

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 15, No. 2, 1995

수직원통형 축열조내 물의 응고과정시 열전달에 관한 실험적연구 -작동유체의 유동방향에 따른 열저장성능 비교-

허 경* · 김영기* · 김영중* · 김준근** · 임장순***

* 인하대학교 대학원
** 인하대학교 박사후 과정
*** 인하대학교 기계공학과

A Study of Heat Transfer during Freezing Process of Water in a Vertical Cylinder -Comparison of thermal storage performance on the working fluid direction-

K. Heo* · Y. K. Kim* · Y. J. Kim* · J. K. Kim**, C. S. Yim***

* Graduate School, Inha University
** Post Doctor, Inha University
*** Inha University

요 약

본 연구는 용융점 온도가 0°C인 순수 물이 수직원통형 빙축열조 내에 각각 형상비(H/R)가 4와 2인 형태로 채워져 있을 경우 수직원관 내로 유입되는 작동유체의 온도를 -10°C, 유량을 10 liter/min로 고정시킨 후 유동방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우 시간경과에 따라 나타나는 물의 응고형상, 수직원통의 온도분포, 수직원관의 온도분포, 축열량에 대한 열전달현상을 실험적으로 규명한 것이다.

축열조내 물의 온도분포는 초기온도가 7°C인 경우 냉각과정중 축열조내 상부가 하부보다 높고 시간경과 후 물의 최대밀도점인 4°C 이하에서는 축열조 하부가 상부보다 높으며, 초기온도가 4°C 와 1°C인 경우는 물의 밀도값이 최대점인 4°C 이하이므로 실험시작 초기부터 하부가 상부보다 온도분포가 높게 나타났다.

응고과정 시에는 동일한 초기온도 하에서 작동유체의 유동방향이 상향일 경우가 하향일 경우보

다 축열조내 자연대류 유동이 활발하여 액상의 평균온도는 빠르게 강하되고 수직원관 외벽면의 상·하부 온도차이도 적으며, 응고형상은 축열조내 물의 초기온도가 7°C와 4°C 일 때 상·하부에서 고르게 진전된다. 축열조내 물의 초기온도가 1°C인 경우는 전도열전달의 영향이 지배적이므로 응고층의 생성은 작동유체 유동방향으로 형성되어진다. 축열량은 형상비에 관계없이 초기온도가 높을수록 크게 나타났으며, 동일한 초기온도 하에서도 작동유체의 유동방향이 상향으로 유입될 경우가 하향에 유입되는 경우보다 시간경과 후 크게 나타났다.

Abstract

An effective heat transfer during freezing process was proposed in the vertical cylinder to improve the effectiveness of the heat storage.

Vertical cylinder was filled with pure water in order to investigate ice-shape, temperature distribution of the liquid, temperature distribution of the cylinder tube wall, total heat storage per unit mass in the test section under the two experimental conditions; inlet temperature of working fluid is constant(-10°C) and inlet direction of working fluid is either upward flow 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 case that the initial temperature of water was 7°C and 4°C, the shape of ice layer in the upward was more uniform than that in the downward. In case of 1°C, the shape of ice layer is formed by inlet direction of working fluid.

Finally, time-varying total heat energy stored in the water in the upward was higher than that in the downward.

Nomenclature

C : Specific heat of PCM
 H : Height of cylinder
 R : Radius of cylinder
 r : Distance between cylinder wall and tube wall
 \bar{T} : Mean temperature
 t : Temperature
 ΔT_{tube} : Temperature difference between upper and lower part of tube wall
 V : Volume
 x : Radial direction coordinate
 y : Vertical direction coordinate

Greek symbols

α : Thermal diffusivity
 ρ : Density
 λ : Latent heat of fusion

Subscripts

ini : Initial
 m : Melting point
 ℓ : Liquid phase
 s : Solid phase

Abbreviation

PCM : Phase Change Material

I. 서 론

최근 에너지 수요의 증가로 인하여 에너지의 효율적인 이용 및 심야전력의 이용방안의 하나로 에너지 저장에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1, 2, 3)} 에너지 저장방법중 열에너지 저장 방법으로는 현열이용형 열에너지 저장방법과 잠열이용형 열에너지 저장방법으로 나뉘어 지며 잠열이용형 열에너지 저장방법에 관한 연구 중에서 난방장치의 효율증대를 목적으로 하는 축열 시스템의 연구는 그동안 활발히 진행되어 왔으나, 냉방장치의 효율증대를 주목적으로 하는 냉방용 축열 시스템에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이며, 냉방용 축열매질로서 물을 사용할 경우 축열밀도가 비교적 크고, 경제성, 화학적 안정성이 유·무기 물질 PCM보다 우수하므로 국내외에서 빙축열 시스템(ice storage system)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

빙축열 시스템은 제빙방식에 따라 정적형(static type)과 동적형(dynamic type)으로 분류할 수 있으며, 정적형 빙축열 system의 일종인 관외 착빙형의 경우, 제작이 비교적 용이하고 기존의 공기조화 system을 바로 이용할 수 있는 장점이 있으나, 전열면 외벽에 상변화물질의 응고시 응고두께가 증대될수록 열저항이 증가하여 system 성능이 저하된다.^{3, 4)} 열전달에 영향을 미치는 인자중 전도열전달 및 자연대류 열전달은 정적형 빙축열 system 내 상변화 물질의 응고과정시 중요한 인자이며, 또한 정적형 빙축열 system에서의 축열과정중 축열조내 잔여 액상영역의 자연대류 열전달은 시간경과 후 생성되는 응고층 형상에 크게 중요한 인자로 사료된다.

물을 상변화물질로 사용하는 빙축열조에서의 응고과정 해석은 전열면이 등온일 경우가

대부분이며, 전열면이 등온으로 생각되지 않을 경우의 온도변화에 따른 상경계면의 응고형상 및 이에 따른 축열조내 축열매질의 온도분포, 축열량에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 관외 착빙형 축열조의 일종인 수직원통형 빙축열조에서 수직원관으로 유입되는 저온 작동유체의 유동방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 경우에 나타나는 수직원관의 온도분포, 축열조 내부의 온도분포, 상변화물질의 응고형상을 실험적으로 규명하고, 축열량을 계산한 후에 이를 비교·검토하여 관외 착빙형 빙축열 system의 효율개선에 유용한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig.1에, 상변화물질이 채워진 수직원통(test section)의 개략도는 Fig.2에 각각 나타내었다.

실험장치의 주요부로는 항온 system, 수직원통형 빙축열조, 제어장치, 순환 pump, 전자유량계, brine chiller, 온도측정장치 및 기록장치 등으로 이루어져 있으며 축열조내 상변화물질의 설정된 초기온도(7°C, 4°C, 1°C)를 평형상태로 유지하기 위하여 항온 system으로 사용한 냉동장치의 압축기를 온도제어장치로 제어하였다. 그리고 실험을 수행하는 동안 열손실을 최소화하기 위한 단열방법으로 시간에 따라 변화하는 수직원통 내벽의 온도와 항온 system 내부의 온도를 일정하게 유지시켰다. 실험에 사용된 수직원통형 빙축열조는 내경 104mm, 높이 250mm, 두께 3mm의 pyrax 재질의 유리관이며, 시간경과에 따른 응고형상을 가시화하기 위하여 항온 system의 전면과

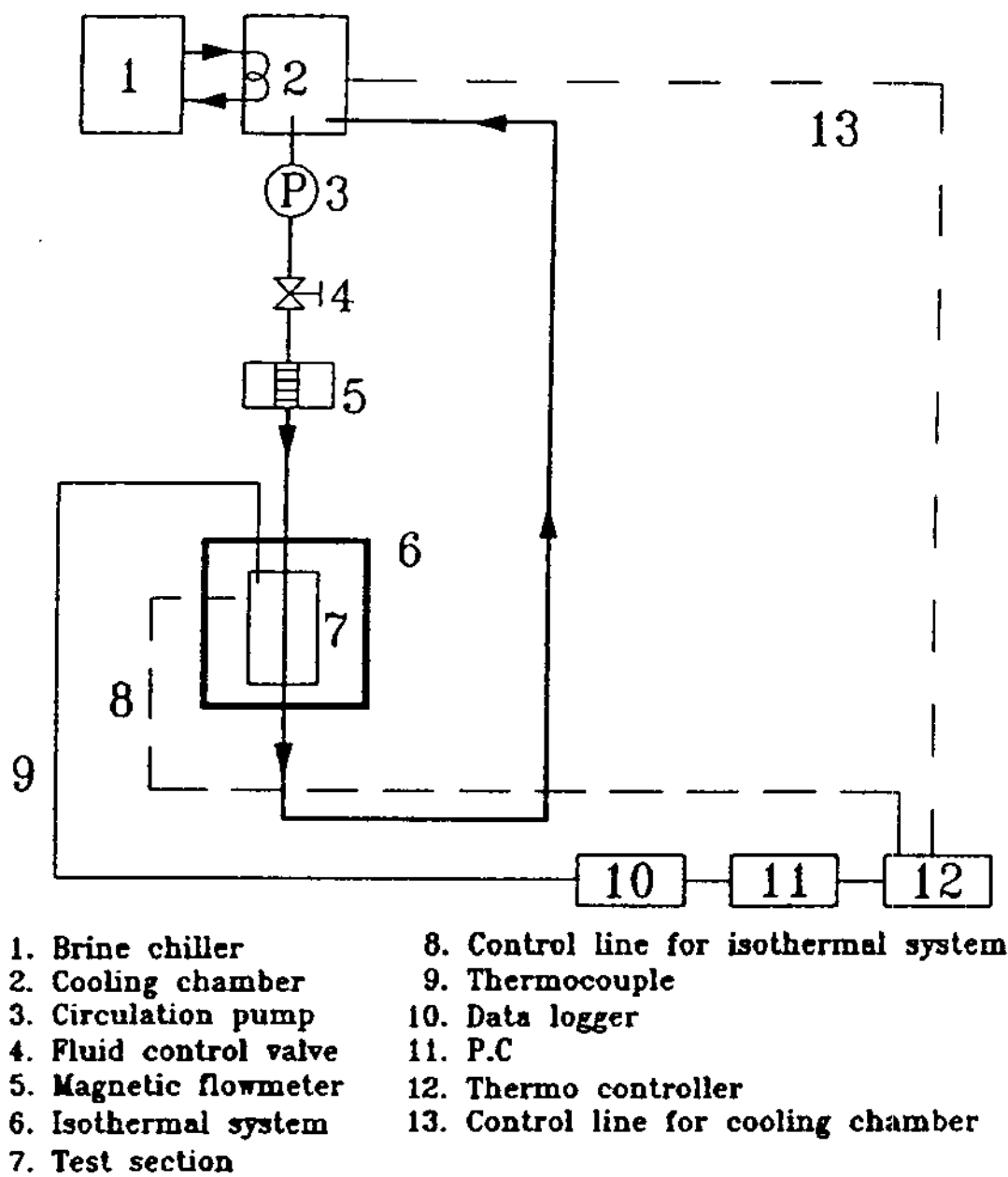


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

후면에 두께 10mm의 acrylic plate를 설치하여 후면에서 halogen lamp를 광원으로 사용하고 전면에서 camcorder를 이용하여 시간경과에 따라 변화하는 응고형상을 촬영하였다. 응고과정중 수직원통내 상변화물질의 내부온도를 측정하기 위한 열전대(T-Type, $\phi=0.1\text{mm}$)는 Fig.2에서 나타낸 바와 같이 형상비(H/R)가 4인 경우에는 수직원관 벽면에 6개, 수직원통 내부에 18개를 부착하였으며, 형상비(H/R) 2인 경우에는 수직원관 벽면에 3개, 수직원통 내부에 9개를 부착하였다. 항온 system을 제어하기 위한 열전대는 항온 system 내부의 상·하부 2지점에 설치하였다. 또한 축열조 내로 유입되는 작동유체 입·출구관의 중앙부에 각각 2개를 설치하였으며, 축열조 내로 유입되는 작동유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위하여 brine chiller내 상·하부에 2개를 설치하여 온도 제어장치로 brine

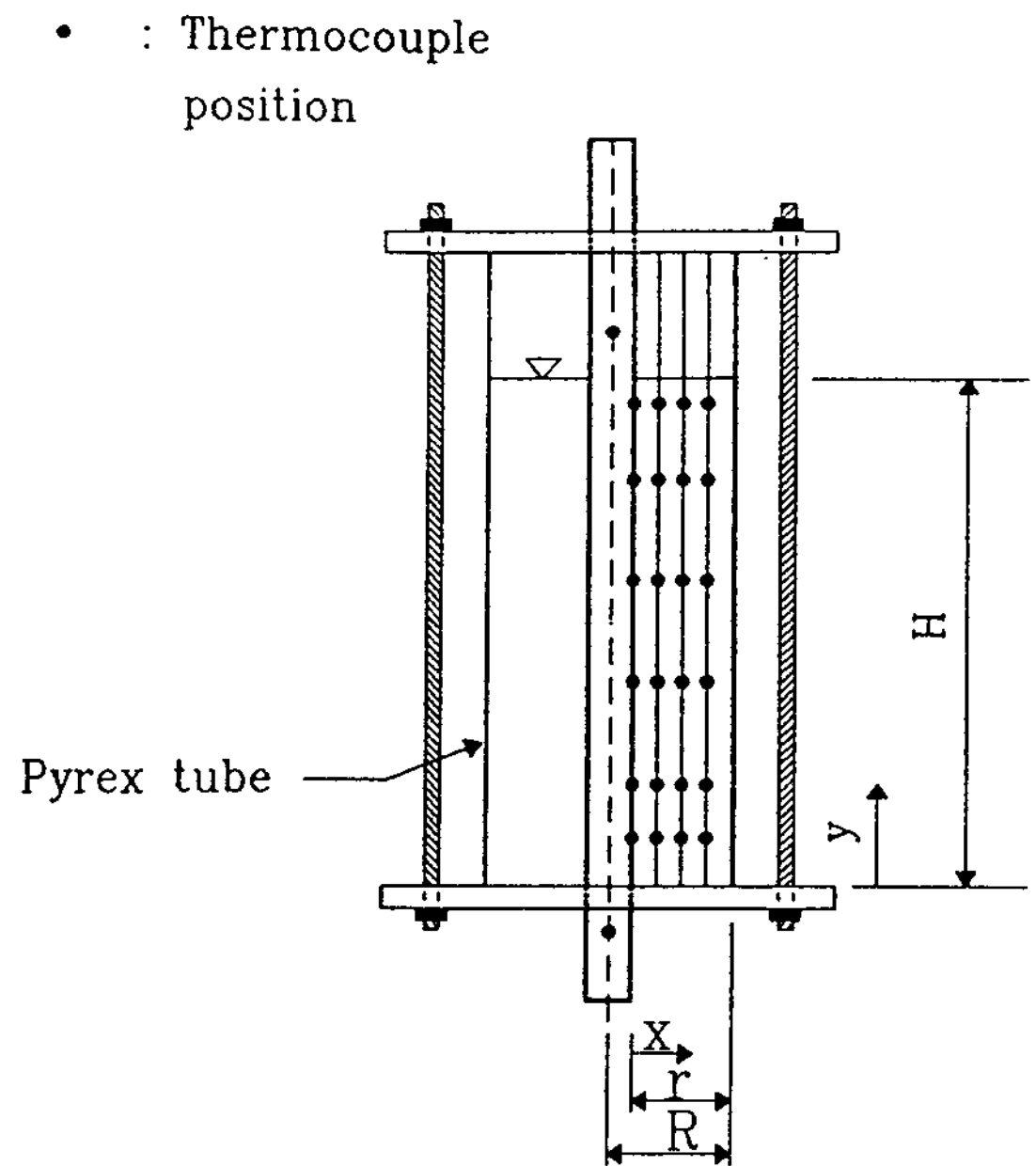


Fig.2 Thermocouple positions in the test section.

chiller의 압축기를 제어하였다.

각각의 열전대에서 측정된 온도들은 data acquisition system(Fluke 2280B)을 사용하여 PC에 기록하였으며, 촬영된 영상들은 video recorder를 이용하여 PC에 화상 data로 기록하고 이를 분석하였다.

III. 실험방법

본 실험에서 사용된 상변화물질은 용융점이 0°C 인 순수한 물이며 이에 대한 물성치를 Table 1에 나타내었다.

본 실험은 수직원통형 빙축열조 내에 1.6liter(형상비 4)의 물이 채워져 있는 경우와 0.8 liter(형상비 2)의 물이 채워져 있는 경우에 빙축열조내의 수직원관으로 유입되는 저온 작동유체의 온도를 -10°C , 유량을 10liter/

min로 고정시키고 축열조내 물의 초기온도를 각각 7℃, 4℃, 1℃, 작동유체의 유동방향을 상향과 하향으로 변화시켰을 때 응고과정시

변화되는 수직원관 벽면의 온도분포, 축열매질의 온도분포, 축열량, 응고형상을 실험적인 방법으로 관찰한 것이다. 실험에 사용된 각 실험조건들을 Tabel 2.에 나타내었다.

Table 1. Thermophysical properties of pure water.

Properties	Value	Properties	Value
T_m (°C)	0	λ (kJ/kg)	334.4
C_e (kJ/kg · °C)	4.18	α_e (m ² /s)	1.333×10^{-7}
C_s (kJ/kg · °C)	2.05	α_s (m ² /s)	1.176×10^{-6}
ρ_e (kg/m ³)	999	k_e (W/m · °C)	0.557
ρ_s (kg/m ³)	916	k_s (W/m · °C)	2.206

수직원통형 빙축열조내 상변화물질의 초기 온도(7℃, 4℃, 1℃)를 열평형상태로 유지하기 위하여 약 6~8시간동안 항온장치를 설정된 초기온도에 따라 압축기를 제어하여 작동시켰으며 축열조내 상변화물질의 평균온도와 초기 설정온도와의 차가 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 이내일 때를 열평형상태로 가정하여 응고실험을 시작하였다. 또한, 실험과정중 수직원관 내로 유입되는 저온 작동유체의 온도를 -10°C 로 유지시키기 위하여 brine chiller의 압축기를 온도 제어 장치로 제어하였다. 축열조내 상변화물질의 온도는 data acquisition system(Fluke 2280B)을 통하여 30초 간격으로 측정·기록하였다. 시간경과에 따른 응고형상을 기록하기 위하여는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 항온조 후면에 halogen lamp를 설치하고 전면에서 camcorder로 촬영을 하였다.

Table 2. Experimental conditions.

Working fluid temperature	Aspect ratio (H/R)	Flow direction of working fluid	Initial temperature of water
-10°C	4	DOWNWARD	1℃ 4℃ 7℃
		UPWARD	
	2	DOWNWARD	
		UPWARD	

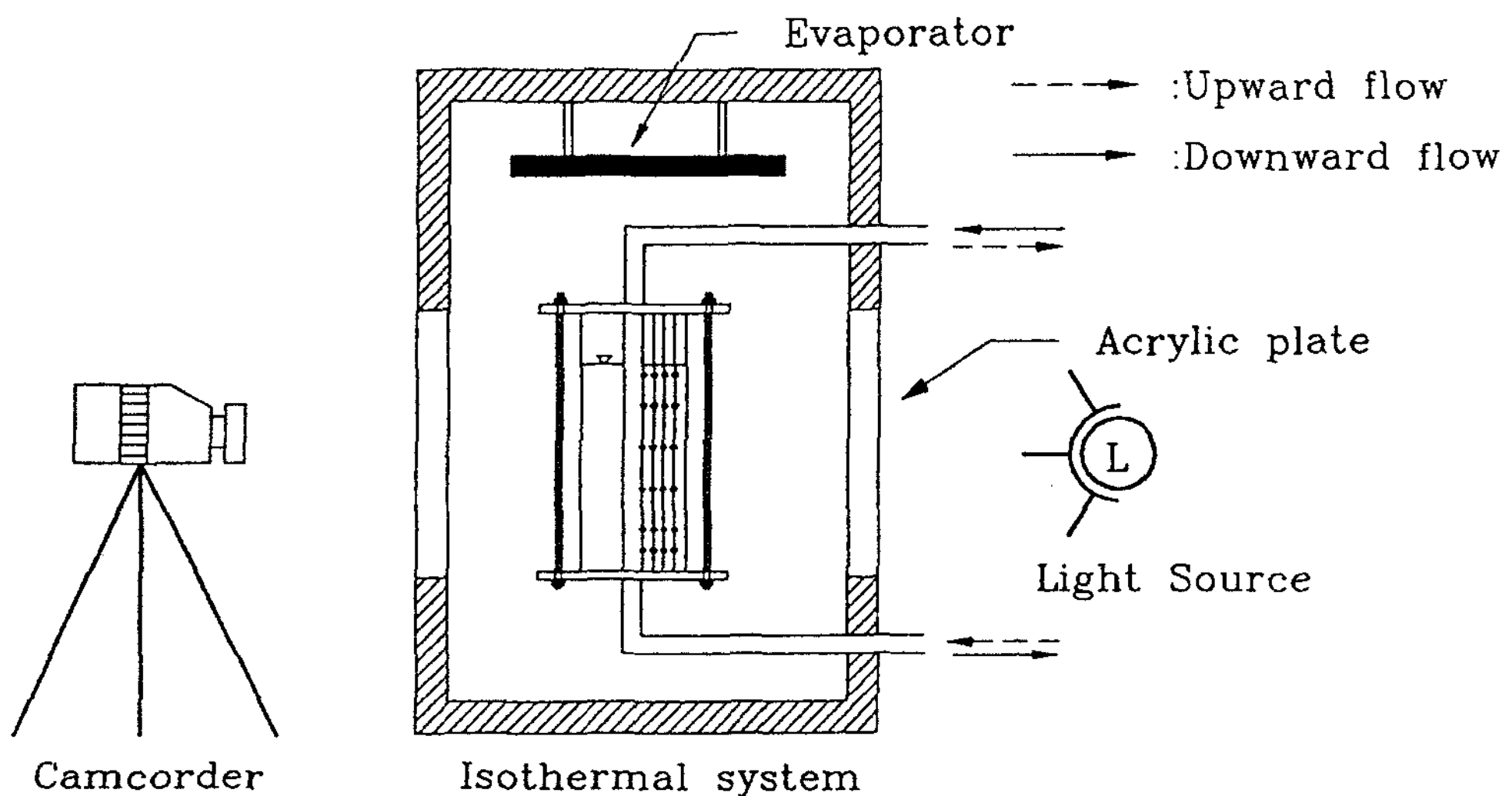


Fig.3 Schematic diagram of isothermal system.

IV. 결과 및 고찰

1. 온도 분포

1-1. 축열조내 온도분포

Fig.4와 Fig.5는 축열조 형상비(H/R)가 각각 4와 2이고 축열조내 축열매질의 초기온도

가 7°C인 경우 각 측정점에서의 시간경과에 따른 온도분포의 결과를 나타낸 것이다. 형상비(H/R) 4, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우 응고과정 초기에는 축열매질의 초기온도가 물의 최대밀도점인 4°C 이상이므로 상부(y/H=0.8)가 하부(y/H=0.1)보다 온도가 높으나

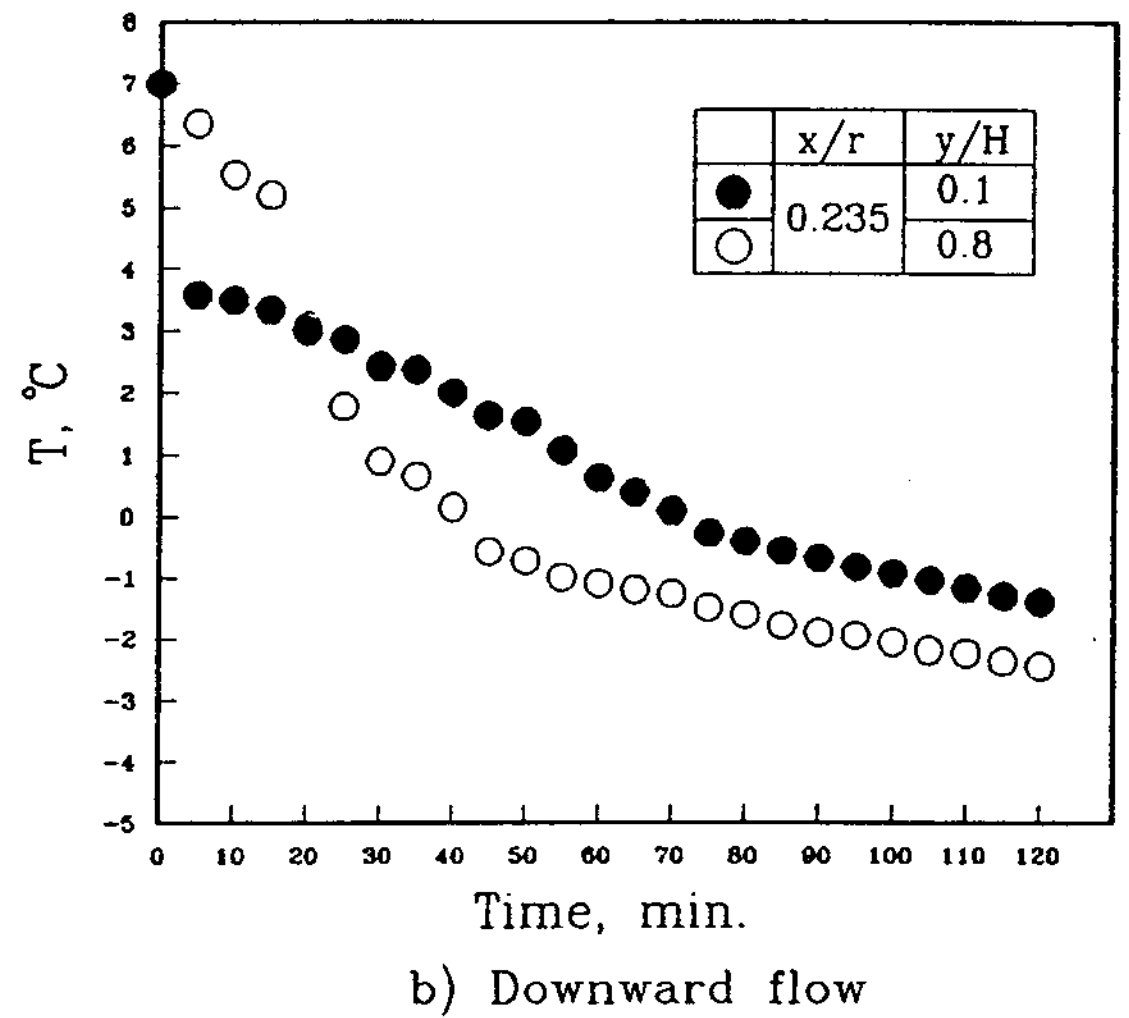
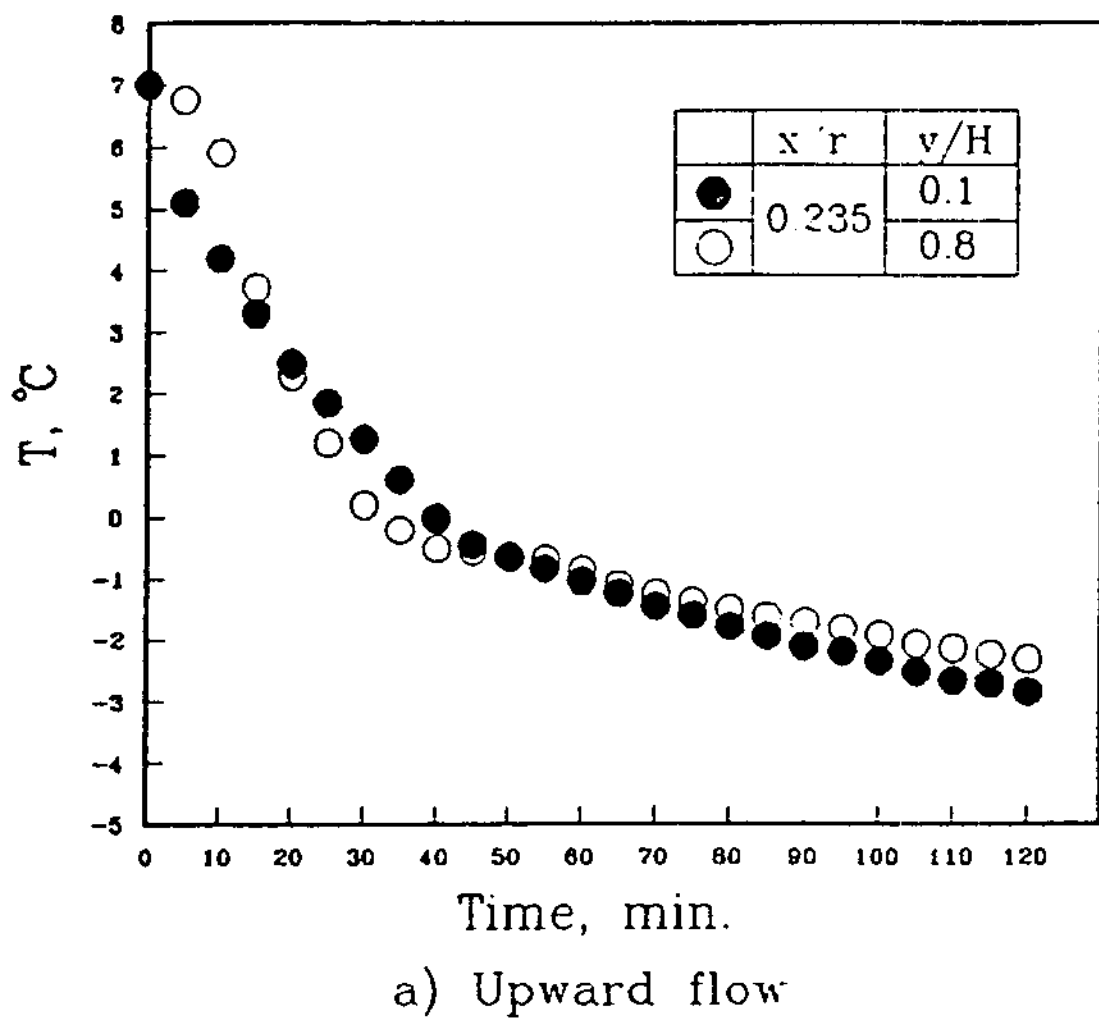


Fig.4 Temperature profiles at the different position of y/H. ($T_{in}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H/R=4$)

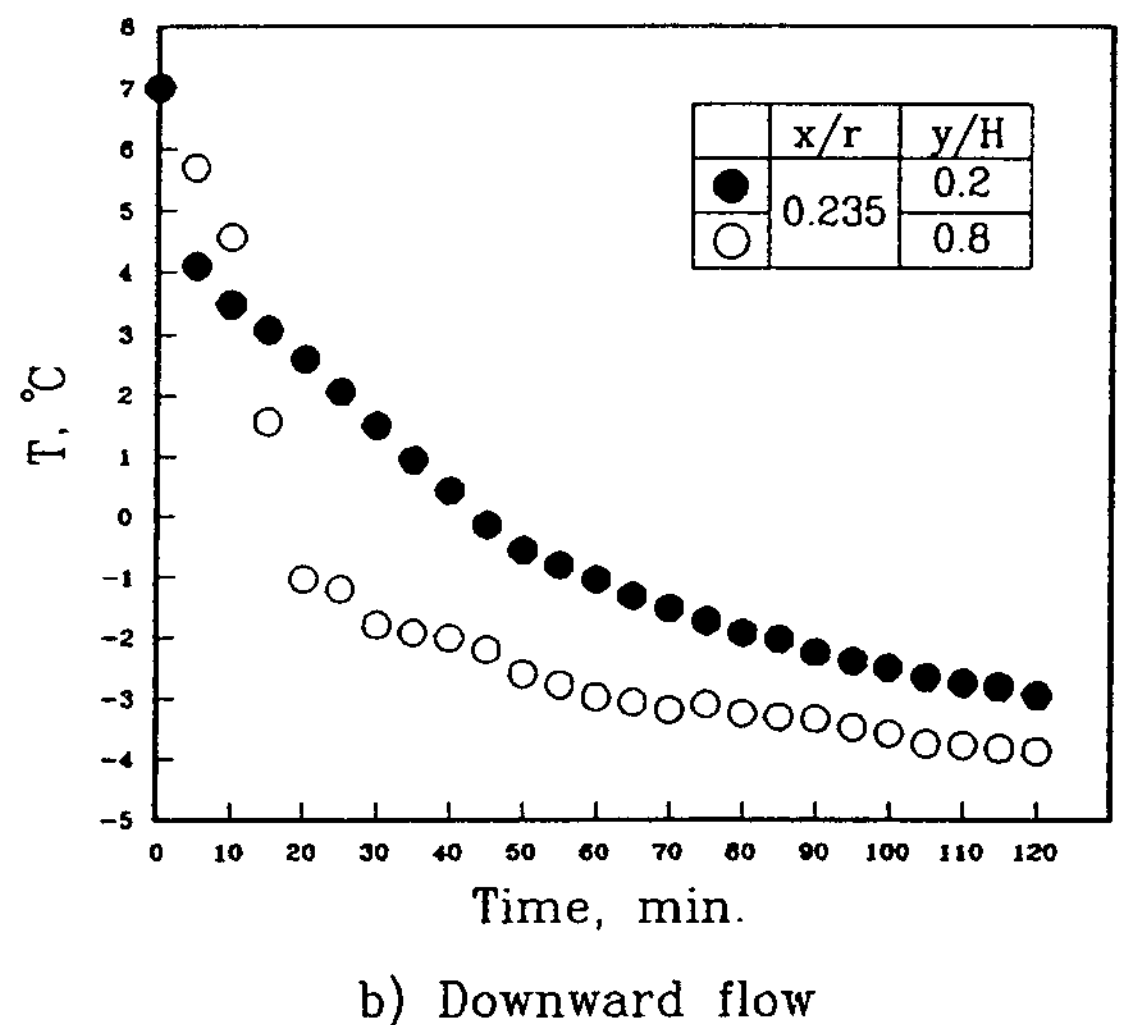
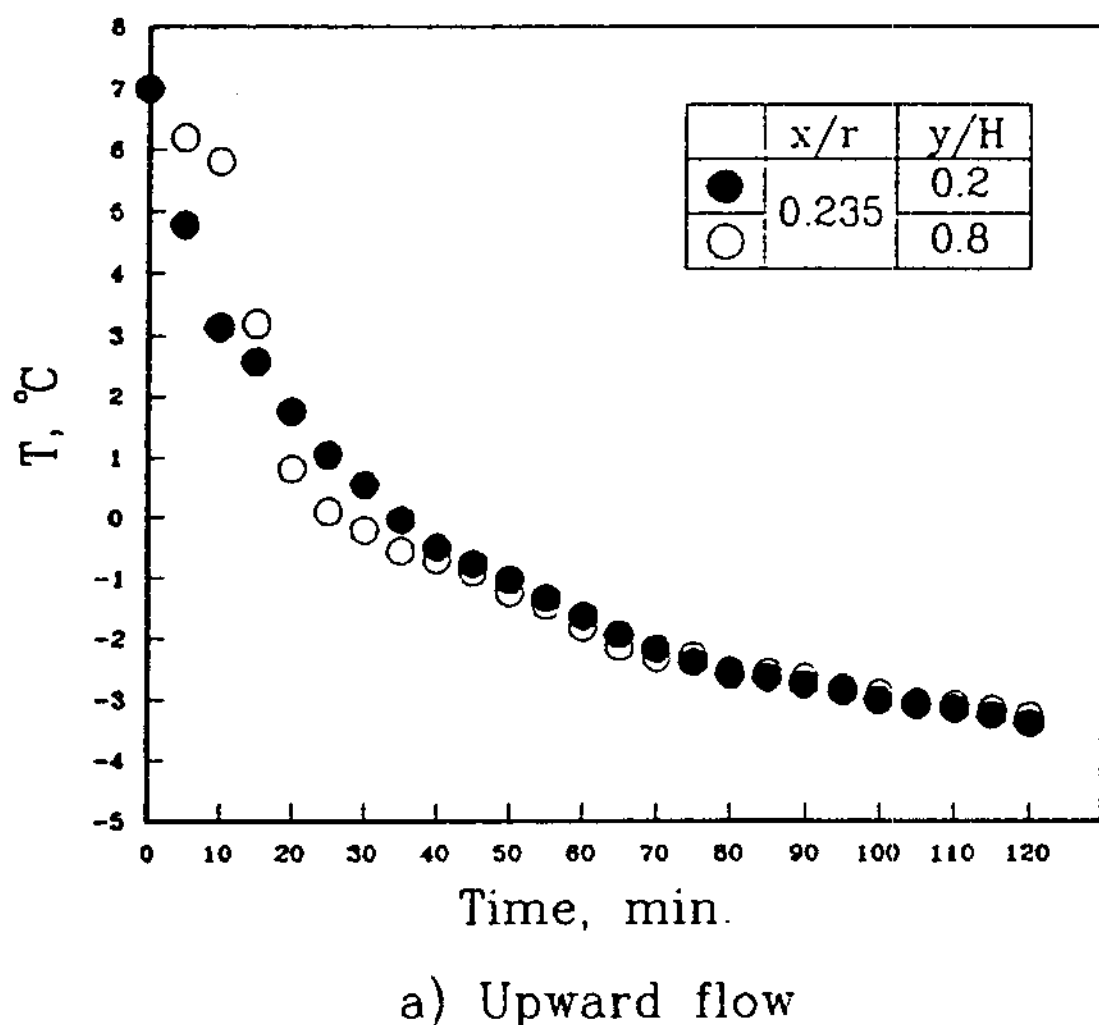


Fig.5 Temperature profiles at the different position of y/H. ($T_{in}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H/R=2$)

냉각과정중 측정점이 물의 최대밀도점인 4°C 부근에 도달한 약 15분 경과 후부터 축열조내 상부(y/H=0.8)가 하부(y/H=0.1)보다 온도가 낮으며 또한, 온도 측정점에서 얼음이 생성된 후에는 작동유체 유동방향의 영향으로 인해 하부(y/H=0.1)가 상부(y/H=0.8)보다 온도가 다시 낮아져 총 2번의 온도 역전현상이 나타났다. 작동유체의 유동방향이 하향인 경우에는 4°C 부근에서 온도 역전구간이 나타나지만, 작동유체 유동방향의 영향으로 인해 상향의 온도분포와는 달리 측정점에서 얼음생성 후에는 온도 역전현상이 다시 나타나지 않는다.

Fig.5는 축열조 형상비(H/R)가 2이고 축열조내 축열매질의 초기온도가 7°C인 경우 각 측정점에서 시간경과에 따른 온도분포의 결과를 나타낸 것이다.

상향에서의 온도 측정점은 액상인 경우에는 온도분포 특성이 형상비(H/R)가 4로서 초기온도가 7°C인 경우와 유사하게 나타났으나 측정점에서 얼음이 생성된 후에는 축열조 상·

하부에서의 온도분포 차이는 형상비(H/R) 4의 상향인 경우보다 작게 나타났다. 이는 작동유체의 유량과 유입온도가 일정한 조건에서 형상비(H/R) 2인 경우의 전열면으로 사용된 수직원관이 형상비(H/R) 4인 경우와 비교하여 길이가 짧기 때문에 수직원관 상·하부에서의 온도 차이가 작아 수직원관 벽면 상·하부가 등온인 조건에 가까워지기 때문인 것으로 사료된다.

1-2. 수직원관 벽면의 온도분포

Fig.6은 축열조의 형상비(H/R)가 각각 4와 2이고 축열조내 축열매질의 초기온도가 7°C인 경우의 등온으로 냉각되지 않는 수직원관 벽면 상부와 하부의 시간경과에 따른 온도분포 차이를 나타낸 것이다. 온도측정점의 위치는 형상비(H/R) 4인 경우 수직원관 벽면 하부로부터 높이 방향으로 y/H=0.1 및 y/H=0.8 위치이며, 형상비(H/R) 2인 경우는 수직원관 벽면 하부로부터 높이 방향으로 y/H=0.2 및 y/H=0.8 위치이다.

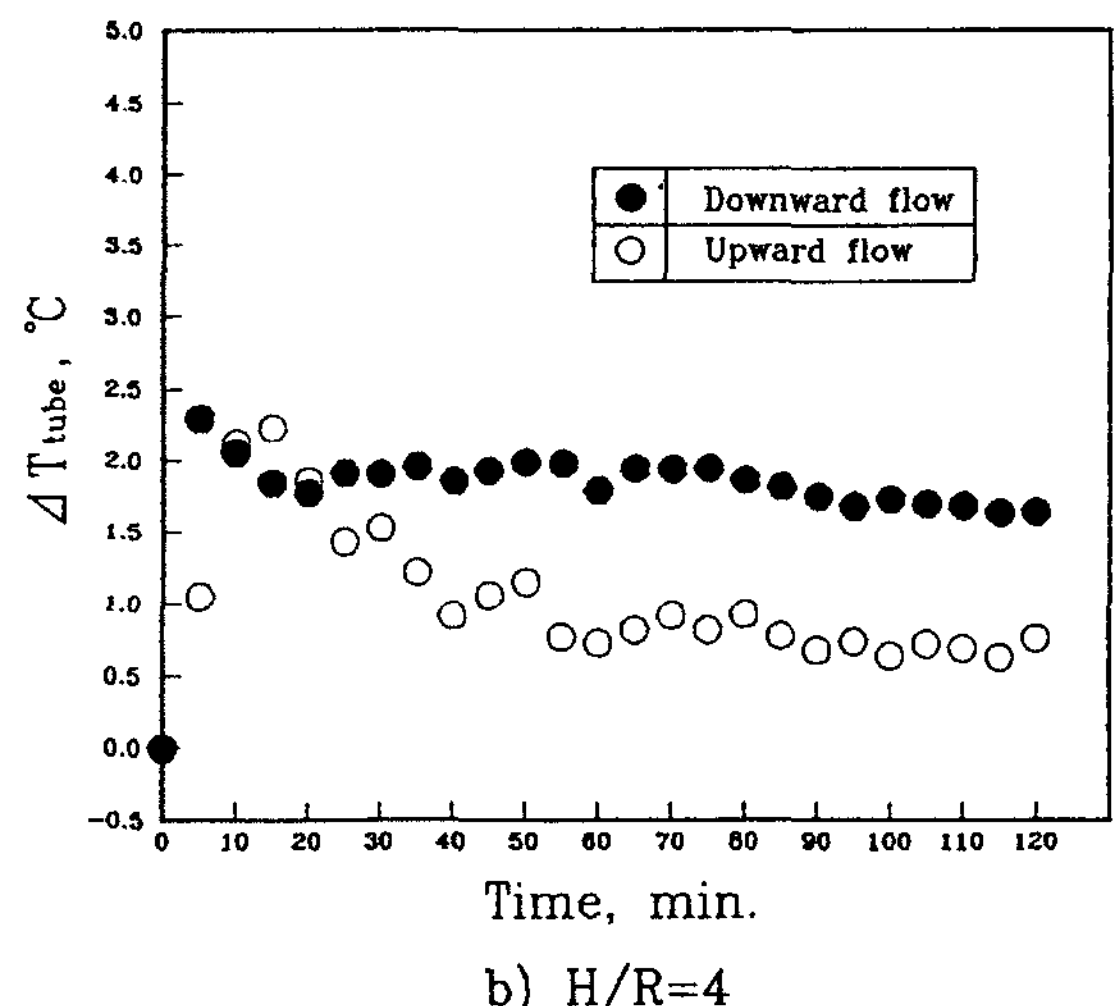
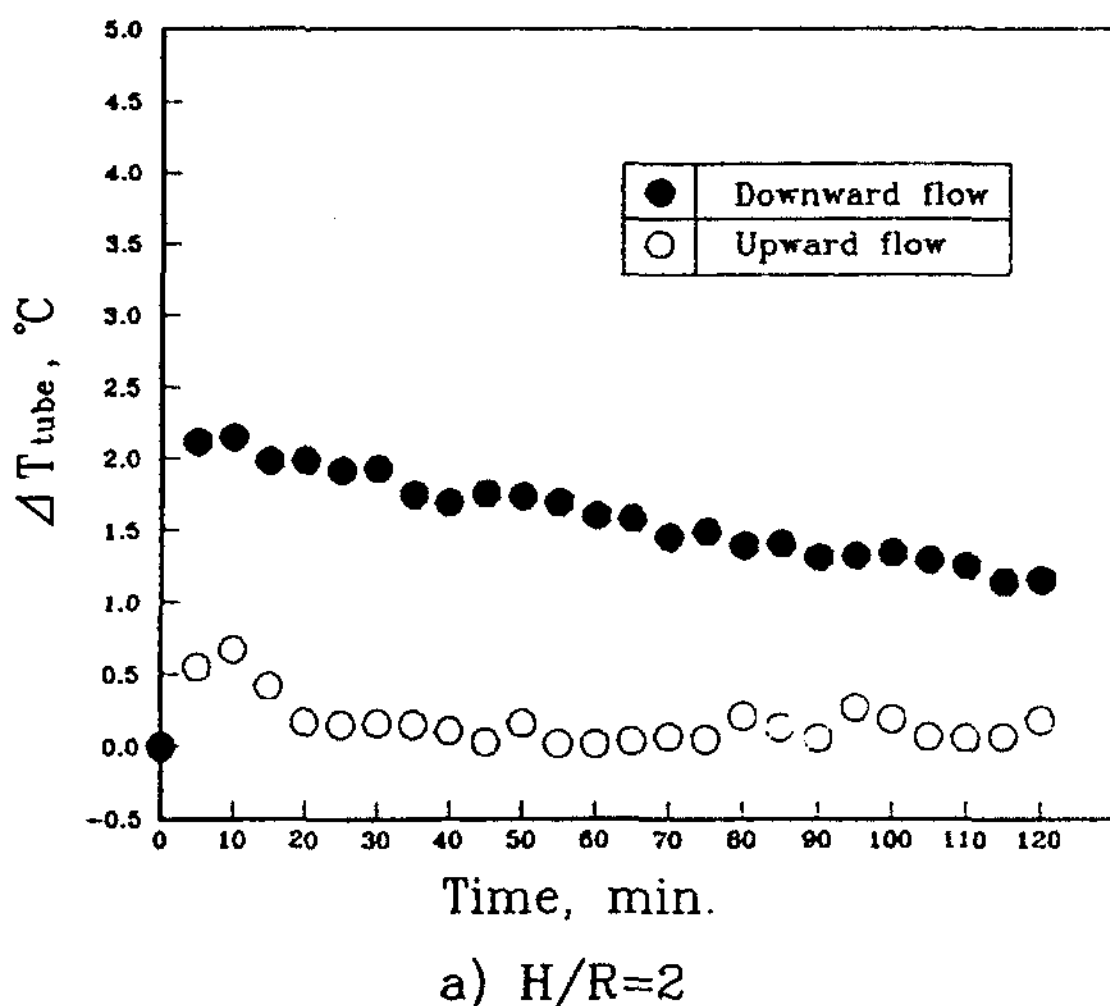


Fig.6 Difference of the tube wall temperature for the upper part and lower. (T_m=7°C)

형상비(H/R) 2, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우는 수직원관 벽면 상부(y/H=0.8)와 하부(y/H=0.2)의 온도차이는 거의 나타나지 않는다. 형상비(H/R)가 4, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우에는 하향인 경우보다 냉각과정 초기에 상·하부의 온도차이가 크게 나타나며 중반 이후부터 작게 나타난다. 위의 결과로부터 축열조의 형상비(H/R)가 각각 4 및 2일 때 축열조내 축열매질의 초기온도가 7°C이고, 유동방향이 상향일 경우 하향보다 냉각과정중 잔여 액상영역이 활발히 혼합되어 수직원관 주의 상·하부에서 응고층이 고르게 생성됨을 알 수 있다.

2. 응고형상

Fig.7과 Fig.8은 형상비(H/R)가 4인 경우에

축열매질의 초기온도가 각각 1°C, 7°C인 조건에서 시간경과(실험 시작으로부터 30분, 60분, 90분, 120분)에 따른 상경계면의 진전형상을 그림으로 나타낸 것이다.

Fig.7은 형상비(H/R)가 4, 축열매질의 초기온도가 1°C인 경우의 시간경과에 따른 상경계면의 변화로써 작동유체의 유동방향이 상향, 하향 모두 전도열전달의 지배적인 영향으로 인하여 작동유체의 유입구 부근에서 상경계면이 두껍게 형성되어 진다.

Fig.8은 형상비(H/R)가 4, 축열매질의 초기온도가 7°C인 경우로써 작동유체의 유동방향이 상향인 경우, 실험시작 시간으로부터 30분 경과 후 상경계면 형상의 0.8H지점 이상은 경계면이 전열면으로 사용된 수직원관 방향에 가깝게 기울어진다. 이는 냉각과정중 액상영역

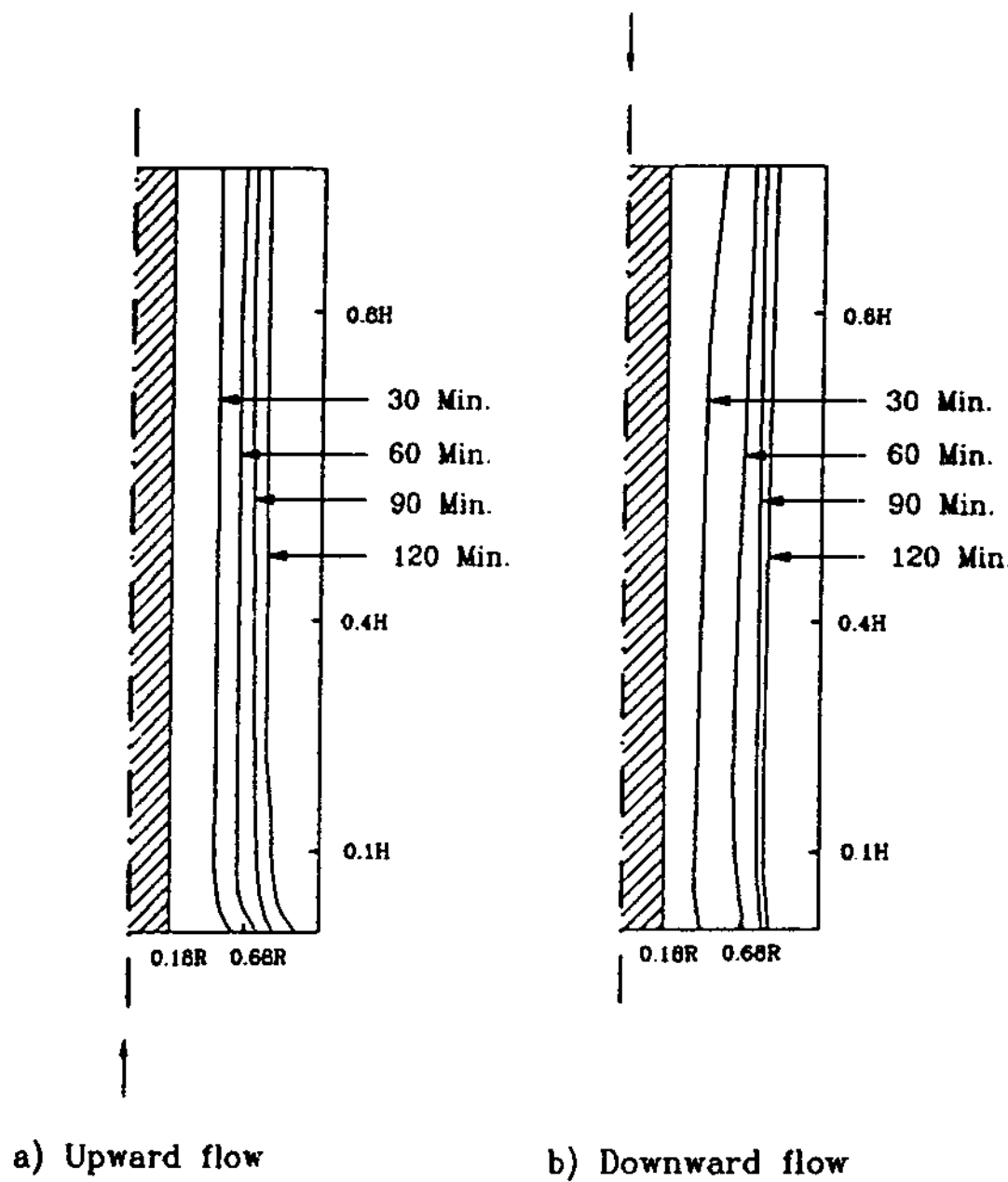


Fig.7 Timewise variations of solid-liquid interfaces. (H/R=4, T_{in}=1°C)

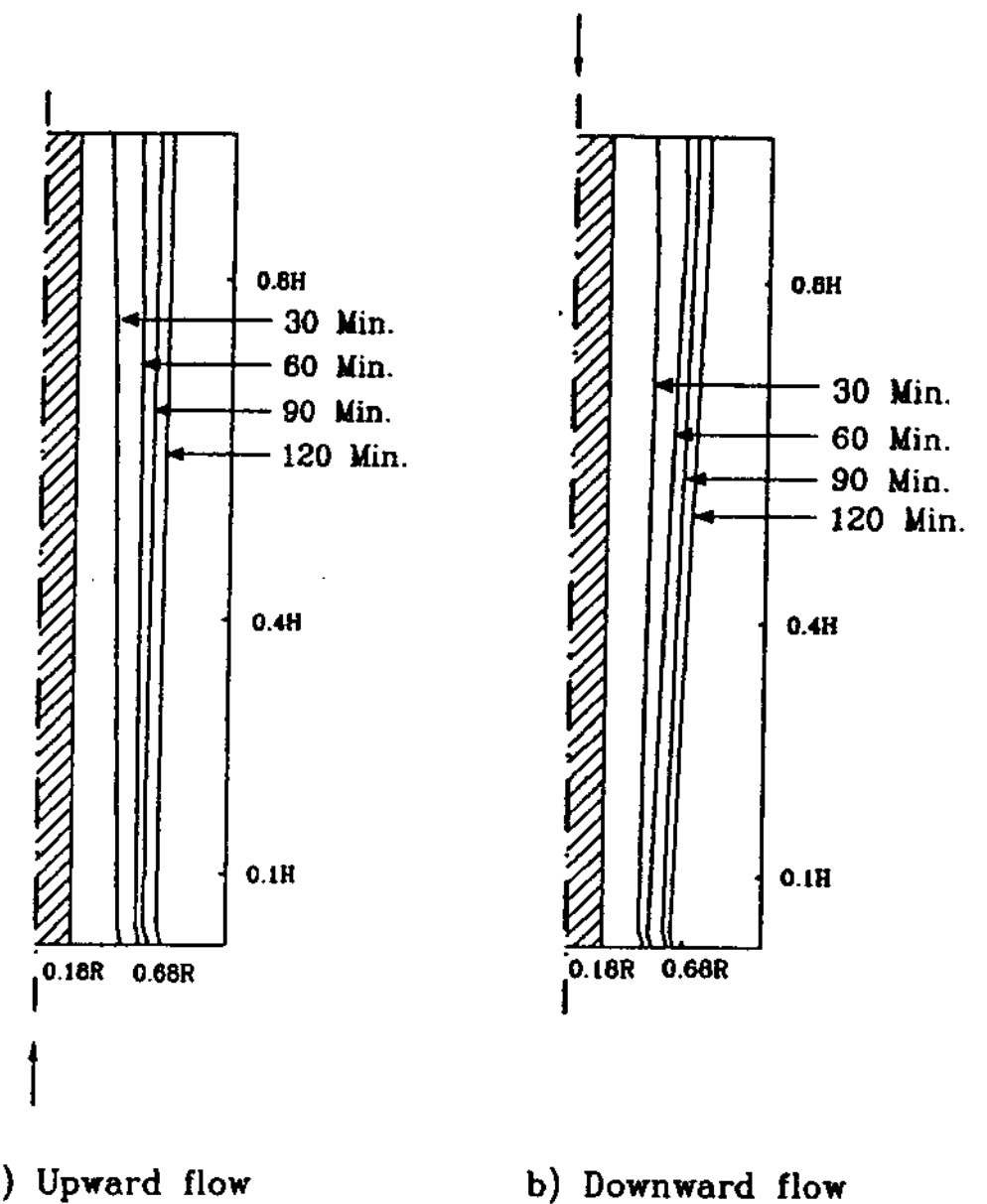


Fig.8 Timewise variations of solid-liquid interfaces. (H/R=4, T_{in}=7°C)

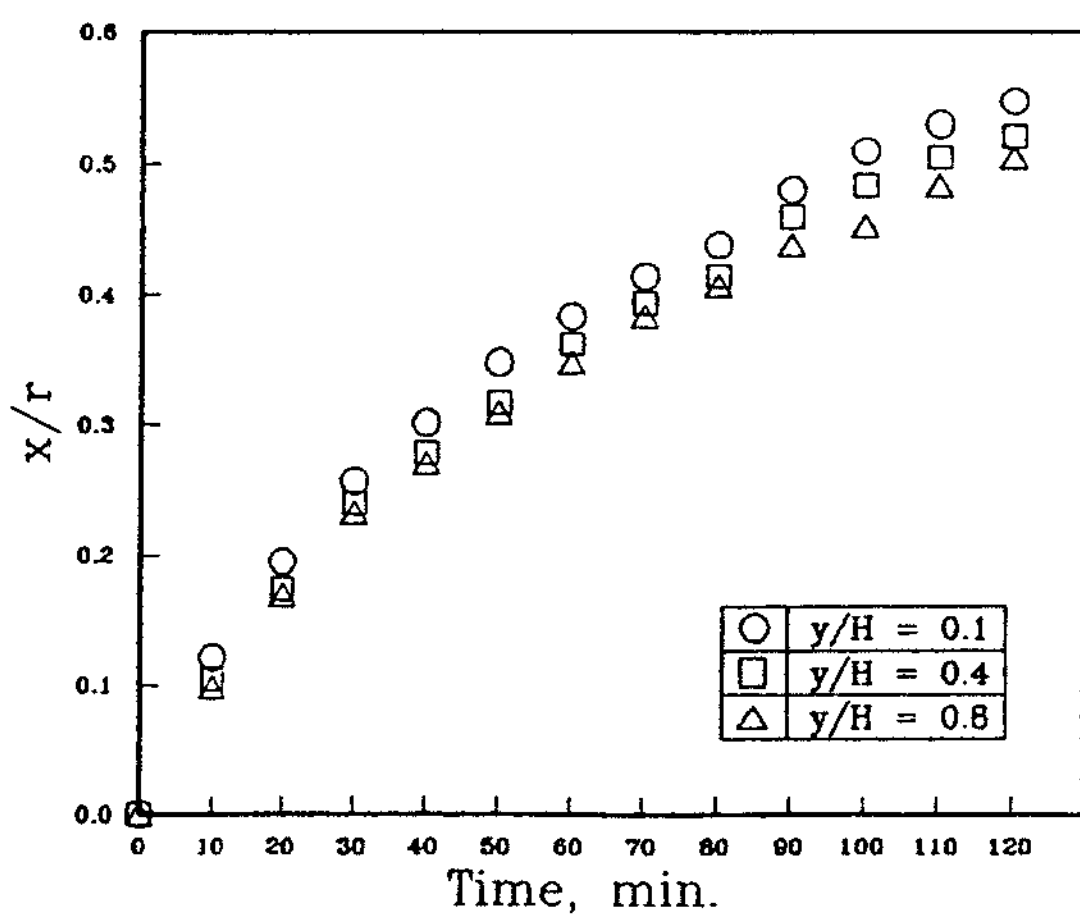
역의 자연대류에 의해 축열조내 상부가 하부보다 온도분포가 높기 때문이며, $0.1H \sim 0.4H$ 구간은 액상영역의 온도분포가 상부보다 낮고 작동유체의 유입구의 영향에 의해 응고두께는 상부보다 두꺼운 경향을 보인다. 따라서 실험 초기인 30분 정도까지는 하부가 상부보다 응고두께가 두꺼우며 물의 최대 밀도점인 $4^{\circ}C$ 구간을 지난 60분 이후의 상경계면은 상부 액상영역의 온도분포가 하부보다 낮기 때문에, 작동유체의 유입구 영향보다는 자연대류의 영향으로 인하여 상부가 하부보다 응고두께가 두꺼운 경향을 보인다. 하향인 경우, 30분대 상경계면에서는 작동유체의 유동방향에도 불구하고 $0.8H$ 지점 이상에서는 상경계면이 전열면으로 사용된 수직원관 방향으로 기울어 있으며, 그 이후의 상경계면은 유입구의 영향에 의한 전도열전달과 자연대류에 의해 상부가 하부보다 응고두께가 두껍다.

3. 응고층 변화율

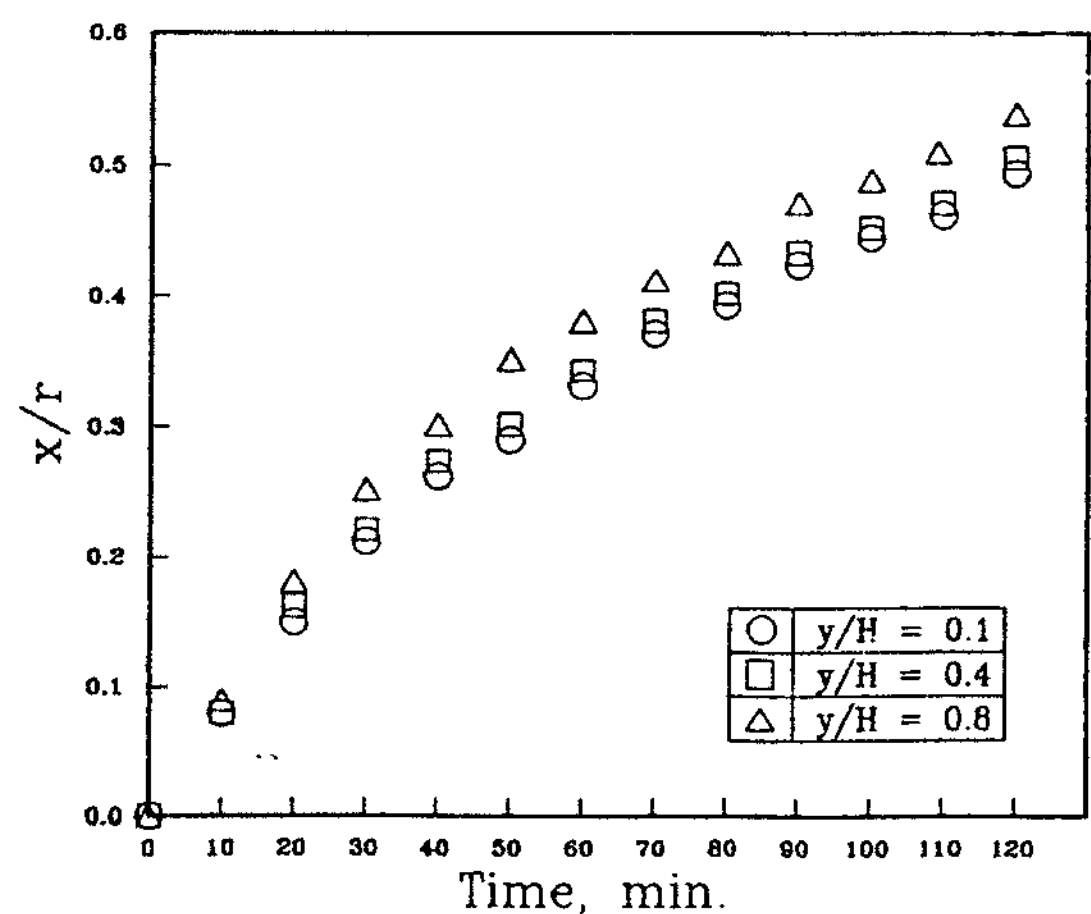
Fig.9는 형상비(H/R)가 4, 축열매질의 초기

온도가 $1^{\circ}C$ 인 경우 수직방향의 임의 위치에서의 시간경과에 따른 응고층 변화율을 나타낸 것이다. 작동유체의 유동방향이 상향인 경우 하부($y/H=0.1$)의 응고층 전진속도가 상부($y/H=0.8$)보다 빠르게 타나났으나, 하향인 경우는 상부($y/H=0.8$)의 응고층 전진속도가 하부($y/H=0.1$)보다 빠르게 나타났다. 따라서 축열매질의 초기온도가 $1^{\circ}C$ 인 경우의 상경계면 형상은 전도열전달의 지배적인 영향으로 인하여 작동유체 유동방향의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

Fig.10은 형상비(H/R)가 4, 축열매질의 초기온도가 $7^{\circ}C$ 인 경우의 시간경과에 따른 응고층 변화율을 나타낸 것으로, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우 응고과정 초기(실험시작 후 40분 이내)에는 작동유체의 유입구 영향과 축열조내 액상의 온도분포가 물의 최대 밀도점인 $4^{\circ}C$ 이상이므로 상부 액상영역보다 하부 액상영역의 온도분포가 낮기 때문에 하부의 응고층 변화율이 상부에 비해 빠르게 진전된다. 그러나, 약 60분 후부터는 유입구 영향에



a) Upward flow



b) Downward flow

Fig.9 Timewise variations of ice layer thickness at the different position of y/H . ($T_{in}=1^{\circ}C$, $H/R=4$)

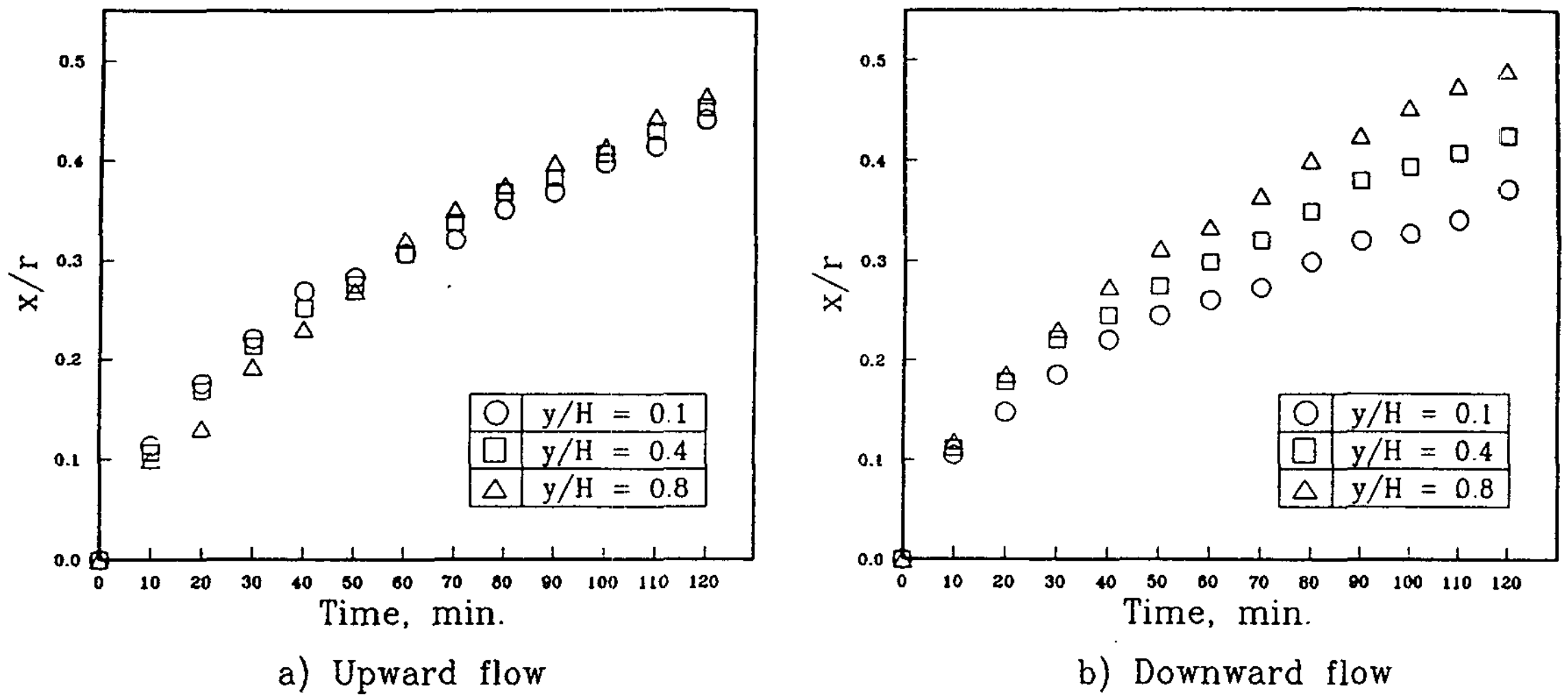


Fig.10 Timewise variations of ice layer thickness at the different position of y/H .
($T_m=7^\circ\text{C}$, $H/R=4$)

도 불구하고 액상영역의 평균온도가 물의 최대 밀도점인 4°C 이하가 됨에 따라 상부 액상영역의 온도분포가 하부 액상영역의 온도분포보다 낮기 때문에 상부에서의 응고층 변화율이 하부보다 빠르게 진전되는 경향을 보인다. 작동유체의 유동방향이 하향인 경우에는 작

동유체의 유동방향에 의하여 상부고상의 온도분포가 하부고상의 온도분포보다 낮고 자연대류에 의한 영향으로 상부액상영역의 온도분포가 하부 액상영역의 온도분포보다 낮기 때문에 시간이 경과함에 따라 상부와 하부에서의 응고층 두께의 차이가 크게 나타났다.

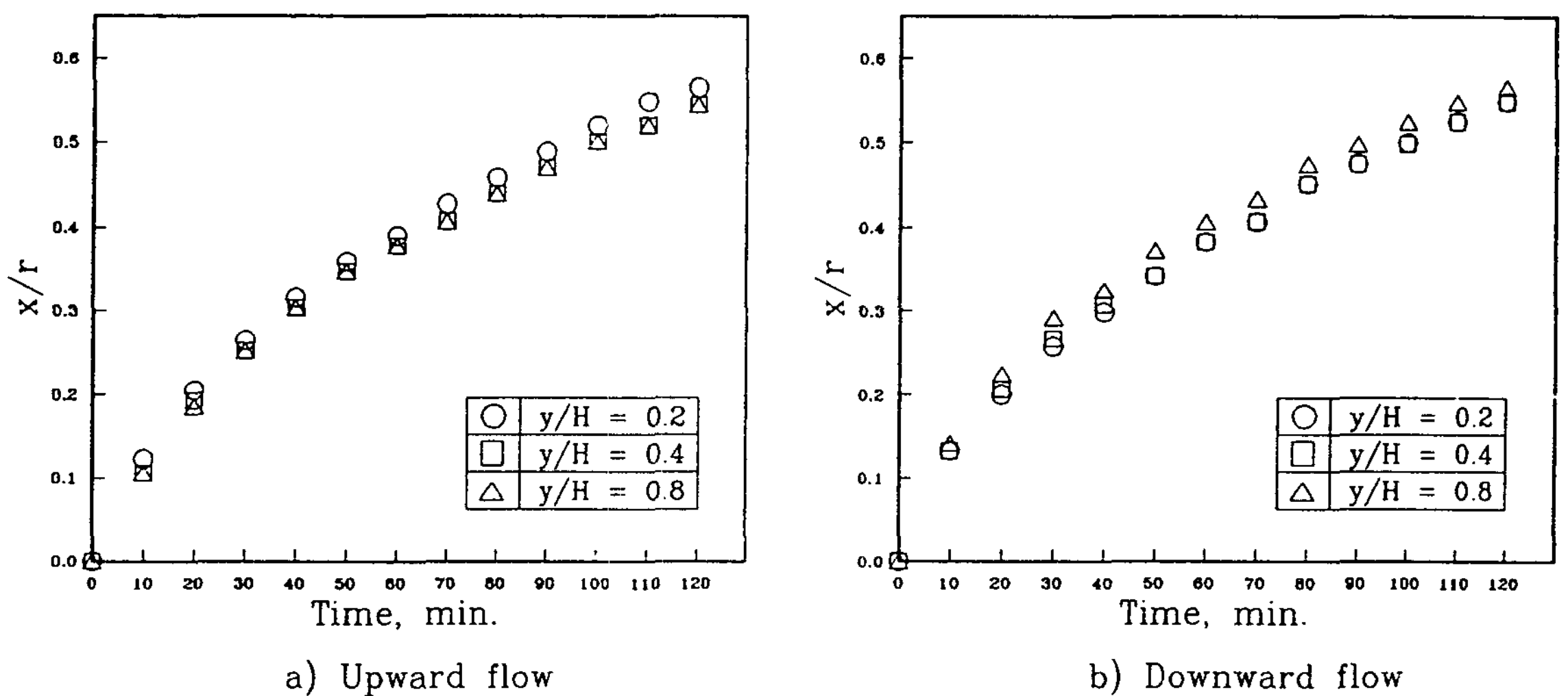
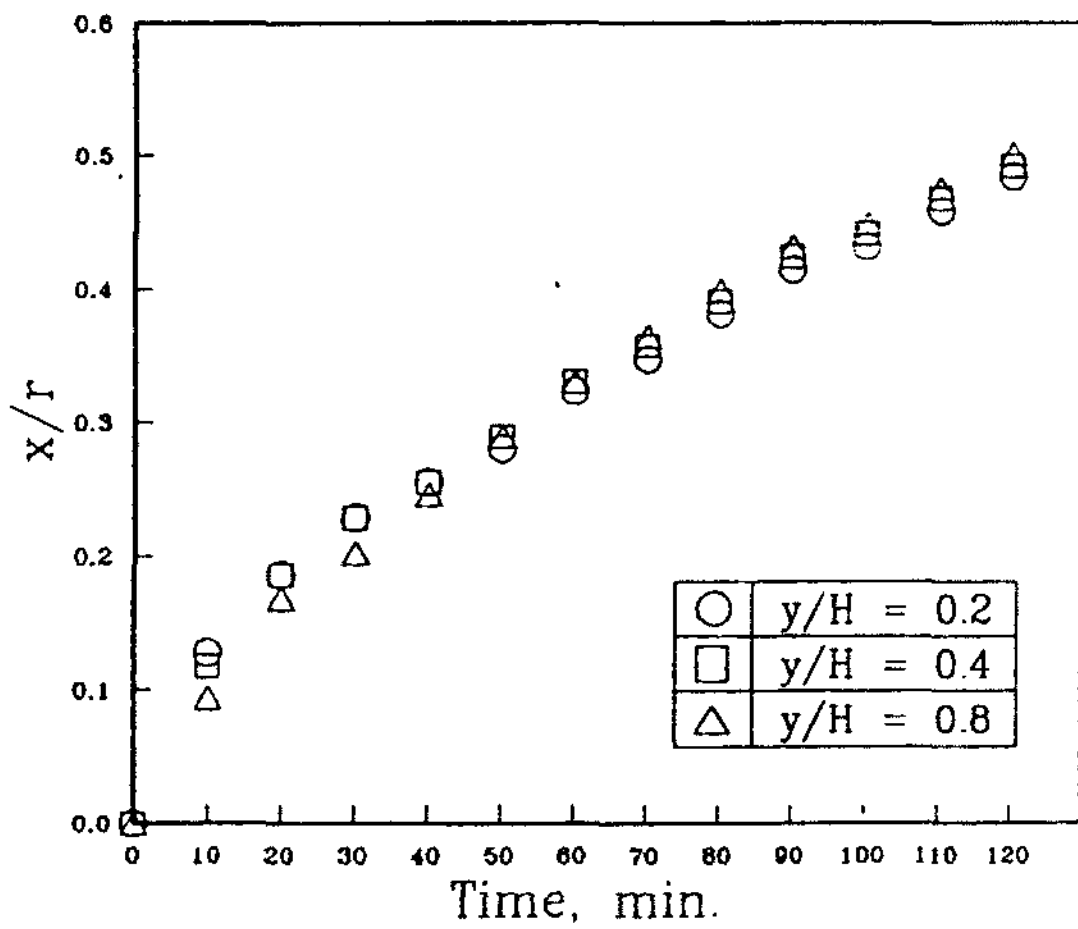
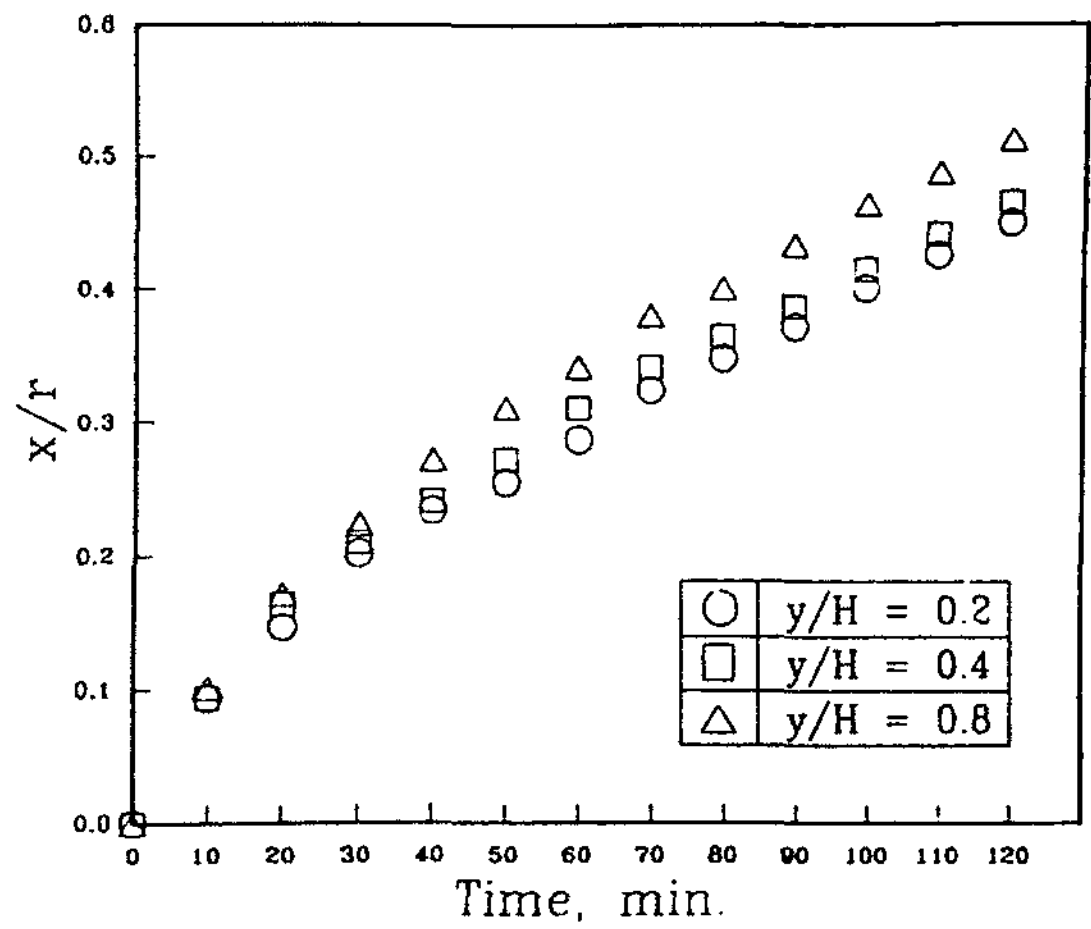


Fig.11 Timewise variations of ice layer thickness at the different position of y/H .
($T_m=1^\circ\text{C}$, $H/R=2$)



a) Upward flow



b) Downward flow

Fig.12 Timewise variations of ice layer thickness at the different position of y/H . ($T_m=7^\circ\text{C}$, $H/R=2$)

Fig.11은 형상비(H/R)가 2, 축열매질의 초기온도가 1°C 인 경우의 시간경과에 따른 임의 위치에서 응고층 변화율을 나타낸 것으로, 작동유체의 유동방향이 상향과 하향인 모두의 경우 응고층 변화율의 차이는 형상비(H/R)가 4, 축열매질의 초기온도가 1°C 인 경우와 유사하게 작동유체 유동방향이 상향인 경우는 하부($y/H=0.2$)가 하향인 경우는 ($y/H=0.8$)가 응고층 변화율이 좀더 크게 나타났다.

Fig.12는 형상비(H/R)가 2, 축열매질의 초기온도가 7°C 인 조건에서의 응고층 변화율을 나타낸 것으로, 작동유체의 유동방향이 상향인 경우는 응고과정 초기에 작동유체의 유입구 영향으로 인하여 하부($y/H=0.2$)에서의 상경계면 전진속도가 상부($y/H=0.8$)에서의 상경계면 전진속도보다 빠르게 나타났으나 약 50분 경과 후부터는 축열조내 액상영역의 평균온도는 4°C 이하가 되어 자연대류의 영향으로 인해 상부 액상영역에서의 온도분포가 하부 액상영역에서의 온도분포보다 낮아짐으로 상부($y/H=0.8$)에서의 상경계면 전진속도는

하부($y/H=0.2$)에서의 상경계면 전진속도보다 좀 더 빠르게 진전된다. 작동유체의 유동방향이 하향인 경우에는 응고초기의 유입구 위치에 의한 영향 및 시간경과에 따른 자연대류에 의한 영향으로 인하여 시간이 경과할수록 상부($y/H=0.8$)에서의 상경계면 전진속도가 하부($y/H=0.2$)에서의 상경계면 전진속도보다 빠르게 나타남을 알 수 있다.

4. 액상영역의 평균온도

Fig.13은 축열조내 축열매질의 초기온도가 각각 1°C , 4°C , 7°C 이고 형상비(H/R)가 각각 2와 4인 경우에서의 시간경과에 따라 변화하게 되는 응고형상을 예측할 수 있는 액상내 평균온도 분포의 결과를 나타낸 것으로, 형상비(H/R)가 2인 경우의 평균 온도분포 결과는 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 실험초기에 보다 빨리 액상축열매질을 냉각시키는 경향을 보여주고 있다. 형상비(H/R)가 4, 축열조내 축열매질의 초기온도가 7°C 인 경우에서의 작동유체 유동방향이 상향

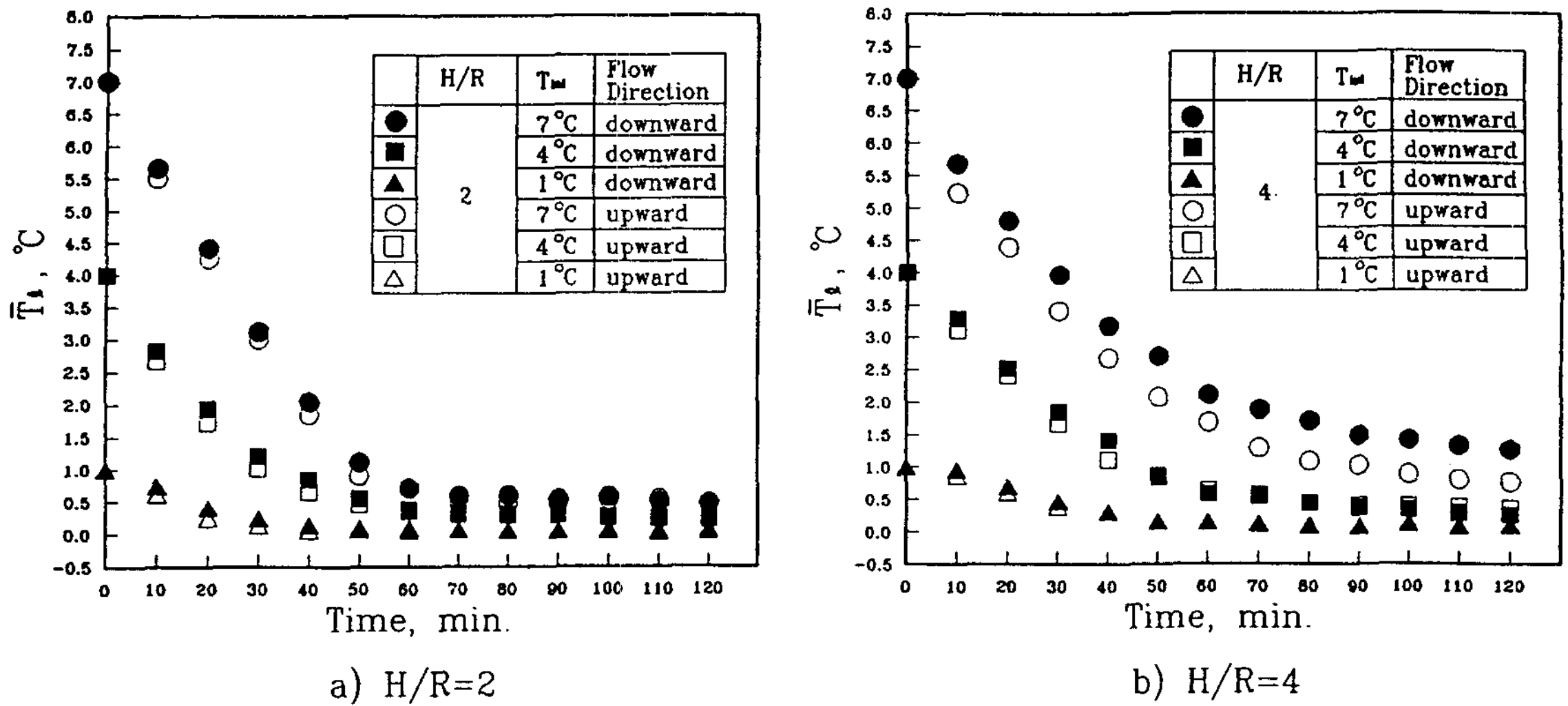


Fig.13 Mean temperature distribution of the liquid on various aspect ratio.

및 하향 조건에 대한 결과를 비교해 보면, 상향 조건일 경우의 액상내 평균온도가 하향 조건일 경우보다 빨리 강하되며, 4°C와 1°C일 경우는 형상비(H/R)가 2일 경우의 온도분포와 유사한 경향을 나타내고 있다.

도분포와 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig.13에 나타난 결과에 의하면 형상비(H/R)가 크고 축열조내 축열매질의 초기온도가 높은 경우 작동유체의 유동방향이 상향일 경우가 비교적 자연대류의 유동이 활발히 진행되어 하향에 비해 액상영역의 냉각이 빨리 이루어지며, 또한 형상비(H/R) 2인 경우가 형상비(H/R) 4인 경우보다 전열면의 길이가 짧기 때문에 수직원관이 등온조건에 좀더 가까와 응고과정시 액상영역의 냉각이 빠르게 이루어진다. 따라서 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 시간이 경과됨에 따라 상부와 하부에서의 응고형상이 균일하게 진전하고, 형상비(H/R) 2인 경우가 형상비(H/R) 4인 경우보다 응고층이 좀더 빠르게

형성될 것으로 사료된다.

5. 축열량

Fig.14는 형상비(H/R)가 4인 경우에 있어서 시간경과에 따른 단위 질량당 축열된 응고 에너지 변화를 나타낸 것으로, 축열매질의 초기온도가 7°C인 경우 실험시작 약 60분 경과 후부터는 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 축열량이 많아지며, 축열매질의 초기온도가 1°C인 경우는 상향인 경우가 하향인 경우보다 축열량은 약간 많게 나타났다. 이는 Fig.13에 나타낸 바와 같이 작동유체의 유동방향이 상향일 경우 잔여 액상영역의 평균온도가 하향일 경우보다 빠르게 강하함에 따라 응고층 생성이 수직원관 주위 상·하부에서 비교적 고르고, 빠르게 진전하기 때문인 것으로 사료된다.

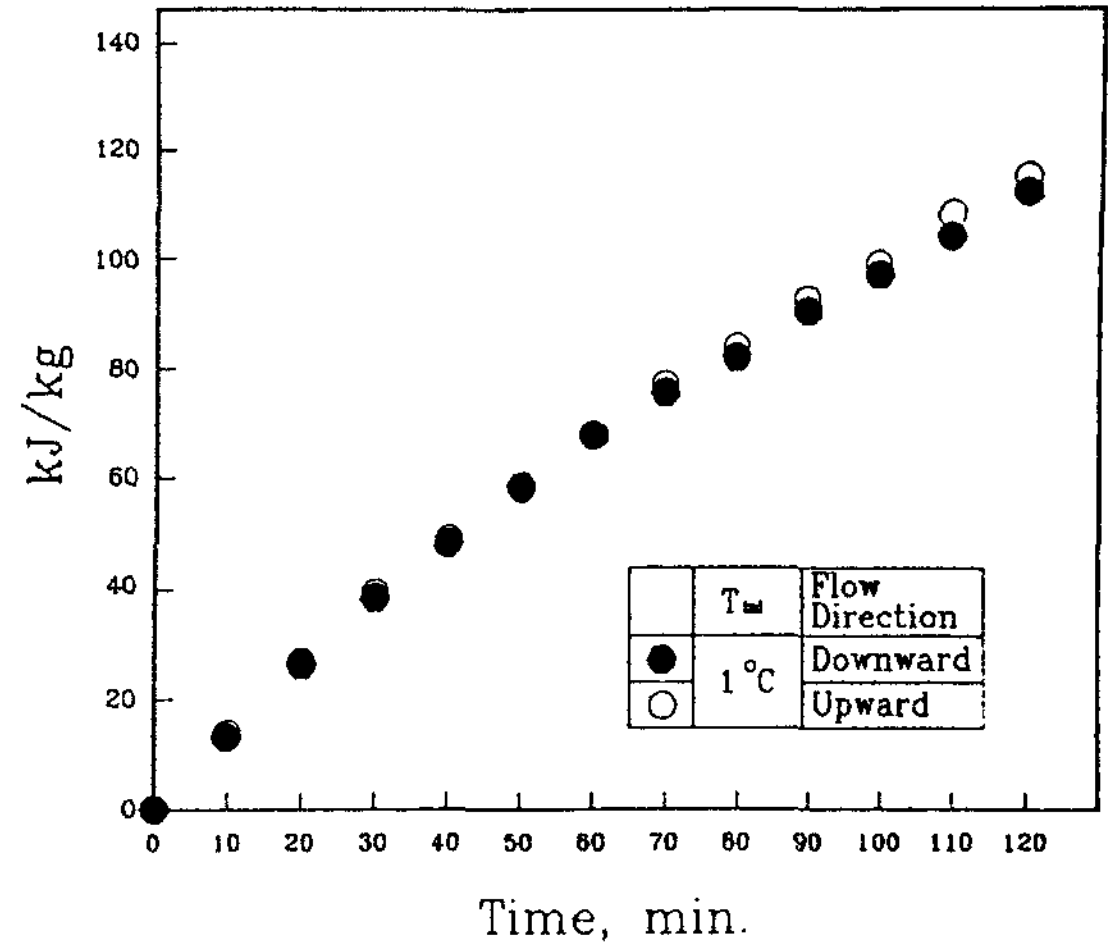
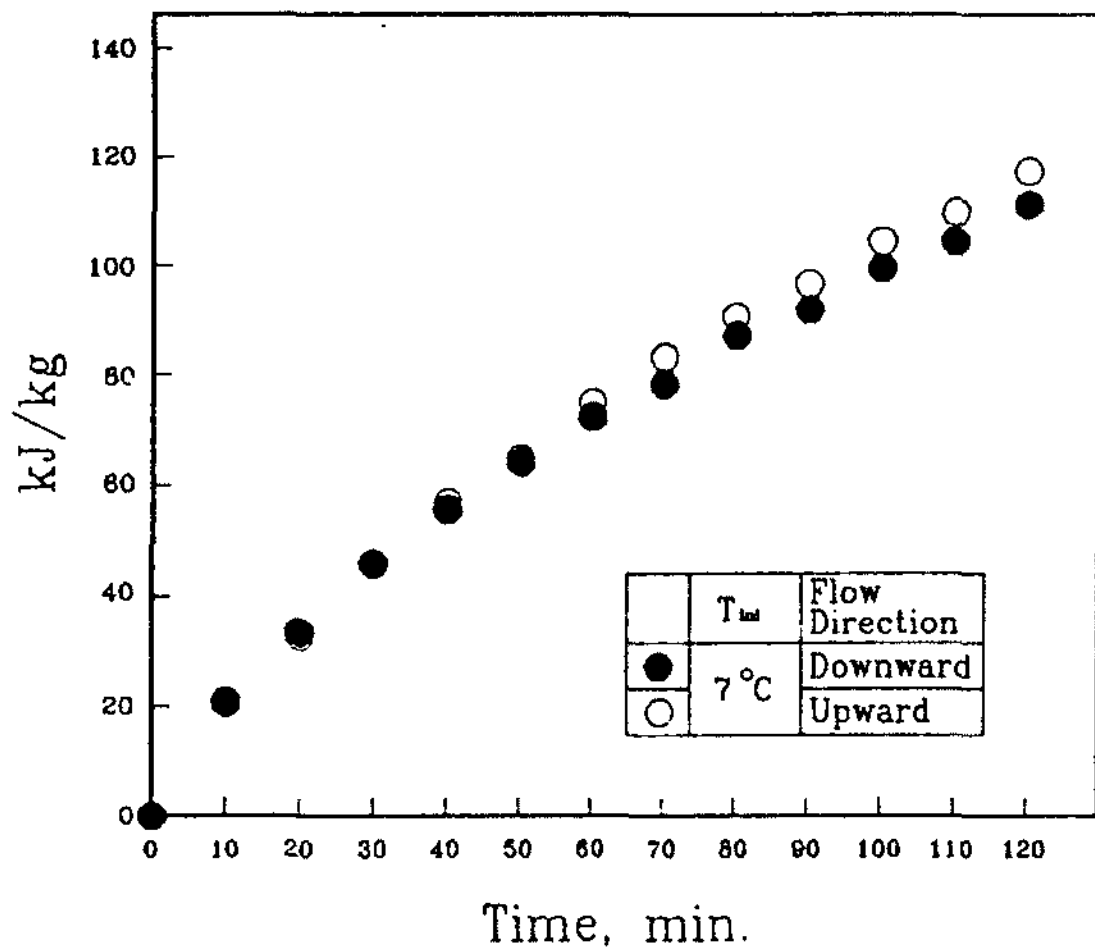


Fig.14 Timewise variations of frozen energy during cooling process on the initial temperature of water. (H/R=4)

V. 결 론

용융점 온도가 0°C인 순수한 물을 수직원통형 빙축열조 내에 장입시킨 후 축열조의 형상비(H/R)를 각각 4와 2 그리고 유입되는 저온 작동유체의 유량과 온도를 10 liter와 -10°C로 고정시킨 후 유동방향을 상향과 하향으로 변화시켜가며 상변화물질의 응고실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축열조내 상변화물질의 초기온도가 7°C인 경우 냉각과정 초기에 액상 상변화물질 상부에서의 온도는 하부에서의 온도보다 높았으나 시간이 경과함에 따라 물의 최대밀도점인 4°C 이하에서 상부에서의 온도가 하부에서의 온도보다 낮았으며, 축열조내 상변화물질의 초기온도가 4°C와 1°C인 경우는 물의 최대밀도점인 4°C 이하이므로 액상영역의 온도분포는 실험초기부터 상부가 하부보다 낮다.

2. 축열조의 형상비(H/R)가 4 및 2이고 축

열매질의 초기온도가 7°C일 때 작동유체가 통과하는 수직원관 벽면 하부와 상부의 온도차이는 작동유체 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우에 비하여 온도차이가 작다.

3. 응고형상은 작동유체 유동방향이 상향일 경우 상변화물질의 초기온도가 7°C 또는 4°C인 조건에서는 작동유체 유동방향에 의해 수직원관 벽면 하부가 상부보다 온도가 낮고 냉각과정중 액상영역의 자연대류에 의해 축열조내 상부가 하부보다 온도분포가 낮기 때문에 수직원관 주위의 응고층 상·하부가 균일하게 전진된다. 상변화물질의 초기온도가 1°C인 경우에는 액상영역의 자연대류 영향보다는 작동유체 유입구 온도에 의한 전도열전달의 영향으로 하부에서의 응고두께가 두껍게 나타나며, 유동방향이 하향일 경우에는 상변화물질의 초기온도와는 관계없이 상부에서의 응고두께가 두껍게 나타난다.

4. 액상영역에서의 평균온도는 형상비

(H/R)가 작을수록 수직원관 벽면의 온도조건이 등온에 가까워 빨리 강하되며, 동일한 초기온도의 조건에서는 작동유체 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 빠르게 강하된다.

5. 축열량은 축열조내 상변화물질의 초기온도가 높을수록 많아지며, 동일한 초기온도 조건에서는 작동유체의 유동방향이 상향인 경우가 하향인 경우보다 많아진다.

참 고 문 헌

1. Fukusaku S. and M. Yamada, "Some Topics on Melting Heat Transfer Problems", 4th Int. Symposium on Thermal Engineering & Science for Cold Regions, New Hampshire, pp. 3~16, 1993.
2. 김영인, "공조용 축열 시스템 개발(II)", 과학 기술처, 1989.
3. 김윤동, "심야 전력을 이용한 빙축열 기술개발", 한국전력공사 1991.
4. Hirata T., S. Ando and 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, pp. 65~70, 1993.
5. Sparrow E. M. and J. A. Broabent, "Freezing in a Vertical Tube", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 217~225, 1983.
6. Brewster, R. A. and B. Gebhart, "An Experimental Study of Natural Convection Effects on Downward Freezing of Pure Water", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 331~348, 1988.
7. 김무근, 노승탁 "수직원관 주위에서 밀도차와 자연대류를 고려한 응고과정 해석" 대한 기계학회지, 제16호, pp. 142~155, 1992
8. Hirata, T. and H. Matsui, "Ice Formation and Heat Transfer with Water Flow around Isothermally Cooled Cylinders Arranged in a line," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 707-713, 1990.
9. Saito T. and K. Hirose, "Thermal Instability of Natural Convection Flow over a Horizontal Ice Cylinder Encompassing a Maximum Density Point", ASME J. Heat Transfer, Vol. 102, pp. 261~267, 1980.
10. 이준용, "수평형 원통용기 내에서 물의 응고-용융시 열전달에 관한 연구", 인하대학교 대학원 논문집

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

–Comparison of thermal storage performance on the working fluid direction–

K. Heo* · Y. K. Kim* · Y. J. Kim* · J. K. Kim, C. S. Yim*****

* *Graduate School, Inha University*

** *Post Doctor, Inha University*

*** *Inha University*

Abstract

An effective heat transfer during freezing process was proposed in the vertical cylinder to improve the effectiveness of the heat storage.

Vertical cylinder was filled with pure water in order to investigate ice-shape, temperature distribution of the liquid, temperature distribution of the cylinder tube wall, total heat storage per unit mass in the test section under the two experimental conditions; inlet temperature of working fluid is constant(-10°C) and inlet direction of working fluid is either upward flow 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 case that the initial temperature of water was 7°C and 4°C , the shape of ice layer in the upward was more uniform than that in the downward. In case of 1°C , the shape of ice layer is formed by inlet direction of working fluid.

Finally, time-varying total heat energy stored in the upward was higher than that in the downward.