

원통형 용기내의 상변화물질에서의 응고 열전달에 관한 연구  
(경사각 변화의 영향)

A Study on Heat Transfer Phenomena during Solidification in a Circular Tube  
Containing Phase Change Material (Effect of Inclination)

송 하 진\*, 김 영 중\*, 오 수 철\*\*, 입 장 순\*\*  
H. J. Song, Y. J. Kim, S. C. Ohu, C. S. Yim

**Key words** : Phase Change Material(상변화물질), Solidification(응고), Inclination(용기의 경사각)

**Abstract**

This paper focuses on the investigation of the heat transfer phenomena that occur inside the cylindrical tube. The inclination of the tube is adopted as a principal parameter varying from vertical to horizontal. The phase change material employed in this experiment is 99 percent pure n-docosane paraffin( $C_{22}H_{46}$ ).

It is found that the amount of solidified mass during a prescribed solidifying period is not sensitive to the inclination of the tube but to the local layer thickness.

It is studied that the latent energy is the largest contributor to the total extracted energy. The sensible energy( $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$ ) may not be negligible at the large wall-subcooling and initial-liquid-superheating, also at the first step of solidifying.

기 호 설 명

$C_L$ : Specific heat of PCM at liquid phase	$E_{s3}$ : Sensible energy extracted from liquid which remains unsolidified
$C_s$ : Specific heat of PCM at solid phase	$E_T$ : Total energy extracted, $E_\lambda + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3}$
$E_\lambda$ : Latent energy extracted	$E_{max}$ : Maximum energy extracted, $E_{\lambda max} + E_{s1 max} + E_{s2 max}$
$E_{\lambda max}$ : Maximum latent energy extracted	$H$ : Height of tube
$E_{s1}$ : Sensible energy extracted from subcooled solid	$K_s$ : Thermal conductivity of solid phase
$E_{s1 max}$ : Maximum $E_{s1}$	$M$ : Solidified mass
$E_{s2}$ : Sensible energy extracted from liquid which solidified	$M_T$ : Total mass of PCM at solidifying process
$E_{s2 max}$ : Maximum $E_{s2}$	$R_w$ : Radius of tube
	$T_s$ : Temperature of solid
	$T_l$ : Temperature of liquid
	$t$ : Time
	$T_{bl}$ : Bulk temperature of liquid

\* 인하대학교 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

- $T_{bs}$  : Bulk temperature of solid
- $T_i$  : Initial temperature
- $T_m$  : Melting temperature
- $T_w$  : Wall temperature

회답문자

- $\alpha_s$  : Thermal diffusivity of solid phase
- $\bar{\delta}$  : Mean thickness of solidified layer
- $\lambda$  : Latent heat per unit mass
- $\rho_s$  : Density of solid

약어

PCM : Phase Change Material

무차원수

- $Ste_L$  : Stefan number(Liquid),  $C_L(T_i - T_m)/\lambda$
- $Ste_s$  : Stefan number(Solid),  $C_s(T_m - T_w)/\lambda$
- $Fo$  : Fourier number,  $\alpha_s t/R_w^2$

1. 서론

최근에 들어서 우리나라와 같이 에너지 부존자원이 거의없는 국가에서는 태양열, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 대체에너지 이용기술의 개발, 불규칙한 전력 수요로 인한 잉여전력의 효과적인 사용과 산업체의 폐열회수등의 필요성이 대두됨에 따라 에너지의 효율적인 이용에 대한 기술개발이 절실히 요구 되고 있다. 이러한 필요성에 대한 연구과제 중의 하나로 열에너지 저장시스템에서 에너지 저장 밀도가 큰 축열 장치의 개발이 우선적으로 해결해야 될 중요한 문제이다. 이러한 축열 장치에서 사용되는 열에너지 저장방법 중 지금까지 알려진 대표적인 방법은 단상의 축열매질로 사용하는 현열 이용형 축열방법 및 상변화물질(phase change material 약칭, PCM)을 축열매질로 사용하는 잠열 이용형 축열방법이 있다.<sup>1-2)</sup>

상변화물질의 열전달 과정의 특징은 열전달이 진행되면서 시간경과에 따라 상경계면이 이동하며, 고상영역에서는 전도 열전달이 일어나고 액상영역

에서는 전도 및 자연대류에 의한 열전달이 복합적으로 발생하는 복잡한 현상을 갖고 있는 것이다. 이러한 열전달 현상에 관한 연구는 원판<sup>3)</sup>, 평판<sup>4)</sup>, 구<sup>5)</sup>, 원이 부착된 판<sup>6)</sup> 등의 여러가지 기하학적 형상에 있어서 상변화물질의 초기온도조건의 변화, 용기벽면온도의 변화 등의 인자(parameter)에 대하여 수행해왔고, 근간의 연구동향은 실험적 방법과 해석적 방법을 병행한 연구<sup>7)</sup>들이 시도되고 있다. 또한 실질적인 축열과정에서 축열매질의 용기가 수직인 경우보다 경사진 경우에 용융율이 크게 향상되는데<sup>8)</sup> 방열과정에서도 이에 따른 열전달 문제가 해결 되어야 한다.

본 연구에서는 온도가 일정한 외벽을 열원으로 하는 원통형용기내에 충전된 상변화물질(PCM)의 내향 응고 과정에서 용기의 경사각과 벽면온도를 변화 인자로 할 때 상변화물질의 응고량, 응고형상, 응고층의 두께, 응고에너지 등을 실험적으로 연구, 분석하고 또한 원통좌표계에 상변화를 동반하는 비정상 열전도 미분방정식을 수치해석하여 응고층의 두께를 구하고 그 결과를 실험적인 결과와 비교, 검토하여 잠열 이용형 축열 장치내에서 발생하는 열전달 현상을 규명 하고자 한다.

본 연구의 해석결과들은 에너지 관련분야에서 축열장치에 대한 효율을 증대시키고 심야전력 또는 태양열을 이용하는 축열장치의 형상 및 크기를 결정하는 설계자료와 금속의 주조과정에서 발생하는 열전도 문제에 응용 등 실질적인 축열장치의 설계에 적용할 수 있는 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험 장치의 주요부분은 실험용기, 원통형용기의 경사각 조절장치, 저온 항온수조, 고온 가열수조, 온도 조절장치(thermo-controller), 온수 공급장치(pump. PDB-86), 온도 측정방치(data-logger; Fluke 2280b), 디지털 질량 측정기(FY-2000; 정확도 0.1g)등으로 구성되어 있으며 실험장치의 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

Fig.2의 좌측 그림은 실험용기의 상세도로서 여기서 수직 원통형용기는 그 재질이 동으로 내경

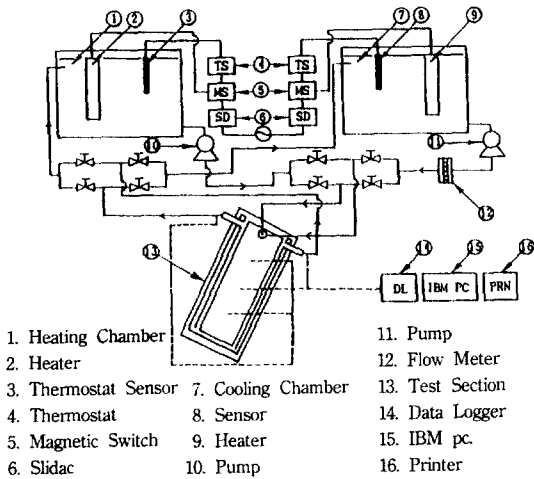


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

60mm, 높이 330mm이고, 두께는 2mm이다. 또한 상변화물질의 용기는 이중관으로 하였으며 온수의 입구, 출구를 각각 2개씩 만들어 용기의 벽면을 등온이 유지되도록 고려하였다.

Fig2의 우측 그림은 용기내 상변화물질의 온도 측정용 열전대의 위치로서 용기의 중심( $r=0$ )에 대한  $y/H=1$ 의 위치, 상경계면의 이동이 심할 것으로 예상되는  $y/H=2/3$ 의 위치,  $y/H=1/3$ ,  $y/H=0$ 의 위치에 각각 1개씩을 설치하였고,  $y/H=1/3$ ,  $1/2$ ,  $2/3$ 의 위치에 용기의 벽면으로부터 반경방향으로  $(R_w-r)/R_w=2/30, 5/30, 8/30, 11/30, 14/30$ 의 위치에 각각 5개씩의 열전대를 설치하여 총 19개 지점의 온도를 측정하였다. 그리고 응고 개시시에 용기의 경사로 인한 액상 상변화물질의 누출에 대비하여 상변화물질의 상부표면과 단열막개 사이에 50mm의 고무층(rubber)을 두었다.

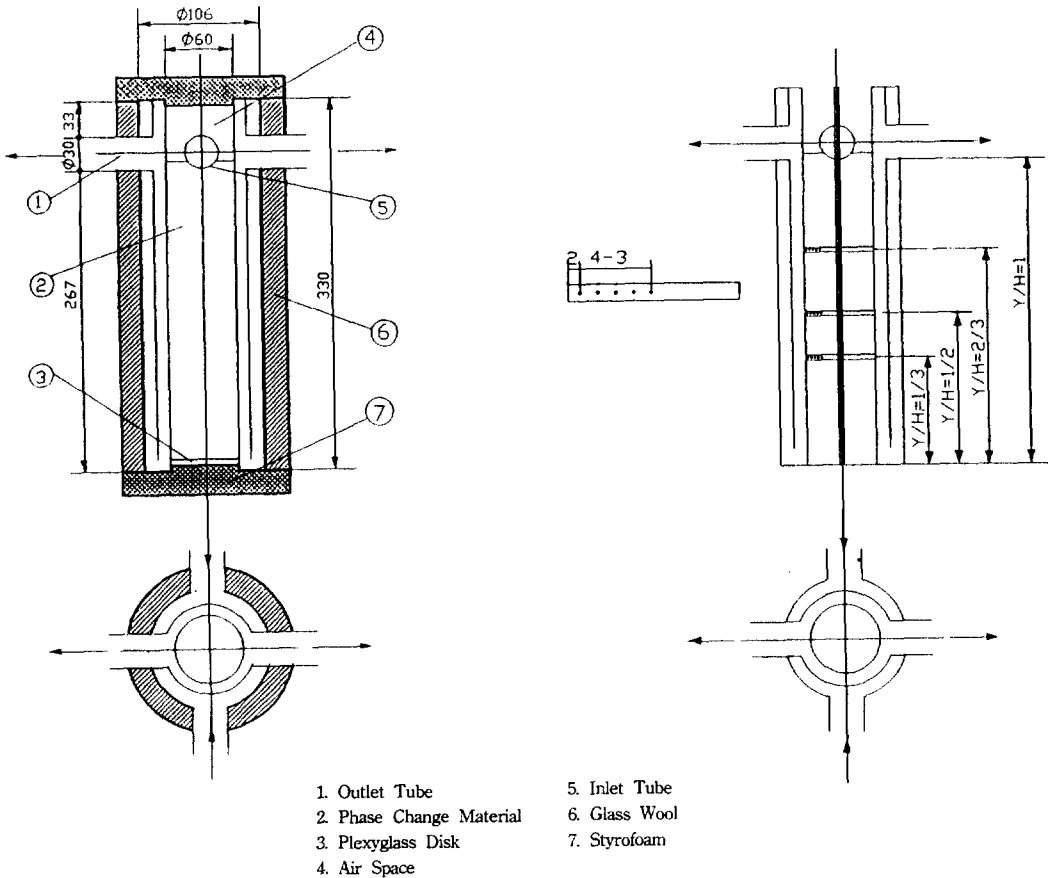


Fig.2 Schematic diagram of container tube and positions of thermocouple probes

고온 가열수조 및 저온 항온조의 용량은 각각 200ℓ이며 그 내부에 각각 3kW 용량의 전기 히터를 내장시켰다. 항온수는 온수용 순환 펌프(PDB-86 : 400W)를 사용하여 순환시켰으며 유량은 30ℓ/min로 일정하게 유지하였고 솔레노이드 밸브로 수로를 자동 개폐하였다.

온도 조절장치(정확도 0.1℃ thermo-controller)는 항온조내에 있는 가열기를 작동시켜 항온조내의 온도를 가열하고자 하는 일정한 온도로 유지시켜 주었다. 원통형용기와 항온조 및 연결 파이프는 단열재를 사용하여 보온시키므로서 유체순환 장치를 통한 외부로의 열방출을 방지하였다.

원통형용기를 일정한 각도로 유지시키기 위하여 10mm의 강판에 외경 27mm, 길이 740mm의 강봉 2개를 450mm의 간격을 두고 수직으로 고정하였다. 또한 강봉의 끝 부분에는 2개로 절단된 T형 소켓을 부착하여 원통형용기를 지지하고 또한 용기가 경사질 수 있도록 설치하였다.

각도의 측정은 수평 각도기(정확도 0.1도)를 사용하였으며 가시적으로 각도를 확인하기 위하여 추가 부착된 분도기를 원통형용기의 끝부분에 고정하였다.

상변화물질 내 각지점의 온도는 데이터 로거(Fluke 2280B)를 통해 IBM-PC(AT기종)에 질량 측정기(정확도 0.1g)를 이용하였다.

### 2.2 실험 방법 및 조건

본 실험에서 사용된 상변화물질로는 용융온도가 42.5℃인 시약용 n-도코산 파라핀(C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>)(일본 Siyo pure chemical사 제품)을 사용하였다.

상변화물질의 초기 온도가 42.5℃, 62.5℃, 72.5℃인 경우, 원통형용기에 유입되는 입구에서 물의 온도를 측정하여 벽면온도를 22.5℃, 27.5℃ 및 32.5℃로 하였고, 이때 유동유량이 크기 때문에 용기의 입출구에서 물의 온도 차이는 작은 것(약 0.3℃ 이내)으로 나타났다.

실험 초기에 실험용기 내 상변화물질의 초기 온도를 열평형 상태로 유지시키기 위해서 예비실험으로부터 얻은 결과에 따라 약 6시간에서 8시간 동안 항온수를 순환시켰다. 실험용기 내의 상변화물질의 온도와 초기 설정 온도와의 차가 0.05℃ 이내 일때를 열평형 상태에 도달된 것으로 가정하였고

열적인 평형상태가 확인되면 원통형용기를 일정한 각도로 고정한 후, 냉각수를 실험용기에 순환시켰다. 설정된 일정시간이 경과하면 고상 상변화물질을 분리, 채취하여 질량을 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서는 원통형용기 내에 충전된 액상 상변화물질이 벽면 냉각에 의해 응고될 때, 수직 방향으로부터 수평 방향으로 단계적으로 용기의 경사각을 변화시킬 경우, 응고량, 응고층의 형상, 응고층의 두께, 응고 에너지 등을 실험을 통하여 검토하고자 한다.

#### 3.1 데이터의 산출

실험결과와 비교검토시 각종 무차원수를 사용하였으며, Stefan수는 고상 및 액상에서 현열과 잠열의 비로 정의되는 열저장의 특성을 나타낸다. 두개의 Stefan수 즉 고상 Stefan수와 액상 Stefan수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ste_s = C_s(T_m - T_w) / \lambda \tag{1}$$

$$Ste_L = C_L(T_i - T_m) / \lambda \tag{2}$$

여기서 T<sub>i</sub>는 응고과정의 초기 액상 상변화물질의 온도이며 액상 상변화물질이 용융온도 T<sub>m</sub>과 같을 때 액상 Stefan수는 Ste<sub>L</sub>=0이 되며 액상 Stefan수의 물리적 의미는 액상 상변화물질의 초기 과열도를 나타내고 고상 Stefan수는 벽면과냉도(T<sub>m</sub>-T<sub>w</sub>)를 나타낸다.

벽면 과냉도(T<sub>m</sub>-T<sub>w</sub>)를 10℃, 15℃, 20℃로 변화시키고 초기 과열도(T<sub>i</sub>-T<sub>m</sub>)를 0℃, 20℃, 30℃로 하였을 경우, 각각의 고상 Stefan수 및 액상 Stefan수는 Table 1과 같다.

Table 1 Temperature differences and associated Stefan numbers

T <sub>m</sub> - T <sub>w</sub>	Ste <sub>s</sub>	T <sub>i</sub> - T <sub>m</sub>	Ste <sub>L</sub>
10℃	0.0886	0℃	0
15℃	0.1329	20℃	0.145
20℃	0.1772	30℃	0.2175

또한, Fourier수는 물체의 크기와 어떤 주어진 시간  $t$  동안 그 물체 안으로 온도가 침투된 깊이의 비로 정의되며 아래 식과 같다.

$$Fo = \alpha_s t / R_w^2 \quad (3)$$

여기서  $\alpha_s$ 는 고상 상변화물질에서 열확산 계수이고  $R_w$ 은 상변화물질 원통형용기의 반지름이다.

상변화 물질의 응고 과정중 용융 상변화물질로부터 방열된 에너지는 다음과 같은 식들로 표현된다.

상변화물질의 초기 온도를 용융온도와 같게 하였을 경우, 응고된 상변화물질을  $M$ 이라고 하면 이때 방출되는 잠열에 의한 에너지  $E_s$ 는

$$E_s = \lambda M \quad (4)$$

용기 내 상변화물질의 전체 질량을  $M_T$ 라 하면 이 상변화물질이 모두 응고되었을 때 방출되는 잠열에 의한 에너지  $E_{s,max}$ 는

$$E_{s,max} = \lambda M_T \quad (5)$$

고상 상변화물질의 비열이 일정하다고 하면 응고된 상변화물질이 용융온도 이하로 냉각될 때 방출되는 현열 에너지  $E_{s1}$ 은

$$E_{s1} = M C_s (T_m - T_{bs}) \quad (6)$$

여기서  $C_s$ 는 고상 상변화물질의 비열,  $T_m$ 은 상변화물질의 용융온도이다.  $T_{bs}$ 는 응고된 상변화물질의 질량평균온도로 다음과 같이 계산된다.

$$T_{bs} = \int_m^{R_w} T(r) \rho_s 2\pi r dr / \int_m^{R_w} \rho_s 2\pi r dr \quad (7)$$

여기서 온도  $T(r)$ 은 반경  $r$ 의 함수이다.  $R_w$ ,  $r_m$ 은 각각 용기의 반경과 용기의 중심선으로부터 상경계면까지의 거리이고,  $\rho_s$ 는 고상 상변화물질의 밀도이다. 상변화물질의 초기 온도가 용융온도  $T_m$ 와 동일할 때 상변화물질에서 방열되는 총 에너지  $E_T$ 는

$$E_T = E_s + E_{s1} \quad (8)$$

또한, 상변화물질 초기 온도가 용융온도 보다 높은 상태일 때는 (8) 식에 두가지 성분의 온도가 더 추가 되는데, 하나는 응고된 상변화물질의 초기 온도  $T_i$ 에서 상변화물질이 용융온도  $T_m$ 까지 냉각될 때 방열되는  $E_{s2}$ 이며 다른 하나는 초기 온도  $T_i$ 로 부터 설정한 실험시간 후 액체 상태로 잔류하는 상변화물질의 체적온도  $T_{bl}$ 까지 냉각될 때 방출되는 현열 에너지  $E_{s3}$ 이며 이들은 다음과 같이 계산된다.

$$E_{s2} = M \int_{T_m}^{T_i} C_L dT \quad (9)$$

여기서  $C_L$ 은 액상 상변화물질의 비열이다.

$$E_{s3} = (M_T - M) \int_{T_{bl}}^{T_i} C_L dT \quad (10)$$

여기서  $M_T$ 는 상변화물질의 전체질량이고  $T_{bl}$ 은 액상 상변화물질의 체적온도 이다. 따라서 상변화물질의 초기 온도  $T_i$ 가 용융온도  $T_m$ 보다 높을 경우 상변화물질로부터 방출되는 총 에너지  $E_T$ 는

$$E_T = E_s + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \quad (11)$$

와 같이 된다.

### 3.2 응고량

Fig3, 4, 5는 초기 과열도를 나타내는 액상 Stefan수가 0이고, 벽면 과냉도를 의미하는 고상 Stefan수가 0.0886, 0.1329, 0.1772일 경우, 용기의 경사각을 0, 30, 60, 90도로 변화시킬 때, 용기의 경사각이 응고량에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 무차원 응고량( $M/M_T$ )의 값을 시간의 함수로서 나타낸 것이다.

여기서 시간 변수로서  $Fo Ste_s$ 을 사용한 것은 상변화를 동반하는 열전도 이론에 의한 것으로 이 무차원 수에 사용된 물성치들은 고상 상변화물질의 용융온도에서 계산된 값이다.

그럼으로부터 용기의 경사각이 증가하더라도 무차원 시간에 따른 무차원 응고량은 변화가 없는

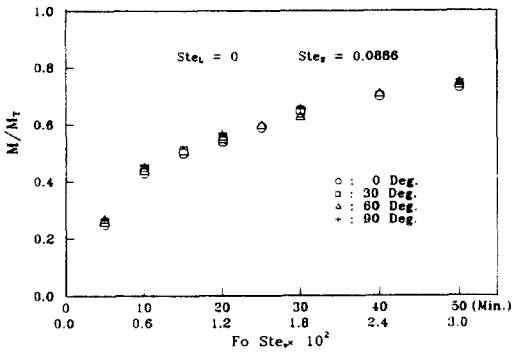


Fig.3 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0$ ,  $Ste_s=0.0886$

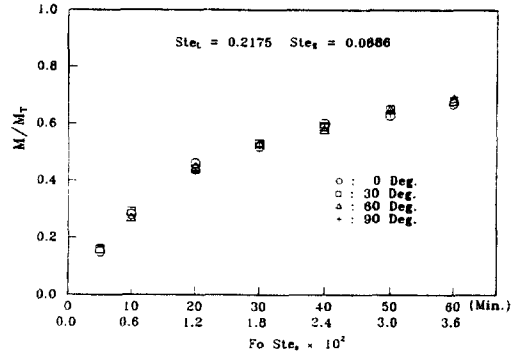


Fig.6 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0.2175$ ,  $Ste_s=0.0886$

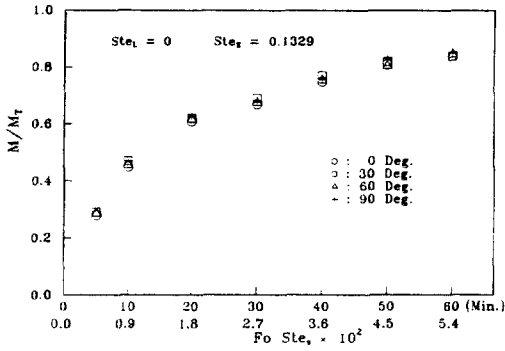


Fig.4 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0$ ,  $Ste_s=0.1329$

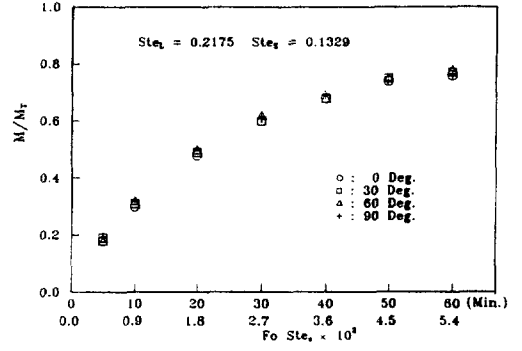


Fig.7 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0.2175$ ,  $Ste_s=0.1329$

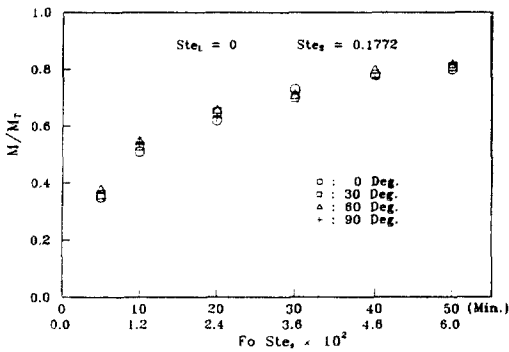


Fig.5 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0$ ,  $Ste_s=0.1772$

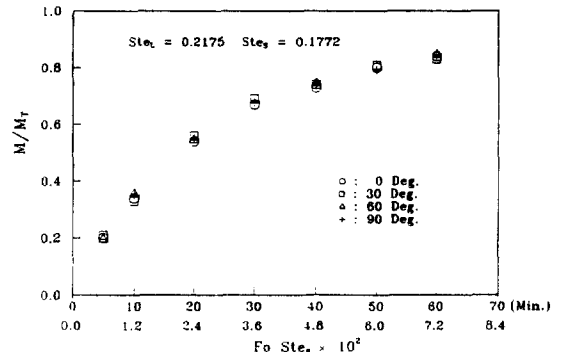


Fig.8 Effect of cylindrical inclination on the solidified mass for  $Ste_L=0.2175$ ,  $Ste_s=0.1772$

것으로 나타났으며 응고 시간이 10분 이후 고상 Stefan수가 0.0886, 0.1329, 0.1772로 증가할 때 마다 응고량  $M/M_T$ 의 값이 약 0.05씩 증가하는 것으로 나타났다. 액상 상변화물질의 초기 과열도가 없으므로 응고과정 동안에 자연대류는 발생하지 않으며 또한 원통형용기에 경사각의 변화를 주어도 경사도에 따른 응고량은 변하지 않고 일치된 분포의 경향을 나타낸다.

Fig. 6, 7, 8은 액상 Stefan수를 0.2175로 고정하고 각 고상 Stefan를 0.0886, 0.1329, 0.1772로 변화시킬 때, 시간 경과에 따른 응고율은 응고 과정동안 원통형용기의 경사각에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나고 있다. 또한 고상 Stefan수가 0.0886, 0.1329, 0.1772로 증가할 때 응고 시간 20분 경과 후, 응고율  $M/M_T$ 의 값은 약 0.05씩 증가하는 것으로 나타났으며 그 증가폭은 시간이 경과함에 따라 점점 증가한다. 이상을 종합해 보면 상변화물질의 응고량은 용기의 경사도에는 거의 영향을 받지 않으나 벽면 파냉도에는 그 의존성이 큰 것으로 나타났다.

Fig.9는 용기의 경사각을 0, 30, 60, 90도로 변화시킬 경우, 상변화물질의 액상 Stefan수가 0.2175, 고상 Stefan수가 각각 0.0886, 0.1772일 때, 액상 상태인 상변화물질의 체적온도 변화를 시간 경과에 따라 나타낸 것이다.

체적온도는 액상의 상변화물질에서 측정된 값이며 액상 영역에서는 전도와 자연대류 현상이 복합적으로 발생하기 때문에 무차원 수  $Fo$   $Ste_s$ 는 시간 변수로 적절한 표현이 아니므로  $X$ 축을 실제 시간 변수  $t$ 로 표시한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 무차원 체적온도는 원통형용기의 경사각의 변화에는 거의 영향을 받지 않으나 고상 Stefan수에 영향을 받는 것으로 나타났다.

이상과 같이 응고량과 체적온도를 고찰해 볼 때, 시간이 경과함에 따라 응고량은 증가하게 되고 부피온도는 응고량에 반비례 하여 감소하게 된다. 또한 응고량과 부피온도는 용기의 경사각에는 영향을 받지 않으나 고상 Stefan수에는 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 상경계면의 형상

수직 및 경사진 원통형용기내 상변화물질의 응고

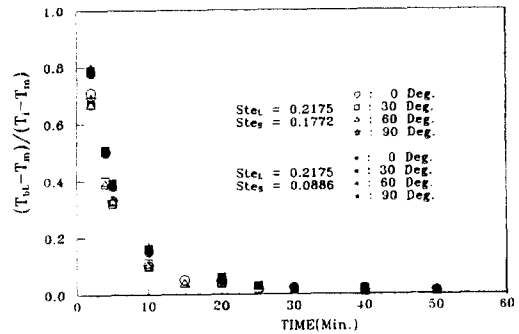


Fig.9 Effect of cylindrical inclination on the decay of the liquid superheat for  $Ste_l=0.2175$ ,  $Ste_s=0.0886$ , 0.1772

과정에서 초기 과열도가 존재하지 않을 경우와 초기 과열도가 존재할 경우의 상경계면의 형상에 대하여 고찰해 보기로 한다.

Fig.10(a)는 액상 Stefan수가 0.2175이고, 고상 Stefan수가 0.1772인 경우,  $y/H=1/2$ 에서 용기의 경사각을 60도로 하였을 때 시간 경과에 따른 국부 응고층 형상의 횡단면을 나타낸 그림이며 Fig.10(b)는 용기의 경사각을 0도로 하였을 때 시간 경과에 따른 국부 응고층 형상의 횡단면을 나타낸 것이다.

Fig.10의 두 그림(a), (b)를 비교하면 용기의 경사각이 0도로 유지될 경우, 용기의 횡 단면의 상부와 하부의 응고층의 두께는 전 시간 범위를 통해 상대적으로 균일한 분포를 보이지만 용기의 경사각이 60도일 때는 응고초기에 응고층의 두께의 분포는 횡단면의 상부가 하부보다 더 밀집된 분포를 나타내고 있다.

특히, 응고초기에 응고층 두께의 차이가 보이는 것은 용기의 경사에 따른 자연대류에 기인하는 현상으로 생각된다.

Fig.11(a)는 액상 Stefan수가 0이고, 고상 Stefan수가 0.1772인 경우,  $y/H=1/2$ 에서 용기의 경사각을 60도로 경사로 하였을 때 시간 경과에 따른 국부 응고층 형상의 횡단면을 나타낸 그림이고 Fig.11(b)는 용기의 경사각을 0도로 유지시킬 때 시간 경과에 따른 국부 응고층 형상의 횡단면을 나타낸 것이다.

Fig.11의 두그림 (a)와 (b)를 비교하면 횡단면의 상부와 하부의 응고층의 두께의 차는 거의 없으며 용기의 경사로 인한 효과도 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 초기 과열도가 존재하지 않을 경우,

$Ste_L = 0.2175$     $Ste_S = 0.1772$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.006$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.012$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.024$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.036$

$Ste_L = 0.2175$     $Ste_S = 0.1772$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.006$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.012$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.024$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.036$

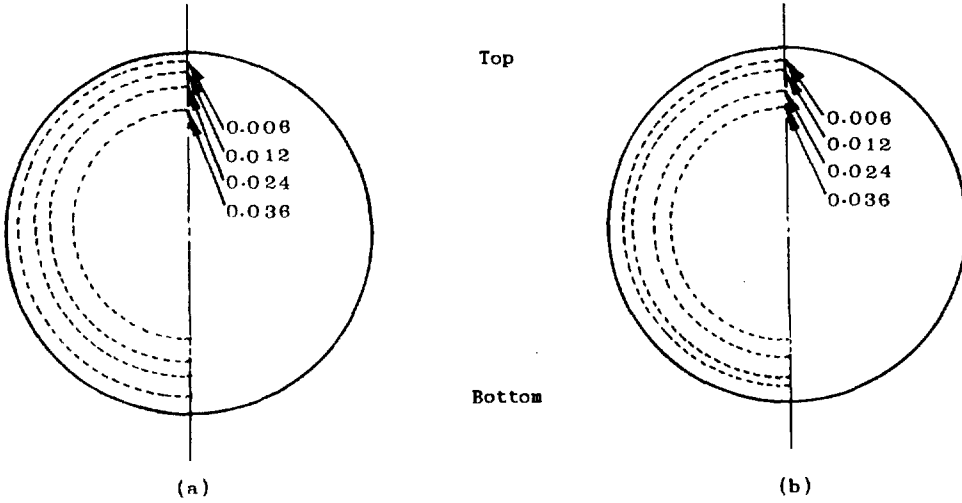


Fig.10 Effect of cylindrical inclination on the local solid-layer thickness at  $y/H=0.5$  for  $Ste_L=0.2175$ ,  $Ste_S=0.1772$

$Ste_L = 0$     $Ste_S = 0.1772$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.006$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.012$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.024$   
 60 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.036$

$Ste_L = 0$     $Ste_S = 0.1772$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.006$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.012$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.024$   
 0 Deg. : Fo  $Ste_S = 0.036$

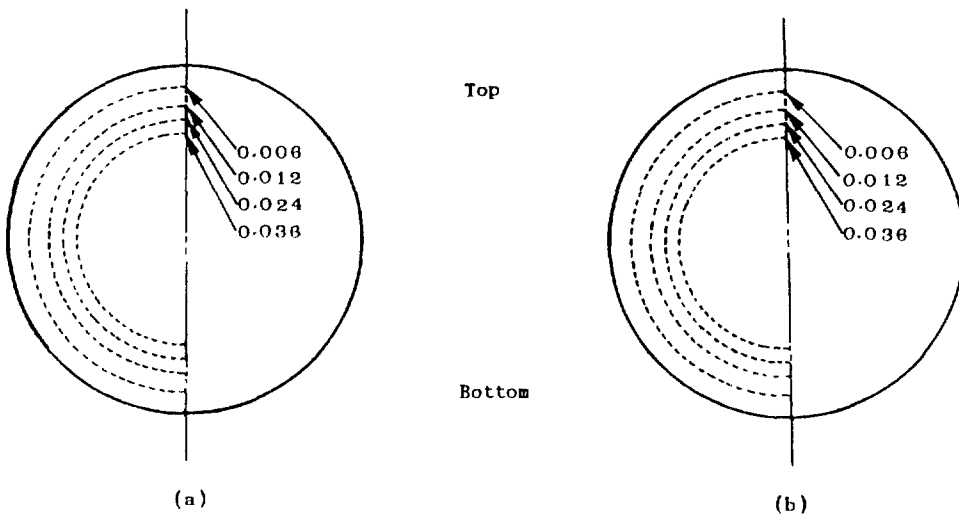


Fig.11 Effect of cylindrical inclination on the local solid-layer thickness at  $y/H=0.5$  for  $Ste_L=0$ ,  $Ste_S=0.1772$



상변화물질내 열전달 현상은 거의 전도에 의한 열전달만이 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

3.4 응고층의 두께

Fig.12는 고상 Stefan수가 0.0886, 0.1329, 0.1772이고 액상 Stefan수가 0일 경우, 시간 경과에 따른 응고층 두께의 실험 평균치의 결과를 수치적인 해(용기의 경사각=0도)와 비교한 것이다.

고상 Stefan수의 각각의 실험조건으로 부터 얻어진 응고층 두께의 실험값들의 평균치는 굵은 실선으로 표시되며 이 실험값들을 식으로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\delta}_{no\_sup} = R_w(0.1636 \log Fo Ste_s + 0.5959) \quad (12)$$

원통 좌표계에 있어서 상변화를 동반하는 비정상 열전도 미분 방정식을 수치해석하여 구한 평균 응고층 두께의 분포를 3가지의 고상 Stefan수(0.0886, 0.1329, 0.1772)에 대하여 각각 실선으로 Fig.12에 나타내었다. 3개의 고상 Stefan수 조건에서 수치해의 편차는 실험값의 편차보다 더 적게 나타나고 있으며 수치해의 응고층 두께의 분포는 실험값과 유사한 곡선을 따르지만, 무차원 시간  $Fo Ste_s$ 수가 1.8일 때 수치적 결과치는 실험에서 얻어진 값 보다 30% 정도 낮게 나타나고 그 이상의 무차원 시간이 경과하면 그 격차는 점점 감소하는 것으로 나타났다. 이와같이 수치적 해가 실험적 값보다 낮은 응고층의 분포를 나타내는 것은 동일한 응고층의 두께에 도달하는데 수치적 해의 경우가 더 장시간 에너지를 방출하고 있다는 것을 의미한다. 이런 차이를 일으키는 가장 큰 이유는 응고 과정시 고상 상변화물질에서 서릿발 같은 수지상의 결정(고상 상변화물질과 같은 물질)이 생성되기 때문인데 이것은 액상 상변화물질과 접하는 고상 상변화 물질과의 접촉면적(전열면적)을 확대시킴에 따라 응고가 촉진되어 응고층의 두께를 크게하는 것으로 생각된다. 또한 이외에 이러한 차이를 일으키는 인자로서 상변화물질의 고상과 액상에서 열전도 계수가 다르기 때문에 열전도 계수를 설정하는 값으로부터 오는 오차와 응고 초기의 미세한 자연대류의 효과등을 들 수 있다.

다음은 액상의 초기 과열도가 존재하는 경우로서

고상 Stefan수가 각각 0.0886, 0.1329, 0.1772이고 액상 Stefan수가 0.2175일 경우, 수직 및 경사진 원통형 용기에서의 응고층 두께의 평균 실험값을 구하여 무차원 시간이 경과함에 따른 응고층 두께의 변화에 대한 수치해의 결과와 비교한것을 Fig.13에 나타내었다. 이들 응고층 두께의 실험값들을 무차원 시간의 함수로 나타내는 실험식을 구하면 (13)식과 같이 나타낸다.

응고초기에 응고층의 두께의 분포는 Fig.12의 경우보다 낮은값의 분포를 보이며 보다 완만한 기울기로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상을 나타내는 주된 이유는 첫째, 초기 과열도가 존재하기 때문이며 둘째, 응고 초기에 자연대류가 발생함으로써 자연대류에 의한 유동이 응고층을 감소시키기 때문이라고 생각된다.

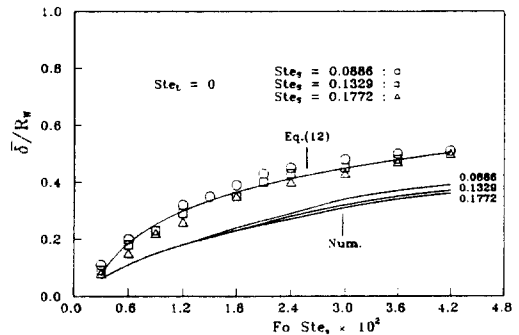


Fig.12 Comparison of experimental and numerical results for the solidified layer thickness for  $Ste_L=0$  and  $Ste_s=0.0886, 0.1329, 0.1772$

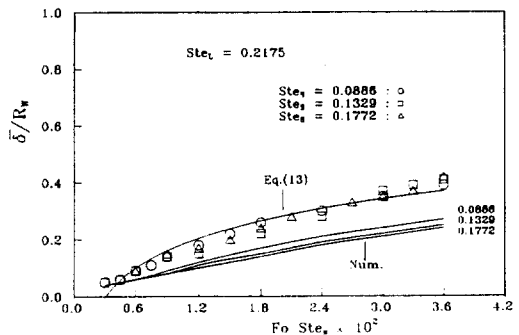


Fig.13 Comparison of experimental and numerical results for the solidified layer thickness for  $Ste_L=0.2175$  and  $Ste_s=0.0886, 0.1329, 0.1772$

$$\bar{\delta}_{sup} = R_w(0.1504 \log Fo Ste_s + 0.4777) \quad (13)$$

### 3.5 응고 에너지

본절에서는 응고 과정에서 시간경과에 따른 각각의 액상 Stefan수와 고상 Stefan수의 조건에 대한 액상 상변화물질로부터 방출되는 각 에너지를 해석하고자 한다.

Fig.14, 15는 액상 Stefan수를 0으로 고정하고 고상 Stefan수를 각각 0.0886, 0.1772로 하였을 경우, 시간경과에 따른 최대 방출 에너지( $E_{max}$ )에 대한 각 에너지의 성분비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 응고 상변화물질에서 방출되는 현열 에너지  $E_{s1}$ 값은 잠열 에너지  $E_L$ 에 비해 매우 작게 나타났으나, 시간이 경과함에 따라 증가하고 있다. 또한 전체 응고 에너지 중 현열에너지가 차지하는 비중은 시간이 경과함에 따라 커지고 벽면 과냉도가

큰 Fig.15의 경우가 Fig.14에 비하여  $E_{s1}$ 이 크게 나타나므로 벽면 과냉도가 클수록 현열 에너지의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.

Fig.16, 17은 액상 Stefan수를 0.2175로 하고, 고상 Stefan수를 각각 0.0886, 0.1772로 하였을 경우, 시간경과에 따른 각 에너지의 성분비를 나타낸 것으로  $E_{s1}$ ,  $E_{s2}$ ,  $E_{s3}$  각각의 값은  $E_L$ 값에 비하여 작게 나타났고,  $E_L$ 의 값과  $E_L+E_{s1}$ 값의 차는 미소하게 나타나며, 응고된 상변화물질에서 방출되는 에너지  $E_{s2}$  값과 용융 상변화물질에서 방출된 에너지  $E_{s3}$ 값의 차는 시간이 경과함에 따라 점점 감소하는 경향을 갖는다. 이것은 액상으로 잔여하는 상변화물질의 체적온도  $T_M$ 이 용융온도  $T_m$ 과 근사한 값으로 되기 때문으로 생각된다. 전체응고에너지에 대한  $E_{s2}$ 의 비율은 응고 초기가 시간이 경과했을 때보다 작은 값을 갖는다. 또한 고상 Stefan수가 큰 Fig.17의 경우가 Fig.16의 경우에 비하여  $E_L+E_{s1}$ 의 값과  $E_L$ 의

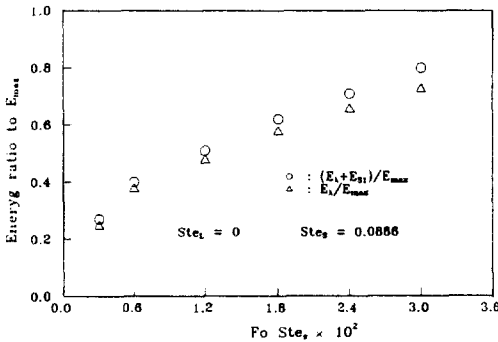


Fig.14 Energy ratio to  $M_{max}$  for  $Ste_L=0$  and  $Ste_s=0.0886$

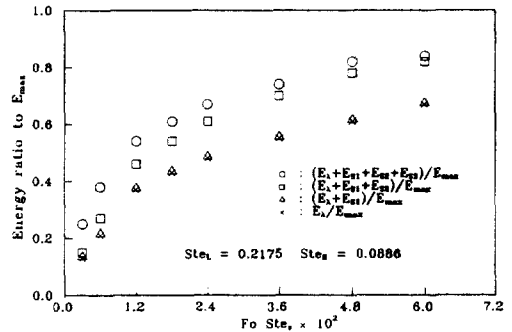


Fig.16 Energy ratio to  $M_{max}$  for  $Ste_L=0.2175$  and  $Ste_s=0.0886$

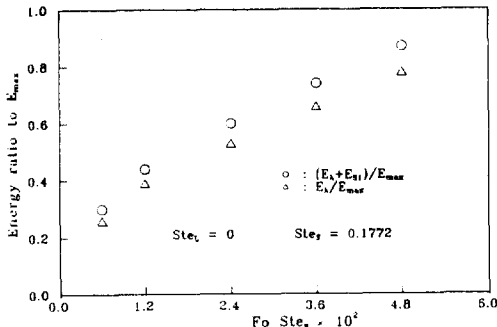


Fig.15 Energy ratio to  $M_{max}$  for  $Ste_L=0$  and  $Ste_s=0.1772$

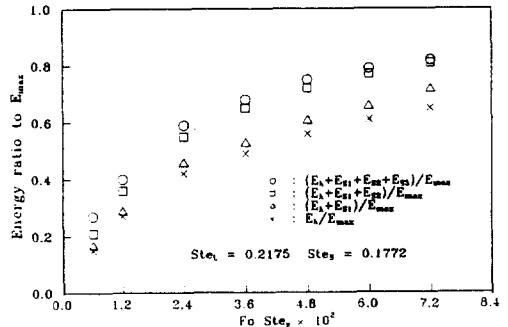


Fig.17 Energy ratio to  $M_{max}$  for  $Ste_L=0.2175$  and  $Ste_s=0.1772$

값의 차가 크게 나타나고 있다. 이상과 같이 전 에너지 중 현열 에너지의 값  $E_{s1}$ 이 차지하는 비율은 벽면 과열도( $T_m - T_w$ )에 따라 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 실험에서는 상변화물질(n-도코산 파라핀)이 채워져 있는 원통형용기의 외부벽면을 등온 조건으로 한 응고 과정에서 용기의 경사도를 변화시켰을 때 응고량, 상경계면의 형상, 응고층의 두께 및 응고 에너지 등을 실험적으로 연구, 분석하였고 응고층의 두께는 비정상 열전도 방정식을 수치해석하여 얻은 결과와 비교, 검토하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 액상 Stefan수 및 고상 Stefan수의 변화에 따른 원통형용기내 상변화물질의 응고량, 평균 응고층의 두께 및 방출되는 에너지는 축열조의 경사각 변화에 크게 영향을 받지 않지만 용기의 벽면에 가까운 응고층의 두께에 영향을 주는 것으로 나타났다.

2) 초기 과열도가 존재하는 경우( $Ste_1=0.145, 0.2175$ )는 초기 과열도가 존재하지 않는 경우( $Ste_1=0$ )보다 응고량이 작게 나타나며 총 응고량은 액상 Stefan수보다 고상 Stefan수에 의해 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

3) 고상 Stefan수의 각각의 실험조건으로부터 얻어진 평균 응고층 두께와 무차원 시간( $Fo Ste_s$ )과의 관계식이 다음과 같이 구해졌다.

(1) 초기 과열도가 존재하지 않을 경우

$$\bar{\delta}_{no-sup} = R_w(0.1636 \log Fo Ste_s + 0.5959)$$

(2) 초기 과열도가 존재할 경우

$$\bar{\delta}_{sup} = R_w(0.1504 \log Fo Ste_s + 0.4777)$$

또한 수치해석하여 얻어진 평균 응고층의 두께는 동일한 시간 조건에서 실험값보다 최대 약 30%

낮게 나타났다.

4) 응고에 대한 총 에너지는 잠열 에너지가 대부분을 차지하나 액상 Stefan수와 고상 Stefan수가 큰 경우( $Ste_s=0.1772, Ste_1=0.2175$ )에는 총 에너지 중 현열 에너지가 차지하는 부분도 평균 25% 정도로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, 1989, "상변화 물질을 사용한 축열조에서의 열전달", 한국 태양에너지 학회지 9(1), pp.53-61.
2. 梁取美智雄, 増田降司, 昭和 59年, "顯熱蓄熱材の熱特性と空調機への應用", 冷凍, 第57卷, 第60號", pp.25-30.
3. 임장순, 이채문, 김준근, 조남철, 김일겸, 1989, "수평원관 내에서의 내향용융 및 응고 열전달 실험", 공기조화 냉동공학회지 1(4), pp.319-329.
4. N.Ranachandran, Y.Jalurid and J.P.Gupta, 1981, "Thermal and Fluid Flow in One-Dimensional Solidification", Letters in Heat&Mass Transfer, Vol.8, pp.69-77.
5. F.E.Moore and Y.Bayzzitoglu, 1982, "Melting within a Spherical Closure", ASME J of Heat Transfer, Vol.104, pp.19-23.
6. B.Kahori and S.Ramadhyni, 1985, "Studies on Heat Transfer from a Vertical Cylinder with or without Fins, Embedded in a Solid Phase Change medium", Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.107, pp.44-51.
7. H.Rieger and Beer, 1986, "The Melting Process of Ice Inside a horizontal Cylinder ; Effect of Density Anomaly", Trans. ASME J. of Heat Transfer, Vol.108, pp.166-173.
8. 임장순, 송하진, 1992, 경사진 용기내에서 상변화물질의 내향용융에 관한 실험적인 연구", 한국 태양에너지 학회지 12(1), pp.48-58.