

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 19, No. 1, 1999

Ice on Coil형 저온 잠열 축열시스템에서의 용융과정시 열전달에 관한 실험적 연구

김영기*, 김동춘*, 김일겸*, 최국광**, 임장순***

- * 인하대학교 대학원
- ** 인천대학교 기계공학과
- *** 인하대학교 기계공학과

The Experimental Study on Heat Transfer during Melting Process in the Low Temperature Heat Storage System (Ice on Coil Type)

Y. K. Kim^{*}, D. C. Kim^{*}, I. G. Kim^{*}, K. K. Choi^{**}, C. S. Yim^{***}

- * *Graduate School, Inha University*
- ** *Dept. of Mechanical Eng., Incheon University*
- *** *Dept. of Mechanical Eng., Inha University*

ABSTRACT

In this study, basic design data which were required for development of highly efficient ice storage system with low temperature latent heat were experimentally obtained. The ice storage system considered in this study was the one that has been widely used in the developed country and called the ice-on-coil type.

Using the system, the ice storage performance for various design parameters which were the flow direction and the inlet temperature of the secondary fluid was tested. In addition, the clockwise

variation of the heat transfer characteristics of the PCM in the ice storage tank were investigated.

During the melting processes in the ice storage tank with several vertical tubes, decrease of the solid-liquid interface area, which was the heat transfer area, between the floating ice and the water made the decreasing rate of IPF less.

Also, the total melting energy for the upward flow of the secondary fluid was higher than that for the downward flow during the melting process, but this trend did not appear if the initial temperature of the PCM was 4°C

The average ice recovery efficiency for the upward flow of the secondary fluid was higher than that for the downward flow.

기 호 설 명

C_b	: Specific heat of brine [kJ/kg · °C]	T_{ini}	: Initial temperature of PCM [°C]
C_i	: Specific heat of ice [kJ/kg · °C] (=0.185+0.689×10 ⁻² (T+273) at 0°C ≥ T ≥ -183°C)	Δt_i	: Time interval between successive sets of experimental observation [°C]
C_w	: Specific heat of water [kJ/kg · °C]	T_{inlet}	: Inlet temperature of brine [°C]
E_{s1}	: Sensible energy stored in ice which remained unmelted [kJ]	\bar{T}	: Mean temperature of PCM [°C]
E_{s2}	: Sensible energy stored in water [kJ]	\bar{T}_i	: Mean temperature of ice [°C]
E_{s3}	: Sensible energy stored in ice [kJ]	T_m^*	: Temperature of the maximum density of water(=4.0293°C) [°C]
E_λ	: Latent energy [kJ]	T_m	: Melting temperature [°C]
E_{tot}	: Total melting energy stored in ice [kJ]	T_{outlet}	: Outlet temperature of brine [°C]
H	: Height of PCM [m]	\bar{T}_w	: Mean temperature of water [°C]
IPF	: Ice Packing Factor	x	: Radial direction coordinate based on outer wall of vertical tube taken a front view [m]
L	: Distance between vertical tube taken a front view [m]	x'	: Radial direction coordinate based on outer wall of vertical tube taken a side view [m]
L'	: Distance between vertical tube taken a side view [m]	y	: Vertical direction coordinate based on bottom of ice storage tank [m]
M_b	: Flux of brine [m ³ /s]		
M_{max}	: Total mass of PCM [kg]		
M_i	: Mass of ice [kg]		
M_w	: Mass of water [kg]		
Q_b	: The supplied freezing energy which carried by brine [kJ]		
T	: Temperature [°C]		

그 리 스 문 자

ρ_w : Density of water
 $\rho_m(1 - \beta_T |T_w - T_m^*|^{1.8948})$ [kg/m³]

- ρ_i : Density of ice [kg/m^3]
 (= $917(1-1.17 \times 10^{-4}T)$
 at $0^\circ\text{C} \geq T \geq -140^\circ\text{C}$)
- ρ_m : Maximum density of water [kg/m^3]
- β_T : Coefficient of volume expansion of
 water(= 9.2972×10^{-6}) [$^\circ\text{C}^{-1}$]
- λ : Latent heat of fusion [kJ/kg]
- η : Ice recovery efficiency

1. 서 론

최근의 주·야간의 전력 수요 형태의 불균형을 해소하기 위해 냉방수요의 일부 또는 전부를 주간 전력 피크시간(pick time)을 피해 저장하였다가 사용하는 냉방용 빙축열 시스템에 대한 연구는 실용화가 비교적 용이하고 전력부하 균형에 기여도가 크다는 장점 때문에 국내·외로 활발하게 수행되고 있다.

그러나 상변화물질로써 물을 사용하는 빙축열 시스템의 경우 축열매질인 물은 여타의 유·무기 물질과는 달리 액상의 밀도값이 고상의 밀도값보다 크기 때문에 동일 질량에 대하여 응고체적이 용융체적보다 크다. 즉 물은 4°C 에서 최대밀도점이 존재하며 물의 초기온도 및 입구온도가 4°C 이상 혹은 이하인 조건에 따라 액상내 자연대류 유동현상이 다르게 나타나는 특성을 갖고 있다.^{1,2)} 그러므로 물 이외 상변화물질의 열전달특성을 고찰한 연구들은 물을 상변화물질로 사용하는 빙축열시스템의 설계자료로 이용하기에는 다소 부적합하다.

이에 본 연구에서는 국내는 물론 미국, 일본 등지에서 많이 사용되고 있는 관외착빙형 빙축열 시스템의 일종인 수직 다발관 형태의 실험용 저온 잠열 축열시스템을 제작한 후, 가열유체의 유입방향 변화 및 유입온도 변화에 따른 방열 성능 실험을 수행하여 빙축열조내 상변화물질의 용융

과정시 열전달특성과 냉방열효율 등을 계산함으로써 고효율의 저온 잠열 축열시스템 개발에 필요한 기초 설계자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서 사용한 실험장치의 주요부로는 수직 다발관형 빙축열탱크, 항온시스템, 냉동장치, 항온탱크, 분배탱크, 3way valve, 온도조절장치, 온도측정장치, 온도기록장치, 정전압장치(A.V.R), U.P.S 시스템, 순환펌프, 유량계 등이 있으며, 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서 시험부로 사용된 빙축열탱크의 외통은 내경 100 mm, 길이 250 mm, 두께 5 mm의 pyrex 재질의 유리관을 사용하였으며, 수직원통형 빙축열탱크 내로 외경이 20 mm이고 두께가 1 mm인 동재질의 수직원관 4개를 정사각 형태의 배열로

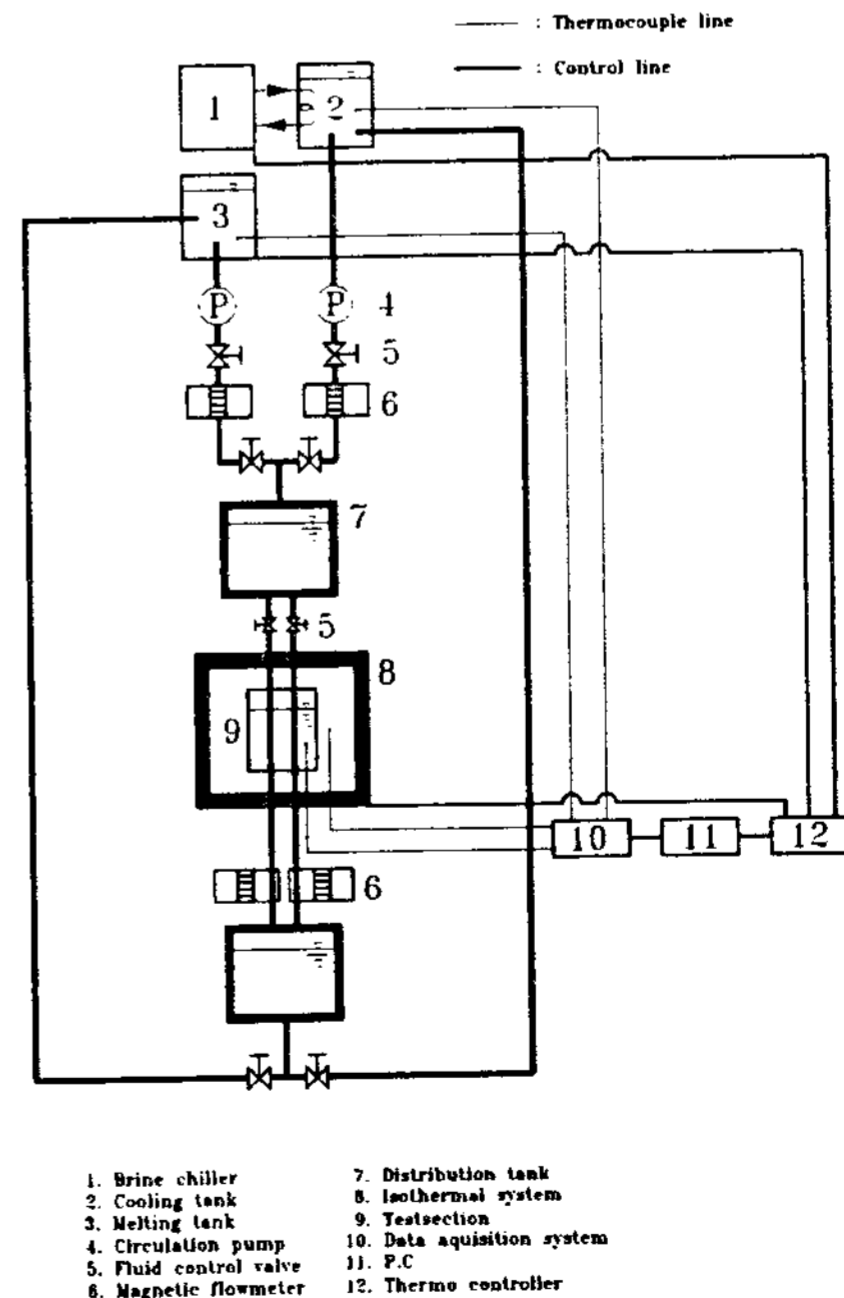


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

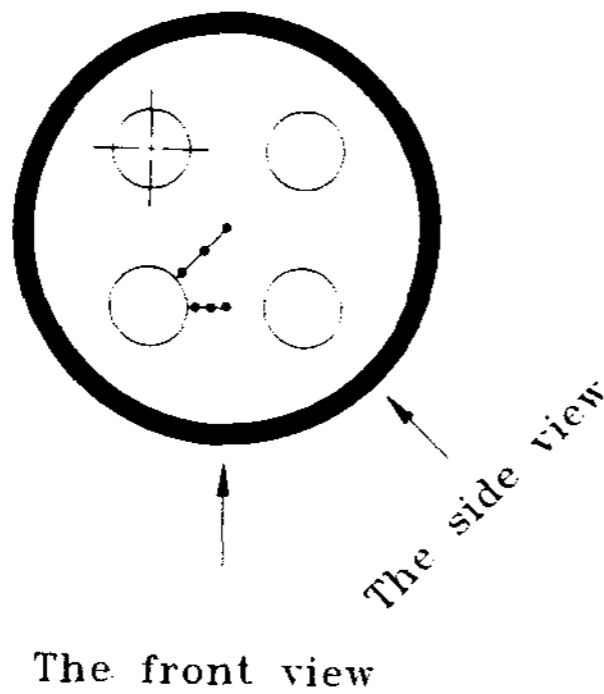


Fig. 2. The plane figure of test section

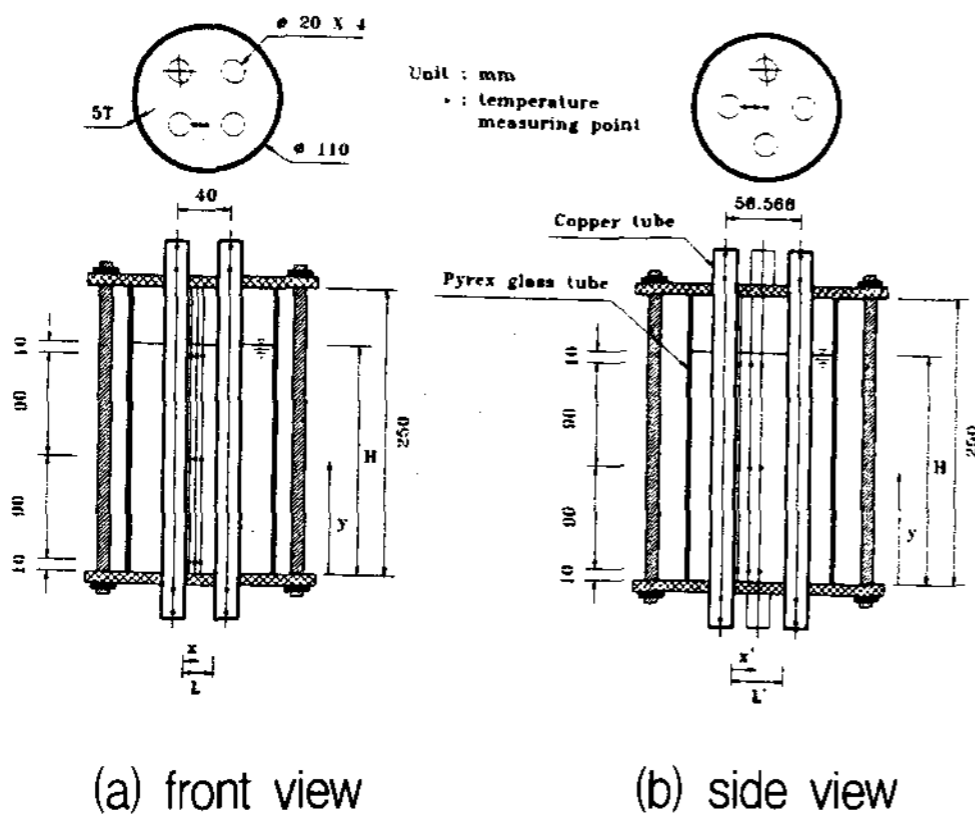


Fig. 3. Thermocouple position in the test section

장착하여 가열유체가 빙축열탱크 내부로 흐를 수 있도록 하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 시험부의 평면도와 정면도, 측면도를 각각 그림으로 나타낸 것이다.

또한 항온시스템에는 시간경과에 따른 용융형상을 관찰하기 위하여 acrylic plate로 제작한 빙축열탱크 크기의 window를 설치하였다.

본 실험에서는 수직 다발관형 빙축열탱크 내에 상변화물질로써 융점이 0°C인 순수한 물을 빙축열탱크내 200 mm 에 해당하는 높이(H)까지 채우고 초기과냉온도인 -10°C로 냉각시킨 후, 빙축열탱크내 4개의 수직원관으로 유입되는 가열유체(ethylene glycol30wt% + water70wt%)를 4의 수직원관 각각에 대하여 입구온도(T_{inlet})를 7°C,

4°C, 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켜가며 용융실험을 수행하였다.

빙축열탱크내 상변화물질의 온도측정을 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 빙축열탱크 내부에 총 18개의 열전대(K-type)을 설치하였으며, 수직원관 내로 유입되는 가열유체의 입구 및 출구온도를 측정하기 위하여 4개의 수직원관 입구와 출구에 각각 2개씩 총 16개의 열전대를 설치하였다.

또한 시간경과에 따른 용융에너지를 계산하기하여 시험부의 하부에 설치된 드레인밸브를 통해 매시간 용융된 물을 추출함으로써 용융량을 측정하였다. 이때 추출회수는 입구온도(T_{ini})가 7°C인 경우 30분, 입구온도(T_{ini})가 4°C인 경우는 50분간격으로 총 10회 추출하였다. 또한 data acquisition system(Fluke 2280B)에 의해 매 60 초 간격으로 측정된 각 측정점에서의 온도들은 PC에 기록·저장하였다.

본 실험에 적용된 각 실험조건들을 Table 1에 나타내었다.

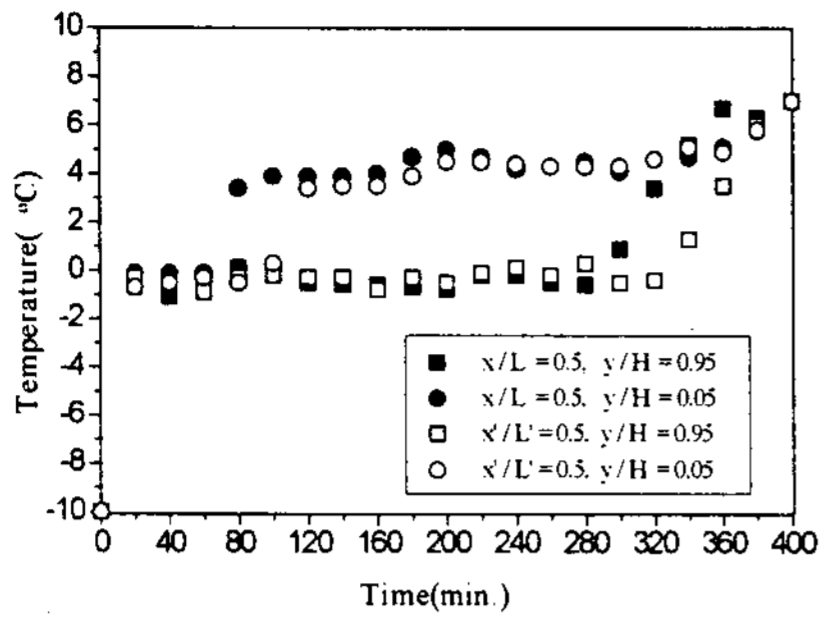
Table 1. Experimental conditions

Experiment	Inlet temperature of working fluid(T_{inlet})	Flow direction of working fluid	Initial temperature of P.C.M (T_{ini})
melting process	7°C	Upward flow	-10°C
	4°C		
	7°C	Downward flow	
	4°C		

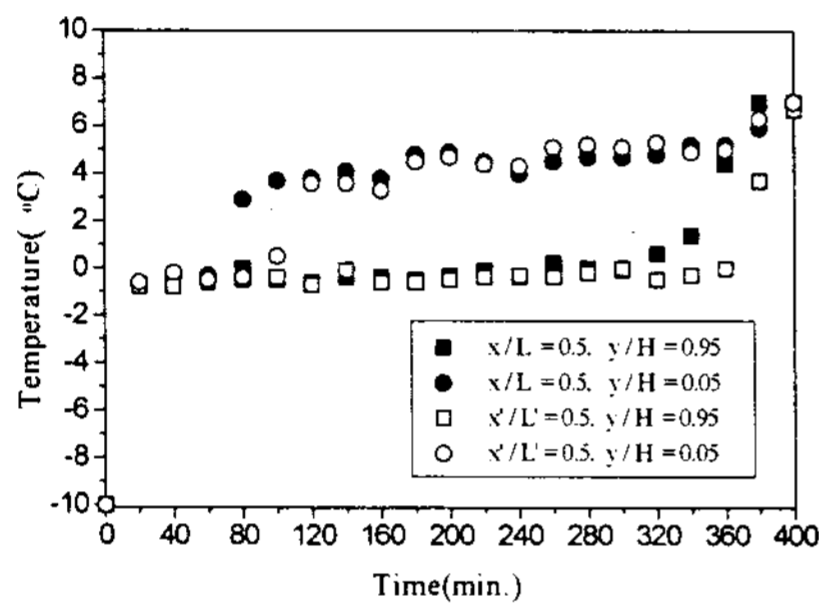
3. 결과 및 고찰

3.1 빙축열탱크내 상변화물질의 온도분포

Fig. 4와 Fig. 5는 빙축열조내 상변화물질의 초기온도(T_{ini})가 -10°C이고 가열유체의 입구온도



(a) upward

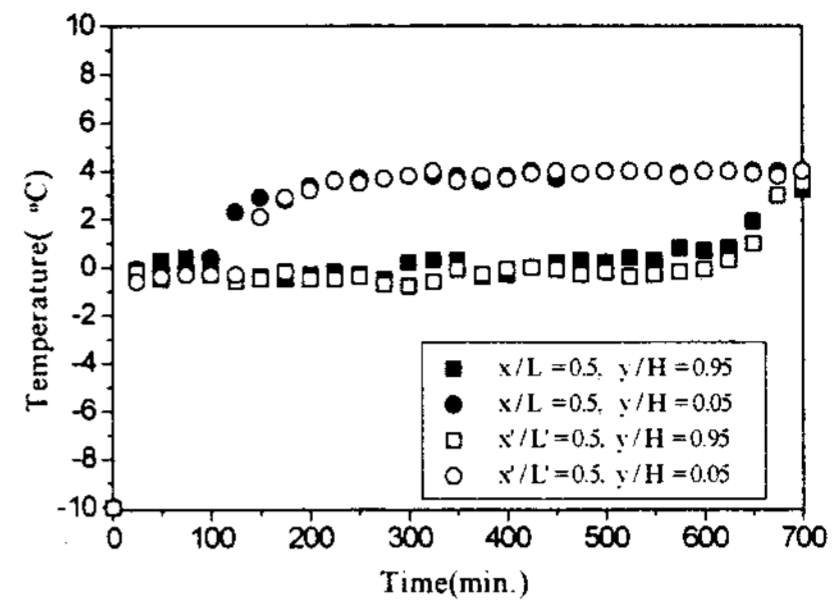


(b) downward

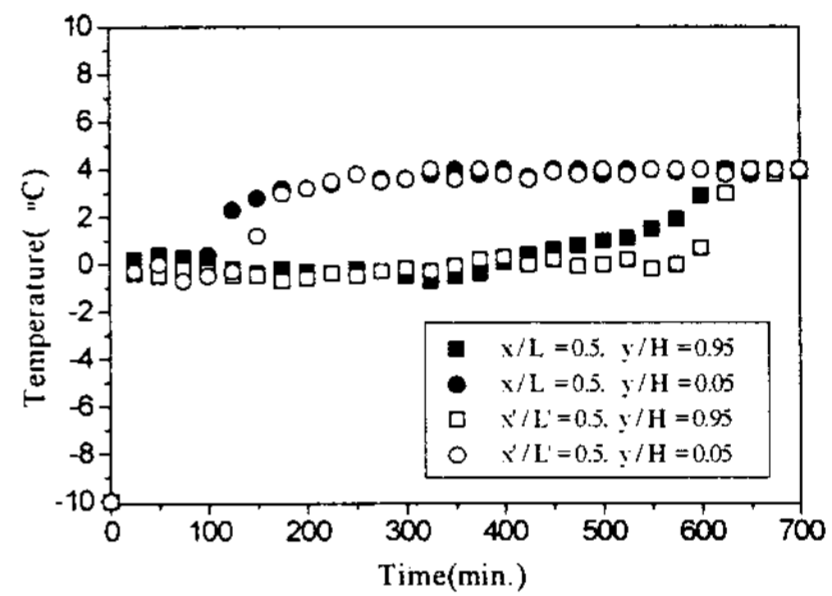
Fig. 4. Temperature profiles of vertical direction ($T_{inlet} = 7^{\circ}\text{C}$, $T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$)

(T_{inlet})가 각각 7°C 와 4°C 인 경우, 가열유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 때 수직원관의 배열이 가로방향이고 온도측정점의 위치가 수직원관과 수직원관 사이 정중앙부인 $x/L = 0.5$ 지점과 빙축열조내 정중앙부 지점인 $x'/L' = 0.5$ 지점에서의 수직방향($y/H = 0.05, 0.95$)에 대한 온도분포를 나타낸 것이다.

가열유체의 입구온도(T_{inlet})가 7°C 인 Fig. 4에 나타난 바와 같이 가열유체의 유입방향이 상향인 경우와 하향인 경우 모두 빙축열조내 각 지점에서의 온도분포는 유사하게 나타났으며, 특히 빙축열조 하부($y/H = 0.05$) 지점에서는 물의 용융점 온도인 0°C 부근에서 약 100분간의 잠열구간을 거쳐 최대밀도점 온도인 4°C 부근에서 온도 정체 구간이 나타났다. 그러나 빙축열조 상부($y/H =$



(a) upward



(b) downward

Fig. 5. Temperature profiles of vertical direction ($T_{inlet} = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$)

0.95)지점에서는 가열유체의 유입방향이 상향인 경우는 약 320분, 하향인 경우는 약 360분의 잠열구간을 지나 최대 밀도점 온도인 4°C 에서의 온도 정체 구간이 나타나지 않고 바로 가열유체의 입구온도에 도달하였다.

이와 같이 가열유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 용융 후반부에 접근하면서 용융이 다소 빠르게 이루어지는 것은 용융과정이 진행됨에 따라 액상인 물이 증가하게 되고 이때 액상인 물에서 발생하는 자연대류에 의한 유체운동은 가열유체의 유입방향이 상향과 동일한 방향, 즉 하부에서 상부로 진행됨에 따라 유입방향이 하향인 경우보다 자연대류 열전달이 활발히 진행되기 때문이라 생각된다.

Fig. 5는 가열유체의 입구온도(T_{inlet})가 4°C 인

경우 가열유체의 유입방향에 대한 빙축열조내 $x/L = 0.5$, $x'/L' = 0.5$ 위치에서 수직방향의 온도분포를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 빙축열조 하부($y/H = 0.05$)지점에서는 0°C 부근에서 약 125분의 잠열구간을 거쳐 가열유체의 입구온도인 4°C 에 도달하였으며, 상부($y/H = 0.95$)지점에서는 입구온도가 7°C 의 경우와는 달리 상향의 경우 약 650분, 하향의 경우는 약 600분의 잠열구간을 거쳐 하향인 경우가 약간 빠르게 가열유체의 입구온도에 도달하는 것으로 나타났다. 즉 용융 후반부의 경우 용융된 물은 빙축열조 하부에 적체되고 잔여 고상인 얼음은 액상인 물위에 부유하게 된다. 이때 가열유체의 입구온도는 물의 최대밀도점 온도인 4°C 임에 따라

빙축열조내 액상인 물에서의 온도분포는 하부가 최대밀도점 온도인 4°C 를 유지하게 되고 상부에 가까울수록 온도분포는 낮아지게 된다.

따라서 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다는 온도가 낮은 액상 상부와의 열전달이 활발히 진행되게 되고 이로 인해 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 용융이 약간 빠르게 진행되는 것이라 판단된다.

3.2 얼음충전율

얼음 충전율(Ice Packing Factor : IPF)은 빙축열탱크내 얼음과 물의 전체 체적에 대한 빙축열탱크 내의 최대 얼음량으로 나타내며, 빙축열시스템의 성능을 해석하는데 주요 인자라 할 수 있다.

본 실험에서는 매시간 용융된 물을 추출함으로써 빙축열조내 얼음의 양을 측정할 수 있으므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

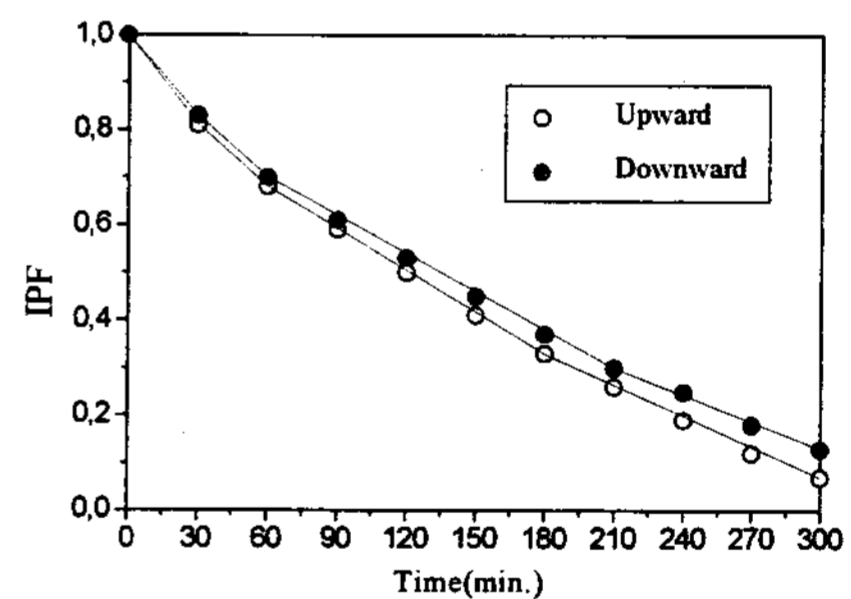
$$IPF = \frac{M_{\max} - M_w}{M_{\max}} = \frac{M_i}{M_{\max}} \quad (1)$$

Fig. 6 은 수직 다발관형 빙축열조내 상변화물

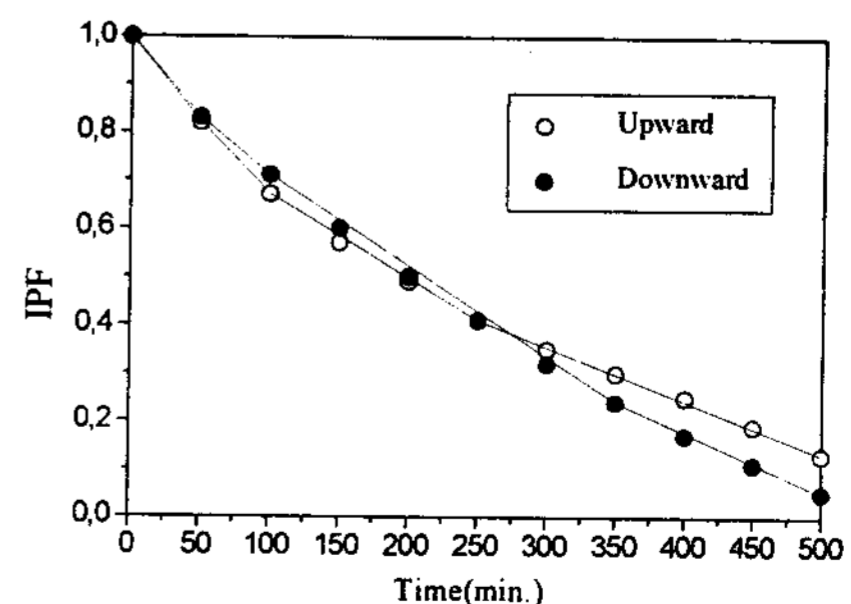
질의 초기온도(T_{ini})를 -10°C , 가열유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시키고 가열유체의 입구온도(T_{inlet})가 각각 7°C 와 4°C 인 조건하에서 용융시켰을 경우 시간경과에 따른 얼음 충전율을 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 가열유체의 입구온도(T_{inlet})가 4°C 인 경우 용융이 진행되면서 약 300분 경과후 부터는 입구온도가 7°C 인 경우와는 달리 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 얼음 충전율이 더 빠르게 감소되는 것으로 나타났다.

이는 용융초기와는 달리 용융이 진행됨에 따라 용융후 잔여 고상인 얼음은 액상인 물위로 부유하게 되고, 이때 가열유체의 입구온도가 물의 최대밀도점 온도인 4°C 임에 따라 빙축열조내 액상인 물에서의 온도분포는 하부가 최대밀도점 온도



(a) $T_{inlet} = 7^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{inlet} = 4^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Timewise variations of IPF($T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$)

인 4°C를 유지하게 되며 상부에 가까울수록 온도 분포는 낮아지게 된다. 따라서 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다는 온도가 낮은 액상 상부와의 열전달이 활발히 진행됨으로써 액상 상부의 온도가 상향인 경우보다 빠르게 상승하고, 이로 인해 가열유체가 하향인 경우가 상향인 경우보다 용융이 빠르게 진행되기 때문이라 판단된다.

3.3 용융에너지

Fig. 7은 상변화물질인 얼음으로 부터 방열되는 용융에너지(Ice Recovery Energy : kJ)를 시간 경과에 따라 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 용융과정시 얼음에 방열되는 용융에너지는 가열유체의 입구온도가

7°C인 경우 가열유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 크게 나타난 반면, 가열유체의 입구온도가 4°C인 경우 7°C인 경우와는 달리 하향인 경우가 상향인 경우보다 큰 것으로 나타났다. 또한 상변화물질인 얼음으로 부터 방열되는 총 용융에너지(E_{tot})는 가열유체의 입구온도가 7°C인 (a)의 경우(300분 경과) 상향은 약 462.13 kJ, 하향은 약 433.99 kJ 이 방열되었으며, 가열유체의 입구온도가 4°C인 (b)의 경우(500분 경과) 상향은 약 473.49 kJ, 하향은 약 431.71 kJ 이 방열되었다.

한편 총 용융에너지의 계산식은 다음과 같다.

$$E_{tot} = E_{\lambda} + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \quad (2)$$

여기서 E_{λ} , E_{s1} , E_{s2} , E_{s3} 는 다음과 같다

$$E_{\lambda} = \lambda \cdot M_i \quad (3)$$

$$E_{s1} = M_i \cdot C_i \cdot (\bar{T}_i - T_{ini}) \quad (4)$$

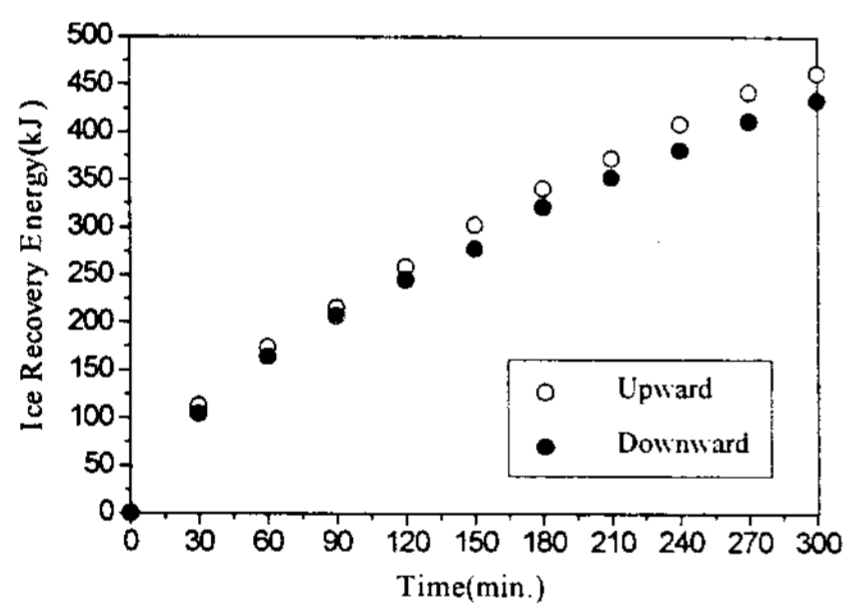
$$E_{s2} = M_w \cdot C_w \cdot (\bar{T}_w - T_m) \quad (5)$$

$$E_{s3} = M_w \cdot C_i \cdot (T_m - T_{ini}) \quad (6)$$

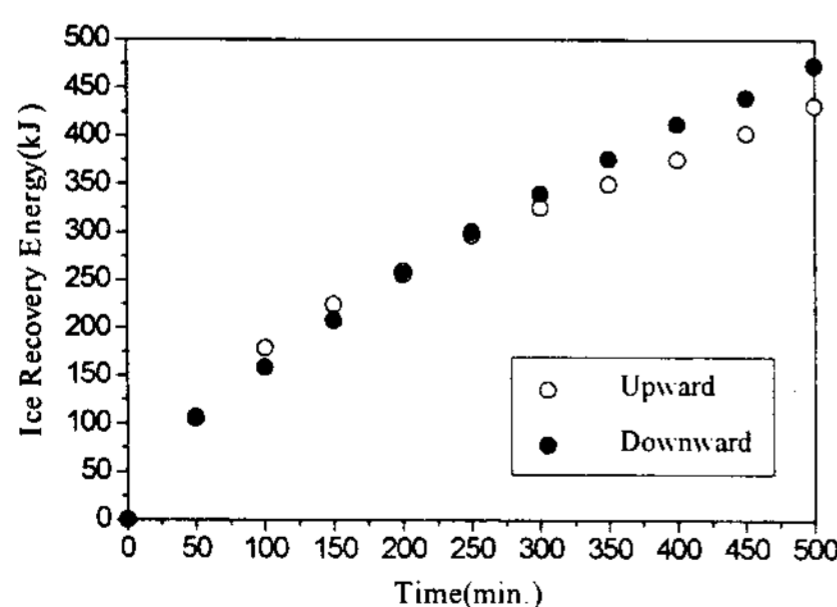
3.4 냉방 열효율

Fig. 8은 시간경과에 따른 냉방 열효율(η) 변화를 나타낸 것으로서 가열유체의 입구온도가 7°C와 4°C인 두 경우 모두 용융초기에 냉방 열효율이 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 이후 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이는 상변화물질의 초기온도와 가열유체의 입



(a) $T_{inlet} = 7^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{inlet} = 4^{\circ}\text{C}$

Fig. 7. Timewise variations of ice recovery energy ($T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$)

구온도와 차가 용융초기에 가장 크기 때문이며, 이후 용융과정이 진행됨에 따라 수직원관 주위에 용융된 물이 층을 형성하게 되고 이러한 용융층에서 발생하는 열저항이 냉방 열효율을 감소시키는 한 원인이라 판단할 수 있다. 또한 가열유체의 입구온도가 7°C 이고 가열유체의 유입방향이 상향인 경우 평균 냉방 열효율은 약 54.1%, 하향의 경우는 약 44.5% 를 나타내고 있으며, 가열유체의 입구온도가 4°C 인 경우는 상향이 약 44.3%, 하향이 약 42.6%의 평균 냉방 열효율을 나타냄으로써 가열유체의 입구온도가 7°C와 4°C 인 두 경우 모두 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 평균 냉방열 효율이 약간 높은 것으로 나타났다. 그러나 가열유체의 입구온도가 4°C인 경우 용융초기와는 달리 용융이

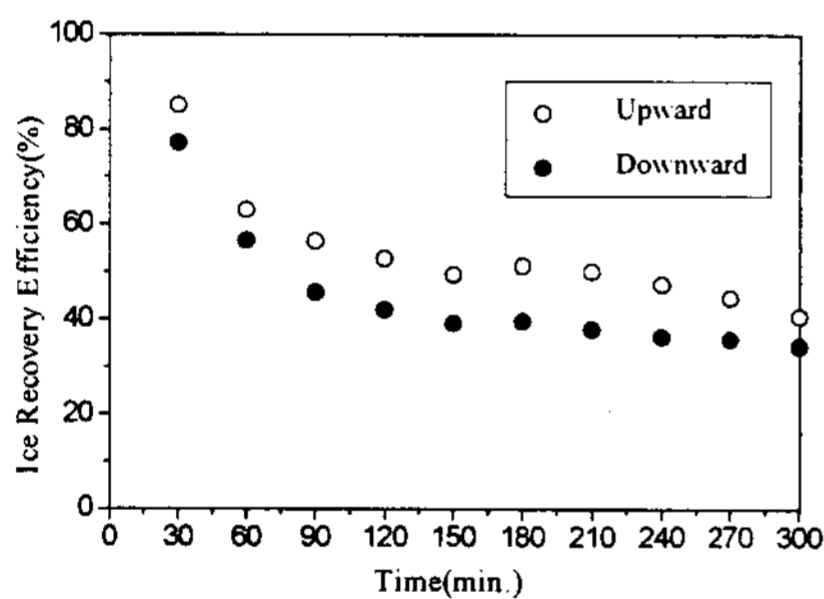
진행됨에 따라 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 냉방 열효율이 커지는 것으로 나타났다.

$$\eta = \frac{E_{tot}}{Q_b} \quad (7)$$

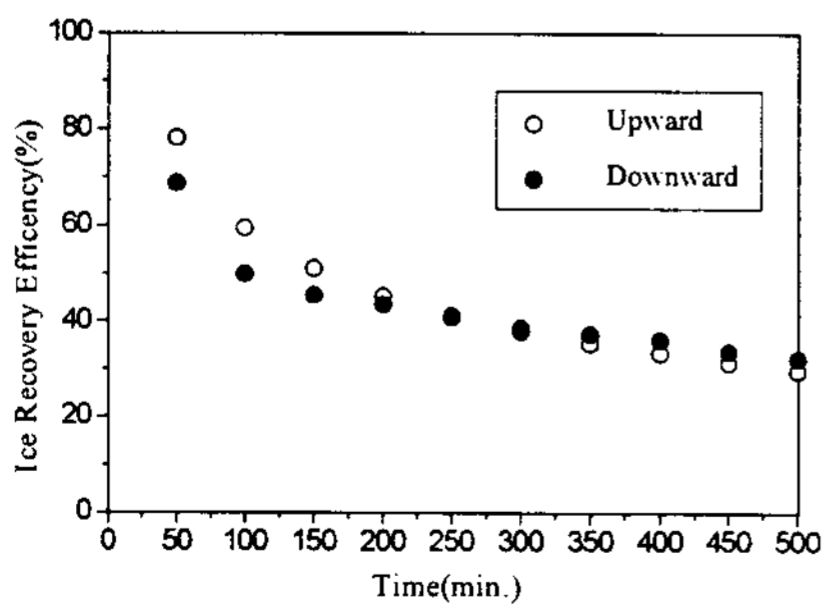
$$= \frac{E_{\lambda} + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3}}{\sum_{i=0}^n M_b \cdot C_b \cdot (T_{inlet} - T_{outlet}) \cdot \Delta t_i}$$

4. 결론

- (1) 가열유체의 입구온도(T_{inlet})가 7°C인 경우 빙축열조내 상부에서의 온도분포는 가열유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 가열유체의 입구온도에 빠르게 도달한 반면, 가열유체의 입구온도가 최대 밀도점온도인 4°C인 경우 가열유체의 입구온도 조건에 의해 하향인 경우가 상향인 경우보다 약간 빠르게 도달하였다.
- (2) 얼음 충전율(IPF)은 입구온도가 7°C인 경우 가열유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 약간 빠르게 감소한 반면, 4°C의 경우 가열유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 얼음 충전율은 더 빠르게 감소하였다.
- (3) 용융과정시 얼음으로부터 방열되는 총 용융 에너지(E_{tot})는 가열유체의 입구온도가 7°C인 경우 가열유체의 유입방향 조건이 상향인 경우가 하향인 경우보다 크게 나타난 반면, 가열유체의 입구온도가 4°C인 경우 7°C인 경우와는 달리 하향인 경우가 상향인 경우보다 큰 것으로 나타났다.
- (4) 가열유체의 입구온도가 7°C 이고 가열유체의 유입방향이 상향인 경우 평균 냉방열 효율은 약 54.1%, 하향의 경우는 약 44.5% 를 나타내고 있으며, 가열유체의 입구온도가 4°C 인



(a) $T_{inlet} = 7^{\circ}\text{C}$



(b) $T_{inlet} = 4^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. Timewise variation of ice recovery efficiency ($T_{ini} = -10^{\circ}\text{C}$)

경우는 상향이 약 44.3%, 하향이 약 42.6%의 평균 냉방열 효율을 나타냄으로써 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 평균 냉방열 효율이 약간 높은 값을 보였다.

후 기

본 연구는 1997년도 인하대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 노승탁, 1991, "저온축열에 의한 에너지의 합리적인 이용", 공기조화·냉동공학회지, Vol. 20, No. 2, pp.98~103
2. S. Fukusako, M. Yamada, 1993, "Some Topics on Melting Heat Transfer Problem", 4th Int. Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions, New Hampshire, pp.3~16
3. S. T. RO, 1993, "Two-Dimensional Freezing of Water Filled Between Vertical Concentric Tubes involving Density Anomaly and Volume Expansion", Int., J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 10, pp.2647~2656
4. K. Yoshiyuki, 1994, "球力ガセル潛熱蓄熱槽の蓄放熱特性(その1 : 凝固, 熔融過程の可視化)", 空氣調和・衛生工學會技術講演會講演論文集, F-30, pp.941~944
5. K. Yoshiyuki, 1994, "球力ガセル潛熱蓄熱槽の蓄放熱特性(その2 : 相變化速度)", 空氣調和・衛生工學會 技術講演會講演論文集, F-31, pp.945~948
6. S. L. Braga, R. Viskanta, 1992, "Transient Natural Convection of Water near its Density Extremum in a Rectangular Cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, No. 4, pp.861~875
7. 윤정인 외, 1995, "수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구", 공기조화·냉동공학회지, Vol. 7, No. 1, pp.89~97
8. 임장순 외, 1996, "빙축열조내 부피 축소 및 부양을 고려한 얼음의 용융과정에 관한 실험적 연구", 한국태양에너지 학회지, Vol. 16, No. 1, pp.19~27