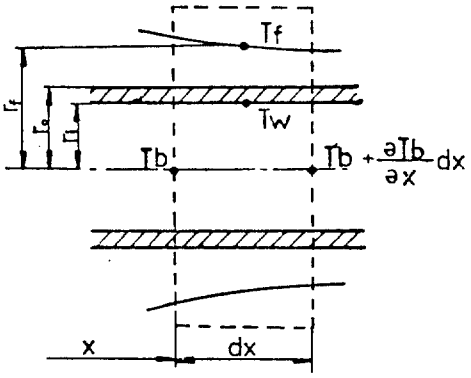

Fig.5 Elemental control volume for energy balance

공기의 입구로부터 길이방향으로 x만큼 떨어진 곳에 Fig. 5와 같은 길이 dx의 검사체적 내의 에너지 균형식은 다음과 같다.

$$dq = h_i (T_b - T_w) P dx \quad (1)$$

$$= h_o (T_w - T_f) P dx \quad (2)$$

$$= -\dot{m} C_{pa} dT_b \quad (3)$$

$$= 2\pi r_f \frac{dr_f}{dt} \rho_{CPM} h_f dx \quad (4)$$

이 때 r_f는 상변화 면까지의 거리를 나타낸다.

경계및 초기 조건은 다음과 같다.

$$T_b(0, t) = T_{bi} \quad (5\text{-a})$$

$$r_f(x, 0) = r_o \qquad (5\text{-b})$$

식(1), (2)로부터 내관의 벽면 온도 T_w를 구하면 다음과 같다.

$$T_w = \frac{h_i T_b + h_o T_f}{h_i + h_o} \qquad (6)$$

식(1), (3), (6)과 조건 (5-a) 로부터입구로 부터 x만큼 떨어진 지점의 유체 온도를 구할 수 있다.

$$T_b = T_f + (T_{bi} - T_f)\exp\left\{-\int_0^x \frac{h_i h_o}{h_i + h_o}\frac{P}{\dot{m}C_{pa}}dx\right\} \qquad (7)$$

이 된다.

식(2), (4), (6)과 조건 (5-b) 로부터

$$\frac{dr_f}{d_t} = \frac{h_i h_o}{h_i + h_o}(T_b - T_f)\frac{P}{\rho_{PCM} h_f (2\pi r_f)} \qquad (8)$$

$$r(x, t) = \left[\frac{1}{\pi}\left\{r_0^2 + \int_0^t \frac{h_i h_o}{h_i + h_o}\frac{T_b - T_f}{\rho_{PCM} h_f} P dt\right\}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (9)$$

를 얻을 수 있다.

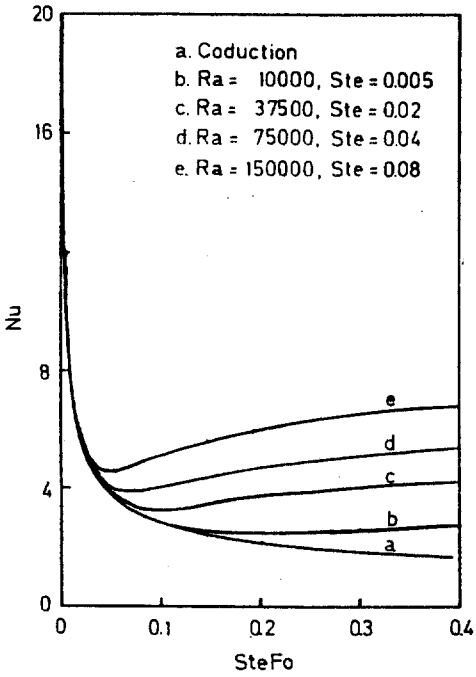

Fig.6 Heat transfer coefficient as a function of time (from H. Rieger et al. [5])

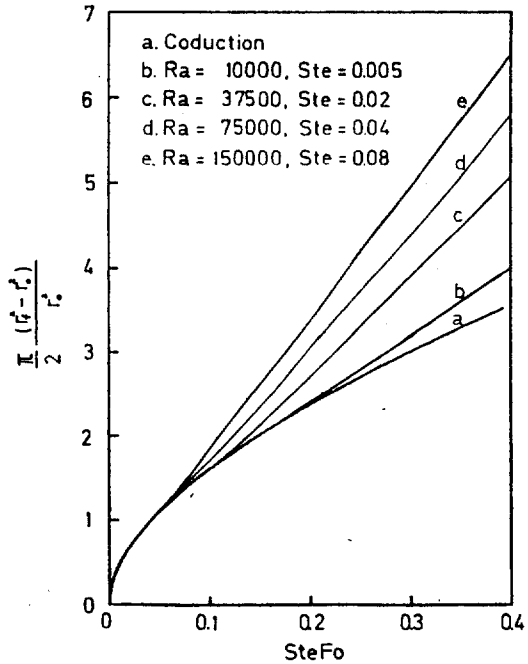

Fig.7 Melted volume fraction as a function of time (from H. Rieger et al. [5])

따라서 식(1)-(4)은 식(6), (7), (9)로 바뀌어진다. 식(6), (7), (9)를 계산하는 데가장 필요로 하는 것은 열전달 계수 h_i, h_o이다. h_i는 원관 내부에서의 국소 열전달 계수로서W. M. Kays[3]가 인용한 Boetler 등[4]의 실험자료로 부터 구하였다. 내관과 상변화 면 사이의 열전달 계수 h_o는 H. Rieger 등[5]이등온 조건의 수평 원관 주위의 융해에 대하여수치 계산하여 얻은 결과를 사용하였다. 인용한 자료는 Fig. 6과 Fig. 7에 표시하였다. 한편 상변화의 초기에는 대류 열전달보다 전도열전달이 지배하고 있으므로 초기 조건으로 전도 과정을 택하였다. 본 실험에서는 초기 온도가 상변화 온도와 같고, 현열은 무시할 수 있으므로 지배 방정식은

$$\frac{d}{dr}\left(r\frac{dT}{dr}\right) = 0$$

이고 경계 조건은

$$T(r_f) = T_f$$
$$T(r_o) = T_w$$

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_r = \rho_{PCM}\, h_f \frac{dr}{dt}$$

이다.[6] 이 식을 풀면

$$\frac{1}{2}\left(\frac{r_f}{r_o}\right)^2 \ln\left(\frac{r_f}{r_o}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{r_f}{r_o}\right)^2 + \frac{1}{4} = r \quad (10)$$

를 얻을 수 있고, 이 때의 미소 길이 dx에서의 열전달량은

$$dq = \frac{k}{r_o \ln(r_f/r_o)}\,(T_w - T_f)(2\pi r_o)\,dx \quad (11)$$

이 된다.

식(11)과 식(2)를 비교하면 전도 열전달에서의 $k/(r_o \ln(r_f/r_o))$는 대류 열전달에서의 h에 해당한다는 것을 알 수 있다.

전도 열전달로 부터 대류 열전달로 바뀌는 시간은 무차원 시간 $\tau = 0.01$을 택하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 초기 상태에서는 전도 과정의 해와 Rieger 등[5]이 구한 대류 열전달의 해가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

식(6)~식(9)에서 열전달량을 시간의 함수로 구하는 계산 순서는 다음과 같다.

1. 시간 $t=0$에서의 초기 조건을 준다.
2. 전 시간 스텝의 정보를 사용하여 식(8)를 차분화한 식으로 부터 길이방향의 선택된 지점에서의 상변화면의 반지름을 추정한다.
3. 추정한 반지름과 벽면 온도로 무차원 시간을 구하고 해당되는 열전달 계수 h_o를 Fig. 6에서 구한다.
4. h_i, h_o를 사용하여 식(7)에 의하여 수치 적분하여 T_b를 구한다.
5. 식(6)에 의하여 벽면 온도 T_w를 구한다.
6. 계산된 h_i, h_o, T_b를 사용하여 식(9)에 의하여 수치 적분하여 상변화면의 반지름 r_f를 구한다.
7. h_o, T_b, T_w, r_f의 수렴을 판정한다.
8. 수렴하지 않았을 경우 3번 부터 다시 계산하고, 수렴한 경우는 다음 시간 스텝으로 진행하여 2번 부터 계산한다.

계산은 내관의 공기 입구쪽 상변화 물질이 모두 융해될 때까지 수행하였다. 내관의 크기는 수도관용 강관의 규격을 사용하였으며 내관의 길이는 실험에서와 같이 1 m로 하였다. 실험의 경우에 해당하는 외관의 반지름은 0.02256 m 이었다. 계산의 조건은 Table 2에 표시하였다.

Table 2 Conditions of Analysis

Case	1	2	3	4	5	6	7	8
Air Inlet Temp. (℃)	20	20	20	20	17	23	20	20
Air Flow Rate for 8 Tubes (m^3/s)	0.015	0.008	0.011	0.019	0.015	0.015	0.015	0.015
Outer Diameter (mm)	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7	27.2	34.0
Re	11057	5897	8180	14000	11057	11057	8280	6594

5. 결과 및 검토

5.1 응고 과정

응고과정에서의 초기 온도에 의한 영향은 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8을 보면 초기 온도에 해당하는 현열만큼의 시간 지연이 생겼다. 응고 초기에는 초기 온도의 영향이 심하게 나타나나 이 응고 속도의 지연은 결국 축

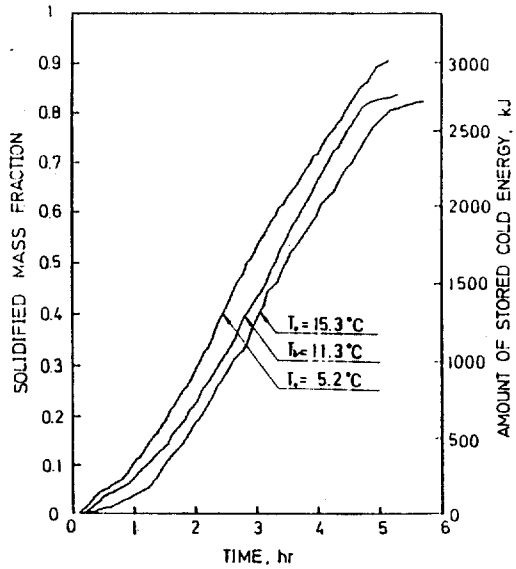

Fig.8 Solidified mass fraction and amount of cold energy stored in heat storage tank related to 0℃ water in solidification experiment

열조 내의 평균 온도를 낮추는데 기여하고 있다. 즉 응고 초기에는 상변화 과정의 진행보다 축열조의 평균 온도가 낮아지는 것이 선행된다. 그러나 초기 온도가 낮을 경우, 즉 T_o =5.2 ℃인 경우의 초기 상태는 상변화가 먼저 어느 정도 진행한 다음에야 축열조의 평균 온도가 떨어지는 경향을 보였다. 이것은 물을 응고시키는 과정이 R—12에 의한 급속 냉동이라 증발기 입구의 물이 주위로 냉열을 전달하지 못하고 바로 얼어버리다가 어느 정도 얼음이 언 뒤 얼음에 의한 열저항으로 인하여 단위 면적당 열전달량이 작아지게 됨에 따라 얼음이 어는 속도가 늦어지게 될 때 부터 수온이 떨어진다고 생각된다.

응고 과정 말기에 응고 질량비가 1이 되지 못하고 어느 값으로 수렴하는 경향이 보이는 것은 얼음에 의하여 증발기의 구리관이 둘러 쌓여 열전달율이 상당히 저하하였기 때문이다.

5.2 융해 과정

융해 과정에서의 융해 질량비는 Fig. 9에표시하였다. Fig. 9로 부터 단위 시간당 녹는양은 거의 일정한 것을 알 수 있다.

융해 과정에서 공기의 입구 온도가 일정하고 유량이 바뀌었을 경우의 시간당 회수열량은 Fig. 10에 표시하였다. Fig. 10을 보면 축열조에서의 시간당 회수열량은 유량에 거의 비례하여 증가하였다. 또한 회수열량이 큰 경우에는 시간이 진행함에 따라 회수열량이 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 후에 다시 언급할 해석 결과에서도 나타났다.

Fig. 11은 실험 각 경우의 출구 공기 온도를 나타낸다. 본 연구에 사용된 축열조의 길이는 1m이었는데 융해과정 초기의 출구 공기 온도는 약 4℃이었고, 얼음이 모두 융해될 때 까지 출구 공기 온도는 11℃를 넘지 않았다.

Fig. 12를 보면 시간의 진행에 따라 또한 관의 길이 방향의 위치에 따라 벽면 온도가 많이 변하는 것을 알 수 있다.

5.3 해해석 결과의 검토 및 실험과의 비교

간략한 모델에 의하여 앞에서 계산으로 구한 시간당 회수열량을 Fig. 13에 표시하였다. Fig. 14에서는 유량이 변화하는데 따른 시간당 회수열량의 변화를 계산과 실험을 비교하

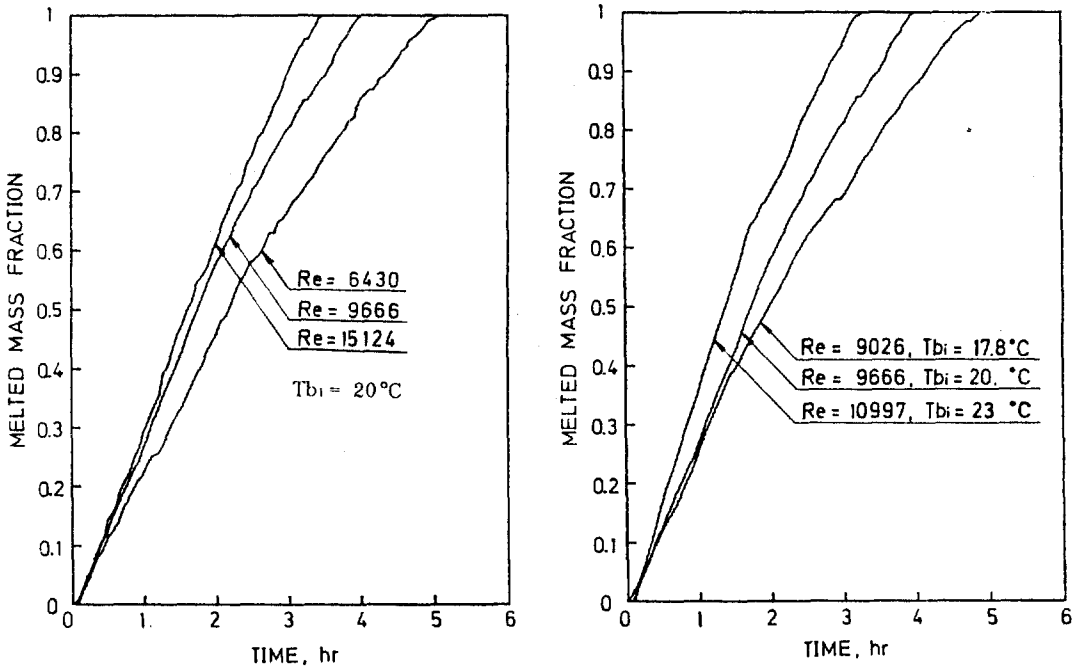

Fig.9 Melted mass fraction in melting experiment

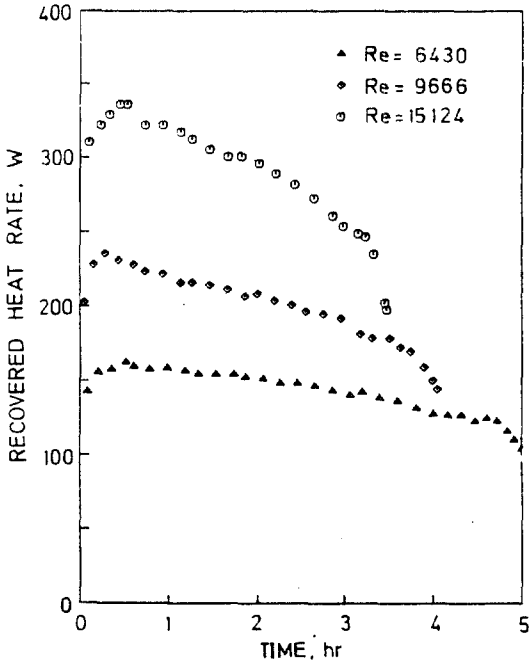

Fig. 10 Effect of air flow rate on the recovered heat rate from heat storage tank in melting experiment (Tb=20℃)

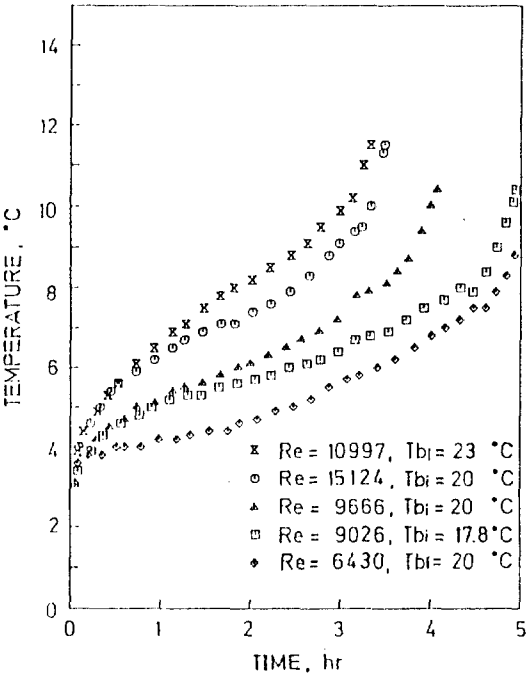

Fig. 11 Outlet air temperature in melting experiment

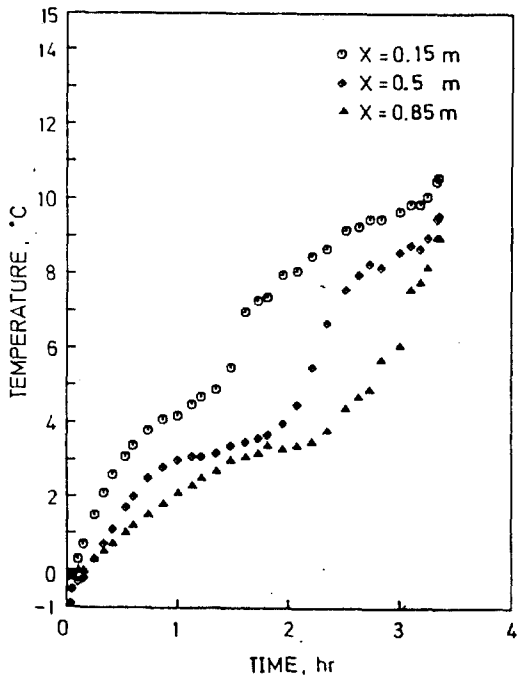

Fig. 12 Tube wall temperature in melting experiment
(Re=10997, Tb=23℃, r_o=0.0217 m)

여 표시하였는데 계산값과 실험값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 계산에 사용한 모델이 실제의 현상을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14의 시간당 회수열량들을 비교하여 보면, 실험에서와 같이 시간당 회수열량이 큰수록 시간이 지남에 따라 시간당 회수열량이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 시간당 회수열량은 공기의 입구 온도와 상변화 온도의 차에 비례하고, 관의 안지름을 특성 길이로 한 Reynolds 수에 대하여 $Re^{0.8}$에 거의 비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 식(7)에서 관안의 공기와 벽면 사이의 열전달 계수 h_i가 $Re^{0.8}$에 비례하고, 또한 상변화 과정의 열전달 계수보다는 작기 때문이다.

Fig. 15에는 $T_b=20$℃인 경우 관의 외경이 달라지는데 따른 입구로부터 거리 x와 Reynolds 수의 0.8승, $xRe^{0.8}$에 대한 $(T_b-T_f)/(T_{bi}-T_f)$의 변화를 10 sec와 3600 sec에 대하여 표시하였다. Fig. 15로부터 관의 외경

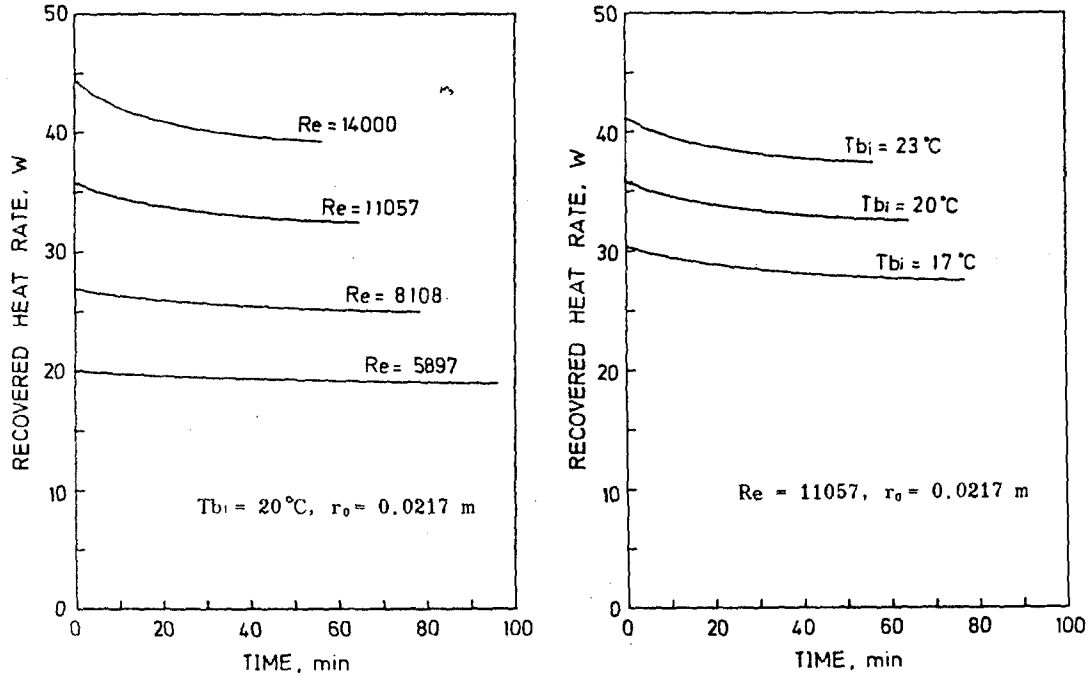

Fig. 13 Recovered heat rate in analytic approach

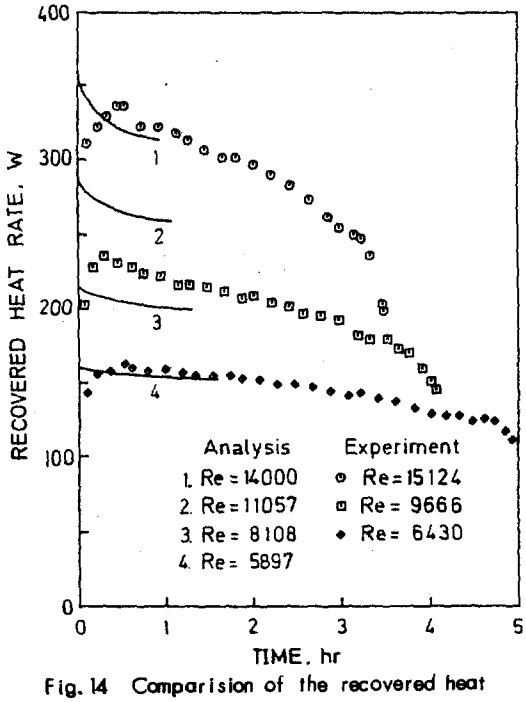

Fig. 14 Comparision of the recovered heat rate from heat storage tank in analytic approach with that in melting experiment ($Tb_i = 20°C$, $r_o = 0.0217$ m)

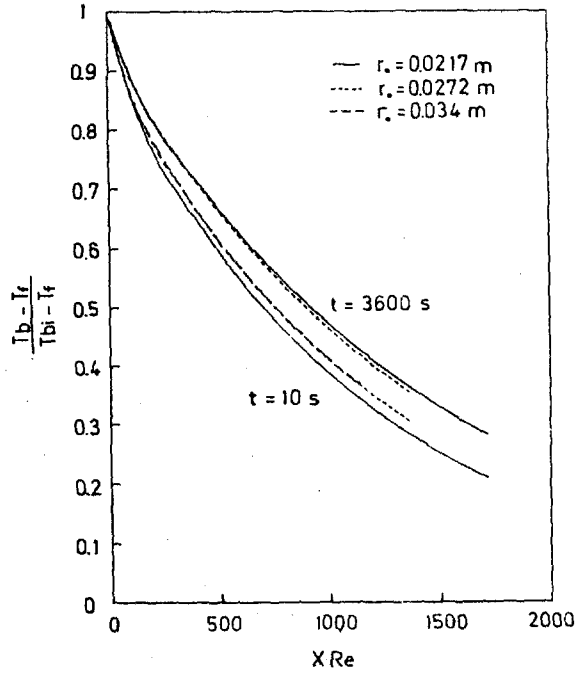

Fig. 15 Dimensionless bulk air temperature as a function of modified tube length in analytic approach ($Tb_i = 20°C$)

이 바뀌더라도 시간당 회수열량은 $Re^{0.8}(T_{bi}-T_f)$에 비례한다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

상변화 물질로서 물을 사용한 냉열 잠열축열조를 제작하고 실험을 하였으며, 간단한 해석 방법을 사용하여 모사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

물을 응고시켰을 때의 초기 온도에 대한 시간 지연은 초기 온도의 현열에 해당하는 만큼 나타났다.

본 연구에서 사용된 형태의 잠열축열조의 시간당 회수열량은 공기가 흐르는 관의 내경을 특성길이로 한 Reynolds 수에 대하여 $Re^{0.8}$에 비례하여 변하며, 공기의 입구 온도와 상변화 온도의 차에 비례하여 변한다.

축열조로부터 시간당 회수열량이 클수록 시간이 경과함에 따라 회수열량이 줄어드는 경향이 크다.

공기 관의 벽면 온도는 시간에 따라 변할 뿐만 아니라 축 방향의 길이에 따라 변하므로 이 형태의 축열조를 해석하는 경우에는 반드시 벽면 온도의 변화를 고려하여야 한다.

이 논문에서 기술한 해석 방식에 따라 축열조의 성능을 평가할 수 있고 설계의 자료로 이용할 수 있을 것이다.

REFERENCE

1. A. Bejan and W. Schultz, Optimum Flow-rate History for Cooldown and Energy Storage Process, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25, pp.1087-1092, 1982.
2. S. Saxena, S. Subrahmaniyam and M.K. Sakar, A Preliminary Model for Phase Change Thermal Energy Storage in a Shell and Tube Heat Exchanger, Solar Energy, Vol.29, pp.257-263, 1982.
3. W.M. Kays and M.E. Crawford, "Convective Heat and Mass Transfer," 2nd Ed., McGraw-Hill, 1980.
4. L.M.K. Boelter, G. Young and H.W. Iverson: NACA TN 1451, Washington, July, 1948.
5. H. Rieger, U. Projahn and H. Beer, Analysis of the Heat Transport Mechanisms During Melting Around a Horizontal Circular Cylinder, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.25, pp.137-147, 1984.
6. V.J. Lunardini, "Heat Transfer in Cold Climates," Van Nostrand Reinhold Company, 1981.