

## 상변화물질을 이용한 잠열축열조에 관한 기초 연구

- 수평원관내에서의 내향용융 및 응고열전달 실험 -

### A Study of Heat Storage System with Phase Change Material - Inward Melting and Solidification in a Horizontal Cylinder -

김 일 겸\*, 조 남 철\*, 김 준 근\*, 이 채 문\*\*, 임 장 순\*\*\*  
I. G. Kim, N. C. Cho, J. G. Kim, C. M. Lee, C. S. Yim

#### ABSTRACT

Heat transfer phenomena during inward melting and solidification process of the phase change material were studied experimentally. The phase change medium was 99% pure n-docosane paraffin ( $C_{22}H_{46}$ ). The solid-liquid interface motion during phase change was recorded photographically.

Measurements were made on the temperature, the solid-liquid interface, the melted or frozen mass and the various energy components stored or extracted from the cylinder wall.

For melting, the experimental results reaffirmed the dominant role played by the conduction at an early stage, by the natural convection at longer time.

For solidification, natural convection effects in the superheated liquid were modest and were confined to short freezing time. Although the latent energy is the largest contributor to the total stored or extracted energy, the aggregate sensible energies can make a significant contribution, especially at large cylinder wall superheating or subcooling, large initial phase change material subcooling or superheating.

#### 기 호 설 명

$C$	: Specific heat (비열)	$E_{s2}'$	: Sensible energy extracted from liquid which solidifies (응고되는 액체에서 추출되는 현열)
$E_{s1}$	: Sensible energy stored in liquid(액체 내의 저장 현열)	$E_{s3}$	: Sensible energy stored in remained solid (잔여고체에 저장된 현열)
$E_{s1}'$	: Sensible energy extracted from sub-cooled (과냉고체에서의 추출되는 현열)	$E_{s3}'$	: Sensible energy extracted from liquid which remains unfrozen (액상에서 추출되는 현열)
$E_{s2}$	: Sensible energy stored in solid (고체 내의 저장 현열)	$E_{tot}$	: Total energy stored(총축열)

\* 인하대학교 대학원

\*\* 정회원, 유한공업전문대학

\*\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학

$E_{tot}$	: Total energy extracted (총추출열)
$E_{\lambda}$	: Energy absorbed at latent heat (잠열)
$E_{\lambda}'$	: Energy liberated by freezing (응고잠열)
$K$	: Thermal conductivity (열전도율)
$M_l$	: Melted mass (용해질량)
$M_s$	: Frozen mass (응고질량)
$M_{tot}$	: Total mass of phase change material (상변화물질의 총질량)
$R$	: Radius of solid-liquid interface (고액 경계 반경)
$R_w$	: Radius of tube wall (관벽의 반경)
$T$	: Temperature of phase change material (상변화물질의 온도)
$T_{bl}$	: Bulk temperature of melted liquid (용해액체의 평균온도)
$T_{bs}$	: Bulk temperature of unmelted solid (용해되지 않은 고체의 평균온도)
$T_{ol}$	: Bulk temperature of unfrozen liquid (응고되지 않은 액체의 평균온도)
$T_{os}$	: Bulk temperature of frozen solid (응고고체의 평균온도)
$T_i$	: Initial temperature of liquid or solid phase change material (상변화물질의 초기온도)
$T_m$	: Phase change temperature (상변화 온도)
$T_w$	: Temperature of tube wall (관벽의 온도)
$V$	: Melted or frozen volume (용해 또는 응고체적)
$V_o$	: Total volume of phase change material (상변화물질의 총체적)

#### GREEK SYMBOL

$\alpha$	: Thermal diffusivity (열확산율)
$\beta_v$	: Thermal expansion coefficient (열팽창계수)
$\rho$	: Density (밀도)
$\lambda$	: Latent heat (잠열)
$\phi$	: Angle (각도)

## 1. 서 론

최근에 들어와서 우리나라와 같이 에너지 부존자원이 거의 없는 국가에서는 태양열, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 대체에너지 이용기술의 개발과 불규칙한 전력수요로 인한 잉여전력의 효율적인 사용 등, 에너지 사용에 대한 기술개발이 요구되고 있다.

이러한 에너지 사용에 관한 기술개발중, 대체에너지의 활용에 있어서는 각 에너지를 규칙적이고 지속적인 에너지원으로 변화시켜 주기위한 열에너지의 축적기술이 절실한 문제로 대두되고 있으며, 이에 관한 많은 연구들이 진행되고 있다.

열에너지 저장시스템중 우선적으로 해결하여야될 문제로는 고효율이며 에너지 저장밀도가 큰 축열장치의 개발을 들 수 있다. 이러한 축열장치에서 사용되고 있는 열에너지의 저장방법중 지금까지 알려진 대표적인 방법은 단상의 물질을 축열매질로 사용하는 현열이용형 축열방법과 상변화물질(PCM: Phase Change Material)을 축열매질로 사용하는 잠열이용형 축열방법이었다. 이중 잠열이용형 열에너지 축열방법이 단위체적당 축열밀도가 크고 적은 온도차 범위내에서 열을 저장할 수 있기 때문에 효율적인 축열방법으로 주목받고 있다.

상변화물질이 용융 또는 응고될때의 열전달 특성에 관한 연구보고들은 실험적인 방법<sup>1,3,4,6,10)</sup>과 수치적인 방법<sup>2,3,5,7,8,9)</sup>으로 열원 혹은 냉각원이 실험용기 내부에 있는 경우<sup>2,3,4,7,9)</sup>와 외부에 있는 경우<sup>1,5,6,8,10)</sup>에 대하여 발표되었으나 상변화물질을 이용한 축열, 방열장치를 설계하기 위한 기초자료로 이용하기엔 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 상변화물질을 이용한 축열, 방열장치에 적용할 수 있는 기초자료를 얻고자 수평형 원통용기내에 채워진 상변화물질이 등온벽면 조건에 의해 용융 및 응고되는 현상에 대하여 실험적인 방법으로 연구하였으며, 상변화물질의 초기온도와 용기벽면의 벽면온도를 각각 변화시켰을때 시간경과에 따른 상

변화물질 내의 온도분포, 상경계면의 형상, 용융율, 응고량, 용융에너지, 응고에너지 등을 비교함으로써 상변화물질의 초기온도와 용기 벽면의 벽면온도가 열전달현상에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

상변화물질의 용융 및 응고과정중 축열 또는 방열된 에너지는 다음과 같이 표현되어진다. 상변화물질의 초기온도가 상변화온도와 동일할때 용융 및 응고된 상변화물질의 질량을 각각  $M_1$ ,  $M_s$  라 하면 이때 축열된 잠열에너지  $E_\lambda$  와 방열된 잠열에너지  $E_\lambda'$  는

$$E_\lambda = \lambda M_1 \text{ 이고} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_\lambda' = \lambda M_s \text{ 이다.} \dots\dots\dots (2)$$

만일 용융 및 응고시 용기내 상변화물질의 전체질량( $M_{tot}$ )이 모두 용융 또는 응고되었다면 축열된 잠열에너지( $E_{\lambda max}$ )와 방열된 잠열에너지( $E_{\lambda max}'$ )는

$$E_{\lambda max} = E_{\lambda max}' = \lambda M_{tot} \text{ 이다.} \dots\dots\dots (3)$$

용융 및 응고된 상변화물질이 상변화온도 이상으로 될때 축열되는 현열에너지( $E_{s1}$ )와 상변화온도 이하로 될때 방열되는 현열에너지( $E_{s1}'$ )는

$$E_{s1} = M_1 C_{liq}(T_{bi} - T_m) \dots\dots\dots (4)$$

$$E_{s1}' = M_s C_{sol}(T_m - T_{os}) \dots\dots\dots (5)$$

으로 된다. 따라서 상변화물질의 초기온도가 상변화온도와 동일할때 상변화물질에 축열되는 총에너지( $E_{tot}$ )와 방열되는 총에너지( $E_{tot}'$ )는

$$E_{tot} = E_\lambda + E_{s1} \text{ 이고} \dots\dots\dots (6)$$

$$E_{tot}' = E_\lambda' + E_{s1}' \text{ 이다.} \dots\dots\dots (7)$$

또한 상변화물질의 초기온도가 상변화온도 이하 및 이상일때에는 식(6), (7)에서 나타내고 있는 에너지에 두가지 성분의 에너지가 더 추가되는데, 용융시에는 용융된 상변화물질의 초기온도에서 상변화온도까지 상승할때 축열되는 현열에너지( $E_{s2}$ )로써 식(8)과 같으며 응고

시에는 응고된 상변화물질의 초기온도에서 상변화온도까지 냉각될때 방열되는 현열에너지( $E_{s2}'$ )로써 식(9)와 같다. 또한 용융시에는 고상으로 남아있는 상변화물질의 평균온도까지 가열됨으로써 축열되는 현열에너지( $E_{s3}$ )는 식(10)과 같으며 응고시에는 액체상태로 남아있는 상변화물질의 평균온도까지 냉각될때 방열되는 현열에너지( $E_{s3}'$ )는 식(11)과 같다.

$$E_{s2} = M_1 C_{sol}(T_m - T_i) \dots\dots\dots (8)$$

$$E_{s2}' = M_s C_{liq}(T_i - T_m) \dots\dots\dots (9)$$

$$E_{s3} = (M_{tot} - M_1) C_{sol}(T_{bs} - T_i) \dots\dots (10)$$

$$E_{s3}' = (M_{tot} - M_s) C_{liq}(T_i - T_{ol}) \dots\dots (11)$$

따라서 상변화물질의 초기온도가 상변화온도와 같지않을 경우 상변화물질로부터 축열되는 총에너지( $E_{tot}$ )는 식(12)과 같고 방열되는 총에너지( $E_{tot}'$ )는 식(13)과 같다.

$$E_{tot} = E_\lambda + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \dots\dots\dots (12)$$

$$E_{tot}' = E_\lambda' + E_{s1}' + E_{s2}' + E_{s3}' \dots\dots\dots (13)$$

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 상변화물질이 채워진 실험용기(Test Section)의 상세도는 Fig. 2에 각각 나타냈다. 실험장치의 주요부는 가열항온조, 상변화물질이 담긴 용기, 온도조절장치, 냉각항온조 순

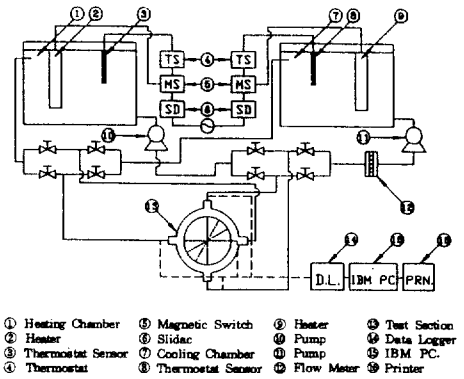


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

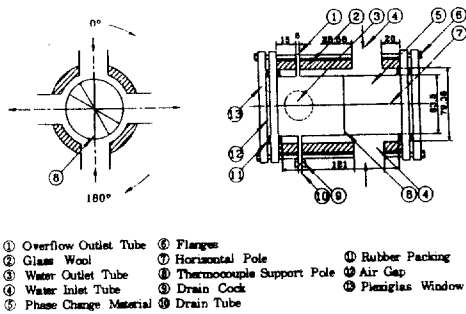


Fig. 2 Schematic diagram of test section

환Pump, 온도측정장치, 기록장치 등으로 이루어져 있다.

실험용기내 상변화물질의 평형상태를 만들기 위하여 100ℓ용량의 가열항온조를 사용하였으며, 항온조내에는 3kw의 전기히터를 내장하였고, 항온수는 순환Pump(한일Pump PDB-86)로 실험용기 주위를 일정시간 순환시켰다. 그리고 열의 출입을 막기 위하여 항온조와 실험용기, 연결고부호스 등은 유리섬유의 스티로폴로 단열시켰다. 실험용기는 내경 63.5mm, 길이 121mm, 두께 2mm인 동관이며, Fig.2에 나타난 바와 같이 실험용기 주위를 등온으로 유지하기 위하여 내경 79.38mm의 동관을 실험용기 외부에 이중관 형태로 설치하여 항온수를 순환시켰다. 순환수의 입출구는 실험용기벽면을 등온조건으로 하기 위하여 각 2개씩 설치하였다. 시간경과에 따른 상경계면의 형상을 가시적으로 측정하기 위하여 실험용기의 양측면은 두께 8mm의 Plexiglas disk를 2중으로 부착하였으며, 2개

의 Plexiglas 사이에 공기층을 뒀으므로 단열 효과를 증가시켰다. 상변화물질은 상부의 overflow outlet tube를 통해 주입시키고, drain valve를 통해 배출시킨다.

실험과정에서 상변화물질 내부의 온도분포를 측정하기 위하여 열전대(T-Type, 0.5mm)를 설치하였으며, 열전대의 위치는 Fig.2에 나타난 바와 같이 원관 단면의 각 30°지점에 3개씩 총 24개, 동관 입출구 2개, 가열, 냉각 항온조 내에 2개, 실험용기의 길이방향 온도분포를 비교 측정하기 위하여 중심축에 2개, 총 30개의 열전대를 설치하였고, 실험용기내의 열전대는 고정된 가는 대나무 막대에 순간접착제를 사용하여 부착시켰다. 이 열전대에서 측정된 온도는 Data Logger(Fluke 2280 B)를 사용하여 RS-232 C Port가 장착된IBM-PC(AT 기종)로 수신하여 기록계에 기록하였다.

### 3. 2 실험방법

본 실험에서 사용한 상변화물질은 상변화온도가 42.5℃인 시약용 n-docosane paraffin (C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>)(일본 Shiyo pure chemical 사 제품, 순도 99%)이며 이의 물성치는 표 1 과 같다.

용융실험은 상변화물질의 초기온도(T<sub>i</sub>)가 상변화온도(42.5℃)일 경우와 상변화온도 이하(32.5℃)일 경우에 벽면온도를 52.5℃, 62.5℃로 하여 용융실험을 행하였으며 용고 실험은 상변화물질의 초기온도가 상변화온도일 경우와 상변화온도이상(52.5℃, 62.5℃)일 경우에 벽면온도를 32.5℃, 22.5℃로하여

Table 1 Thermophysical properties of n-doco- sane paraffin (C<sub>22</sub> H<sub>46</sub>)

Properties	Value	Properties	Value
T <sub>m</sub> (°C)	42.5	ρ <sub>sol</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	788
C <sub>sol</sub> (KJ/kg °C)	2.2	ρ <sub>liq</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	766
C <sub>liq</sub> (KJ/kg °C)	1.8	β <sub>v</sub>	8.3 × 10 <sup>-4</sup>
λ (KJ/kg)	248.3	μ (kg/m s)	3.8 × 10 <sup>-3</sup>
K <sub>sol</sub> (kw/m °C)	1.6 × 10 <sup>-4</sup>	α <sub>liq</sub> (m <sup>2</sup> /s)	8.94 × 10 <sup>-8</sup>
K <sub>liq</sub> (kw/m °C)	1.54 × 10 <sup>-4</sup>	α <sub>sol</sub> (m <sup>2</sup> /s)	1.02 × 10 <sup>-7</sup>
Pr	55.37	ν (m <sup>2</sup> /s)	4.90 × 10 <sup>-7</sup>

실험을 행하였다.

실험초기에 상변화물질이 열평형상태에 도달되도록 하기 위하여 액상 Paraffin을 충전시켜 8시간에서 16시간 정도 등온수를 순환시켰으며, 실험용기내 측정점의 온도분포와 실험초기 설정온도와의 차가  $0.05^{\circ}\text{C}$  이내로 들었을때 열평형상태에 도달한 것으로 가정하여 실험을 시작하였다. 온도분포는 1분마다 측정하였고, 시간경과에 따른 상경계면의 형상과 응고량을 측정하기 위해 각 실험시간 step마다 사진촬영하였다. 사진촬영은 실험용기의

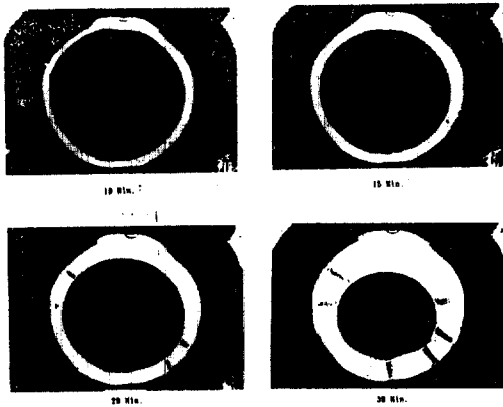


Photo. 1 Photograph of melting front at time variation:  $T_m - T_i = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^{\circ}\text{C}$

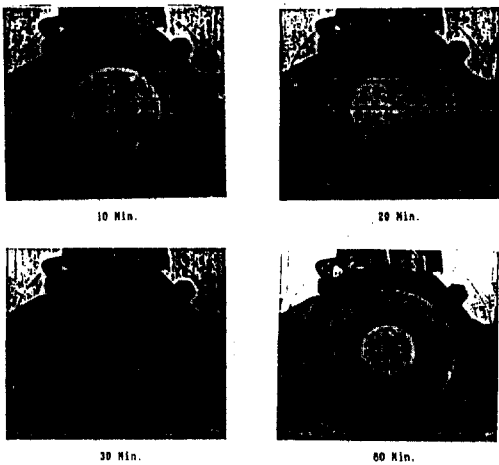


Photo. 2 Photograph of freezing front at time variation:  $T_i - T_m = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^{\circ}\text{C}$

오른쪽과 왼쪽에 광원을 두고, 왼쪽에서 35 mm Nikon FM2 Camera로 Kodak Tri-X film(ASA 400)과 Ilford HP5DX film(ASA 400)을 사용하여 각 용융 및 응고현상을 촬영하였으며, 그 예로 촬영한 사진을 Photo.1과 Photo.2에 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원통형 수평용기내에 충전된 상변화물질의 용융 및 응고과정 중에 일어나는 열전달현상을 해석하였으며 상변화물질의 초기온도 및 용기의 벽면온도를 변화시키면서 상변화물질내의 온도분포, 상경계면의 형상, 용융율, 응고량, 용융에너지, 응고에너지 등을 구하였다.

##### 4.1 온도분포

Fig. 3. 4는 용융시 초기과냉도( $T_i - T_m$ )가 각각  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ 이고 벽면과열도( $T_w - T_m$ )가  $10^{\circ}\text{C}$ 일 경우에 각 원주방향의 온도분포를 나

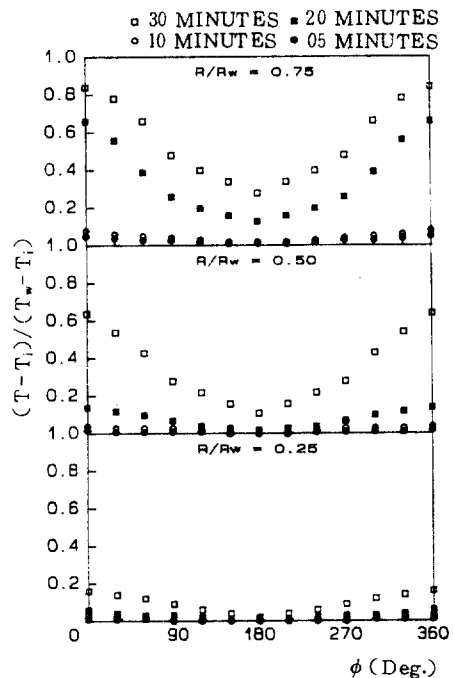


Fig. 3 Temperature profile at different  $R/R_w$ :  $T_m - T_i = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^{\circ}\text{C}$

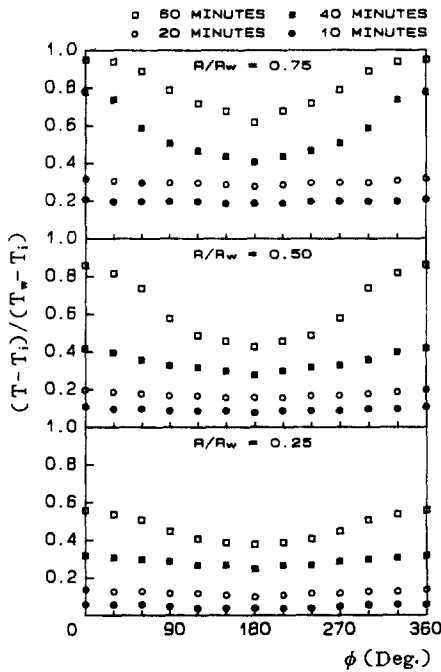


Fig. 4 Temperature profile at different  $R/R_w$  :  $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$

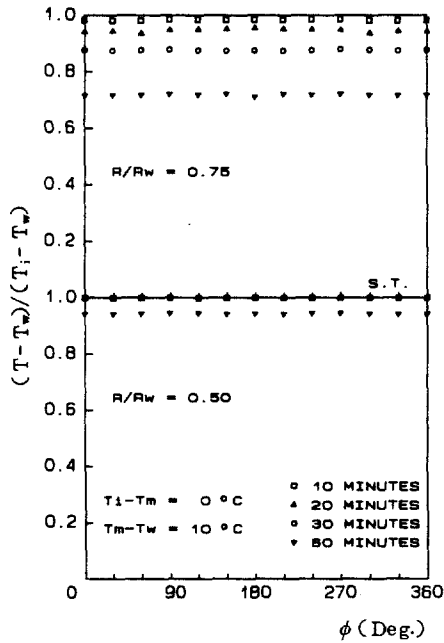


Fig. 5 Temperature profile at different  $R/R_w$  :  $T_i - T_m = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

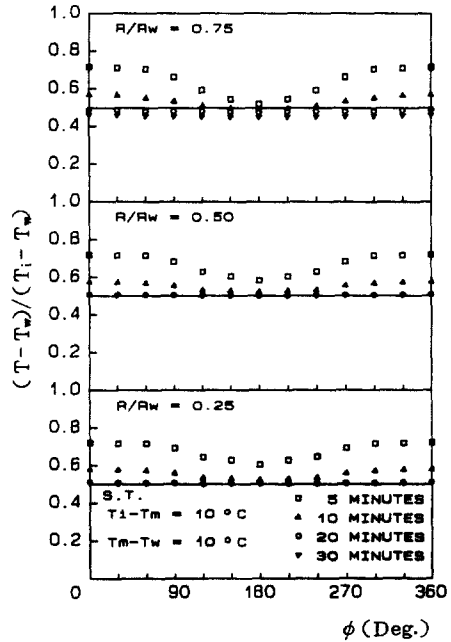


Fig. 6 Temperature profile at different  $R/R_w$  :  $T_i - T_w = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

타낸 것이다. 용융초기에는 용기내부 각원주 방향의 온도분포가 거의 일정하나, 시간이 경과할수록 원주방향의 온도분포는  $\phi=0^\circ(360^\circ)$ 에서 가장 높고,  $\phi=180^\circ$ 인 위치로 갈수록 낮아지게 된다. 위의 결과로부터 초기 용융과정에서는 벽면을 통한 상변화물질로의 열전달이 전도에 의한것이 지배적이거나, 시간이 경과할수록 자연대류에 의한 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5, 6은 응고시 초기과열도( $T_i - T_m$ )가 각각  $0^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ 이고 벽면과냉도( $T_m - T_w$ )가  $10^\circ\text{C}$ 인 경우에 측정된 온도분포를 나타낸 것으로 초기과열도가 없는 경우에는 원주방향 온도분포는 시간경과에 따라 거의 일정하게 나타나나 초기과열도가  $10^\circ\text{C}$ 인 경우에는 응고초기에 원주방향의 온도차가 나타나고 시간이 경과함에 따라 원주방향의 온도차이는 점점 줄어든다. 따라서 초기과열도가 없는 경우에는 전도에 의한 열전달이 지배적이고, 초기과열도가  $10^\circ\text{C}$ 인 경우에는 응고초기에 자연대류에 의한 열전달의 영향을 받지만 시간이

경과함에 따라 자연대류의 영향은 줄어들고 전도에 의한 열전달이 작용함을 알 수 있다.

#### 4.2 상경계면의 형상

Fig. 7~Fig. 12는 상변화물질의 용융 및 응고시 시간경과에 따른 상경계면형상의 변화를 사진촬영한 후 이것을 다시 Cubic Spline Curve를 이용하여 그림으로 나타낸 것이다.

Fig. 7, 8은 초기과냉도가 각각 0 °C, 10 °C 이고 벽면과열도가 10 °C인 조건에서의 용융되는 상경계면의 형상을 나타낸 것으로 용융 초기에는 전도에 의한 열전달이 지배적으로 되어 상경계면이 거의 원형상태이나, 용융이 진행될수록 자연대류 열전달의 영향으로 인한 상경계면 형상의 변화가 생기기 시작하였다. 즉 상경계면의 전진이  $\phi=0^\circ$  위치에서 가장 빠르고,  $\phi=180^\circ$  위치로 갈수록 점점 느려진다.

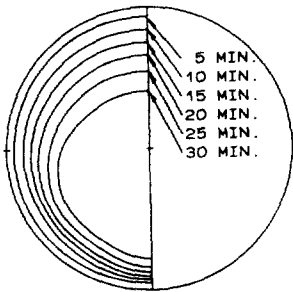


Fig. 7 Timewise motion of the melting front for  $T_m - T_i = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$  (fixed P. C. M.)

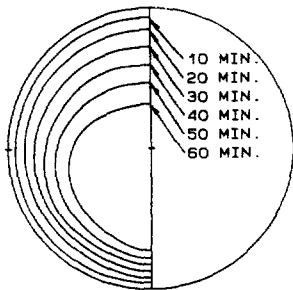


Fig. 8 Timewise motion of the melting front for  $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$  (fixed P. C. M.)

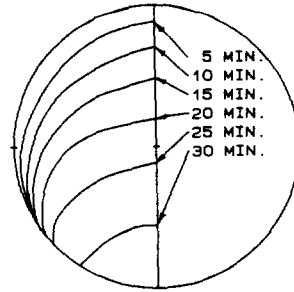


Fig. 9 Timewise motion of the melting front for  $T_m - T_i = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$  (unfixed P. C. M.)

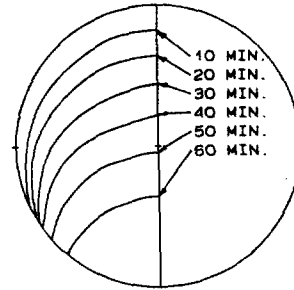


Fig. 10 Timewise motion of the melting front for  $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$  (unfixed P. C. M.)

Fig. 9, 10은 Fig. 7, 8과 같은 온도조건에서 수평용기 내에 충전되어 있는 상변화물질이 중심지대에 고정되어 있지않은 경우에 시간경과에 따른 용융시 상경계면 형상의 변화를 나타낸 것으로, 미용융된 고상 상변화물질의 밀도가 액상의 밀도보다 크기 때문에 고상 상변화물질이 원관 바닥으로 가라앉게 된다. 이때 바닥에 접촉되어 있는 고상의 상변화물질은 벽면온도의 영향을 직접 받게되어 하부에서의 용융이 상부에서의 용융보다 크게 나타난다.

Fig. 11, 12는 응고시 초기과열도가 각각 0 °C, 10 °C이고 벽면과열도가 10 °C인 경우에 상경계면의 형상을 시간경과에 따라 나타낸 것이다. 초기과열도가 없는 경우에는 시간경과에 따른 상부와 하부의 응고층 두께의 차는 거의 없는 것으로 나타났으나 초기과열도가 10 °C인 경우에는 응고초기에 상부와 하부의 응고층 두께의 차가 나타난다. 그러나 시간이 경과함에

따라 그 차는 점점 줄어들어 20 분이 경과한 후에는 응고층 두께의 차는 거의 나타나지 않는다. 따라서 초기과열도가 없는 경우에는 전도에 의한 열전달이 지배적이고 벽면과냉도가

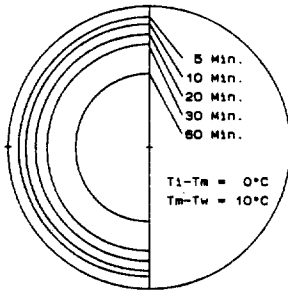


Fig. 11 Freezing front at time variation :  $T_i - T_m = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

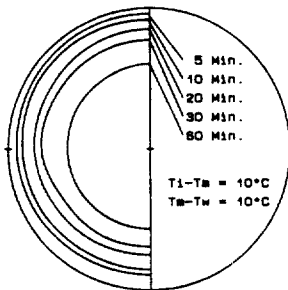


Fig. 12 Freezing front at time variation :  $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

10 °C인 경우 응고초기에는 자연대류에 의한 열전달이 영향을 미치고 있으나 시간이 경과함에 따라 자연대류의 영향은 감소하고 전도에 의한 열전달이 지배적으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

4. 3 용 용 율

Fig. 13, 14는 No-Subcooling 조건과 초기과냉도가 10 °C인 Subcooling 조건에서 벽면과열도를 10 °C, 20 °C로 변화시켰을때 시간에 따른 용융체적을 나타낸 것으로, Fig. 13은 수평원관내 상변화물질이 원관중심에 고정되어 있는 경우에서, Fig. 14는 상변화물질이 고정되어 있지않은 경우에서 상변화물질의 초기과냉도와 벽면과열도가 용융율에 미치는 영향을

고찰하기 위하여 무차원 용융율( $V/V_0$ )을 시간의 함수로써 나타낸 것이다. 용융율은 초기과냉도가 적고 벽면과열도가 클수록 크며, 초기 용융과정 동안에는 직선적으로 증가하나, 용융이 진행됨에 따라 그 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 초기과냉도가 10 °C이고 벽면과열도는 20 °C인 경우가 초기과냉도가 없고 벽면과열도가 10 °C인 경우보다 용융율이 초기시간(약 5 분)부터 커지기 시작하여 시간이 경과할수록 증가하고 있음이 나타난다. 이로부터 상변화물질의 용융과정중 벽면과열도가 초기과냉도보다 용융율에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그리고 상변화물질이 원관중심 지지대에 고정되어 있지않은 경우가 고정되어 있는 경우보다 초기부터 용융율이 크게 나타나고 있다.

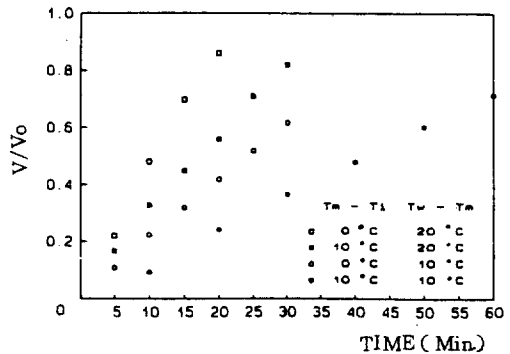


Fig. 13 Timewise variation of molten volume fraction at fixed P. C. M.

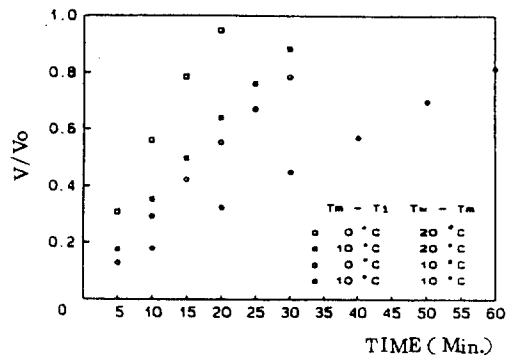


Fig. 14 Timewise variation of molten volume fraction at unfixed P. C. M.



#### 4.4 응고량

Fig. 15, 16은 각각 벽면과냉도가 10 °C, 20 °C일때 초기과열도가 0 °C, 10 °C, 20 °C일경우 시간경과에 따른 무차원 응고량( $V/V_0$ )을 나타낸 것으로 초기과열도가 없을 경우가 10 °C, 20 °C일 경우에 비하여 더 많은 양이 응고되었고, 응고초기에는 초기과열도에 따라 응고량의 차가 크나 시간이 경과함에 따라 응고량의 차가 점점 줄어들었고 벽면과냉도가 클 경우가 작을때 보다 응고량은 더 많다. 이 결과로 보아 응고초기에는 초기과열도가 응고

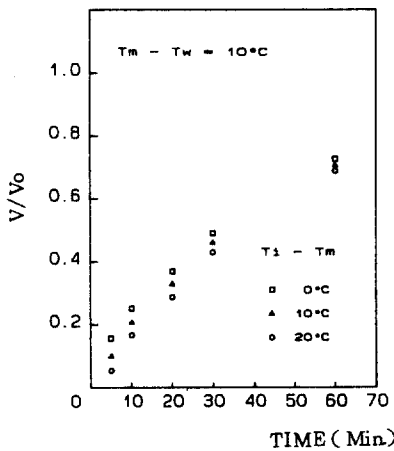


Fig. 15 The frozen volume at different initial superheating :  $T_m - T_w = 10\text{ }^\circ\text{C}$

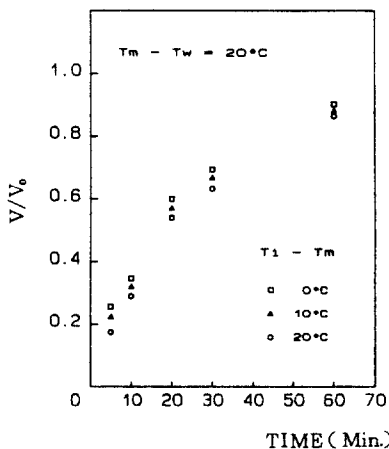


Fig. 16 The frozen volume at different initial superheating :  $T_m - T_w = 20\text{ }^\circ\text{C}$

량에 영향을 주지만 시간이 경과함에 따라 그 영향은 점점 줄어든다.

#### 4.5 용융에너지

Fig. 17은 벽면과열도가 10 °C인 No-Subcooling 조건에서 시간경과에 따른 각 에너지 비의 변화를 나타낸 것으로, 용융된 상변화물질에 축열되는 현열에너지  $E_{s1}$ 는 상변화에 의해 축열되는 잠열에너지  $E_2$ 에 비해 매우 작은 것을 알 수 있고, 용융이 진행될수록 축열되는 전 에너지의 증가율이 감소함을 알 수 있다.

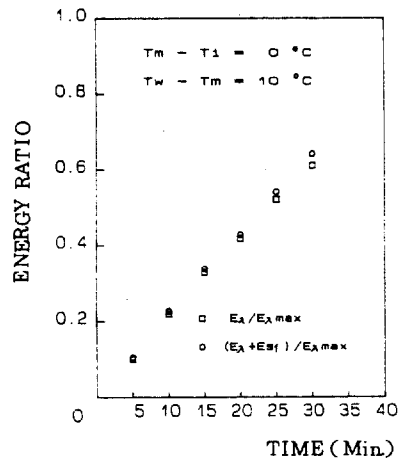


Fig. 17 Component stored energies for a initial No-Subcooling at  $T_m - T_i = 0\text{ }^\circ\text{C}$  :  $T_w - T_m = 10\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 18은 초기과냉도가 10°이고, 벽면과열도가 10 °C인 Subcooling 조건에서 각 에너지 성분비를 나타낸 것으로, 용융시간이 길어질수록 용융된 상변화물질에 축열되는 현열에너지  $E_{s1}$ 과 상변화물질의 초기온도에서 상변화온도까지 축열되는  $E_{s2}$ 는 증가되고, 잔여고상 상변화물질에 축열되는 현열에너지  $E_{s3}$ 는 감소하게 된다.

#### 4.6 응고에너지

Fig. 19는 초기과열도가 없고 벽면과냉도가 10 °C일 경우 시간경과에 따른 각 에너지의 성분비를 나타낸 것으로  $E_{s1}'$ 은  $E_2'$ 에 비하여

작은 값으로 나타났으며 시간경과에 따라  $E_{s1}'$ 가 증가하고 있다. 따라서 전체 응고에너지 중 현열에너지가 차지하는 비중은 시간의 경과에 따라 커지는 것을 알 수 있다.

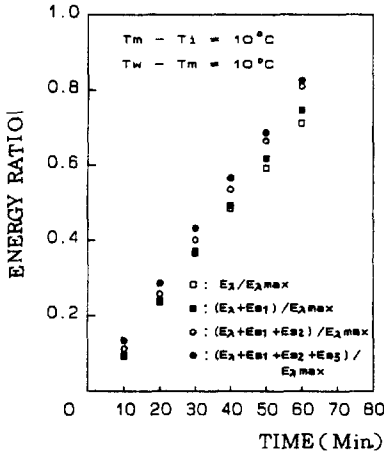


Fig. 18 Component stored energies for a Initial Subcooling at  $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$ :  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$

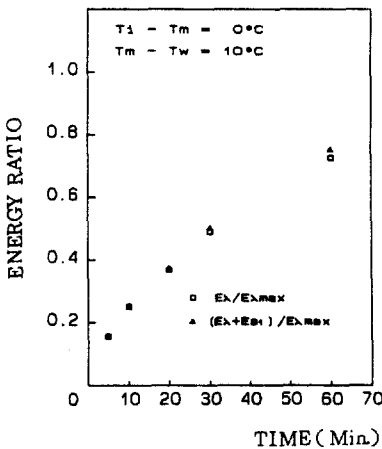


Fig. 19 Component extracted energies:  $T_i - T_m = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

Fig. 20, 21은 초기과열도가  $10^\circ\text{C}$ 일때 벽면 과냉도를 각각  $10^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ 로 하였을 경우 시간경과에 따른 각 에너지의 성분비를 나타낸 것으로 현열에너지의 값들은 잠열에너지의 값에 비하여 작게 나타났고  $E_{s2}'$ 와  $E_{s1}'$ 의 차는 시간이 경과함에 따라 증가하고 있다.  $E_{s2}'$ 와

$E_{s1}'$ 의 차는 응고초기에는 많이 나타나나 시간이 경과함에 따라 감소한다. 그리고 Fig.21의 경우가 Fig.20의 경우에 비하여  $E_{s1}'$ 과  $E_{s2}'$ 의 차가 크게 나타나고 있다. 이 결과로 보아 응고초기에는  $E_{s2}'$ 의 영향이 거의 나타나지 않으나 시간이 경과함에 따라  $E_{s2}'$ 의 영향이 많아지고, 또한  $E_{s3}'$ 의 영향은 응고초기에 많이 나타나나 시간이 경과함에 따라 그 영향은 감소함을 보여준다. 그리고 벽면과냉도가 큰 경우에  $E_{s1}'$ 의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

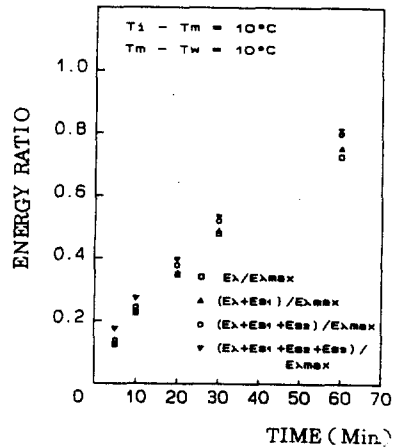


Fig. 20 Component extracted energies:  $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 10^\circ\text{C}$

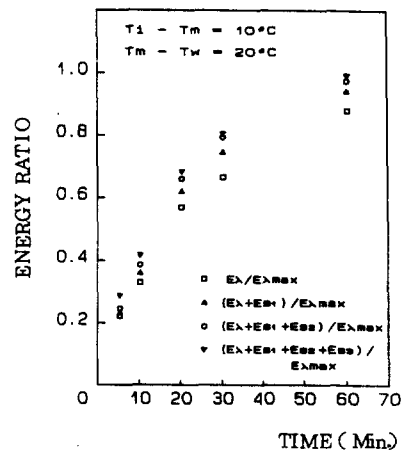


Fig. 21 Component extracted energies:  $T_i - T_m = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_m - T_w = 20^\circ\text{C}$

## 5. 결 론

본 연구는 상변화물질(*n*-docosane paraf-fine)이 채워져 있는 수평형 원통용기의 외부 벽면을 등온조건으로 하여 용융 및 냉각시킬 때의 축열, 방열과정에서 상변화물질의 초기 온도와 용기벽면의 벽면온도를 변화시킬 경우 시간경과에 따른 상변화물질내의 온도분포, 상경계면의 형상, 용융량, 응고량, 용융에너지, 응고에너지 등에 관하여 고찰한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용융율은 초기과냉도가 적고, 벽면과열도가 클수록 크며, 축열과정중 벽면과열도가 초기과냉도보다 열전달에 더 큰 영향을 미친다.
2. 용융율은 전도에 의한 열전달현상이 지배적으로 나타나는 초기과정 동안은 직선적으로 증가하나, 시간이 경과함에 따라 그 증가폭이 감소하는 경향을 보인다.
3. 상경계면의 형상은 응고초기에는 상부와 하부에서의 응고층 두께의 차가 많이 나타나나 시간이 경과함에 따라 그 차는 줄어들어 자연대류의 영향은 응고초기에 많이 나타난다.
4. 응고초기에는 초기과열도가 클수록 응고량은 감소하나 총응고량의 증감은 초기과열도보다 벽면과냉도에 의해 더 영향을 받는다.
5. 용융 및 응고에 대한 총에너지는 잠열에너지가 큰 부분을 차지하지만 용융시에는 초기과냉도가 벽면과열도가 크고, 응고시에는 초기과열도와 벽면과냉도가 큰 경우에는 현열에너지가 차지하는 부분도 상당한 양으로 나타난다.

## 부 기

본 연구는 동력자원부 대체에너지 기술개발 사업에 의한 연구비 지원의 일부에 의하여 이루어졌음을 밝혀두며 이에 감사한다.

## 참 고 문 헌

1. 임장순, 이채문, 이재복, “수직냉각관내에서 상변화물질의 응고에 관한 실험적 연구”, 공기조화냉동공학회지, 13(4), pp.

- 213~220, 1984. 12.
2. 임장순, 김준근, “상변화물질의 용융과정에서 있어서 좌표변환을 이용한 온도분포의 해석적 연구”, 한국태양에너지학회지, 6(2), pp. 77~83, 1985. 11.
3. A.G. Bathelt and R. Viskantanta, “Heat Transfer at the Solid-Liquid Interface during Melting from a Horizontal Cylinder”, Int. J. of Heat Transfer, Vol.23, pp.1493-1503, 1980.
4. R.G. Kemink and E.M. Sparrow, “Heat Transfer Coefficients for Melting about a Vertical Cylinder with or without Subcooling and for Open or Closed Containment”, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.24, pp.1699-1710, 1981.
5. H. Rieger, U. Projahn, M. Bareiss and H. Heat Transfer during Melting inside a Horizontal Tube”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.105, pp.226-234, 1983.
6. E.M. Sparrow and J.A. Broadbent, “Freezing in a Vertical Tube”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.105, pp.217-225, 1983.
7. J. Prusa and L.S. Yoa, “Melting around a Horizontal Heated Cylinder: part I-Perturbation and Numerical Solutions for Constant Heat Flux Boundary Condition”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.106, pp. 376-384, 1984.
8. R.Guenigault and G. Poots, “Effects of Natural Convection on the inward Solidification of Spheres and Cylinders”, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.28, pp. 1229-1231, 1985.
9. C.J. Ho and K.C. Lin, “Outward Melting in a Cylindrical Annulus”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.108, pp.240-245, 1986.
10. K.C. Cheng, H. Inaba and R.R. Gilpin, “Effects of Natural Convection on Ice Formation around an Isothermally Cooled Horizontal Chlinder”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.110, pp.931-937, 1988.