

# 상변화 물질을 사용한 축열조에서의 열전달

-수직원관에서 내향용융 실험-

## Heat Transfer in Heat Storage System with P.C.M. - Inward Melting in a Vertical Tube

손 화 승\*   황 태 인\*   이 채 문\*\*   최 국 광\*\*\*   임 장 순\*\*\*\*  
 H.S. SHON   T. I. Hwang   C. M. LEE   G. G. CHOI   C. S. YIM

### ABSTRACT

In the present investigation, experiments on the melting of a phase change material were performed to research heat transfer phenomena generated by means of conduction and natural convection in the vertical tube at inward melting.

The phase change material used in the experiments is 99 percent pure n-Docosane paraffin which is measured melting temperature of 42.5°C, latent heat of 37.5 cal/g, heat conductivity of 0.1505W/m °C.

Experiments were performed both in the no-subcooling which is initiating it at melting temperature of phase change material, and in the subcooling which means to initiate it under melting temperature of phase change material, in order to compare and investigate the horizontal temperature history, vertical temperature history, ratio of melting and melted mass, figure of the melting front in the vertical tube.

In the experimental results, heat transfer from tube wall to phase change material were due to conduction at early stage and due to natural convection with the passage of time, and then occurred melting downward from surface by volumetric expansion.

Natural convection affects temperature distribution in the tube, ratio of melting and melted mass, figure of the melting front and then progress rapidly in case of no-subcooling compared to subcooling

### NOMENCLATURE

---

\* 인하대학교 대학원  
 \*\* 정회원 ; 유한공업전문대학  
 \*\*\* 정회원 ; 인천대학교  
 \*\*\*\* 정회원 ; 인하대학교 공대

As : aspect ratio d/H  
 Cliq : specific heat at liquid-phase  
 Csol : specific heat at solid-phase  
 d : diameter of tube  
 E : energy transfer,  $E_1 + E_s$

- Es : energy transfer for sensible heat storage in liquid melt
- Esl : energy transfer for sensible heat storage in solid phase.
- Es2 : energy transfer for sensible heat storage in remained solid phase.
- $E_{\lambda}$  : energy transfer for melting
- H : height of tube
- M : melted mass
- Mo : total mass of phase change material
- r : radius of tube
- T : temperature
- Ts : mean temperature of solid phase
- Ti : initial temperature
- Tw : temperature of tube wall
- T\* : melting temperature
- $\bar{T}$  : bulk temperature of liquid melt
- X : length inward from tube wall
- Y : axial coordinate measured upward from bottom of heating tube

### Greek Simbol

- $\lambda$  : latent heat of melting per unit mass

### Subscript

- liq : liquid phase
- sol : solid phase
- w : wall of tube
- PCM : phase change material
- max : maximum value

## 1. 서 론

최근에 들어서 우리나라와 같이 에너지 부존자원이 거의 없는 국가에서는 태양열, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 대체에너지 이용기술의 개발과 불규칙한 전력수요로 인한 잉여전력의

효율적인 사용등을 위하여 열저장장치의 기술개발이 절실히 요구되며 이중 축열조내에서의 열전달해석은 열저장 장치의 설계에 있어 필수적인 요건이다.

일반적으로 열에너지의 저장방법에는 단상물질을 축열매질로 하는 현열이용형 열에너지 저장방법과 상변화 물질 (P.C.M.; phase change material)을 축열매질로 하는 잠열이용형 열에너지 저장방법이 있으며, 이중 잠열이용형 열에너지 저장방법이 단위 체적당 축열밀도가 높고 용융점 부근의 일정한 온도에서 축열과 방열이 가능하기 때문에 효율적인 축열의 한 방법으로 주목받고 있다.

현재까지 상변화 물질이 용융 또는 응고될 때의 열전달특성에 관한 연구보고들은 실험적인 방법 [1,2,5,6,7]과 수치해석적인 방법 [3,4,8]으로 열원 혹은 냉각원이 축열조 내부에 있는 경우 [1,2,3,4,6]와 외부에 있는 경우 [5,7,8]에 대하여 일부 발표되었으나 실질적인 축열장치를 설계하기 위한 기초자료로 이용하기엔 아직 크게 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 축열조에 대한 효율을 증대시키고 실질적인 축열장치에 적용할 수 있는 기초자료를 얻고자 상변화 물질로서 용융점이  $42.5^{\circ}\text{C}$ 이고 순도 99%인 n-docosane paraffin을 수직 원통형관에 내향 용융형 (Inward melting)으로 no-subcooling과 subcooling의 경우에 대해 실험을 실시하여 용융점 부근에서의 온도변화와 용융 및 자연대류의 영향으로 발생하는 상 경계면의 변화 등을 비교, 검토하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

본 실험은 상변화물질 (phase change material : PCM)을 축열매체로하는 내부용융 (Inward melting)방법으로 잠열과정을 연구

하기 위해 no-subcooling 과 subcooling 조건에서의 열전달현상들을 비교, 검토하기 위한 것이다.

no-subcooling의 경우는 본 실험에서 사용한 n-docosane 의 예에서 용기내 PCM의 온도를 용융점 온도인 42.5 °C의 상태에서 가열을 시작하여 고체상태에서 액체상태로 변화시키는 것이다. 따라서 이때의 축열과정과 현열과정이 존재하게 된다.

Subcooling의 경우는 용융점온도 이하에서 실험을 실시하므로 초기에는 용융점까지 현열에 의한 축열과정이 나타나며 용융점 부근에서부터 잠열에 의한 축열과정이 나타나 이 과정이 완만한 것처럼 보이며 일단 용융이 시작되면 다시 액체부에서 현열에 의한 축열과정이 시작된다.

이상의 축열과정들에서 축열량의 산정에는 다음과 같은 식이 이용되고 있다. Mmax를 PCM의 총질량, M을 PCM의 용융된 질량으로 표시하면 tube로 부터 상변화 물질에 전달된 용융잠열 energy  $E_{\lambda}$  는 :

$$E_{\lambda} = \lambda M$$

여기서  $\lambda$ 는 용융잠열이다. 만일 전량이 용융된다면

$$E_{\lambda \max} = \lambda M_{\max} \text{이며 그 비는 다음과 같다.}$$

$$E_{\lambda} / E_{\lambda \max} = M / M_{\max}$$

용융온도를  $T^*$  가열이 끝날때의 용융된 상변화 물질의 온도를  $\bar{T}$  (혼합 평균온도) 라 하면 이때 벽면으로부터 상변화 물질에 전달되는 현열 energy  $E_s$  는 :

$$E_s = M \int_{T^*}^{\bar{T}} C_{liq} dT$$

이 식은 잠열과정을 제외한 식이다. Subcooling의 경우 잠열과정 이전까지의 고체부 축열량에 대한 현열에너지  $E_{s1}$  은

$$E_{s1} = M \int_{T_i}^{T^*} C_{sol} dT$$

잠열이 축적된 후 잔여고체부에서의 현열 energy  $E_{s2}$  는

$$E_{s2} = (M_{\max} - M) \int_{T_i}^{T_s} C_{sol} dT$$

전달된 총 energy  $E$  는

$$E = E_{\lambda} + E_s + E_{s1} + E_{s2}$$

$$E = \lambda M + M \int_{T^*}^{\bar{T}} C_{liq} dT +$$

$$M \int_{T_i}^{T^*} C_{sol} dT +$$

$$(M_{\max} - M) \int_{T_i}^{T_s} C_{liq} dT$$

여기서  $T_s$ 는 잔여 고체부의 평균온도이다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

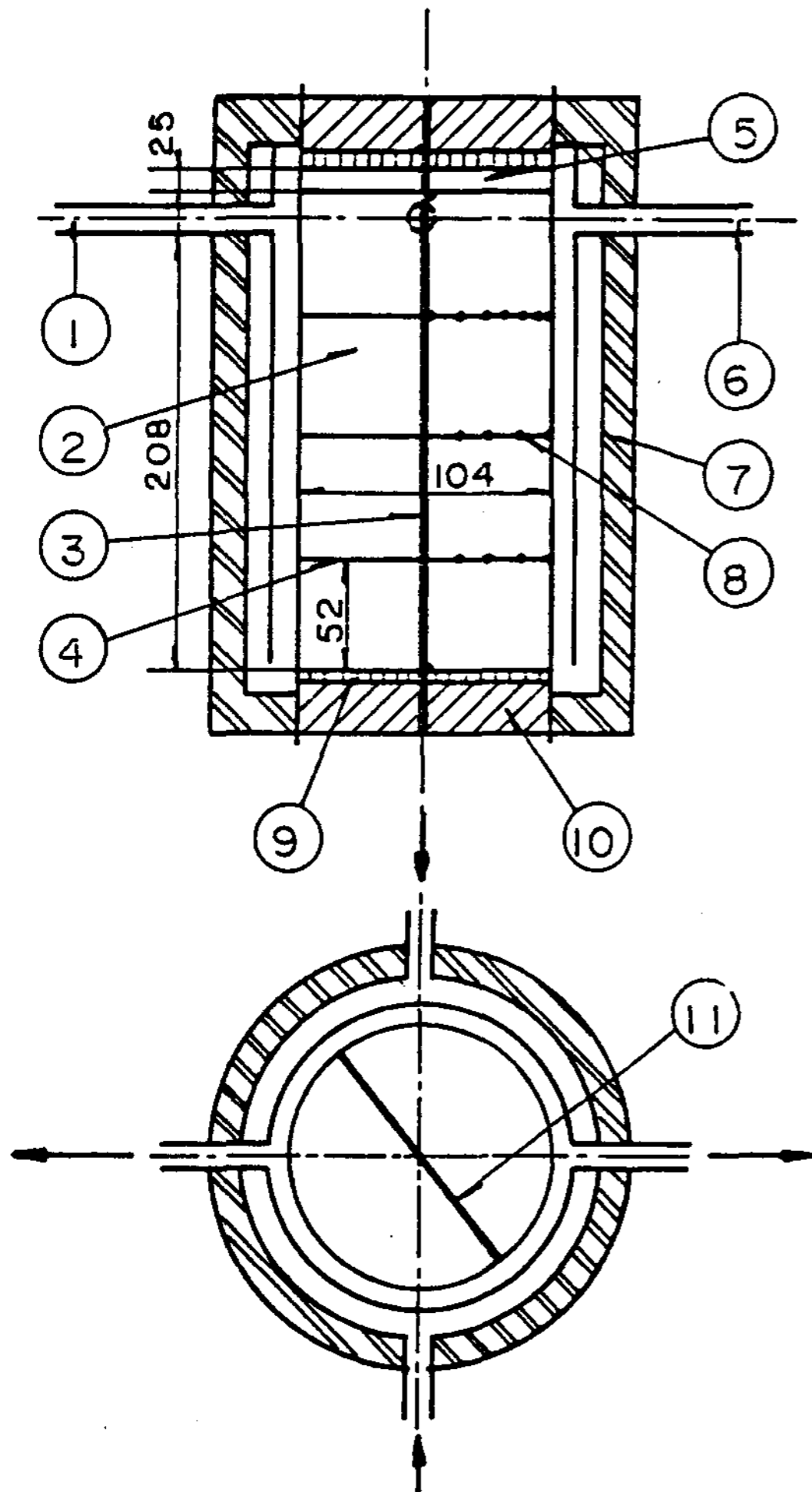
#### 3.1 실험장치

본 실험장치의 주요부분은 수직원통형 PCM 용기, 저온 항온수조 (100 ℓ), 고온 가열수조 (100 ℓ), 온도 조절장치 (thermocontroler), 온수 공급장치 (pump, PDB-86) 등이며 기타 온도 측정장치 (data logger), 질량측정기 (천칭), 등으로 구성되어 있다.

##### 3.1.1 수직 원통형 PCM 용기

PCM용기의 재질은 동이며 내경은 104 mm, 높이는 208 mm이며 두께는 2 mm로 Fig.1에 나타난 바와같이 관내의 벽면을 등온으로 하기 위하여 2중관을 사용하였고 또한 온수의 입구, 출구를 각각 2개씩 만들었다. PCM 용기의 상, 하부에는 단열을 시키기 위하여 styrofoam disk를 사용하였고 paraffin 이 styrofoam에 흡수되는것과 하부로 누출을 방

지하기 위하여 plexy-glass disk 를 부착하였으며 외부와의 단열을위해 glass wool 로 피복하였다. 열전대의 위치는 Fig.1 에서와 같이  $Y = 1.0 H$ 의 위치인 PCM상부표면에 1개, 자연대류의 발생이 많고 상경계면의 이동이 심한  $Y = 0.75 H$  위치에 7개,  $Y = 0.5 H$ 에 5개,  $Y = 0.25 H$  위치에 4개,  $Y = 0.0 H$ 에 1개를 설치하여 용기내에 총 18개를 고정시켰



- |                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| 1) Outlet Tube           | 7) Glass Wool        |
| 2) Phase Change Material | 8) Thermocouple Rack |
| 3) Vertical Pole         | 9) Plexyglass Disk   |
| 4) Horizontal Pole       | 10) Styrofoam        |
| 5) Air Space             | 11) Horizontal Pole  |
| 6) Outlet Pipe           |                      |

Fig. 1 Schematic diagram of containment tube

다. PCM상부표면과 단열마개 사이에는 25 mm의 단열공기층 (air space)을 두어 PCM의 용융시 체적팽창에 대비하였다.

### 3.1.2 기타 부속장치

항온조로는 고온가열조와 저온 항온조가 있으며 크기는 각각 100 ℓ 용량이며 3KW 용량의 전기 히터를 내장시켜 가열하고 PCM 용기로의 순환을 위해 온수용 pump (한일 PDB-86)로 작동시키고 있다.

또한 온도 조절장치 (정도 0.1 °C, thermo controller)는 항온조내의 온도를 감지하여 이에 연결된 자기 스위치 (magnetic switch)로 전기적 신호를 주어 전력의 공급과 차단 역할을 한다. 그리고 이 자기 스위치와 연결된 변압기에서 전력의 양을 조절하여 항온조내에 있는 heater를 작동시켜 항온조내의 온도를 가열하고자 하는 일정한 온도로 유지시켜 준다. 항온조는 외부와의 단열을 위해 glass wool과 styrofoam을 피복시켰고 항온조와 PCM용기 사이에는 강 pipe와 온수용 고무호스를 연결시켰으며 pipe용 단열재를 이용하여 단열시켰다. 그리고 PCM내 각지점의 온도는 data logger (Sanei model 7 V 08, 정도 0.1 °C)를 사용하여 측정하였다. 실험후 용융 PCM의 질량측정은 천칭 (용량 2 kg, 1.0 g급)을 이용하였으며 납선 ( $\phi = 0.1$ )과 vernier calipers를 이용하여 고-액상 경계면의 형상과 위치를 측정하였다.

### 3.2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 상변화 물질인 n-docosane paraffin( $C_{22}H_{46}$ )은 시약으로써 용융온도는 42.5 °C, 용융잠열은 37.5 cal/g, 밀도 778 kg/m<sup>3</sup>, 열전도도는 0.1505 W/m °C이다. 저온 항온조의 온도를 no-subcooling 시 42.5 °C, subcooling 시 37.5 °C 및 32.5 °C로 고정

시킨후 PCM 용기로 온수를 순환시켜 용기내의 PCM 온도를 등온으로 유지시킨다. 이때 평형온도에 도달하는데 보통 36시간에서 48시간이 경과하며 용기내 PCM이 평형된 후 저온 항온조의 수로를 차단하고 62.5°C와 52.5°C로 고정된 고온 항온조의 수로를 열어 온수를 순환시킨다.

No-subcooling이며 가열온도가 62.5°C일 때는 15, 30, 45, 60 분으로 변화시켰고 그 외의 실험들은 30 분단위로 실시했으며 각 시간마다 용융 파라핀을 추출하여 질량을 측정하였고 고체부 파라핀은 꺼내어 형상을 측정하고 카메라로 촬영한 후 똑같은 반복으로 실험을 한다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 수평 방향에 대한 온도 분포

수평방향으로 설치한 온도측정 지점에서의 시간에 따른 온도변화를 비교하기 위하여 자연 대류가 활발한 구역으로 예측되며 또한 온도 변화와 경계면 형상이 빠르게 진행될 것으로 생각되는  $Y = 0.75 H$  위치이며 tube 벽면으로부터  $X = 2, 6.5, 13, 19.5, 26, 39, 52 \text{ mm}$  지점들에 열전대를 설치하여 온도를 측정했다.

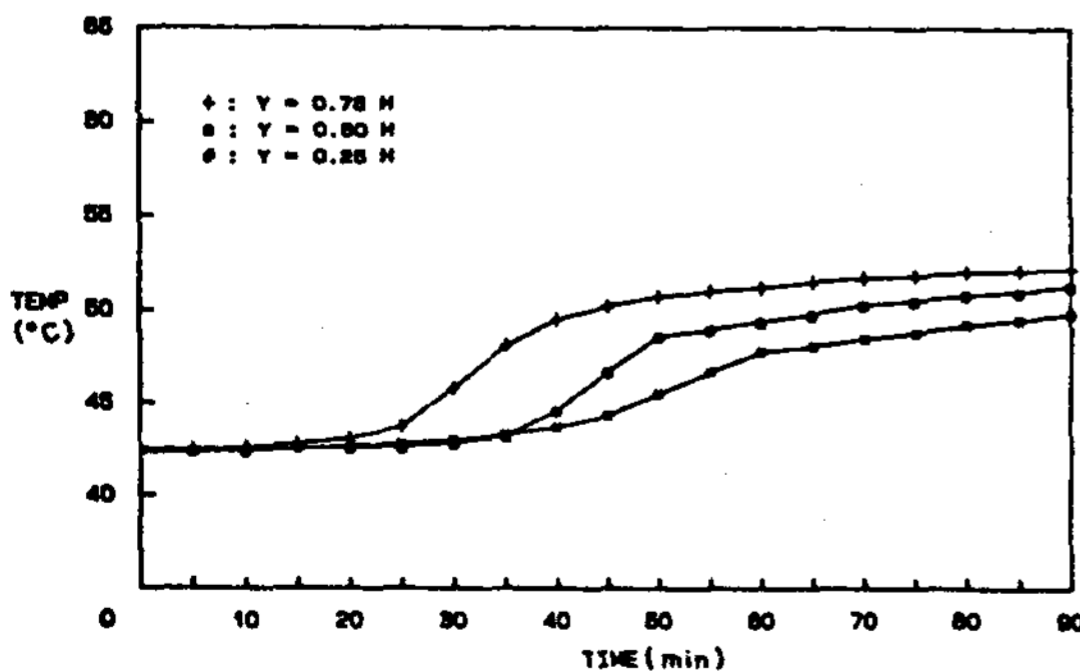


Fig. 2 Temperature history inward from heating tube wall  $(T_w - T_i = 52.5 - 42.5) = 10^\circ\text{C}$ , Nosubcooling.  $Y = 0.75H$ .

Fig. 2는  $(T_w - T_i) = 10^\circ\text{C}$ 인 no-subcooling 조건으로 90분동안 실험을 실시하여 얻은 결과이다. PCM이 고상에서는 시간에 따라 온도변화가 나타나지 않았으며 80분정도 경과했을 때에는  $Y = 0.75 H$ 까지 전체가 용융된 것을 알 수 있다.

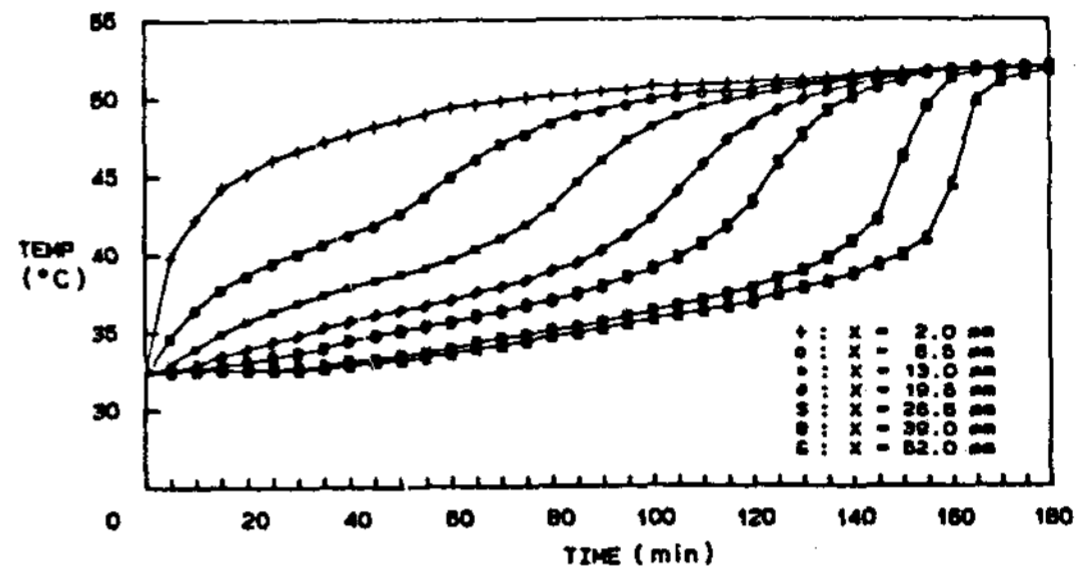


Fig. 3 Temperature history inward from heating tube wall  $(T_w - T_i = 52.5 - 32.5) = 20^\circ\text{C}$ , Subcooled by  $10^\circ\text{C}$ .  $Y = 0.75$

Fig. 3은  $(T_w - T_i) = 20^\circ\text{C}$ , subcooling  $10^\circ\text{C}$ 인 조건에서 180분 동안 실험을 실시한 결과이다.  $40^\circ\text{C}$  부근에서 곡선의 기울기가 완만해지고 있는데 이것은 고체상태로부터 액체상태로 변화하는 곳에 잠열구간이 존재함을 뜻한다. 또한  $Y = 0.75 H$ 까지 용융되는데 Fig. 2에서는 80분이 소요되는데 비하여 Fig. 3에서는 170분 정도 소요되었으므로 sub-cooling 조건보다 no-subcooling 조건을 형성하여 주는편이 용융율을 증가시키는데 적합하며 PCM을 이용한 축열과정에서는 subcooling 조건을 피하는것이 바람직하다는 결과를 얻을 수 있다.

##### 4.2 수직방향에 대한 온도분포

수직방향으로 설치한 온도측정 지점에서 PCM내에서의 시간에 따른 온도변화를 비교함으로써 자연 대류의 영향을 예측할 수 있다.

열전달 특성이 전도만에 의해 지배된다면 수직방향의 온도변화는 벽면과 평행하게 나타나

지만 자연대류에 의한 열전달이 이루어지므로 액상영역에서 상부와 하부의 온도차가 발생하면 수직방향의 온도분포를 비교함으로써 자연대류의 영향을 관찰할 수 있고 또한 상경계면의 형상도 예측할 수 있다. 본 실험에서는 tube 벽면으로 부터  $X = 13, 26, 39, 52 \text{ mm}$  지점에서 수직방향으로 온도변화를 측정하였다. 그중  $X = 13 \text{ mm}$  지점에서  $Y = 0.25 \text{ H}, Y = 0.5 \text{ H}, Y = 0.75 \text{ H}$ 인 3지점의 온도변화 과정을 비교했는데 이 지점들의 온도변화는 고상에서 액상으로 변화할때 온도분포가 PCM의 용융점 온도부근에서 온도변화 과정이 가장 분명하게 나타나므로 대표로 지정하여 비교, 검토하였다.

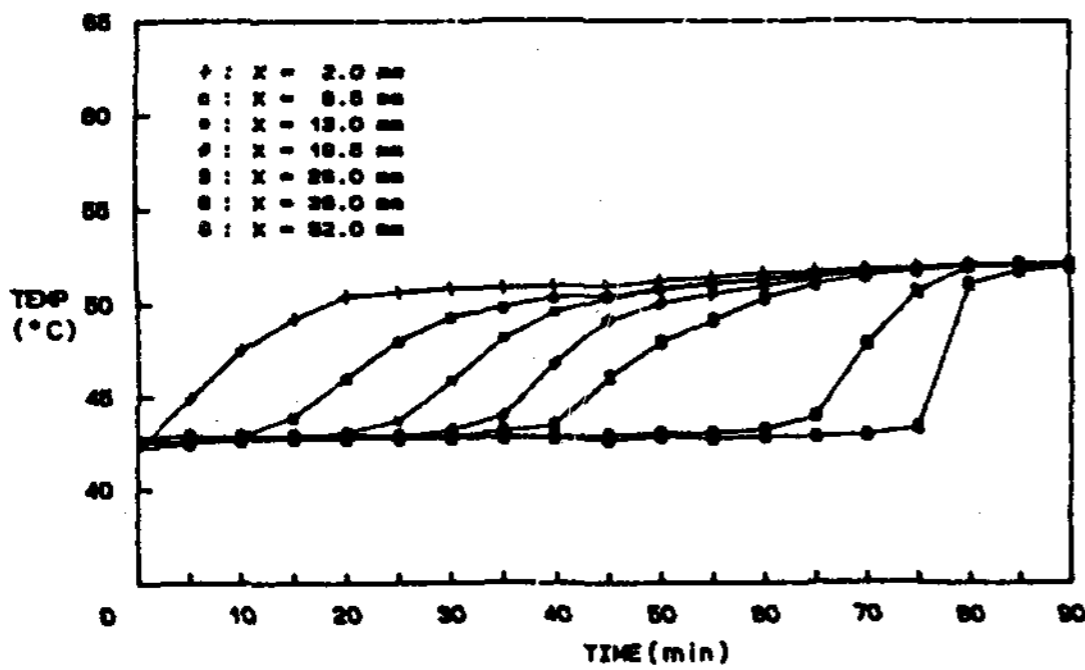


Fig. 4 Temperature history upward from bottom of heating tube  $X=13 \text{ mm}$ ,  $(T_w-T_i=52.5-42.5)=10^\circ\text{C}$ , nosubcooling

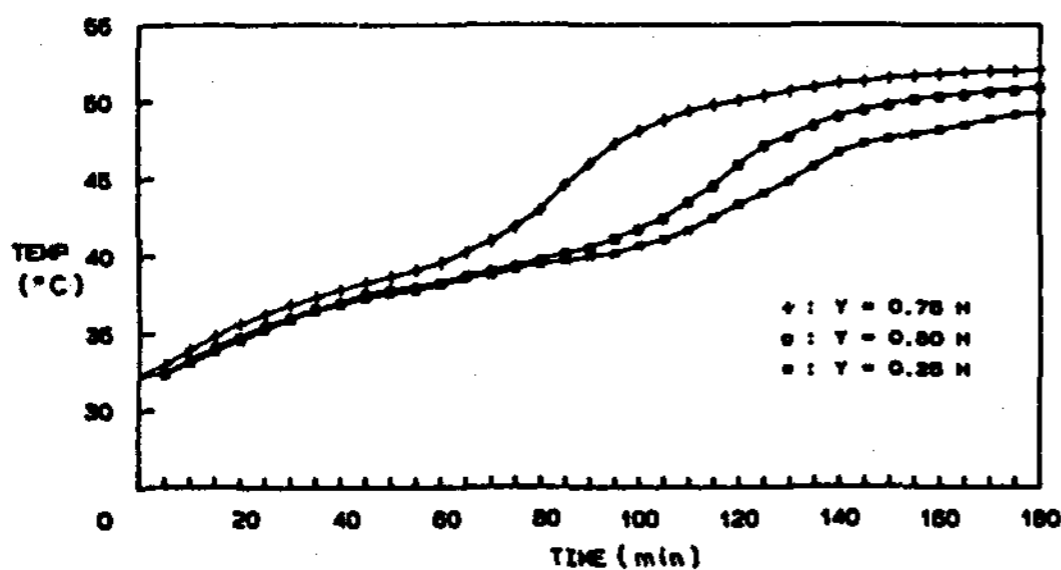


Fig. 5 Temperature history upward from bottom of heating tube  $X=13 \text{ mm}$ ,  $(T_w-T_i=52.5-32.5)=20^\circ\text{C}$ , subcooled by  $10^\circ\text{C}$

Fig.4 와 Fig. 5는 no-subcooling 과 subcooling 조건에서 수평방향의 온도변화를 비교한 그림으로 두 그림에서 보면 위 부분에서 자연 대류가 활발히 진행되고 있음을 알수 있고 실험 종료시에도 수직방향 각 지점의 온도는 수평방향의 온도변화에 대한 결과와는 달리 일정한 온도에 도달하지 않고 서로 다른 온도를 나타내고 있다.

#### 4.3 용융율 비교

Fig. 6은 시간경과에 따른 용융율 ( $M/M_0$ )을 no-subcooling시와 subcooling 온도가  $5^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ 인 경우에 대하여 표시한 것이다. subcooling의 경우  $(T_w-T_i) = 15^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}$ 에서는 용융율이 시간 경과에 따라 거의 직선적으로 변화하고 있는데 비해 no-subcooling의 경우 용융율은 곡선적으로 변화하며 기울기가 점차로 감소함은 tube 내 PCM의 경계면면적이 시간경과에 따라 감소하고 또한 전달 열량중 액체부의 현열 축열에 할당되는 열량이 증가하기 때문인 것으로 사료된다. Tube 내 PCM의 총질량이 80%정도 용융되었을때 실험을 종료했는데 이에 소요되는 시간은 no-subcooling에서  $(T_w-T_i) = 20^\circ\text{C}$ 인 조건의 경우 47분,  $(T_w-T_i) = 10^\circ\text{C}$ 인 조건의 경우가 97분, subcooling 온도가  $5^\circ\text{C}$ 에서  $(T_w$

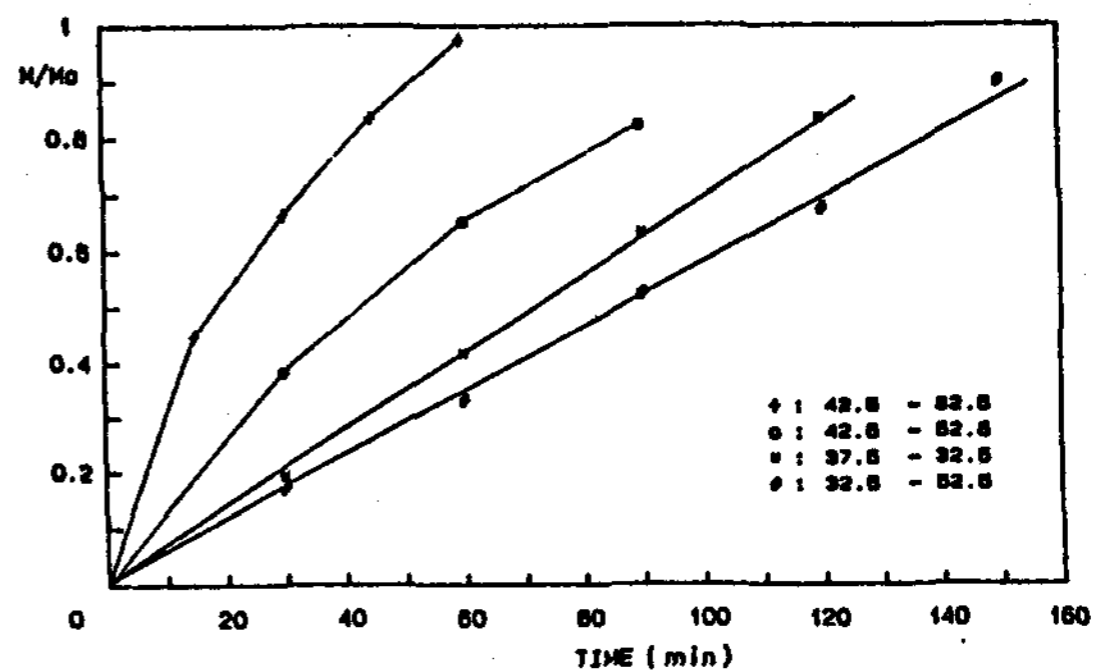


Fig. 6 Timewise variation of the melted mass, no-subcooling and subcooling

$(T_w - T_i) = 15^\circ\text{C}$  조건의 경우 123분, subcooling 온도가  $10^\circ\text{C}$ 에서  $(T_w - T_i) = 20^\circ\text{C}$ 의 경우는 147분 정도로 나타났다. 따라서 축열시간의 단축을 위해서는 no-subcooling조건이 더 바람직한 것으로 나타났다.

#### 4.4 상 경계면 형상

Fig. 7 과 Fig. 8 은 no-subcooling 조건과 subcooling조건시의 상경계면 형상을, 그리고 Fig.9는 시간이 60분 경과했을 때 앞의 두 조건을 비교하기 위하여 도시한 것이다. 초기에는 가열벽면과 거의 평행으로 용융이 진행되고 있으며 시간이 경과함에 따라 상부의 용융속도는 빨라지고 있다. 또한 그림에서 상경계면 형상의 상면이 둥글게 나타나고 있는데 이러한 경계면 형상으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째 가열 초기에는 경계면 형상이 tube 벽면에 근접해 있고 거의 평행으로 나타나고

있는데 이는 열전도가 지배적이라는 결과를 뜻하며, 둘째 시간이 경과함에 따라 tube 벽면 근처에서 PCM의 온도는 상승하게 되어 밀도가 감소함에 따라 상부로 이동하며 상 경계면 근처에서 하향하는 유동이 발생하므로 tube의 상부쪽은 하부쪽에 비해 용융이 활발하게 일어남을 알 수 있다. 따라서 시간이 점점 경과함에 따라 자연대류의 영향으로 상 경계면의 기울기가 완만해지고 직선적인 모양에서 곡선 모양으로 바뀌게 된다.

셋째 본 실험에서 사용한 paraffin은 약 10%정도 체적팽창이 발생하고 있으며 PCM은 공기층(air space)으로 팽창 상승하게 된다. 상부에 있는 가열된 공기층으로 부터의 열 전달은 상부표면을 용융시키므로 상경계면은 전도와 자연대류 및 체적팽창에 의한 상부 공기층으로 부터의 가열 등으로 형성된 상경계면 형상임을 알 수 있다.

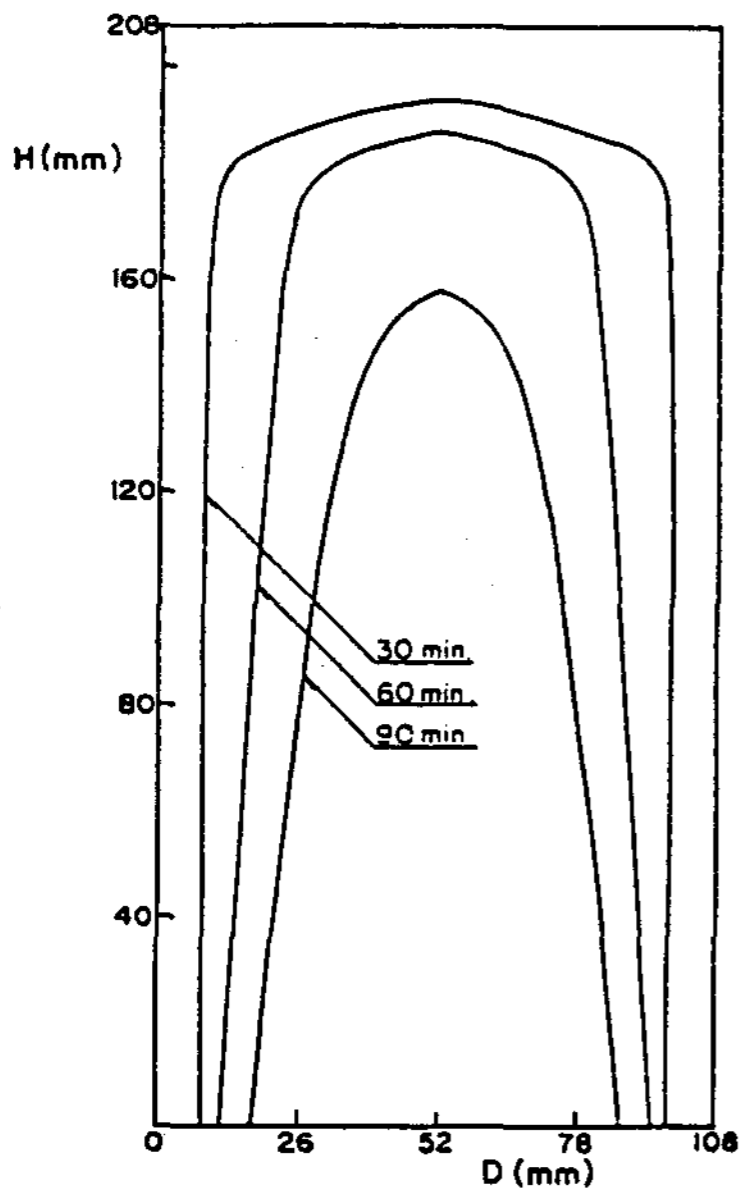


Fig. 7 Timewise movement of the melting front,  $(T_w - T^*) = 10^\circ\text{C}$  at 30, 60, 90 minutes, No-subcooling

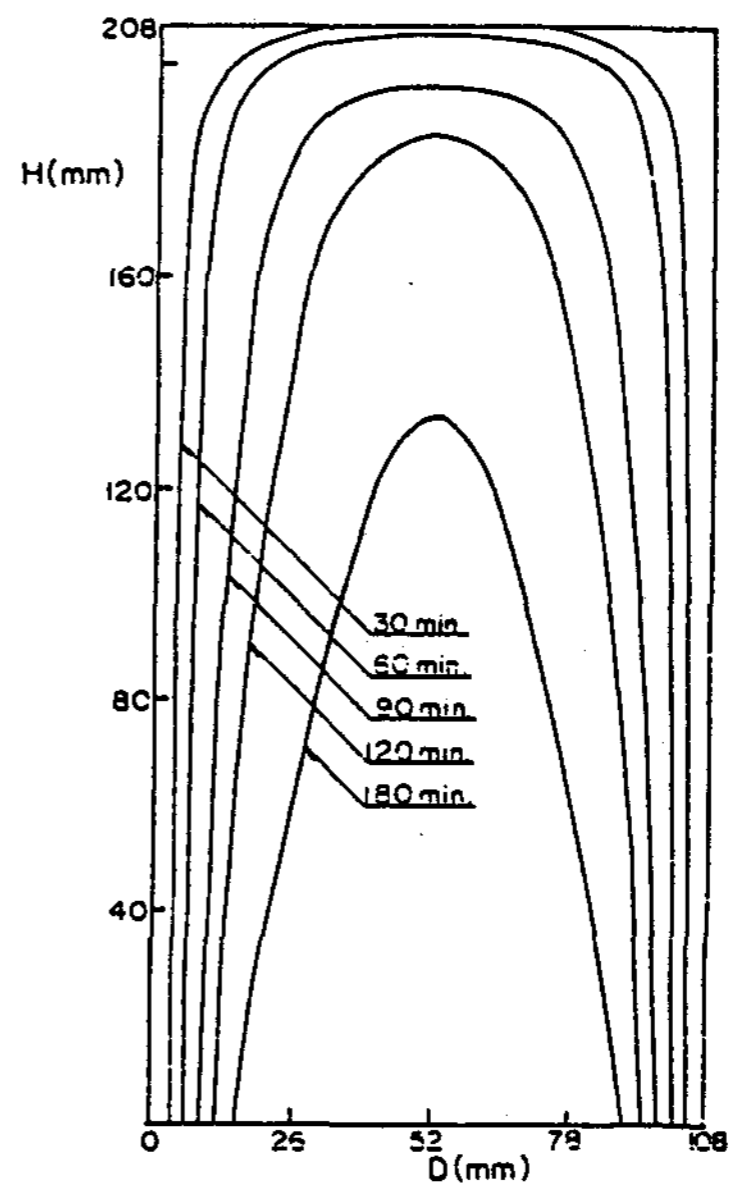


Fig. 8 Timewise movement of the melting front,  $(T_w - T^*) = 10^\circ\text{C}$  subcooled by  $10^\circ\text{C}$  at 30, 60, 90, 120, 180 minutes

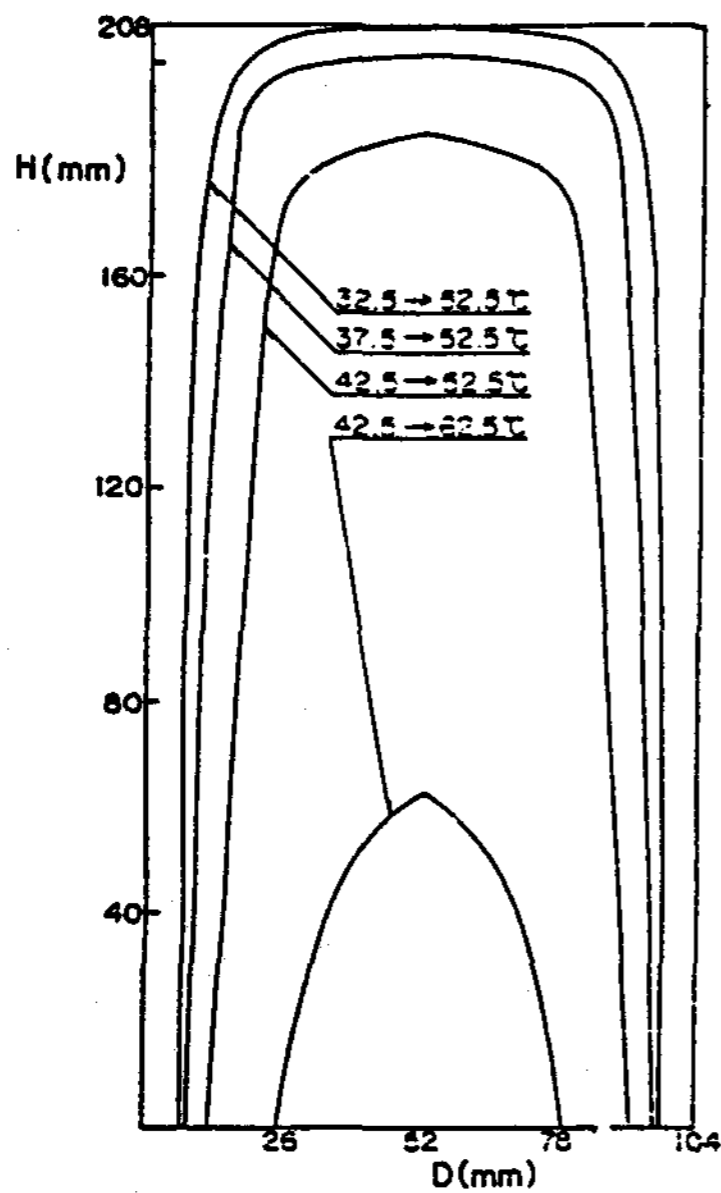


Fig. 9 Timewise movement of the melting front,  $(T_w - T^*) = 10, 20^\circ\text{C}$ , no-subcooling and subcooling by  $5^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}$ , at 60 minutes

### 5. 결 론

상변화 물질로 용융점이  $42.5^\circ\text{C}$ 이고 순도 99%인 n-docosane paraffin( $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$ )을 이용하여 수직원관에서 외부가열에 의한 내향용융(inward melting)의 경우 no-subcooling과 subcooling 조건에서 용융실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용융이 시작되는 초기과정 동안은 전도 열 전달의 지배적인 영향으로 외부벽면과 평행한 형태의 고-액상 경계면이 형성되며 시간이 경과함에 따라 자연대류의 영향을 받아 상부층의 경계면 이동속도가 하부층의 경계면 이동 속도보다 빠르게 된다.

2. 고체상태의 상변화물질이 용융되는 과정 동안 용융점 온도부근에서 잠열구간이 나타난다.

3. 상변화 물질의 초기온도를 용융점 온도

로 하는 no-subcooling조건이 subcooling 조건보다 열저장면에서 효율증대를 가져온다.

4. 온도 상승에 따른 상변화 물질의 체적 팽창은 전체의 약 10% 정도 발생되며 상부 표면으로부터의 용융을 발생시킨다.

5. 용융율 ( $M/M_0$ )은 subcooling 조건시 시간의 경과에 따라 직선적으로 증가하고 있으며 no-subcooling 조건에서는 시간의 경과에 따라 증가율이 subcooling조건시보다 저하되는 것으로 나타났다.

### 부 기

본 연구는 학술진흥재단의 연구비지원의 일부에 의하여 이루어졌음을 밝혀두며 이에 감사한다.

### REFERENCES

1. 任將淳, 宋何曠, 李榮文, "흰이 附着된 垂直 冷却管에서의 熱傳達에 관한 實驗的인 研究" 태양에너지 제 4 권 2 호 pp.43-49, 1984.11
2. 任將淳, 李英鎬, "相變化 物質을 利用한 潛熱過程의 熱傳達에 관한 實驗的인 研究" 仁荷大學校 研究論文, 1987.2
3. C.J. Ho and K.C. lin, "Outward melting in a cylindrical annulus", ASME. J. of Heat transfer, Vol.108, pp.240-245, 1986.
4. B. Kalhori and S. Ramadhyani, "Studies on heat transfer from a vertical cylinder, with or without fins, embedded in a solid phase change medium", ASME J. of Heat Mass Transfer, Vol.107, pp.44-51, 1985.
5. E.M. Sparrow and J.A. Broadbent, "Inward-melting in a vertical tube with allows free expansion of the phase-change medium", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp.309-



- 315, 1982.
6. C.J. Ho and R. Viskanta, "Inward solid-liquid phase-change heat transfer in a rectangular cavity with conducting vertical walls", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.27, No.7, pp. 1055-1065, 1984.
  7. E.M. Sparrow and T.A. Myrum, "Inclination-induced direct-contact melting in a circular tube", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.107, pp. 533-540, 1985.
  8. C.J. Ho and R. Viskanta, "Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall", *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.106, pp.12-19, 1984.