

수직 원통형 축열조내 물의 응고 과정시
열전달에 관한 실험적 연구
(작동 유체의 유동방향에 따른 열저장 성능 비교)

A Study of Heat Transfer during Freezing Process of
Water in a Vertical Cylinder.

허 경*, 김 영 기, 김 영 중 (인하대학교 대학원)
김 준 근 (인하대학교 박사후 과정), 임 장 순 (인하대학교 기계공학과)

ABSTRACT

Heat transfer phenomena during freezing process of the water in a vertical cylinder were experimentally studied. Purified water was inserted into the vertical cylinder. Experiment was performed with two conditions ; the inlet temperature of the working fluid was maintained to be -10°C and the direction of the working fluid was to be upward or downward. Both the mean temperature of the liquid and temperature difference of cylinder tube wall in the upward were lower than those in the downward. In addition, shape of ice layer in the upward was more uniform than that in the downward. Finally, time-varying total heat energy stored in the water in the upward was higher than that in the downward.

1. 서 론

최근 에너지 수요의 증가로 인하여 대체에너지 및 심야전력의 효율적인 이용방안의 하나로 에너지 저장에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1),2),3)} 효율적 에너지 저장방법인 잠열이용형 열에너지 저장방법에서 축열매질로 사용될 수 있는 물은 여타의 유·무기 상변화물질(PCM)보다 경제성 및 화학적 안정성이 우수하여 빙축열장치의 축열매질로서 널리 사용되고 있으나, 이에 대한 잠열축열 매질로서의 각종 설계 자료는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는 관외착빙형 빙축열조의 일종인 수직원통형 빙축열조에서, 유입되는 작동유체의 유동방향 및 축열조의 형상비 그리고 축열매질의 초기온도를

변화시켜 가며 각 조건에 따르는 축열매질의 온도분포, 용고형상을 측정하고 축열량을 계산한 후 이에 대한 각각의 결과를 비교, 검토하여 빙축열 System 설계시 유용한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

상변화물질의 용고과정시 수직원통 내부의 평균온도 (Mean-temperature) 는 고상 및 액상의 각 지점에서 측정된 온도들을 사용하여 구하였다.⁴⁾

$$\bar{T}_l = \frac{1}{\rho_l V_l} \int \rho_l t_l dV_l, \quad \bar{T}_s = \frac{1}{\rho_s V_s} \int \rho_s t_s dV_s$$

수직 원통 내부의 용고된 상변화물질의 질량과 비열을 M_{s1} , C_s 라 하고, 잔여 액상 상변화물질의 질량과 비열을 M_{l1} , C_l 이라 하면 액상으로 남아있는 상변화물질이 초기온도 T_{ini} 부터 액상 평균온도 \bar{T}_l 까지 냉각될때 축열되는 현열에너지 E_{s1} , 액상 상변화물질이 용고시 축열되는 잠열에너지 E_λ , 용고된 상변화물질이 용융점온도 이하인 고상 평균온도 \bar{T}_s 까지 냉각될때 축열되는 현열에너지 E_{s2} 와 초기온도 T_{ini} 부터 용융점온도 T_m 까지 냉각될때의 현열에너지 E_{s3} 는 다음과 같으며, 총축열량은 이들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_{s1} = M_{l1} \cdot C_l \cdot (T_{ini} - \bar{T}_l) \quad E_{s2} = M_{s1} \cdot C_s \cdot (T_m - \bar{T}_s)$$

$$E_{s3} = M_{s1} \cdot C_l \cdot (T_{ini} - T_m) \quad E_\lambda = \lambda \cdot M_{s1}$$

$$E_{tot} = E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} + E_\lambda$$

3. 실험장치 및 실험방법

실험장치의 주요부는 항온 시스템, 수직 원통형 빙축열조, 제어장치, 순환 펌프, 전자 유량계, Brine Chiller, 온도측정장치 및 기록장치 등으로 이루어져 있으며 그 개략도는 Fig. 1 과 같다. 실험 수행동안 열손실을 최소화하기 위한 단열방법으로 시간에 따라 변하는 수직원통형 빙축열조 내벽의 온도와 항온 시스템의 내부온도를 동일하게 유지시켰다. 실험에 사용된 수직 원통형 빙축열조는 가시화를 하기위해 내경 104 mm, 길이 250 mm, 두께 3 mm의 Pyrax 재질의 유리관을 사용하였으며, 용고형상을 관찰하기 위하여 항온 시스템 전면과 후면에 두께 10 mm의 Acrylic Plate를 설치한 후 전면에서 CAM-Corder (삼성 SV-H33)를 이용하여 용고형상을 촬영하였다. 용고과정 중 축열조 내부 상변화 물질의 온도를 측정하기 위한 열전대(T-type, ϕ

=0.1 mm)의 위치는 Fig. 2 에 나타내었고, 항온 시스템을 제어하기 위한 열전대는 항온 시스템 내부의 상부 및 하부 2 지점에 설치하였다. 각각의 측정된 온도와 촬영된 영상들은 Data Acquisition System (Fluke 2280B) 및 Video recorder (삼성 SV-8200)을 이용하여 PC에 기록하고 이를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 축열조의 형상비(H/R)가 4 이고 축열매질의 초기온도가 7 ℃ 인 경우 시간경과에 따른 축열조내 상부 및 하부에서 나타난 물의 온도분포이며 작동유체의 유동방향이 상향인 경우 냉각 과정 중 물의 최대밀도점인 4℃ 부근에 도달한 약 15 분 경과 후 부터 축열조내 물의 상부지점 온도가 하부지점 온도보다 낮아지는 온도역전 현상이 나타나나 온도 측정점에서 얼음이 생성된 이후부터 냉각관의 하부에서 유입되는 작동유체의 온도 영향으로 인해 축열조내 물의 하부지점 온도가 상부지점 온도보다 낮아지는 온도역전현상이 한번 더 나타났다. 작동유체의 유동방향이 하향인 경우에는 4 ℃ 부근에서 온도 역전현상이 나타나나, 유입구 부분에서의 작동유체 온도 영향으로 인해 상향인 경우와는 다르게 얼음 생성후에는 온도 역전현상이 나타나지 않는다. Fig. 4 는 축열조의 형상비와 작동유체의 유동방향에 따른 수직원관 벽면 상부와 하부지점 사이의 온도 차이를 나타낸 그림으로 형상비 2, 유동 방향이 상향인 경우는 상부 및 하부 지점에서의 온도 차이는 거의 나타나지 않으나 형상비가 4이고 유동방향이 상향인 경우에는 냉각과정 초기에 자연대류 현상이 활발히 나타나 하향의 경우보다 수직원관 벽면 상부지점과 하부지점 사이의 온도 차이가 크게 나타나며 중반 이후부터는 하향의 경우보다 작은 차이를 나타낸다.

Fig. 5 는 형상비 4, 초기온도 7 ℃인 경우의 시간에 따른 상경계면의 변화로써 상향의 경우, 30분대에 나타난 상경계면의 형상은 하부 액상영역의 온도분포가 상부보다 낮고 또한 작동유체의 유입구가 하부이므로 응고두께는 상부보다 두껍게 나타났다. 따라서 실험 초기인 30 분대까지는 하부가 상부보다 응고두께가 두꺼운 경향을 보이며 4 ℃인 최대 밀도점을 지난 60 분 이후의 상경계면은 온도가 낮은 유체들이 상부에 위치하므로 작동유체의 유입구 영향보다는 자연대류의 영향으로 인하여 상부가 하부보다 응고두께가 두꺼운 경향을 보인다. 하향인 경우, 30 분대 상경계면은 작동유체 유입방향에도 불구하고 0.8 H 이상에서는 상경계면이 전열면 방향으로 기울어 있으며, 그 이후로부터 상경계면은 유입구의 영향에 의한 전도 열전달과 자연대류에 의해 상부가 하부보다 응고두께가 두껍게 나타났다. Fig. 6 은 형

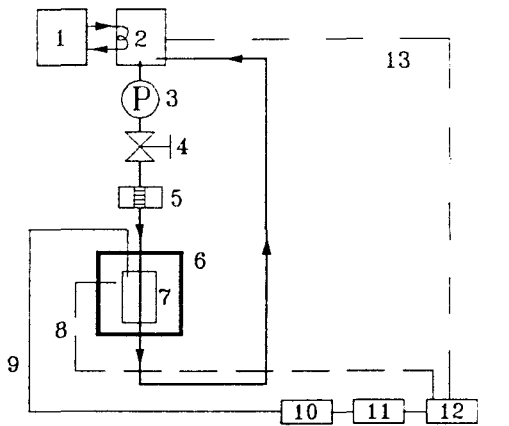
상비 4, 초기온도 1 ℃인 경우로써 상향, 하향 모두 상경계면의 형상이 전도 열전달의 영향으로 작동유체 유입구 부분이 더 두꺼워진다. Fig. 7 은 자연 대류의 세기와 시간이 경과함에 따라 나타나게 될 응고형상을 예측할 수 있는 형상비 2, 4인 경우의 각 조건들에서 액상내 평균온도 분포의 결과를 나타낸 것이며, 형상비가 2인 경우의 평균온도 분포는 작동유체 유입방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 실험 초기에 좀더 빨리 축열매질을 냉각시키는 경향을 보여주고 있다. 형상비 4, 축열조 초기온도 7 ℃인 경우의 상향 및 하향 조건에 대한 결과를 비교할때 상향일 경우의 액상내 평균온도가 빠르게 하강되며, 4 ℃ 및 1 ℃일 경우는 형상비 2일 경우의 온도분포와 유사한 경향을 보인다. Fig. 8 은 형상비(H/R)가 4인 경우에 있어서 단위 질량당 축열된 응고 에너지 변화를 나타낸 것으로, 초기온도 7 ℃인 경우 실험시작 시간으로부터 60 분 경과후 부터는 상향인 경우가 하향인 경우보다 축열량이 많아지며, 초기온도 1 ℃인 경우는 초기 과정부터 상향인 경우가 하향인 경우보다 축열량은 약간 크게 나타난다.

5. 결 론

1. 축열조내 상변화 물질의 초기온도가 7 ℃인 경우 냉각과정중 액상 상변화 물질의 온도가 4 ℃ 에 도달한 이후부터는 액상 영역상부의 온도분포가 하부의 온도분포보다 낮으며 초기온도가 4 ℃ 와 1 ℃인 경우는 액상영역의 온도분포는 상부가 하부보다 낮다.
2. 작동유체가 통과하는 수직원관의 외부벽면 하부 지점과 상부 지점간의 온도는 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우에 비해 그 차이가 작아 상향일 경우에 있어서 수직원관 주위에 얼음이 형성될 시 축열조내 상변화 물질의 상부 및 하부의 응고두께가 거의 동일하게 나타나는 원인이 된다.
3. 작동유체의 유동방향이 상향일 경우 상변화 물질의 초기온도가 7 ℃ 또는 4 ℃인 조건에서는 상변화물질의 상부 및 하부의 응고 두께가 거의 동일하게 나타나나 초기온도가 1 ℃인 경우에는 유입구 지점에서의 작동유체 입구 온도 영향으로 하부에서의 응고 두께가 상부보다 두텁게 나타나며, 작동유체의 유동방향이 하향일 경우에는 상변화 물질의 초기온도와는 관계없이 상부에서의 응고 두께가 하부보다 두껍게 나타난다.
4. 액상 영역에서의 평균온도는 형상비가 작을수록 빨리 강하되며, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 강하된다.
5. 축열량은 동일한 초기온도 조건에서는 작동유체 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우 보다 많아진다.

참고 문헌

- 1) S. Fukusaku, M. Yamada, 1993, "Some Topics on Melting Heat Transfer Problems", 4th Int. Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions, New Hampshire, pp. 3-16
- 2) 김 영인 등, 1989, "공조용 축열 시스템 개발(II)", 과학 기술처
- 3) 김 윤동 등, 1991, "심야 전력을 이용한 빙축열 기술개발", 한국 전력공사
- 4) E. M. Sparrow, J. A. Broabent, 1983, "Freezing in a vertical Tube", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 217-225



1. Brine chiller
2. Cooling chamber
3. Circulation pump
4. Fluid control valve
5. Magnetic flowmeter
6. Adiabatic chamber
7. Test section
8. Control line for adiabatic chamber
9. Thermocouple
10. Data logger
11. P.C
12. Thermo controller
13. Control line for cooling chamber

Fig 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

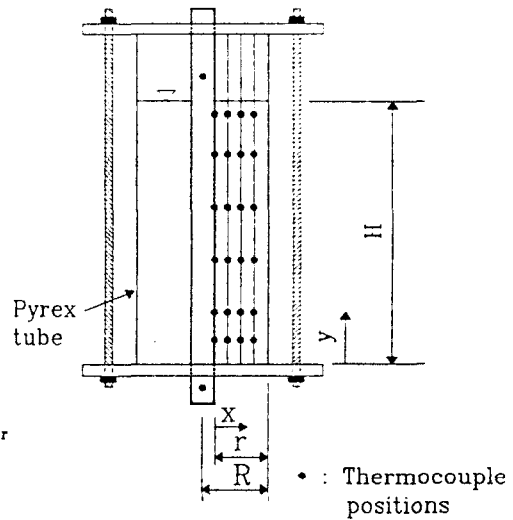
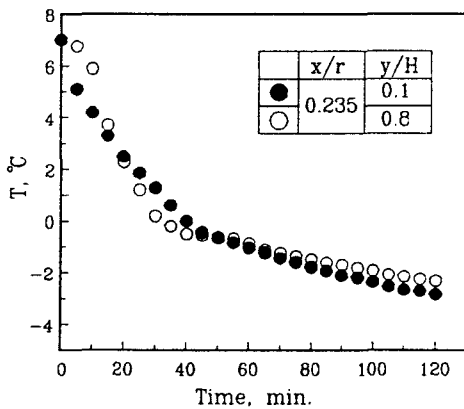
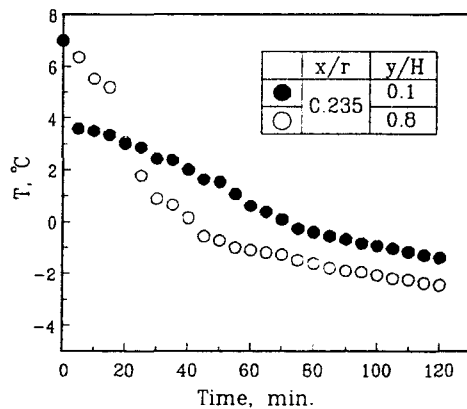


Fig 2. Thermocouple positions in the test section.



a) Upward flow



b) Downward flow

Fig. 3 Temperature profiles at the different position of y/H .
($T_{in} = 7^\circ\text{C}$, $H/R = 4$)

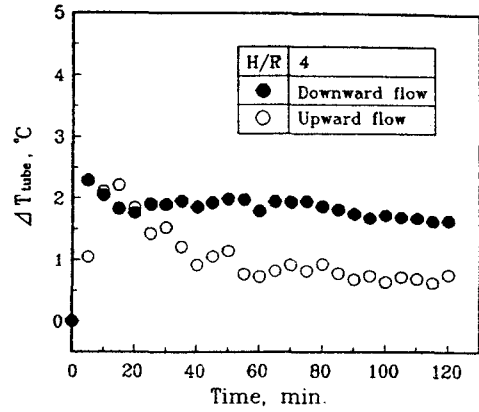
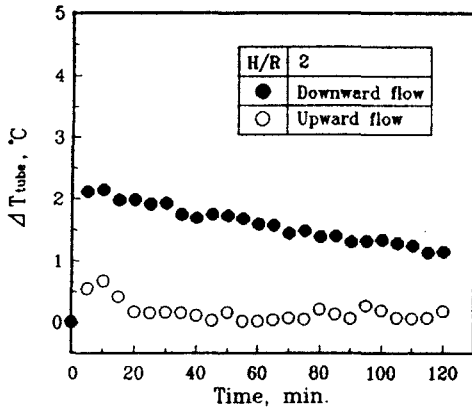
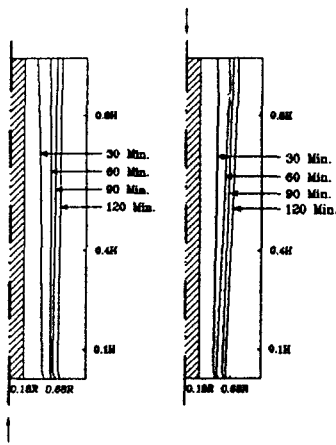
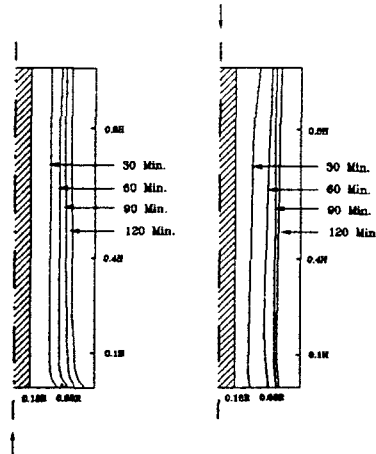


FIG. 4 Difference of the tube temp. for the upper part and lower part. ($T_{\text{ini}}=7^\circ\text{C}$)



a) Upward flow b) Downward flow

Fig. 5 Timewise variations of solid-liquid interfaces. ($H/R=4, T_{\text{ini}}=7^\circ\text{C}$)



a) Upward flow b) Downward flow

Fig. 6 Timewise variations of solid-liquid interfaces. ($H/R=4, T_{\text{ini}}=1^\circ\text{C}$)

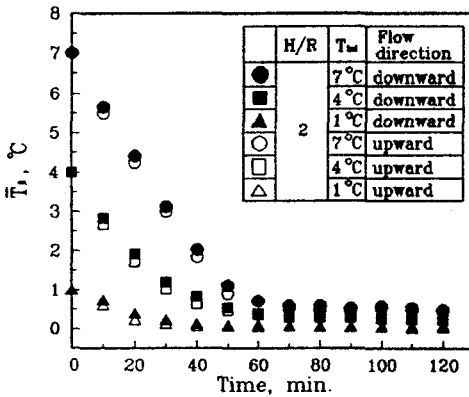
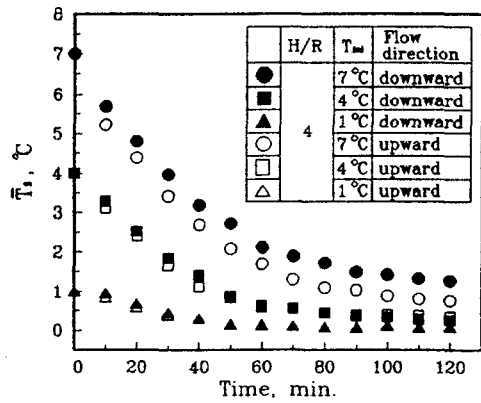


Fig. 7 Mean temperature of the liquid on various aspect ratio.



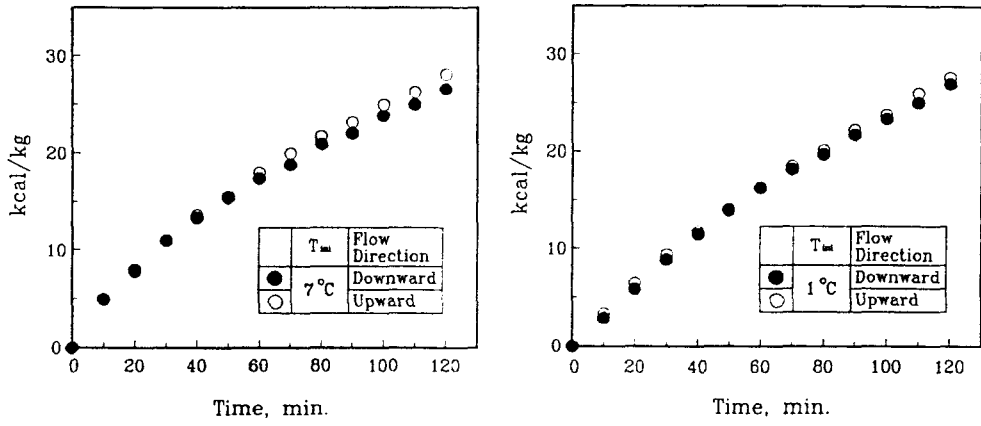


Fig. 8 Timewise variations of frozen energy during cooling process on the initial temperature of water. ($H/R=4$)