

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 3, 1998

수직다발관형 빙축열 탱크내 물의 응고과정시 열전달특성에 관한 연구

김영기*, 임장순**

* 인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics during the Freezing Process of Water in the Vertical Multi Tube Type Ice Storage Tank

Y. K. Kim*, C. S. Yim**

* *Graduate School, In-ha University*

** *Department of Mechanical Engineering, In-ha 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 timewise variation of the interface profiles between the solid and the liquid were visualized, and the heat transfer characteristics of the Phase Change Material(PCM) in the ice storage tank were investigated.

During the freezing processes in the ice storage tank with several vertical tubes, decrease of the heat transfer area and the heat resistance of the ice layer made the increasing rate of ice packing factor(IPF) less.

The total freezing energy for the upward flow of the secondary fluid was higher than that for the downward flow.

The average ice storage 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]
- C_i : Specific heat of ice [kJ/kg · °C]
(=0.185 + 0.689 × 10⁻²(T + 273) at 0°C ≥ T ≥ -183°C)
- C_w : Specific heat of water [kJ/kg · °C]
- E_{s1} : Sensible energy released from water which remained unfrozon [kJ]
- E_{s2} : Sensible energy released from ice [kJ]
- E_{s3} : Sensible energy released from water [kJ]
- E_λ : Latent energy [kJ]
- E_{tot} : Total freezing energy released from water [kJ]
- H : Height of PCM [m]
- IPF : Ice Packing Factor
- L : Distance between vertical tube taken a front view [m]
- L' : Distance between vertical tube taken a side view [m]
- M_b : Flux of brine [m³/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]

- T_{ini} : Initial temperature of PCM [°C]
- Δt_i : Time interval between successive sets of experimental observation [°C]
- T_{inlet} : Inlet temperature of brine [°C]
- \bar{T} : Mean temperature of PCM [°C]
- \bar{T}_i : Mean temperature of ice [°C]
- T_m^* : Temperature of the maximum density of water(=4.0293°C) [°C]
- T_m : Melting temperature [°C]
- T_{outlet} : Outlet temperature of brine [°C]
- \bar{T}_w : Mean temperature of water [°C]
- x : Radial direction coordinate based on outer wall of vertical tube taken a front view [m]
- x' : Radial direction coordinate based on outer wall of vertical tube taken a side view [m]
- y : Vertical direction coordinate based on bottom of ice storage tank [m]

그리스 문자

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

(= $917(1-1.17 \times 10^{-4}T)$ 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_{sto} : Ice storage 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.

특히 상변화물질로써 물을 사용하는 빙축열시스템의 경우 축열매질인 물은 여타의 유·무기물질과는 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 유동 현상이 다르게 나타나는 특성을 갖고 있다.^{1,2)} 그러므로 물 이외 상변화물질의 열전달특성을 고찰한 연구들은 물을 상변화물질로 사용하는 빙축열시스템의 설계자료로 이용하기에는 다소 부적합하다.

근래에 들어 물-얼음의 상변화과정을 고려하여 빙축열탱크내 상변화물질의 열전달특성을 규명하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

그동안 발표된 빙축열탱크내 상변화물질의 열전달특성을 고려한 많은 연구에서는 액상인 물 영역에서 자연대류의 열전달기구에 대한 정성적인 연구가 주로 수행되었다.^{3)~9)} 그러나 실제 빙

축열시스템의 빙축열탱크 설계에 있어서는 물의 열전달특성에 관한 연구중 액상내 자연대류의 영향뿐만 아니라 응고과정시 물-얼음의 상경계면 형상 변화 또한 심도있게 고려되어야 한다. 이러한 빙축열탱크내 물의 상변화과정시 상경계면 형상 변화에 대한 깊은 연구는 아직 미흡한 실정이다. 특히 수직원통형 빙축열탱크내 물의 외향 응고과정시 상경계면 형상 변화를 가시적으로 고찰한 경우는 거의 찾아볼 수 없다.

이에 본 연구에서는 국내는 물론 미국, 일본 등지에서 많이 사용되고 있는 관외착빙형 빙축열시스템의 일종인 수직 다발관 형태의 실험용 저온 잠열 축열시스템을 제작한 후, 냉각유체의 유입방향 변화와 상변화물질의 초기온도 변화에 따른 축열 성능 실험을 수행하여 빙축열탱크내 상변화물질의 응고과정시 열전달특성과 열저장성능 등을 규명함으로써 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 외통에는 상변화과정시 상경계면 형상의 가시화를 위하여 내경 100 mm, 길이 250 mm, 두께 5 mm의 pyrex 재질의 유리관을 사용하였다. 또한, 수직원통형 빙축열탱크 내로 외경이 20 mm이고 두께가 1 mm인 동재질의 수직원관 4개를 정사각 형태의 배열로 장착하여 냉각유체가 빙축열탱크 내부로 흐를 수 있도록 하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 시험

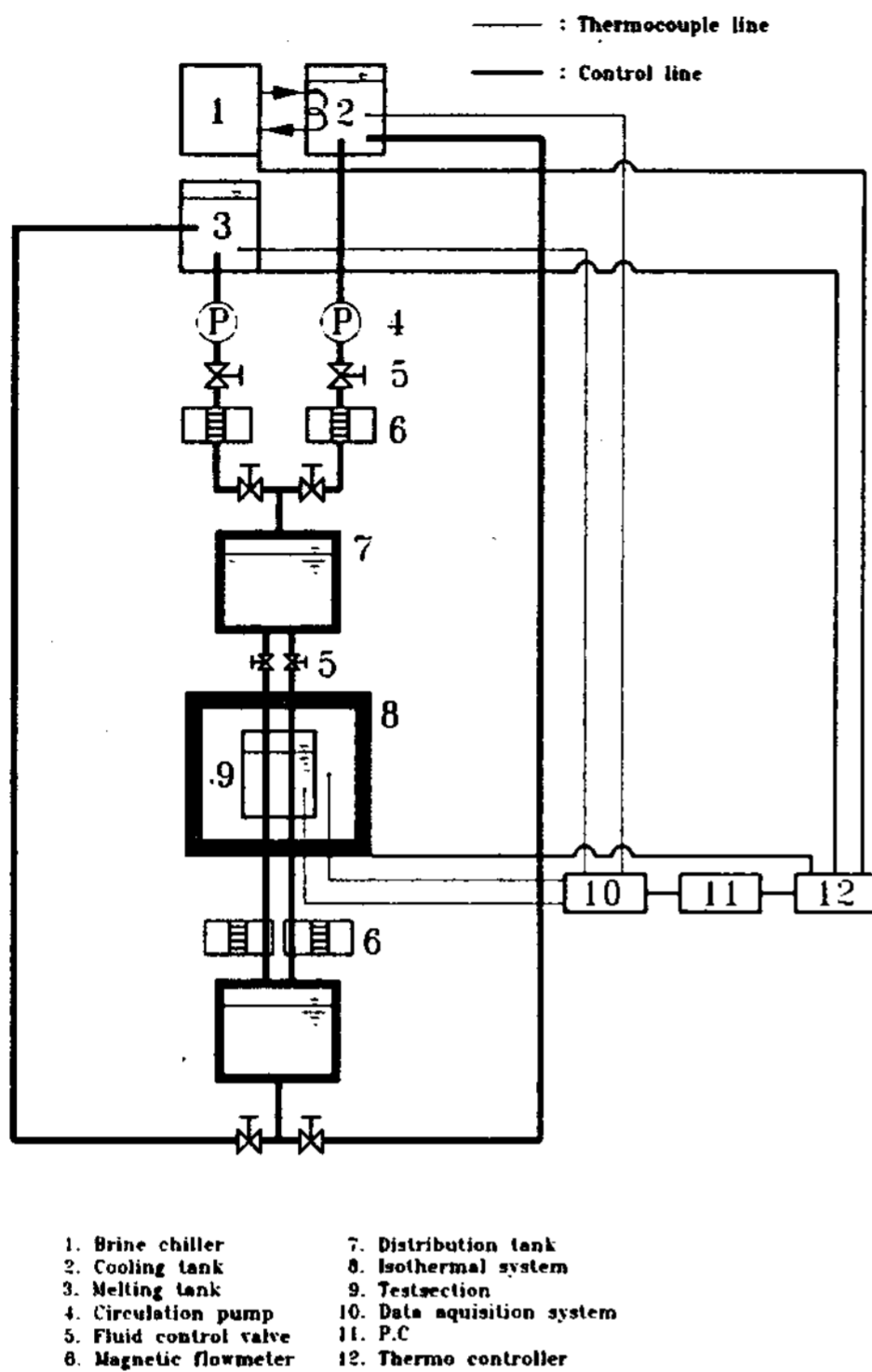


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

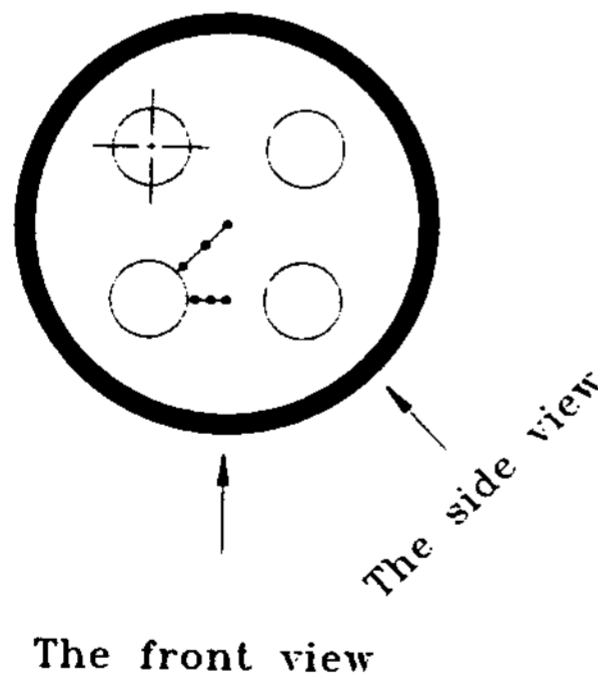


Fig. 2. The plane figure of test section

부의 평면도와 정면도, 측면도를 각각 그림으로 나타낸 것이다.

또한 항온시스템에는 시간경과에 따른 상경계면 형상을 가시화하기 위하여 acrylic plate로 제

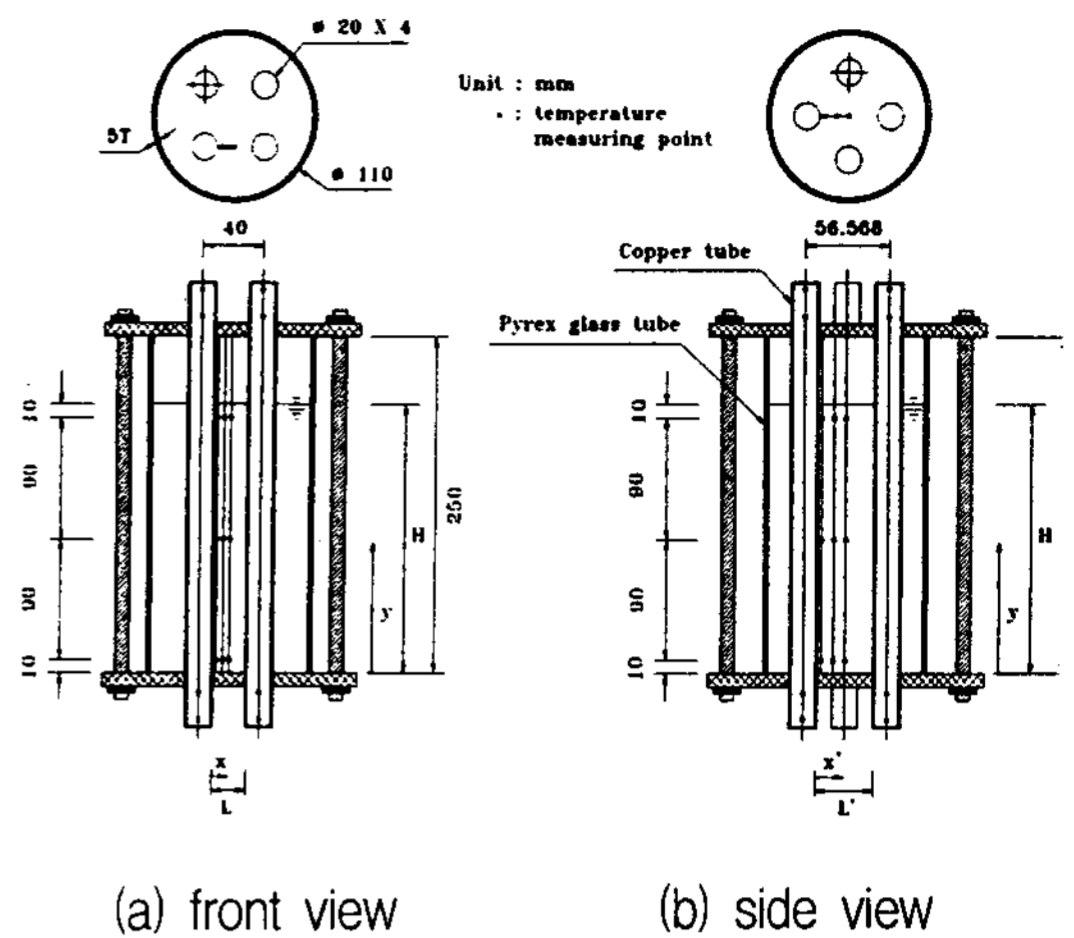


Fig. 3 Thermocouple position in the test section

작한 빙축열탱크 크기의 window를 설치하였으며, 전면으로부터 halogen 광원을 사용하여 camcorder로써 일정 시간마다 상경계면의 형상을 촬영·기록한 후, 이를 분석하였다.

본 실험에서는 수직 다발관형 빙축열탱크 내에 상변화물질로써 융점이 0°C인 순수한 물을 빙축열탱크내 200mm 에 해당하는 높이(H)까지 채운 후, 빙축열탱크내 4개의 수직원관으로 유입되는 저온 냉각유체(ethylene glycol 30wt% + water 70wt%)를 4개의 수직원관 각각에 대하여 입구온도(T_{inlet})를 -10°C, 유량을 10 l/min.로 고정시키고 빙축열탱크내 물의 초기 과열 온도를 각각 7°C, 4°C, 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켜가며 응고실험을 수행하였다.

빙축열탱크내 상변화물질의 온도측정을 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 빙축열탱크 내부에 총 18개의 열전대를 설치하였으며, 수직원관 내로 유입되는 냉각유체의 입구 및 출구온도를 측정하기 위하여 4개의 수직원관 입구와 출구에 각각 2개씩 총 16개의 열전대를 설치하였다.

또한 시간경과에 따른 응고에너지를 계산하기 위하여 시험부의 하부에 설치된 드레인밸브를 통해 매시간 물을 추출함으로써 응고량을 측정하였

다. 이때 추출회수는 초기온도(T_{ini})가 7°C 인 경우 5분, 초기온도(T_{ini})가 4°C 인 경우는 4분간격으로 응고를 한 후 남은 잔여 액상을 총 10회 추출하였다.

또한 data acquisition system(Fluke 2280B)에 의해 매 60 초 간격으로 측정된 각 측정점에서의 온도들은 PC에 기록·저장하였고, 일정시간 간격으로 camcorder에 의해 촬영된 화상 data도 file 형태로 PC에 저장하였다.

본 실험에 적용된 각 실험조건들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental conditions

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

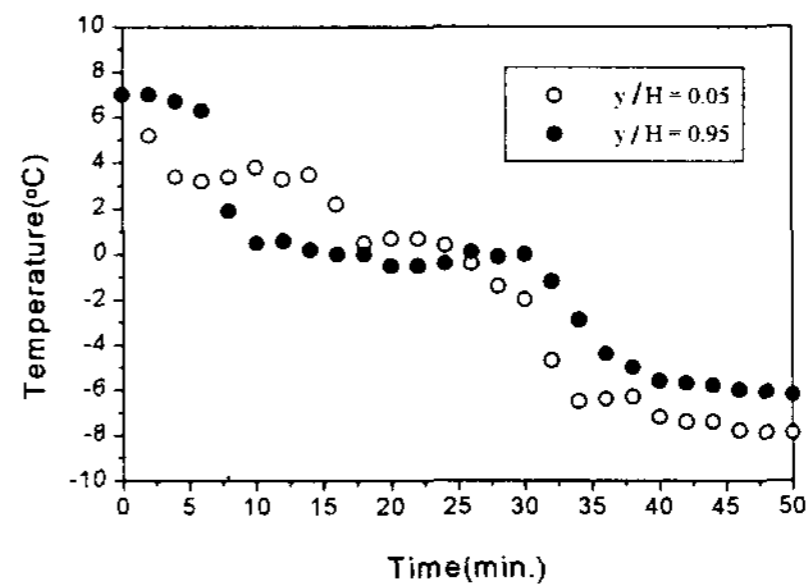
3. 결과 및 고찰

3.1 빙축열탱크내 상변화물질의 온도분포

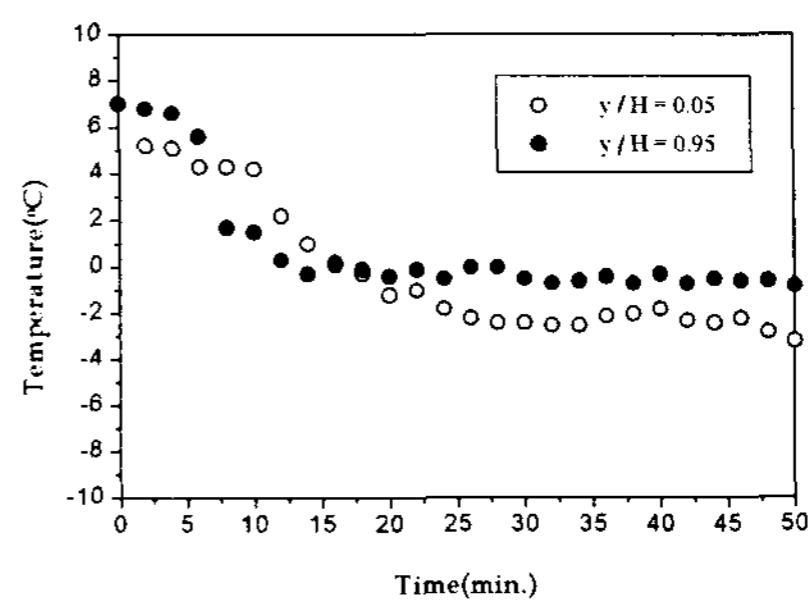
Fig. 4와 Fig. 5는 빙축열탱크내 상변화물질의 초기온도(T_{ini})가 7°C 이고, 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우 수직원관의 배열을 가로방향으로 설치하고, 이때 온도측정점의 위치가 수직원관과 수직원관 사이 정중앙부인 $x/L = 0.5$ 지점과 빙축열탱크내 정중앙부 지점인 $x'/L' = 0.5$ 지점에서의 수직방향에 대한 온도분포를 나타낸 것이다.

냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 Fig. 4에 나타난 바와 같이 응고과정 초기의 온도분포는 $x/L = 0.5$, $x'/L' = 0.5$ 두 지점 모두 상부(y/H

$= 0.95$)의 온도가 하부($y/H = 0.05$)의 온도보다 높은 것으로 나타났으나, 하부의 경우 냉각이 진행됨에 따라 물의 최대밀도점인 4°C 부근에서 온도 정체 구간이 나타남과 동시에 밀도역전에 의한 유동변화로 인해 빙축열탱크내 상부의 온도가 하부보다 낮게 나타나는 온도 역전 구간이 나타났다. 이후 온도측정점의 온도가 얼음생성을 의미하는 0°C 이하인 구간에서는 냉각유체의 입구온도 조건에 의한 열전도의 지배적인 영향으로 하부의 온도가 상부보다 빠르게 냉각되는 온도 역전 구간이 한번 더 나타났다. 반면 냉각유체의 유입방향이 하향인 Fig. 5의 경우에 상향과 마찬가지로 4°C 부근에서 온도 정체 구간과 상·하부의 온도 역전 구간이 나타났지만, 냉각이 진행됨에 따라 $x/L = 0.5$ 지점에서의 온도분포는 0°C 이하 구간에서 냉각유체의 입구온도에 의한 영향으로



(a) $x / L = 0.5$



(b) $x' / L' = 0.5$

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

인해 상향의 경우와는 달리 온도 역전 구간이 다시 나타나지 않는다.

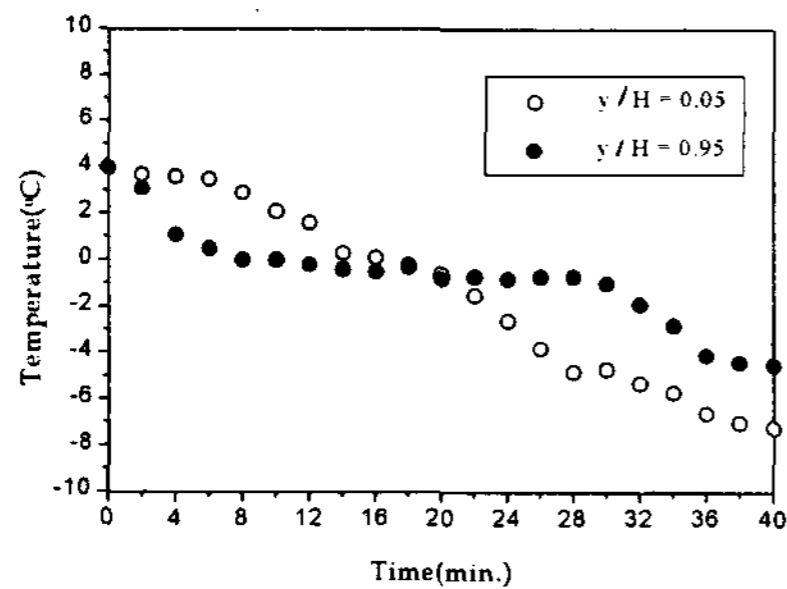
또한 Fig. 4에 나타난 바와 같이 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 수직원관의 배열이 가로 방향이고 온도측정점의 위치가 수직원관과 수직원관 사이 정중앙부인 $x/L = 0.5$ 지점에서의 온도분포는 약 30분이 경과되면서 상·하부의 온도가 모두 0°C 이하로 낮아짐에 따라 두 수직원관 사이의 물이 응고되기 때문에 얼음으로 연결됨을 알 수 있었다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 빙축열탱크내 상변화물질의 초기온도(T_{ini})는 4°C 이며 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우 $x/L = 0.5$, $x'/L' = 0.5$ 두 지점에서의 온도분포를 나타낸 것이다.

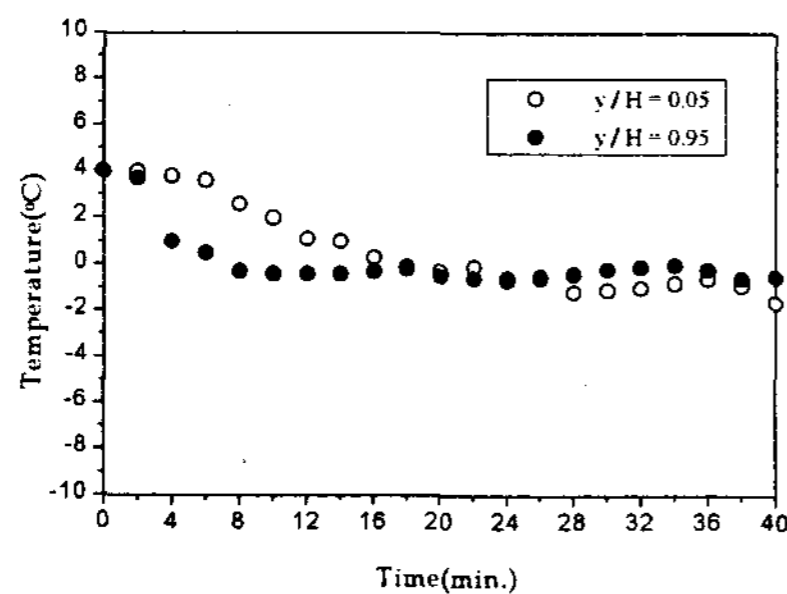
이와같이 상변화물질의 초기온도는 물의 최대

밀도점 온도인 4°C 이므로 초기온도가 7°C 인 경우와는 달리 0°C 이상의 구간에서 상·하부의 온도 역전 구간이 발생하지 않고 상부의 온도가 하부보다 빠르게 냉각되는 것을 알 수 있다. 그러나 온도측정점의 온도가 0°C 이하인 고상 현열 구간에서는 초기온도가 7°C 인 경우와 마찬가지로 상향의 경우 냉각유체의 입구온도에 의한 열전도의 영향으로 하부의 온도가 상부보다 빠르게 냉각됨으로써 온도역전 현상이 나타난 반면, 하향인 경우 온도 역전 구간이 나타나지 않았다.

냉각유체의 유입방향이 상향이고 온도측정점의 위치가 $x/L = 0.5$ 지점인 Fig. 6(a)의 경우 약 22분이 경과되면서 하부지점의 온도가 0°C 이하로 낮아짐에 따라 가로 방향 배열의 두 수직원관 사이가 하부에서부터 얼음으로 연결됨을 알 수 있었으며, 또한 약 30분이 경과되면서 상부지점에서

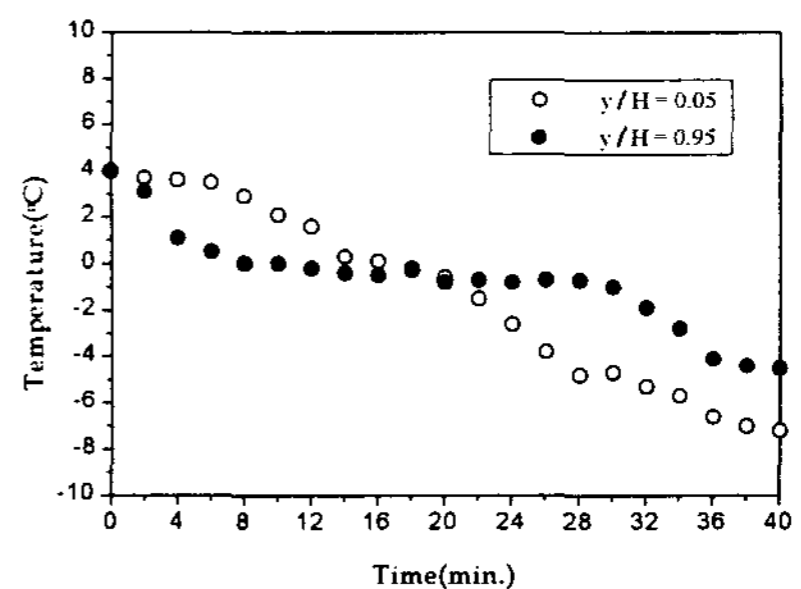


(a) $x / L = 0.5$

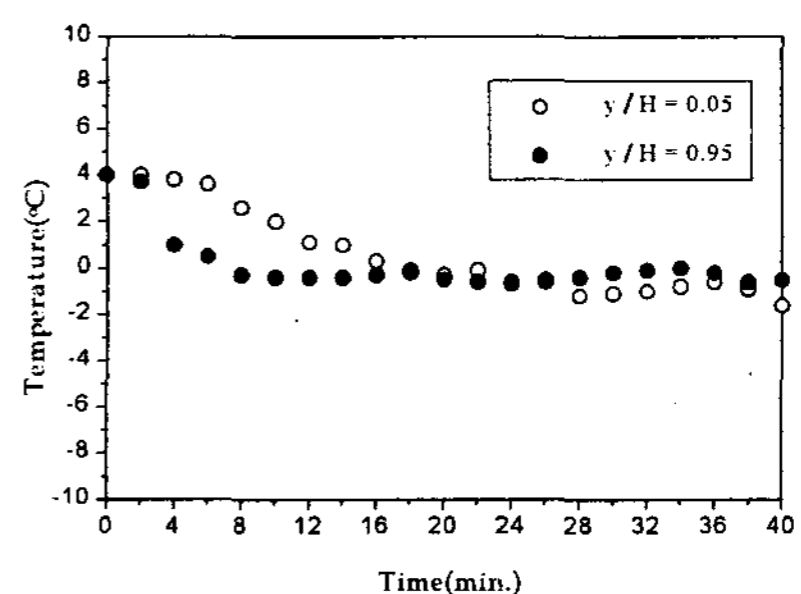


(b) $x' / L' = 0.5$

Fig. 5. Temperature profiles of vertical direction at downward flow ($T_{ini} = 7^{\circ}\text{C}$, $T_{inlet} = 10^{\circ}\text{C}$)



(a) $x / L = 0.5$



(b) $x' / L' = 0.5$

Fig. 6. Temperature profiles of vertical direction at upward flow ($T_{ini} = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

부터 얼음으로 연결됨을 나타내고 있다.

그러나 냉각유체의 유입방향이 하향인 Fig. 7(a)의 경우 상향의 경우와는 달리 상부에서부터 가로방향의 수직원관 사이가 얼음으로 연결되면서 하부로 얼음 생성이 진행됨을 보여주고 있다.

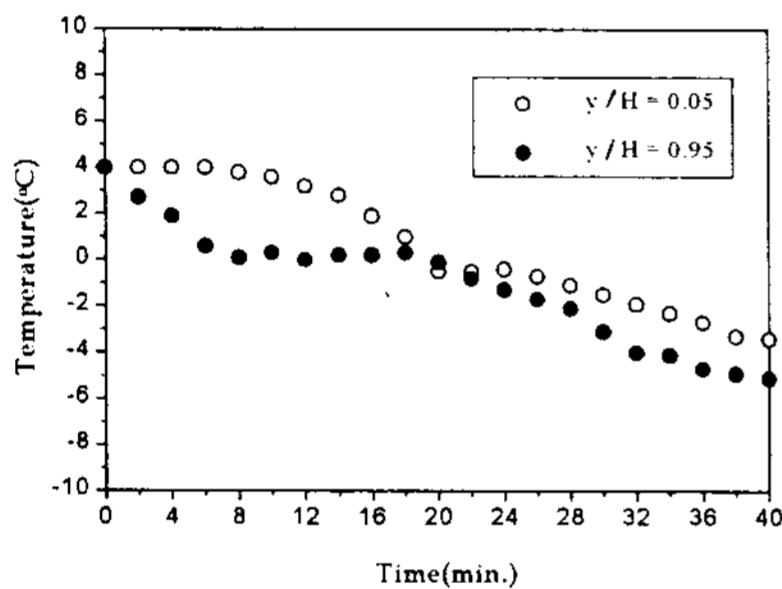
이는 상변화물질의 초기온도가 4°C인 경우(Fig. 6, Fig. 7) 잔여 액상영역에서의 온도분포는 전체적으로 물의 최대밀도점 온도인 4°C 이하로 되기 때문에 냉각이 진행되는 동안 잔여 액상영역의 상부의 온도는 하부보다 낮아지게 된다. 따라서 냉각유체의 유입방향이 하향인 경우가 상향인 경우보다 잔여 액상영역에 대하여 냉각유체의 입구 온도 영향을 더 크게 미치게 되므로 하부보다 상부에서 얼음생성이 빠르게 진행된 반면 상변화물질의 초기온도가 7°C인 경우(Fig. 4, Fig. 5) 잔여

액상영역에서의 온도분포는 최대밀도점인 4°C를 기준으로 할때 7°C에서 4°C까지는 하부의 온도가 상부의 온도보다 낮게 되지만 이후 4°C에서 0°C까지는 밀도역전으로 인하여 하부의 온도가 상부보다 높아지는 온도 역전 현상이 발생함에 따라 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 상·하부에서의 얼음형성이 빠르게 진행되는 것으로 판단된다.

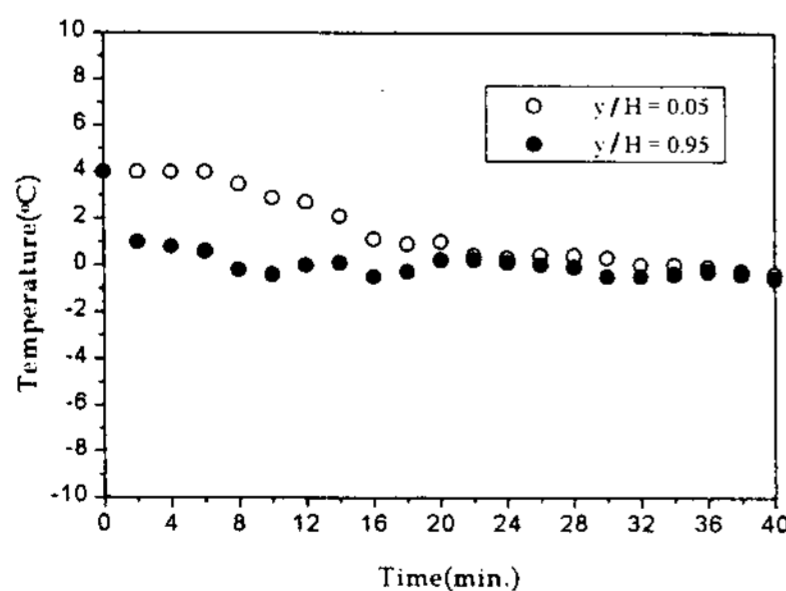
3.2 응고 형상

Photo. 1은 상변화물질의 초기온도(T_{ini})가 4°C이고 냉각유체의 입구온도(T_{inlet})가 -10°C인 경우, 응고실험이 시작되고부터 16분이 경과된 후 냉각유체의 유입방향 변화에 대한 응고 형상을 촬영한 것이다.

Fig. 8은 상변화물질의 초기온도(T_{ini})가 7°C이고 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우 시간경과(실험 시작으로부터 10분, 20분, 30분, 40분)에 따른 상경계면의 형상을 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 30분이 경과된 후 빙축열탱크 하부지점의 수직원관들 사이가 얼음으로 연결됨을 볼 수 있으며, 이후 40분이 경과되면서 수직원관들 사이 상·하부 모두

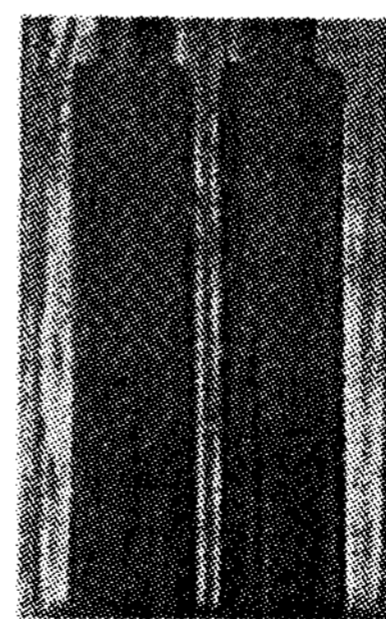


(a) $x / L = 0.5$

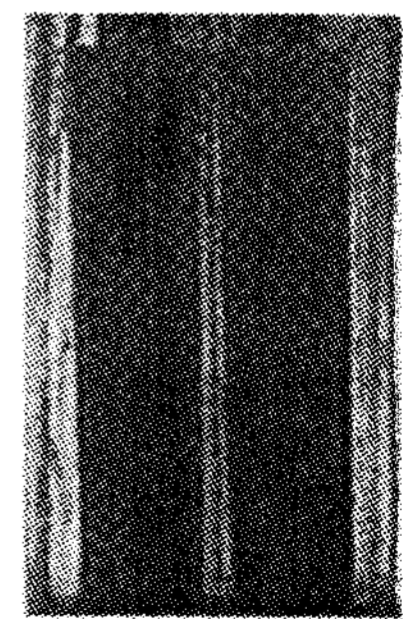


(b) $x' / L' = 0.5$

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



(a) upward



(b) downward

Photo. 1. Solid-liquid interface in the test section after 16 minutes ($T_{ini} = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

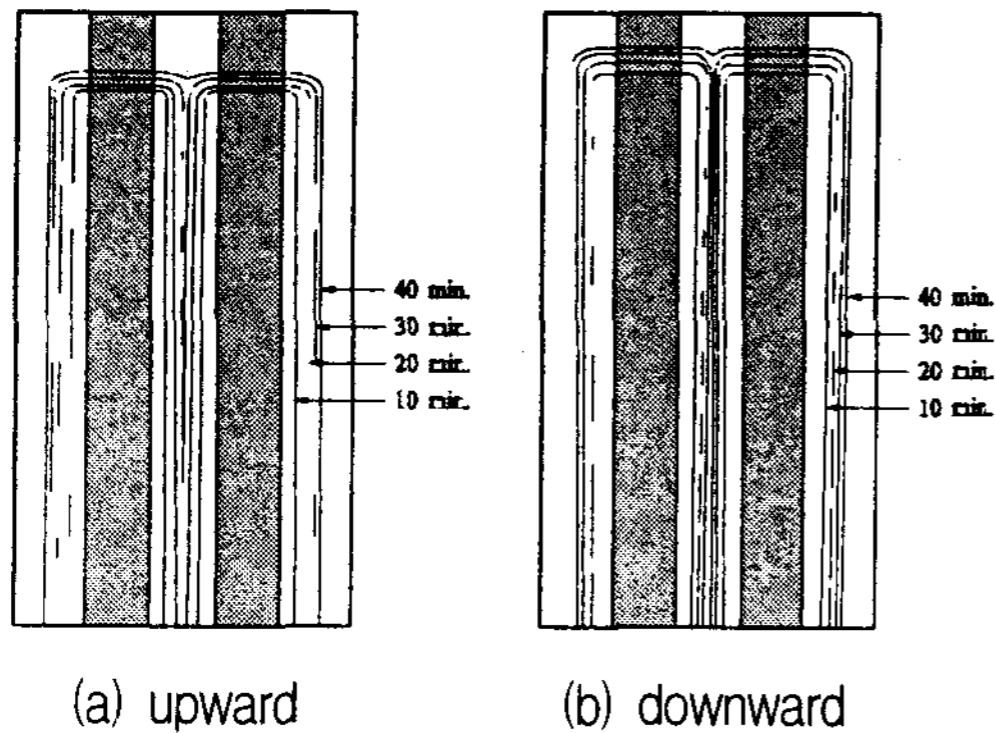


Fig. 8. Timewise variations of solid - liquid interface ($T_{ini} = 7^{\circ}\text{C}$, $T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

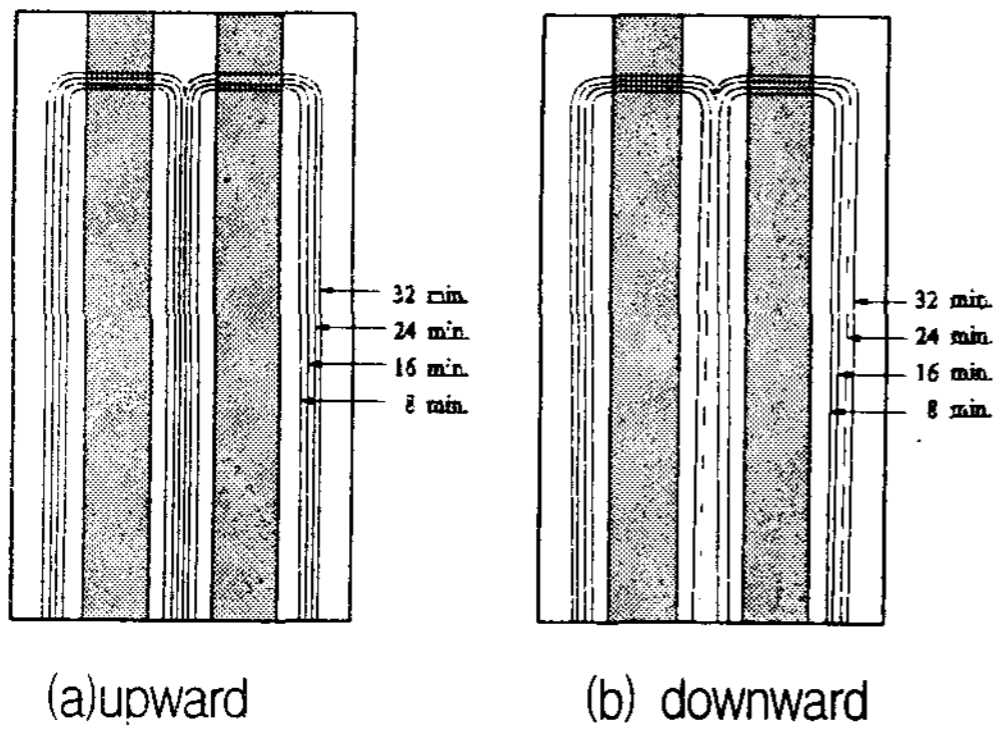


Fig. 9. Timewise variations of solid - liquid interface ($T_{ini} = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

가 얼음으로 연결되었음을 알 수 있다.

또한 전체적인 상경계면 형상도 빙축열탱크의 하부가 상부보다 응고층이 두꺼운 것으로 나타났다. 반면 냉각유체의 유입방향이 하향인 경우 전반적인 상경계면 형상은 상향과는 달리 하부보다 상부에서 응고층이 약간 두꺼운 경향을 나타내고 있으며, 특히 30분 경과후의 상경계면 형상은 빙축열탱크의 상부가 하부보다 응고층이 두꺼웠으나 수직원관들 사이로 전체가 응고되지 않았음을 보여주고 있다. Fig. 9는 상변화물질의 초기온도(T_{ini})가 4°C 이고 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우 시간경과(실험 시작으로부터 8분, 16분, 24분, 32분)에 따른 상경계면의

형상을 그림으로 나타낸 것이다. 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 전반적인 상경계면 형상은 빙축열탱크의 상·하부가 고르게 진행됨을 볼 수 있으며, 약 32분이 경과된 후부터는 수직원관들 사이가 완전히 얼음으로 연결되었음을 볼 수 있다. 반면 냉각유체의 유입방향이 하향인 경우 응고초기부터 빙축열탱크의 상부가 하부보다 응고층이 두껍게 형성되었으며, 실험이 진행되는 동안 계속적으로 빙축열탱크의 상부가 하부보다 응고층이 두꺼운 것으로 나타났다.

3.3 얼음 충전율

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 응고후 잔여 액상인 물을 추출함으로써 빙축열탱크내 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. 10은 수직 다발관형 빙축열탱크내에 상변화물질로써 물을 장입한 후, 상변화물질의 초기온도(T_{ini})를 각각 7°C 와 4°C , 냉각유체의 유입방향을 상향과 하향으로 변화시키고 냉각유체의 입구온도(T_{inlet})가 -10°C 인 조건하에서 응고시켰을 경우 시간경과에 따른 얼음 충전율을 나타낸 것이다.

그림에서 나타난 바와 같이 초기온도(T_{ini})가 7°C 와 4°C 인 (a),(b) 두 경우 모두 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 응고 진행 속도는 빠르게 나타났다. 특히, 초기온도가 7°C 인 (a)의 경우 40분이 경과된 후 상향은 약 75%, 하향은 약 65%가 응고된 반면, 초기온도

가 4°C인 (b)의 경우 상향은 약 82%, 하향은 약 73%가 응고됨으로써 초기온도가 4°C인 경우가 7°C인 경우보다 제빙 속도는 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.

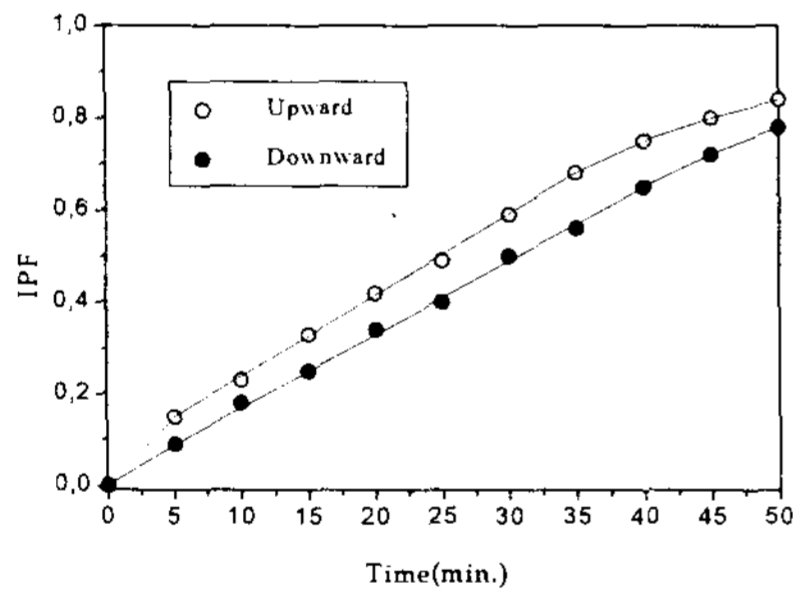
또한 Fig 4-17 (a)에서 초기온도가 7°C인 경우 상향은 약 35분, 하향은 약 40분부터, 초기온도가 4°C인 (b)의 경우 상향은 약 32분, 하향은 약 36분부터 얼음 충전율의 증가구배는 둔화되는 것으로 나타났다.

이는 가로방향 배열의 수직원관 사이가 서로 얼음으로 연결되어 제빙되기 때문에 제빙표면적이 감소하게 되고, 또한 얼음에 의한 열저항이 급속히 증가하기 때문이라 생각된다.

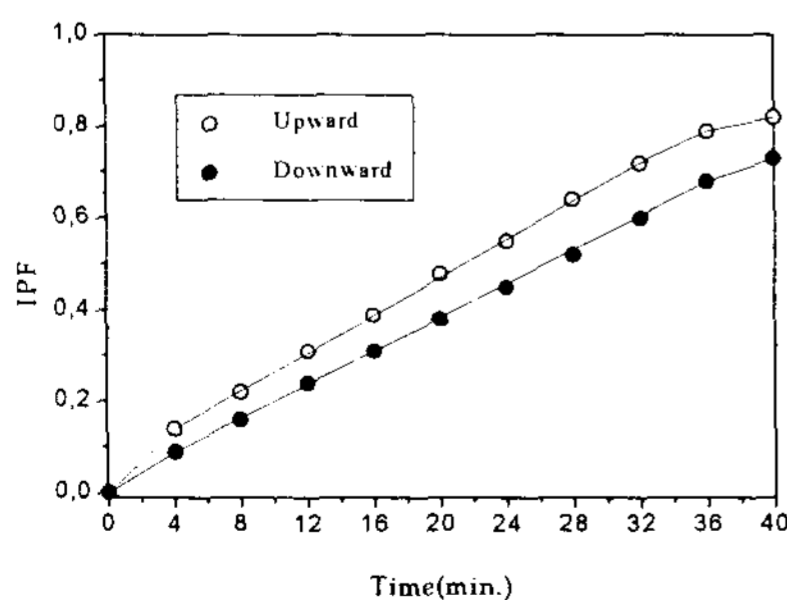
3.4 응고에너지

Fig. 11은 상변화물질인 물로부터 방열되는 응고에너지(Ice Storage Energy : kJ)를 시간 경과에 따라 나타낸 것이다.

응고과정시 물로부터 방열되는 응고에너지는 물의 초기온도가 7°C와 4°C인 두 경우 모두 냉각 유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 크게 나타났으며, 특히 물의 초기온도 변화에 대한 응고에너지의 변화는 초기온도가 4°C인 경우가 7°C인 경우보다 응고에너지의 증가율이 빠르게 나타났다. 또한 Fig. 11에 나타난 바와 같이 시간 경과에 따라 상변화물질인 물로부터 방열되는 총 응고에너지($E_{sto-tot}$)는 초기온도가 7°C인 (a)의 경우(50분 경과) 상향은 약 431.08 kJ, 하향은 약 398.56 kJ 이 방열되었으며, 초기온도가 4°C인 (b)의 경우(40분 경과) 상향은 약 401.14 kJ, 하향은 약 359.22 kJ 이 방열되었다. 한편 총 응고에너지의 계산식은 다음과 같다.

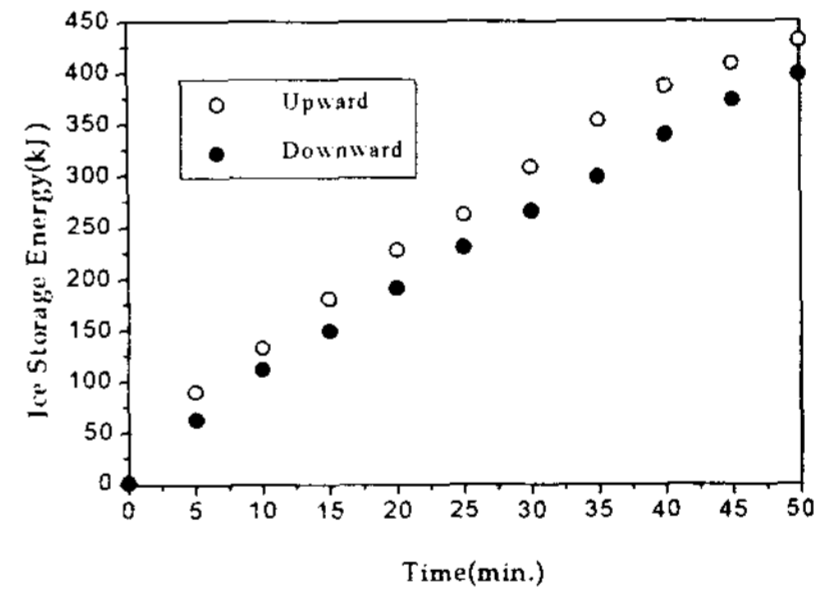


(a) $T_{ini} = 7^{\circ}\text{C}$

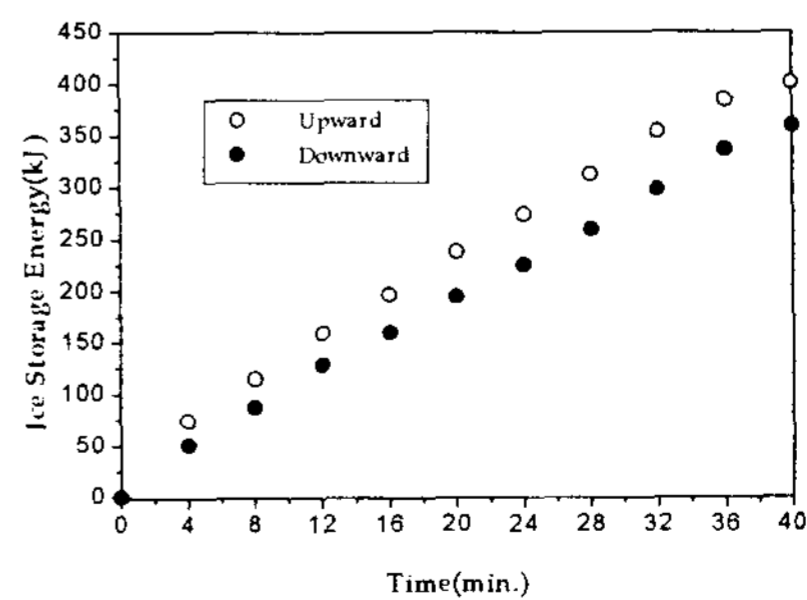


(b) $T_{ini} = 4^{\circ}\text{C}$

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



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



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

Fig. 11. Timewise variations of ice storage energy ($T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

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

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

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

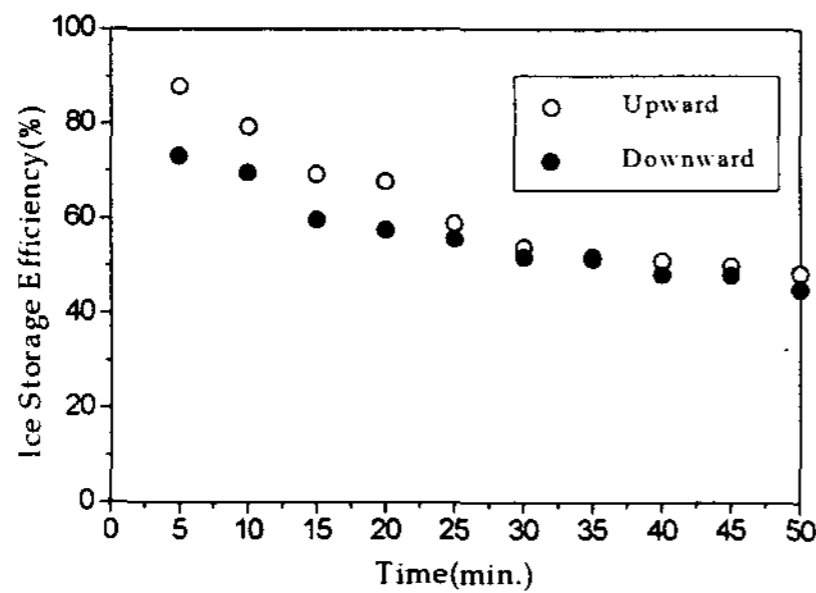
$$E_{s1} = M_w \cdot C_w \cdot (T_{ini} - \bar{T}_w) \quad (4)$$

$$E_{s2} = M_i \cdot C_i \cdot (T_m - \bar{T}_i) \quad (5)$$

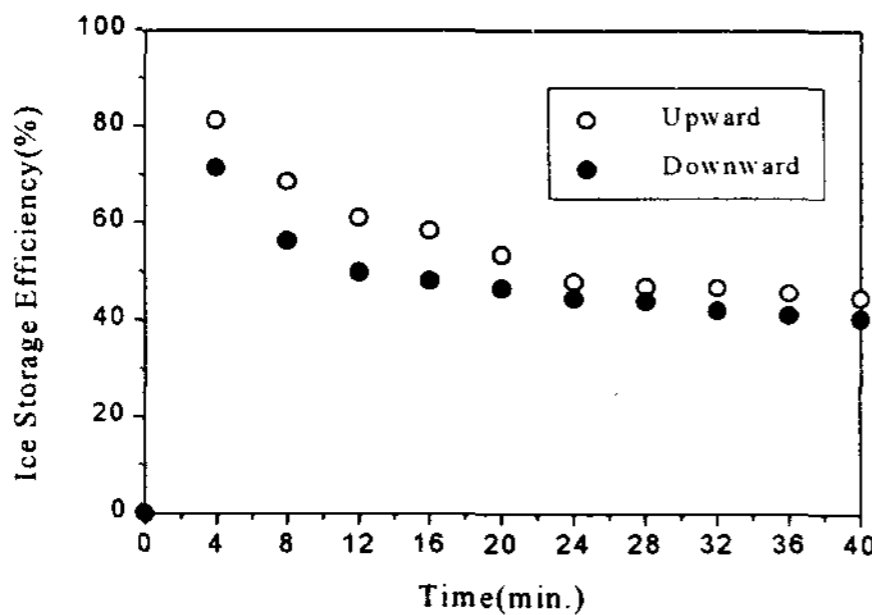
$$E_{s3} = M_i \cdot C_w \cdot (T_{ini} - T_m) \quad (6)$$

3.5 빙축열 효율

Fig. 12는 시간경과에 따른 빙축열 효율 변화를 나타낸 것으로서 상변화물질의 초기온도가



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



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

Fig. 12. Timewise variations of ice storage efficiency ($T_{inlet} = -10^{\circ}\text{C}$)

7°C 와 4°C 인 두 경우 모두 응고초기에 빙축열 효율이 가장 큰 값을 나타내고 있으며, 이후 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 상변화물질의 초기온도와 냉각유체의 입구온도와의 차이가 응고초기에 가장크기 때문이며, 이후 응고과정이 진행됨에 따라 수직원관 주위에 응고층이 성장하게 되고 이러한 응고층에서 발생하는 열저항이 빙축열 효율을 감소시키는 한 원인이라 판단할 수 있다.

더욱이 상변화물질의 초기온도가 7°C 이고 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 평균 빙축열 효율은 약 61.8%, 하향의 경우는 약 56% 를 나타내고 있으며, 초기온도가 4°C 인 경우는 상향이 약 56%, 하향이 약 49%의 평균 빙축열 효율을 나타냄으로써 초기온도가 7°C 와 4°C 인 두 경우 모두 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빙축열 효율(η)가 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

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

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

1. 상변화물질의 초기 온도가 물의 최대 밀도점인 4°C 인 경우 냉각유체의 유입방향 변화에 대한 상경계면 형상은 유입방향이 상향인 경우가 빙축열탱크의 상·하부에서의 응고형상이 고르게 나타난 반면, 하향인 경우는 냉각유체의 입구온도 조건에 의한 열전도의 지배적인 영향으로 상부의 응고층이 하부보다 두꺼운 것으로 나타났다.
2. 가로방향 배열의 두 수직원관 사이는 서로 얼음으로 연결되어 제빙되기 때문에 제빙표면적

이 감소하게 되고, 얼음에 의한 열저항이 급속히 증가함에 따라 응고과정이 진행되면서 얼음 충전율(IPF)의 증가율은 둔화되었다.

3. 응고과정시 상변화물질로부터 방열되는 총 응고에너지(E_{tot})는 초기온도가 7°C와 4°C의 두 경우 모두 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 크게 나타났다.
4. 상변화물질의 초기온도가 7°C이고 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우 평균 빙축열 효율은 약 61.8%, 하향의 경우는 약 56%를 나타내고 있으며, 초기온도가 4°C인 경우는 상향이 약 56%, 하향이 약 49%의 평균 빙축열 효율을 나타냄으로써 초기온도가 7°C와 4°C인 두 경우 모두 냉각유체의 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빙축열 효율이 높은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 1996년도 한국과학재단(특정연구과제 : 94-0200-10-01-3)의 연구비 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. S. L. Chen, J. S. Yue, 1991, "A Simplified Analysis for Cold Storage in Porous Capsules with Solidification", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 113, pp.108~116
8. 윤정인 외, 1995, "수평 2열 원통관 주위의 동결형상에 관한 연구", 공기조화·냉동공학회지, Vol. 7, No. 1, pp.89~97
9. 임장순 외, 1996, "빙축열조내 부피 축소 및 부양을 고려한 얼음의 용융과정에 관한 실험적 연구", 한국태양에너지 학회지, Vol. 16, No. 1, pp.19~27

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics during the Freezing Process of Water in the Vertical Multi Tube Type Ice Storage Tank

Y. K. Kim^{*}, C. S. Yim^{**}

^{*} *Graduate School In-ha University*

^{**} *Department of Mechanical Engineering, In-ha 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 timewise variation of the interface profiles between the solid and the liquid were visualized, and the heat transfer characteristics of the Phase Change Material(PCM) in the ice storage tank were investigated.

During the freezing processes in the ice storage tank with several vertical tubes, decrease of the heat transfer area and the heat resistance of the ice layer made the increasing rate of ice packing factor(IPF) less.

The total freezing energy for the upward flow of the secondary fluid was higher than that for the downward flow.

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