

[논문] 태양에너지  
*Solar Energy*  
Vol. 20, No. 4, 2000

## 직사각형 환이 부착된 관외착빙형 빙축열조에서 응고과정시 열전달 특성에 관한 연구

권혁용\*, 고재운\*, 정백영\*, 임장순\*\*

\*인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

An experimental study on heat transfer characteristics in the ice storage system of ice-on-coil type with rectangular finned tube during freezing process

H.Y. Kwon\*, J.Y. Koh\*, B.Y. Jeong\*, C. S. Yim\*\*

\*Graduate School, In-ha University

\*\* Dept. of Mechanical Eng., In-ha University

### Abstract

The purpose of this study is to improve heat transfer by attaching rectangular fins to tube. Experiments were carried out under the following conditions - Aspect ratio( $W_f/R_t$ ) is 0.7, 1.2 and 1.8. Temperature conversion between high and low positions of water in the thermal storage appeared because maximum density point of water is about 4°C and inlet direction of working fluid influenced conductive heat transfer. Compared with the unfinned tube(bare tube), the rectangular tube increased the ice thermal storage energy and the ice thermal storage energy was increased as aspect ratio was increased.

## 기 호 설 명

- $E_{s_1}$  : Sensible heat energy from the liquid [kJ]
- $E_{s_2}$  : Sensible heat energy from the solid [kJ]
- $E_{s_3}$  : Sensible heat energy released from the total PCM [kJ]
- $E_\lambda$  : Latent heat energy [kJ]
- $R$  : Radius of cylinder [mm]
- $H_f$  : Fin height [mm]
- $H_f/R_t$  : Aspect ratio
- $\lambda$  : Latent heat of fusion
- ini : Initial state
- f : Fin
- t : Tube

## 1. 서 론

산업화로 인해 전력수요는 증가하고 있고 건물 냉난방에 이용되는 에너지도 점차 증가하고 있다. 특히 하계 주간에는 냉방장치 사용의 증가로 인한 전력수요의 첨두부하 감소 및 부하의 균등화가 요구되어지고 있다. 전력부하를 고르게 하기 위해선 에너지를 저장하는 기술이 요구되며 이러한 저장방법 중의 하나로 야간의 잉여전력을 저장하여 최대부하가 나타나는 시간대에 최소의 전력사용으로 열부하를 공급해 주는 것이 축열 시스템이다. 우리나라의 경우, 전력을 생산하는데 소모되는 연료의 전량을 수입하고 있는 상황에서 에너지 저장기술의 개발이 더욱 필요하다.

본 연구에서는 정적형 관외 착빙형 빙축열조의 열저장 성능에 관한 실험을 하였다. 관외 착빙형 빙축열 시스템은 제빙관 외벽에 생성된 얼음이 열전달을 저해하는 요인이 되기 때문에 제빙량이 제한된다. 열전달을 촉진시키고 축열량을 높이기 위해서 동관 주위에 rectangular fin을 부착하였

다. 응고과정시 나타나는 시간에 따른 온도분포, 응고형상, 축열량 등의 열전달 특성을 고찰하였고, 이 결과를 fin이 없는 수직원통형에서의 실험<sup>1)</sup> 결과와 비교·분석하였다.

축열과정 중 열교환 방법의 개선을 통해 열저장 능력을 향상시킨 연구경향을 보면, 이윤표 등<sup>2)</sup>은 직접 접촉식을 이용한 빙축열 시스템의 저장 성능을 간접 접촉식 빙축열 시스템에서의 저장 성능과 비교하였는데 축열성능이 직접 접촉식에서 더 우수하고 직접 접촉식 빙축열 방식은 순환 냉매량에 비례하여 제빙능력을 선형적으로 증가시킬 수 있다고 하였다. R. A. Brewster와 B. Gebhart<sup>3)</sup>가 직육면체형 용기 내에서 물이 수면에서 바닥으로 응고할 때 응고과정을 실험하여 액상 내에서 자연대류 유동현상을 고찰하였으며 T. Hirata와 S. Ando 등<sup>4)</sup>은 물의 응고과정 중 전열저항의 증가를 줄이기 위해 축열조 내부의 전열면에 fin을 설치한 후 축열성능과 효율적인 핀의 pitch에 대하여 실험과 수치해석적인 방법으로 연구하였다. Jianfeng Wang, Guangming Chen 등<sup>5)</sup>은 균질 상변화 과정에 대하여 이론적으로 연구하였으며 기존의 상변화 과정에 비해서 상변화 과정에 걸리는 시간이 단축된다는 것을 알아냈다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

그림 1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 수직원통형축열조, 항온시스템, 2차냉매 냉동기(brine chiller), 순환펌프, 유량계, 온도측정장치 및 온도기록장치로 구성되어져 있다. 축열조 중앙부에 수직으로 설치된 rectangular finned tube에 저온(-10°C)의 작동 유체(brine; ethylene glycol 30 wt % + water 70 wt %)를 유입시켜 축열실험을 수행하는 동안에 축열조 내벽의 온도와 항온시스템 내기의 온

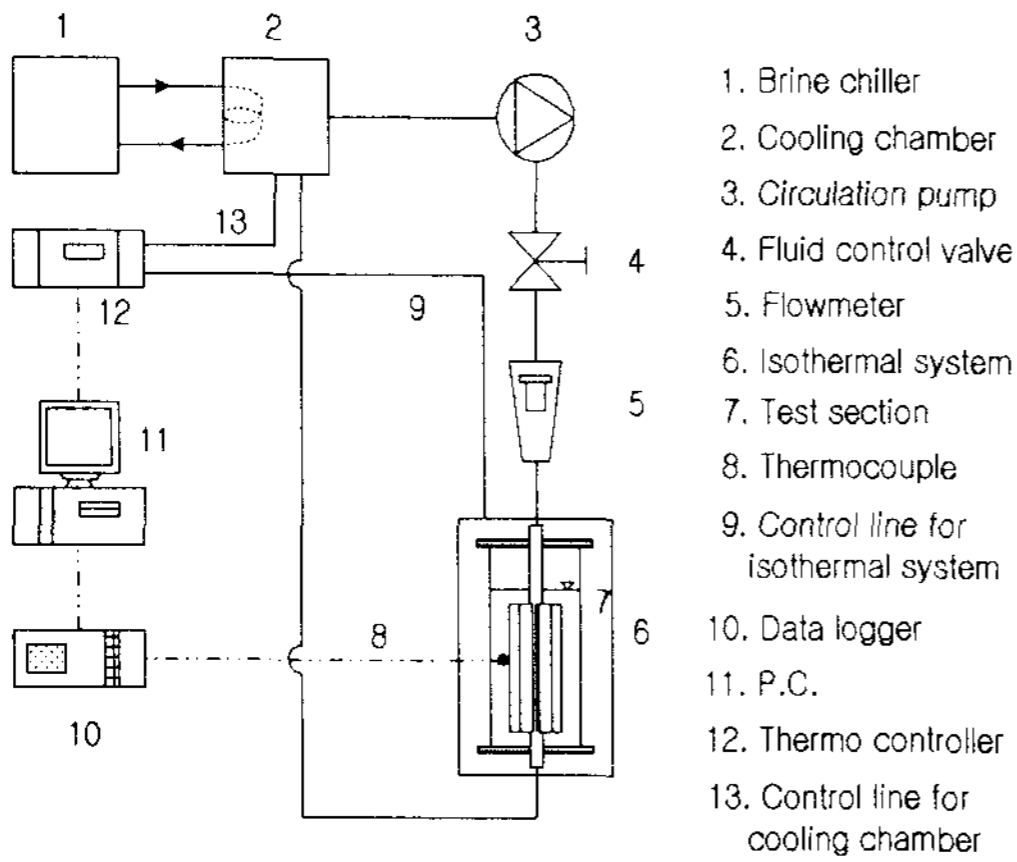


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

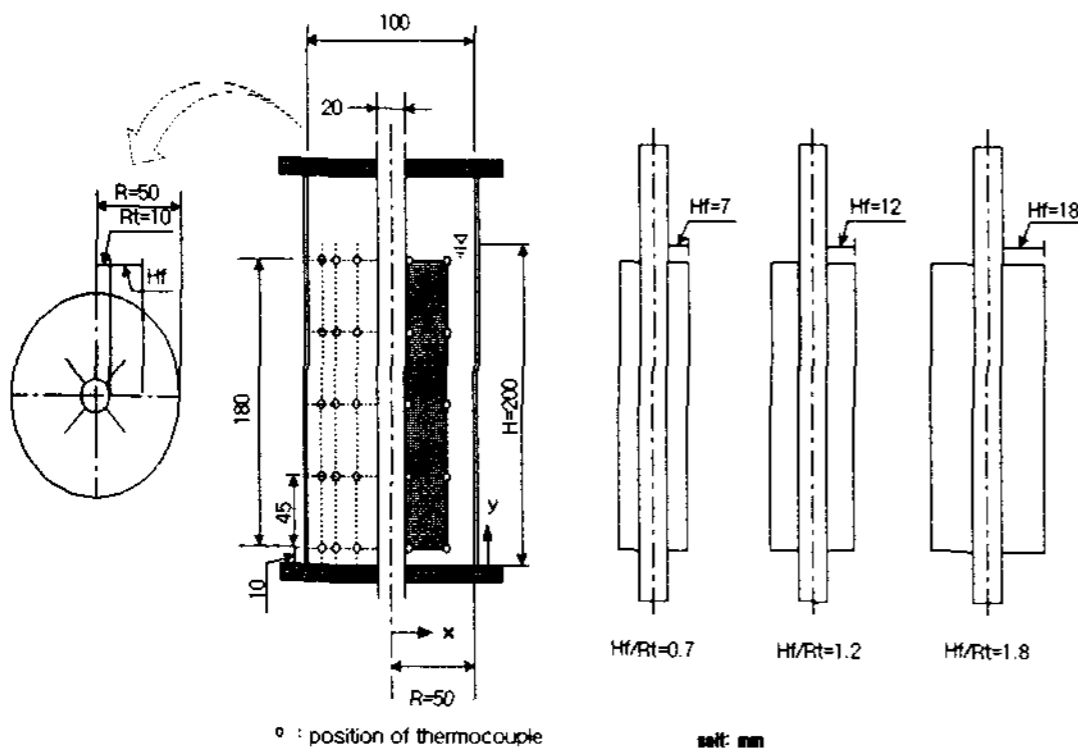


Fig. 2. Diagram of test section

도를 동일하게 유지시킴으로써 축열조의 열손실을 최소화하였다. 응고형상을 가시화하기 위해 항온시스템 전면부에 투명 아크릴판을 설치하고 camcorder를 사용하여 시간경과에 따른 응고형상을 촬영하였다.

그림 2는 빙축열조 test section에 대한 세부도이다. 축열조는 내경 100mm, 높이 250mm, 두께 5mm의 pyrex관내에 축열조 중심에 rectangular finned tube를 설치하였다. rectangular finned tube는 외경 20mm, 두께 1mm인 동관 외주에 길이 180mm, 두께 1mm, 높이가 각각 7, 12,

18mm인 직사각형 흰이 8개씩 45°로 동일하게 납땀하여 부착시켰다. fin의 표면온도를 측정하기 위해서 열전대(T-type ; copper - constantan)를 fin base와 fin tip에 축방향(y)으로 45mm 간격으로 5개씩 10개를 부착하였다. 그리고 상변화 물질의 온도를 측정하기 위해서 열전대를 fin과 fin 사이의 공간에 동관 반경방향(x)으로 fin폭의 반, fin폭, fin tip과 pyrex 내벽과의 반에 해당하는 거리에 축방향(y)으로 45mm 간격으로 5개씩 모두 15개를 설치하였다. 항온시스템의 온도를 제어하기 위해 열전대를 상, 중, 하부 세 지점에 설치하였고 축열조내로 유입되는 작동유체의 설정온도를 유지시키기 위해 입·출구에 각각 1개씩을 설치하였으며 2차 냉매 냉동기 내에도 열전대를 설치하여 온도제어장치로 온도를 제어하였다.

2.2 실험방법

표 1에 본 실험에 적용된 각 실험조건들을 나타내었다. 내경 100mm인 수직원통형 축열조내에

Table 1 Conditions of experiments

Aspect ratio (H <sub>f</sub> /R <sub>t</sub> )	Initial temp. of water	Flow direction of working fluid	Temperature & flow rate of working fluid			
0.7	1°C	Upward	-10°C	10 l/min.		
	7°C	Downward				
	1°C	Upward				
	7°C	Downward				
1.2	1°C	Upward			-10°C	10 l/min.
	7°C	Downward				
	1°C	Upward				
	7°C	Downward				
1.8	1°C	Upward	-10°C	5, 10, 15 l/min.		
	7°C	Downward				
	1°C	Upward				
	7°C	Downward				

물을 높이 200mm까지 채우고 초기설정온도(1°C, 7°C)로 맞춘 후, rectangular fin이 부착된 제빙관에 저온의 작동유체를 온도 -10°C, 유량 10 l/min.로 유입시켜 형상과 작동유체 유입방향을 변화시키면서 응고실험을 수행하였다. 항온시스템의 냉각장치를 제어하여 수직원통형 축열조내 상변화물질의 초기온도를 열평형 상태로 유지시켰으며, 축열조내 모든 온도측정점에서 상변화물질의 온도와 설정초기온도의 차가  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내일 때를 열평형상태로 가정하여 응고실험을 시작하였다.

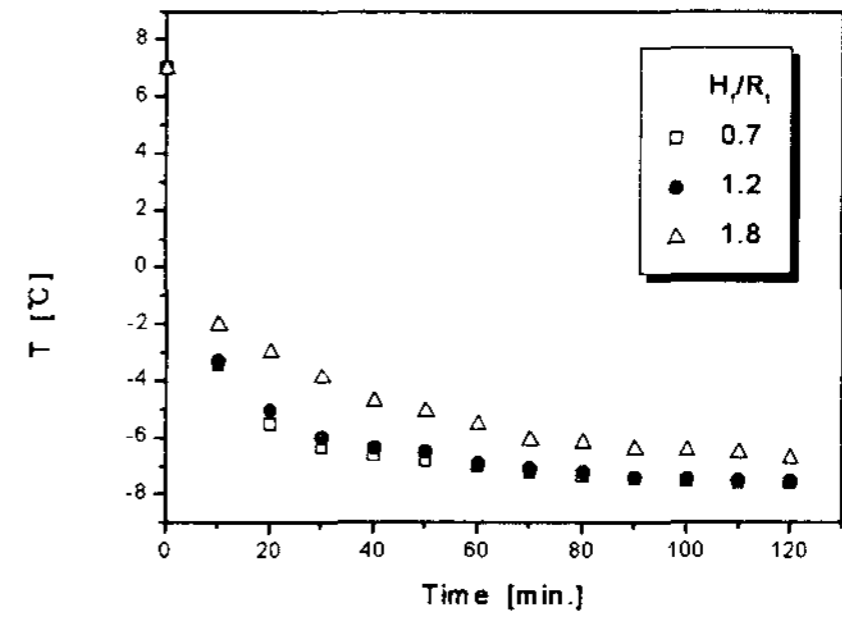
응고가 진행되는 동안에는 항온system 내기의 온도를 축열조 내측벽의 온도와 동일하도록 제어하여 축열조의 열손실을 최소화하였다. 작동유체의 유입온도를 -10°C로 유지시키기 위하여 2차 냉매 냉동기를 제어하였으며 응고실험은 각 조건당 120분씩 수행하였다. 축열조 내 상경계면은 항온system 전면부의 투명 아크릴 창을 통하여 15분 간격으로 camcorder로 촬영하였고 data acquisition system을 이용하여 빙축열 시스템 내에 설치된 모든 열전대의 온도를 1분 간격으로 측정, PC에 기록하였다.

### 3. 결과 및 고찰

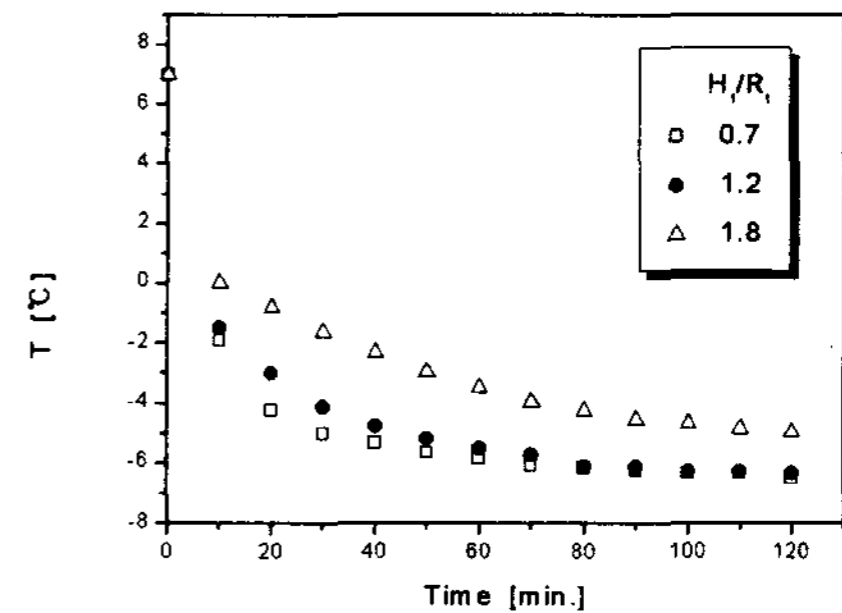
#### 3.1 온도분포

##### 3.1.1. fin 표면의 온도분포

그림 3은 상변화물질인 물의 초기설정온도가 7°C이고 작동유체의 유입방향이 상향인 경우 fin base와 fin tip의 시간경과에 따른 평균온도의 변화를 나타낸다. 시간이 경과할수록 평균온도는 작동유체의 유입으로 인해 감소하는 경향을 보인다. 형상비( $H_f/R_f$ )가 증가할수록 fin base와 fin tip에서의 평균온도의 감소율이 작아짐을 알 수 있는데, 이것은 fin 폭의 증대로 상변화물질과의 열전달이 더 활발히 일어나고 있음을 의미한다.



(a) fin base

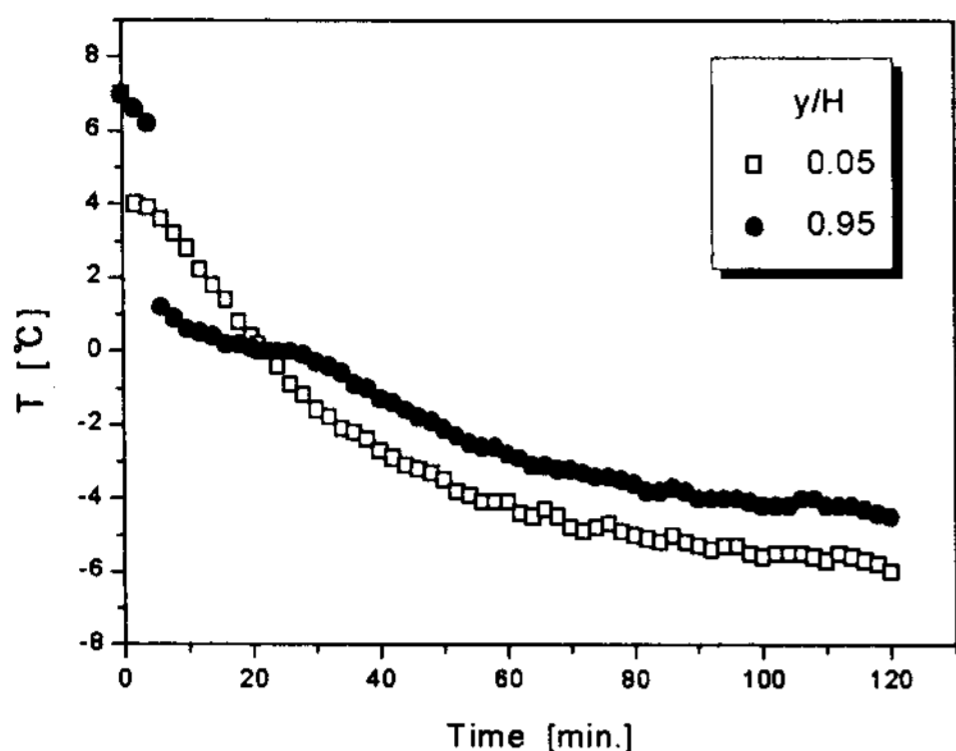


(b) fin tip

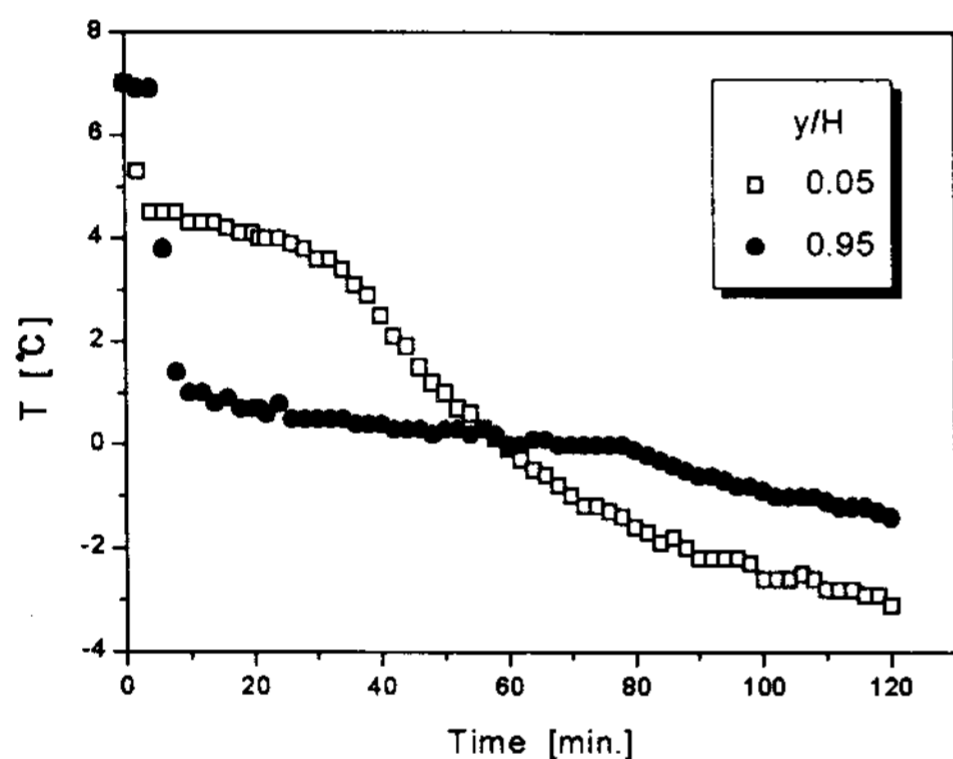
Fig. 3. Average temperature of fin base and fin tip ( $T_{ini}=7^\circ\text{C}$ , upward)

#### 3.1.2. 상변화물질의 온도분포

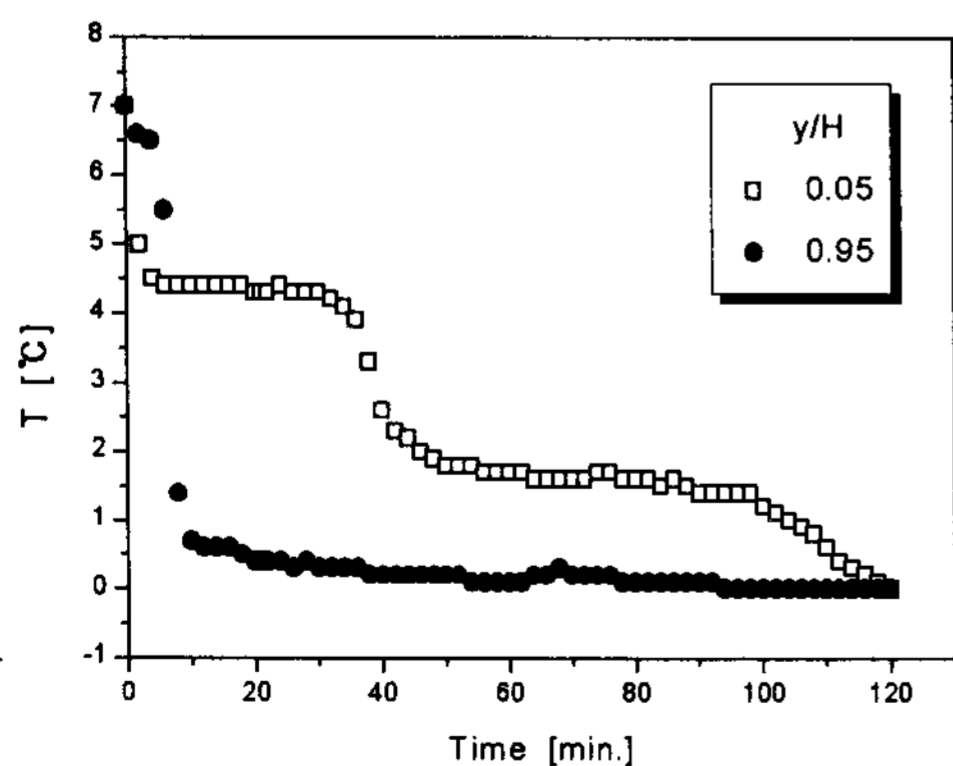
그림 4는 형상비( $H_f/R_f$ )가 1.8이고 상변화물질의 초기설정온도가 7°C, 작동유체의 유입방향이 상향인 경우에  $x/R$ 의 비(0.38, 0.56, 0.78)에 따른 상·하부( $y/H = 0.05, 0.95$ )에서 상변화 물질의 온도분포를 나타낸다. 초기에는 하부의 온도가 상부의 온도보다 낮지만, 상변화물질인 물의 최대밀도점이 4°C 부근인 특성 때문에 하부의 온도가 4°C 부근에서 어느 정도 정체를 이루고 있는 동안에 상부의 온도가 빠른 속도로 하강하여 하부보다 온도가 낮아지는 온도역전구간이 나타나고, 상부의 온도가 0°C 부근에서 상변화하는 동안에 하부의 온도는 작동유체의 유입에 의한 전도열전달의 영향으로 인해서 다시 하부의 온도가 낮아지게 된다.



(a)  $x/R=0.38$



(b)  $x/R=0.56$



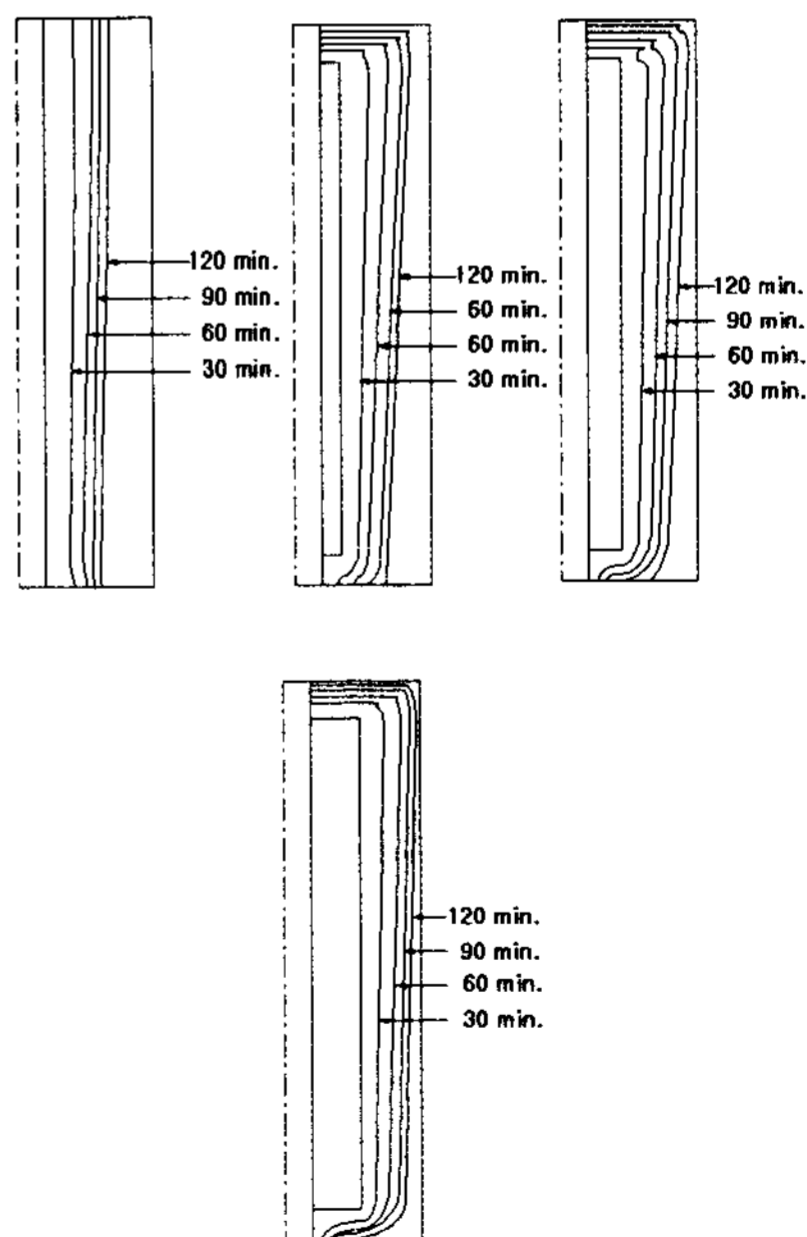
(c)  $x/R=0.78$

Fig. 4. Temperature distribution at  $x/R$  ( $H_f/R_t = 1.8$ ,  $T_{ini}=7^\circ\text{C}$ )

### 3.2 응고형상

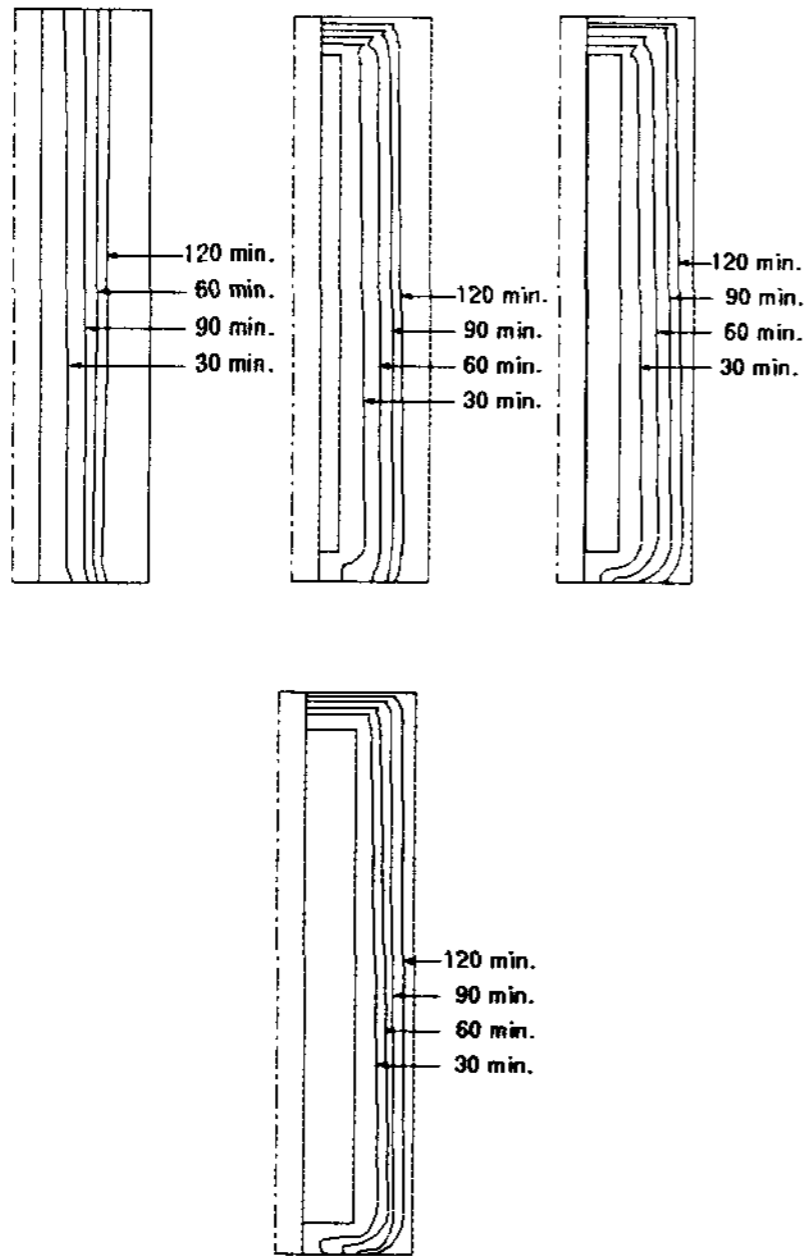
그림 5와 그림 6은 fin을 부착하지 않은 경우와 fin을 부착했을 때 각 형상비( $H_f/R_t$ )에 대해서 상변화물질의 초기설정온도가  $7^\circ\text{C}$ 일 때 작동유체의 유입방향에 따른 응고형상을 나타낸다. 전반적으로 작동유체의 유입에 의한 전도열전달의 영향으로 유입부분에서 더 많은 응고층을 형성하였다.

작동유체의 유입방향이 하향일 때는 작동유체 유입에 의한 전도열전달의 영향과 밀도차에 의한 자연대류의 영향으로 시간이 지날수록 상부에서의 응고생성이 하부보다 많기 때문에 상·하부 응고편차가 증가하였다. 작동유체의 유입방향이 상향일 때는 이러한 영향으로 시간이 경과할수록 상·하부의 응고편차는 감소하여 고른 응고형상을 보였다. 얼음이 생성되면서 얼음 자체가 열저항체로 작용하여 시간이 경과할수록 응고층 생성율이 감소함을 알 수 있다.



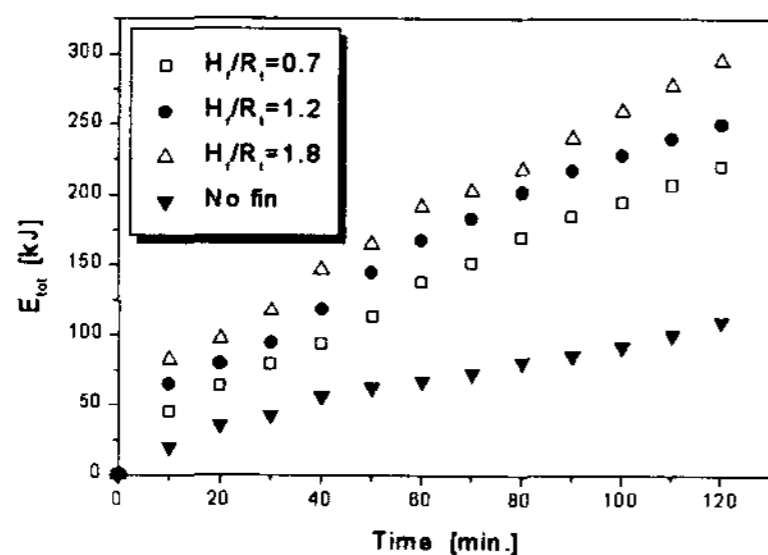
(a) no fin, (b)  $H_f/R_t=1.2$ , (c)  $H_f/R_t=1.2$ , (d)  $H_f/R_t=1.8$

Fig. 5. Variations of solid-liquid interfaces ( $T_{ini}=7^\circ\text{C}$ , downward)

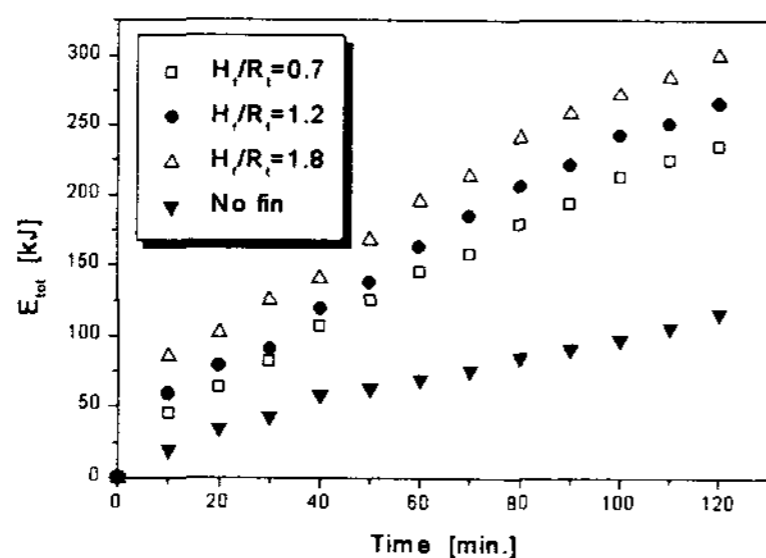


(a) no fin, (b)  $H_f/R_t=0.7$ , (c)  $H_f/R_t=1.2$ , (d)  $H_f/R_t=1.8$

Fig. 6. Variations of solid-liquid interfaces ( $T_{ini}=7^\circ\text{C}$ , upward)



(a) downward



(b) upward

Fig. 7. Thermal storage energy( $T_{ini}=7^\circ\text{C}$ )

### 3.3 축열량

총축열량( $E_{tot}$ )은 다음과 같이 네 가지로 분류하여 더한 값으로 구할 수 있다. 즉, 액상으로 남아있는 상변화물질이 초기온도  $T_{ini}$ 로부터 액상 평균온도  $\overline{T}_l$ 까지 냉각될 때 축열되는 현열에너지( $E_{s1}$ ), 액상 상변화물질이 응고시 축열되는 잠열에너지( $E_\lambda$ ), 응고된 상변화물질이 용융점 이하 고상 평균온도  $\overline{T}_s$ 까지 냉각될 때 축열되는 현열에너지( $E_{s2}$ ), 초기온도  $T_{ini}$ 로부터 용융점  $T_m$ 까지 냉각될 때 축열되는 현열에너지( $E_{s3}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_{tot} = E_{s1} + E_\lambda + E_{s2} + E_{s3} \quad (1)$$

$$E_{s1} = M_l C_l (T_{ini} - \overline{T}_l) \quad (2)$$

$$E_{s2} = M_s C_s (T_m - \overline{T}_s) \quad (3)$$

$$E_{s3} = M_s C_l (T_{ini} - T_m) \quad (4)$$

$$E_\lambda = \lambda M_s \quad (5)$$

그림 7은 상변화물질의 초기설정온도가  $7^\circ\text{C}$ 일 때 형상비( $H_f/R_t$ )에 따른 축열량을 나타낸다. 축열량은 fin이 없는 경우에 비해 더 많이 축적되었으며 형상비가 증대할수록 그 양도 증가하였다. 시간이 지날수록 각 형상비에서 축열량의 증가폭은 점점 감소하였다. 그러나 흰이 없는 경우에서처럼 축열량의 증가폭이 급격하게 감소하지 않았는데 이것은 fin에 의한 열전달 효과 때문이라고 생각한다. 120분 경과 후 작동유체의 유입방향이 하향일 때, 형상비( $H_f/R_t$ )가 0.7, 1.2, 1.8로 변화됨에 따라 흰이 없는 경우에 비해서 축열량이 각각 대략 100, 127, 168%가 증가하였고 상향인 경우에 형상비가 0.7, 1.2, 1.8로 변화됨에 따라서 각각 102, 129, 169% 정도 증가하였다.

그림 8은 형상비( $H_f/R_t$ )가 1.8, 상변화물질의 초기설정온도가  $7^\circ\text{C}$ 이고 작동유체의 유입방향이 하향인 경우 작동유체의 유량이 5, 10, 15 l/min.로

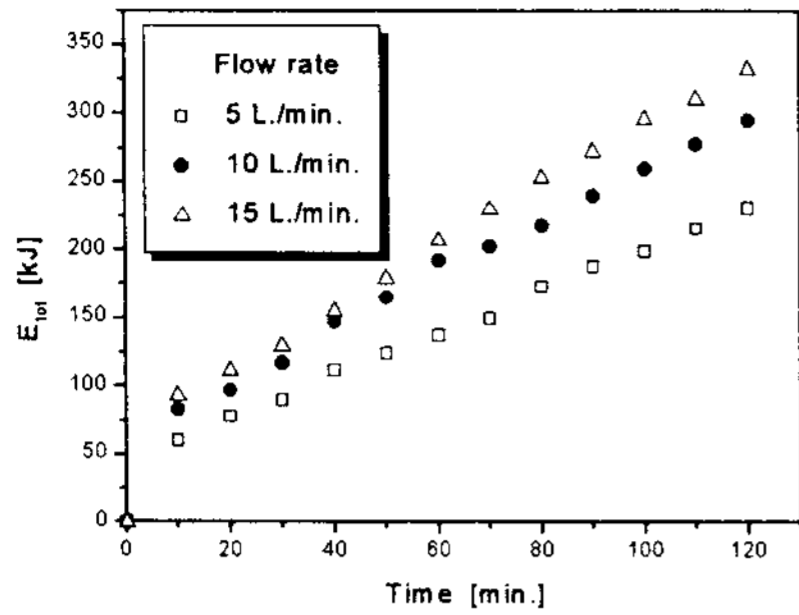


Fig. 8. Thermal storage energy according to flow rate of working fluid( $H_f/R_t = 1.8$ ,  $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ , downward)

변화될 때의 축열량을 나타낸다. 작동유체의 유량이 증가할수록 보유열량이 증가하므로 축열량이 증가하였으며 시간에 따른 증가폭은 감소하는 경향을 보였다. 작동유체의 유량이 증가하면서 유속 또한 증가하므로 상·하부간의 온도차가 줄어들기 때문에 유량 증가에 의한 축열량의 증가가 감소함을 보였다.

#### 4. 결 론

수직원통형 빙축열조에 형상비( $H_f/R_t$ )가 각각 0.7, 1.2, 1.8인 직사각형 흰을 부착하여 응고실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. fin base와 fin tip의 평균온도차는 형상비( $H_f/R_t$ )가 커질수록 증가하였고 이것으로 fin에서 상변화물질로의 열전달이 fin이 큰 경우에서 더 활발히 진행됨을 알 수 있었다.
2. 응고가 진행되면서 작동유체의 유입에 의한 전도열전달의 영향과 자연대류에 의한 영향으로 인해서 상변화물질인 물의 온도분포가 역전되는 것을 확인하였다.
3. 응고형상은 작동유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우에 비해서 시간이 경과할수록 상·하부에 고르게 형성되었다.

4. 축열량은 fin을 부착한 경우가 fin을 부착하지 않은 경우에 비해서 증가하였고, 형상비가 커질수록 전열면적이 증대하므로 축열량이 증가하였다.
5. 전체적으로 작동유체의 유입방향에 의한 축열량은 큰 차이를 보이지 않았으며 상·하부의 응고생성이 상향인 경우가 하향에 비해서 고르게 나타나므로 상향이 더 유리하다.

#### 후 기

본 연구는 1999년도 에너지관리공단 학술진흥사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 허경, "수직원통형 축열조 내 물의 응고과정시 열전달에 관한 연구", 석사학위논문, 인하대학교, 1995.
2. 이윤표, 윤성영, 이춘식, "직접접촉식을 이용한 빙축열시스템", 공기조화·냉동공학 논문집 제 6권 제3호, 1994, pp.247~258.
3. R. A. Brewster & B. Gebhart, "An experimental study of natural convection effects on downward freezing of pure water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, 1998, pp.331~348.
4. T. Hirata, S. Ando & M. Ishikawa, "Effect of heat conductor plates on ice formation near a wall, 4th Int. Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions", New Hampshire, 1993, pp.65~70.
5. Jianfeng Wang, Guangming Chen & Haobo Jiang, Theoretical study on a novel phase change process, Int. J. Energy Res., 23, 1999, pp.287~294.