

## 경사진 원통형 용기내에서 상변화 물질의 내향 용융에 관한 실험적 연구

임 장 순\* · 송 하 진\*\*

\* 인하대학교 기계공학과

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

## Experimental Study on Inward Melting of Phase Change Material in Inclined Circular Tube

Yim, Chang-Soon\* · Song, Ha-Jin\*\*

\* *Inha University, Graduate School*

\*\* *Inha University*

### 요 약

온도가 일정한 외벽을 열원으로 하는 수직 원통형 용기내에 채워진 물질(PCM)의 내향용융 과정에서 용기의 경사각의 변화에 따른 상변화 물질 내의 온도 분포, 용융율, 용융 에너지 등을 실험적으로 연구, 분석하였다.

상변화 물질로는 용융점 온도가 42.5°C인 n-docosane paraffin(C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>)을 사용하였다.

수직 원통형 용기내에서 PCM 용융의 열전달 기구는 자연 대류에 의한 용융이 지배적인 반면 경사진 용기 내에서 용융은 자연 대류 및 고상 PCM과 용기 벽면의 직접 접촉에 의한 조합된 열전달 현상으로 나타났으며, 경사진 용기 내에서 파라핀의 용융율 및 용융 에너지는 동일 온도 조건에서 수직 원통형 용기에서 보다 높은 값을 나타내었다.

### ABSTRACT

In the present investigation, experimental analysis was performed to research heat transfer phenomena generated by means of conduction and natural convection at a succession of tube-inclinations relative to the vertical tube during inward melting process of a phase change material.

The phase change material used in the experiments is 99 percent pure n-docosane paraffin (C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>).

When the tube is vertical, the dominant mode of energy transfer between the tube wall and the melting interface is natural convection. On the other hand, when the tube

is inclined to the vertical, the melting solid is brought into direct contact with the tube wall by the action of gravity.

In the experimental results, direct contact gave rise to substantial enhancements in the amount of melted mass, relative to those for natural-convection-dominated melting.

## NOMENCLATURE

- $C_{liq}$  : Specific heat of liquid at PCM  
 $C_{sol}$  : Specific heat of solid at PCM  
 $E_{TOT}$  : Total energy stored,  $E_{\lambda} + E_{S1} + E_{S2} + E_{S3}$   
 $E$  : Energy transfer  $E_{S2} + E_{\lambda}$   
 $E_{S1}$  : Sensible energy stored in solid  
 $E_{S2}$  : Sensible energy stored in liquid  
 $E_{S3}$  : Sensible energy stored in remained solid  
 $E_{\lambda}$  : Energy stored by latent heat  
 $E_{\lambda,max}$  : Energy stored by maximum latent heat  
 $H$  : Height of tube  
 $M$  : Melted mass  
 $M_{max}$  : Total mass of PCM  
 $M_s$  : Solid mass of PCM,  $M_{max} - M$   
 $T$  : Mean temperature of solid phase  
 $T_b$  : Bulk temperature  
 $T_i$  : Initial temperature  
 $T_m$  : melting temperature  
 $T_w$  : Wall temperature

## Greek Simbol

- $\lambda$  : Latent heat per unit mass

## Abbreviation

- PCM : Phase Change Material

## Dimensionless Group

- Ste : Stefan number,  $C_{liq}(T_w - T_m)/\lambda$

## 1. 서 론

에너지 자원의 고갈에 대비한 에너지의 효율

적인 활용, 대체 에너지의 개발, 산업체의 폐열 회수, 심야 잉여전력의 활용 등의 필요성이 대두됨에 따라 에너지 저장에 관한 연구가 최근 활발히 진행 되고 있다. 지금까지 개발되고 있는 대표적인 열 에너지 저장 방법으로는 자갈, 세라믹 등과 같은 단상의 물질을 이용하는 현열 이용 축열 방법과 파라핀등과 같은 상변화 물질을 이용하는 잠열이용 축열 방법등을 들 수 있으며 이 중 특히 저장 밀도가 비교적 큰 것으로 알려진 상변화 물질을 이용한 에너지 저장 방법이 많은 관심을 일으키고 있다.<sup>1-7)</sup>

본 연구에서는 축열장치에 대한 효율을 증대시키고 실질적인 축열 장치의 설계에 적용할 수 있는 기초 자료를 얻고자 상변화 물질이 채워진 원통형 용기를 경사지게 한 경우 관 외부로부터 가열이 행해질때, 즉 내향 용융시에 대한 열전달 실험을 실시하여 온도 분포와 용융 질량 및 용융 에너지 등을 수직 원통형 용기인 경우의 결과들과 비교 검토하고자 한다. 이때 사용한 상변화 물질은 용융점이 42.5°C이고, 순도가 90%인 n-docosane paraffin을 사용하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험 장치의 주요부분은 Test Section, 원통형 용기의 지지대, 저온 항온수조, 고온 가열수조, 온도 조절장치(Thermo-controller), 온수 공급장치(Pump. PDB-86), 온도 측정장치(Data-logger), 디지털 질량 측정기(정확도 0.1g) 등으로 구성되어 있으며 실험 장치의 개략도를 Fig.2-1에 나타내었다.

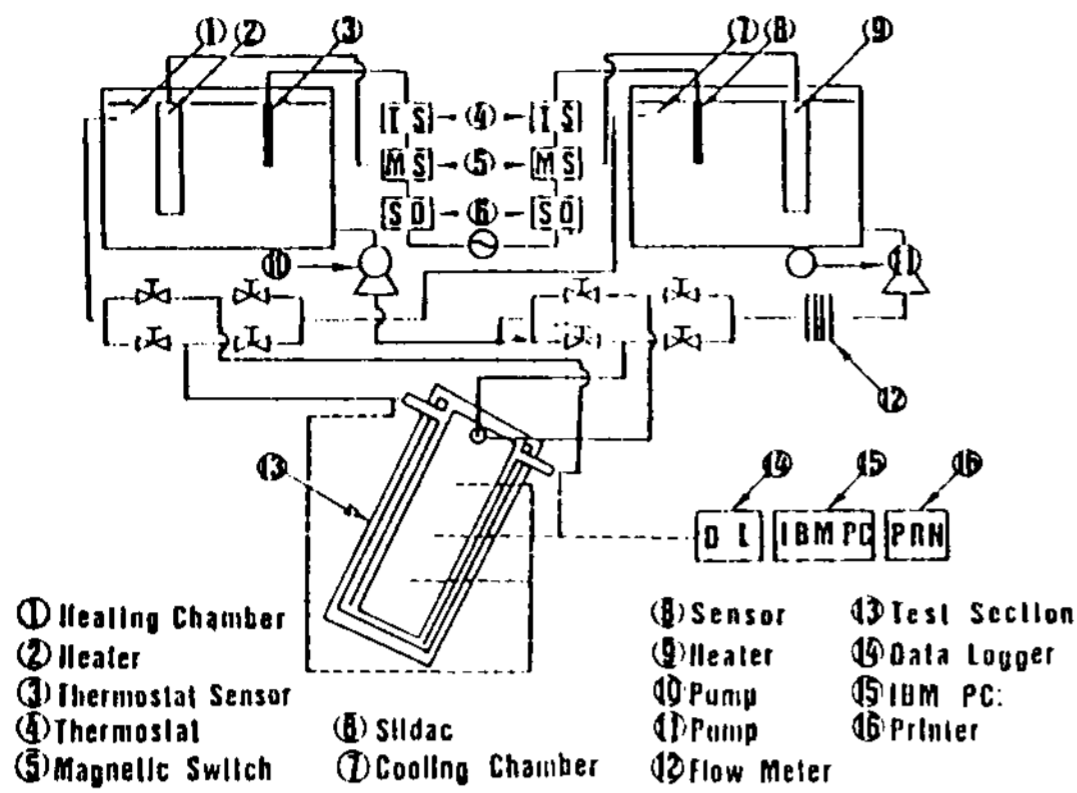


Fig.2-1 Schematic diagram of experimental apparatus

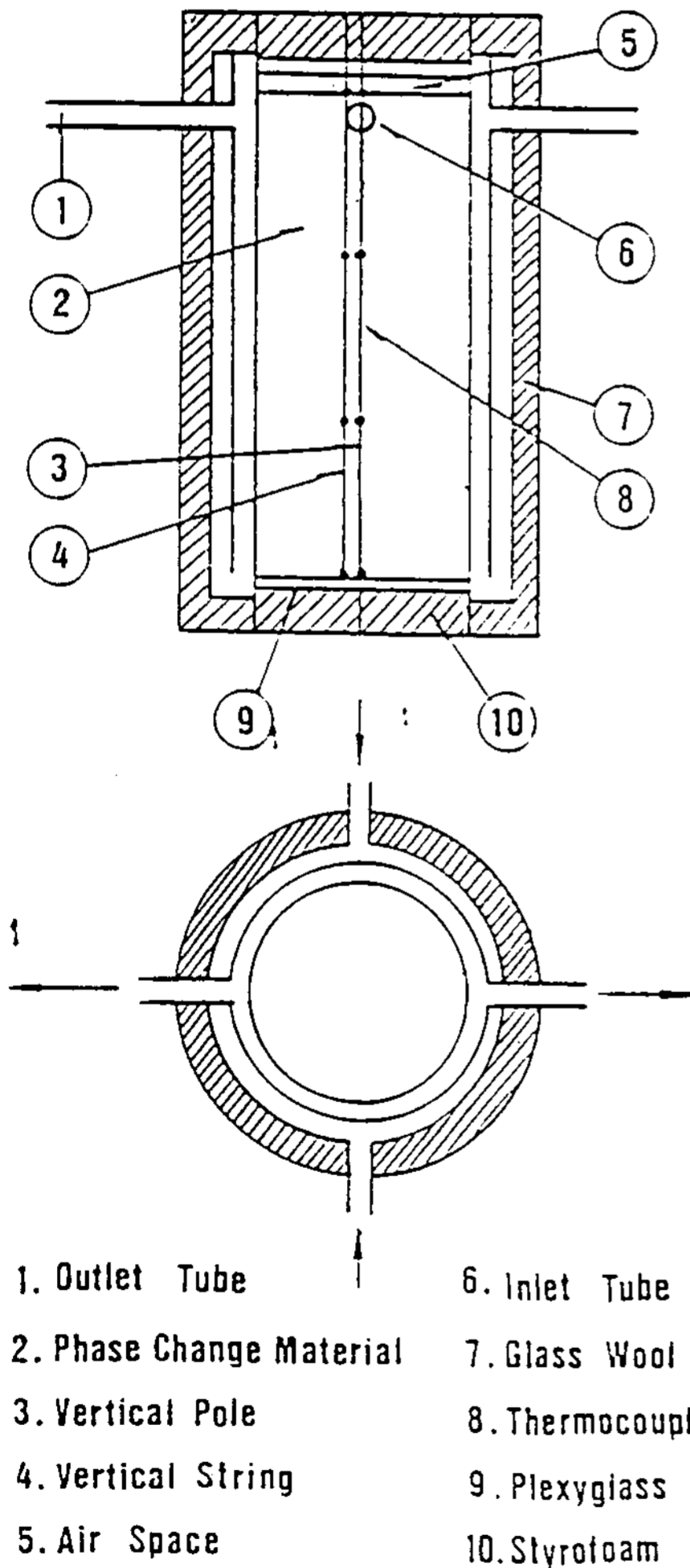


Fig.2-2 Schematic diagram of container tube

Fig.2-2는 Test section의 상세도로써 여기서 수직 원통형 PCM용기는 그 재질이 동으로 내경 60mm, 높이 370mm이고 두께는 2mm이다. 또한 PCM 용기는 이중관으로 하였으며 온수의 입구, 출구를 각각 2개씩 만들어 용기의 벽면을 등온이 유지되도록 하였다.

용기내 PCM의 온도 측정용 열전대는 1.0·Y/H의 위치에 1개, 상경계면의 이동이 심할 것으로 생각되는 2/3·Y/H 위치에 1개, 1/3·Y/H에 1개, 0.0·Y/H 위치에 1개를 설치하여 상변화 물질의 온도를 측정하였다. 액상 PCM의 부피 온도를 측정하기 위하여 지지대의 하부에 10mm의 간격으로 2개의 열전대를 부착하여 총 6개 지점의 온도를 측정하였다. PCM의 용융시 체적팽창 및 용기의 경사로 인한 PCM의 누출에 대비 하기 위하여 PCM 상부표면과 단열마개 사이에는 50mm의 공기층(Air space)을 두었다.

고온 가열수조 및 저온 항온조의 용량은 각각 200ℓ이며 그 내부에 각각 3kw용량의 전기 히터를 내장시켰다. 항온수를 순환 시키기 위해 온수용 순환 펌프(한일 순환 펌프 PDB-86)를 사용하였으며 솔레노이드 밸브로 수로를 자동 개폐 하였다.

온도 조절장치(정도 0.1°C, Thermo-controller)는 항온조내에 있는 가열기를 작동시켜 항온조내의 온도를 가열하고자 하는 일정한 온도로 유지시켜 준다. PCM 용기, 항온조 및 연결 파이프는 단열재를 이용하여 보온 하였다.

원통형 용기를 일정한 각도로 유지시키기 위하여 10mm의 강판에 외경 27mm, 길이 740mm의 강봉을 450mm의 간격을 두고 2개를 강판에 수직으로 고정하였다. 또한 강봉의 끝 부분은 2개로 절단된 T형 소켓을 부착하여 원통형 용기가 지지 및 경사 지도록 하였다.

각도의 측정은 수평 각도기(정확도 0.1도)를 사용하였으며 가시적으로 각도를 확인 하기 위하여 추가 부착된 각도기를 원통형 용기의 끝부분에 고정하였다. PCM내 각지점의 온도는 Data-logger(Fluke 2280B)를 통해 IBM-PC(AT기종)에 수신되어 자동 기록되도록 하였으며 용융 PCM의 질량 측정은 디지털 질량 측정기(정확도 0.1g)를

이용하였다.

## 2.2 실험방법

본 실험에서 사용된 상변화 물질은 n-Docosane Paraffin(C<sub>22</sub>H<sub>46</sub>)으로써 용융온도는 42.5°C, 용융잠열 248.3KJ/kg, 밀도 776kg/m<sup>3</sup> 및 액상 비열 1.8

KJ/kg°C인 물성치를 갖고 있다.

상변화 물질의 초기 온도가 20°C인 Subcooling 경우에는 벽면온도를 52.5°C, 62.5°C 및 72.5°C로 하여 정해진 각도에 따라 내향 용융 실험을 행하였으며, 온도조건 및 용기의 경사각에 대한 자세한 사항은 Table 1-1에 나타냈다.

실험초기에 Test Section내 상변화 물질의 초기

Table 1-1 The table of experimental condition

Initial Temperature (Ti)	Wall Temperature (Tw)	Experimental Time Step (Min)	Inclination of tube (Deg)
20°C	52.5°C	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60	0, 10, 20, 30, 45, 60, 90
	62.5°C	10, 20, 30, 40, 50	0, 10, 20, 30, 45, 60, 90
	72.5°C	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30	0, 10, 20, 30, 45, 60, 90

온도를 열평형 상태로 유지시키기 위해서 예비 실험으로부터 얻은 결과에 따라 약 6시간에서 8시간 동안 온수를 순환 시켰으며 Test Section 내의 상변화 물질 온도와 초기 설정 온도와의 차이가 0.05°C 이내 일때를 열평형 상태에 도달된 것으로 하였다.

열적인 평형 상태가 확인 되면 PCM 용기를 일정한 각도로 고정후 고온수를 Test section에 순환시켰다. 일정한 시간이 경과하면 PCM용기내 용융된 파라핀으로 부터 고상 파라핀을 채취하여 실험 시간 Step마다 사진 촬영하였다.

그리고 용기내 남아있는 액상 파라핀의 용융량 및 액상 부피 온도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

상변화물질의 초기온도를 일정하게 유지한 후 용기의 경사각 및 벽면온도를 각각 변화시키면서 상변화물질 내의 온도분포, 용융율, 용융에너지 등을 실험적으로 측정 및 계산하여 이에 대한 결과를 수직 용기 내의 상변화 물질의 온도 분포,

용융율, 용융에너지 등의 측정치와 비교 검토하였다.

### 3.1 용융 에너지의 산출

M<sub>max</sub>를 PCM를 총질량, M을 PCM의 용융된 질량으로 나타내면 PCM 용기로 부터 상변화 물질에 전달된 용융 잠열 에너지 E<sub>i</sub>는

$$E_i = \lambda M \quad (1)$$

여기서 λ는 단위 질량 당 잠열이다.

만일 전량이 용융된다면 총잠열 에너지는

$$E_{i,max} = \lambda M_{max} \quad (2)$$

이 되고 그 비는 다음과 같다.

$$E_i/E_{i,max} = M/M_{max} \quad (3)$$

용융된 PCM이 초기조건 온도(T<sub>i</sub>)에서 용융점 온도(T<sub>m</sub>)이 되기 까지 벽면으로 부터 받은 현열 에너지 E<sub>s1</sub>은

$$E_{s1} = M \int_{T_i}^{T_m} C_{sol} dT \quad (4)$$

용융점 온도 T<sub>m</sub>에서 부터 일정 시간이 경과한

후 용융된 PCM의 부피 온도를  $T_b$ 라하면 이때 벽면으로부터 상변화 물질에 전달된 현열 에너지  $E_{s2}$ 는

$$E_{s2} = M \int_{T_m}^{T_b} C_{liq} dT \quad (5)$$

아직 용융되지 않는 잔여 고상부에서의 현열 에너지  $E_{s3}$ 는

$$\begin{aligned} E_{s3} &= (M_{max} - M) \int_{T_i}^T C_{sol} dT \\ &= M_s \int_{T_i}^T C_{sol} dT \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 PCM의 잔여 고상부 질량  $M_s = M_{max} - M$ 이다.

전달된 전에너지  $E_{TOT}$ 은

$$\begin{aligned} E_{TOT} &= E + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3} \\ &= \lambda M + M \int_{T_i}^{T_m} C_{sol} dT + M \int_{T_m}^{T_b} C_{liq} dT \end{aligned} \quad (7)$$

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

가 된다. 여기서  $T$ 는 잔여 고상부의 평균 온도이다.

또한 열저장 특성을 설명하기 위해 무차원 변수로 Stefan수를 설정하면 이것은 잠열에 대한 액상에서의 현열의 비로 정의된다.

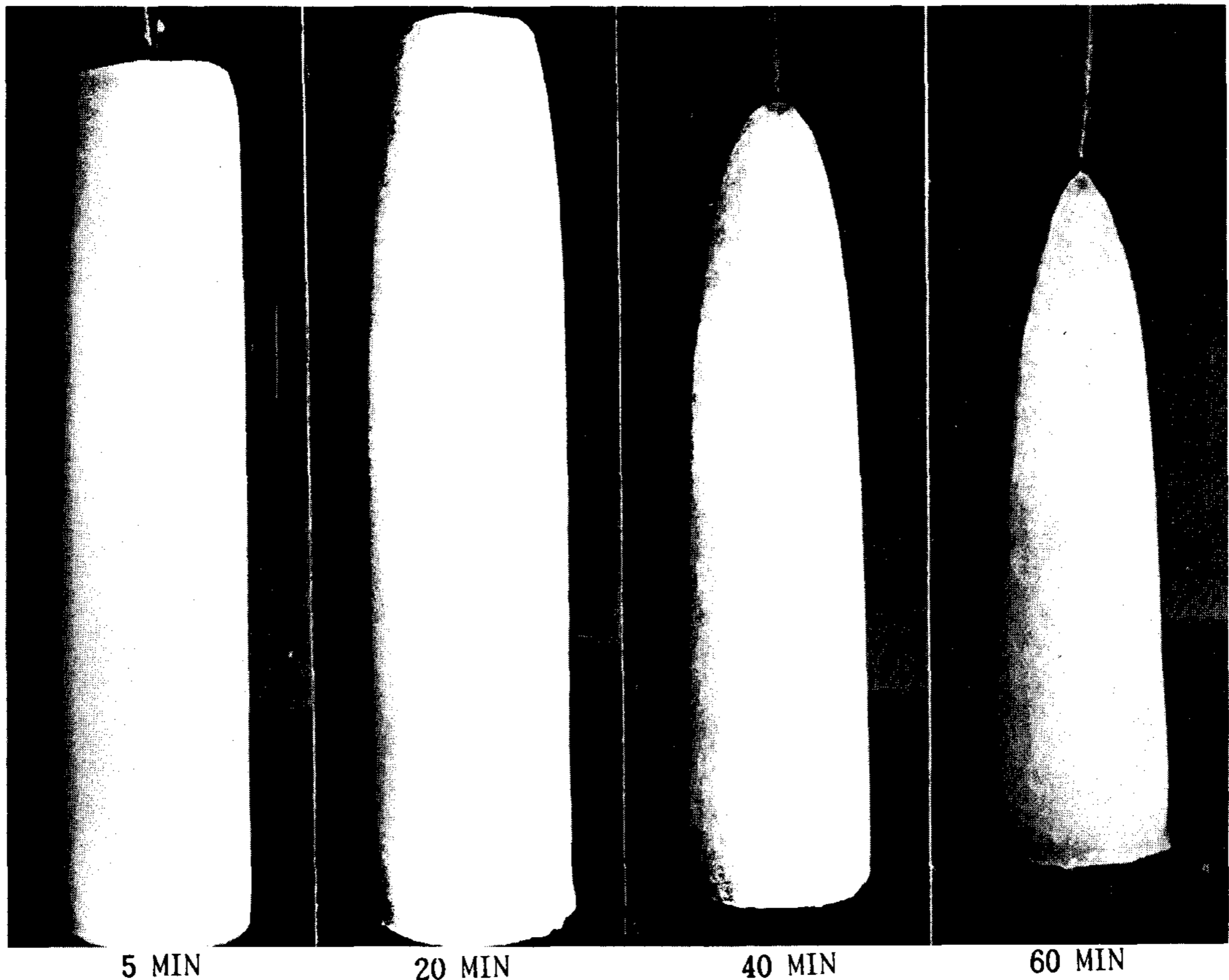
즉 열이 축열될 때

$$Ste = C_{liq}(T_w - T_m)/\lambda \quad (8)$$

여기서  $T_w$ 는 PCM 용기의 벽면온도이다.

### 3.2 용융형태

Photo. 3-1, 3-2는 초기과냉도( $T_m - T_i$ )가  $22.5^\circ\text{C}$ 이고 벽면 과열도( $T_w - T_m$ )가  $30^\circ\text{C}$ 인 경우에



5 MIN

20 MIN

40 MIN

60 MIN

Photo. 3-1 Photograph of solid PCM in a vertical tube :  
5, 20, 40, and 60 min. :  $T_w - T_m = 30^\circ\text{C}$   
 $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

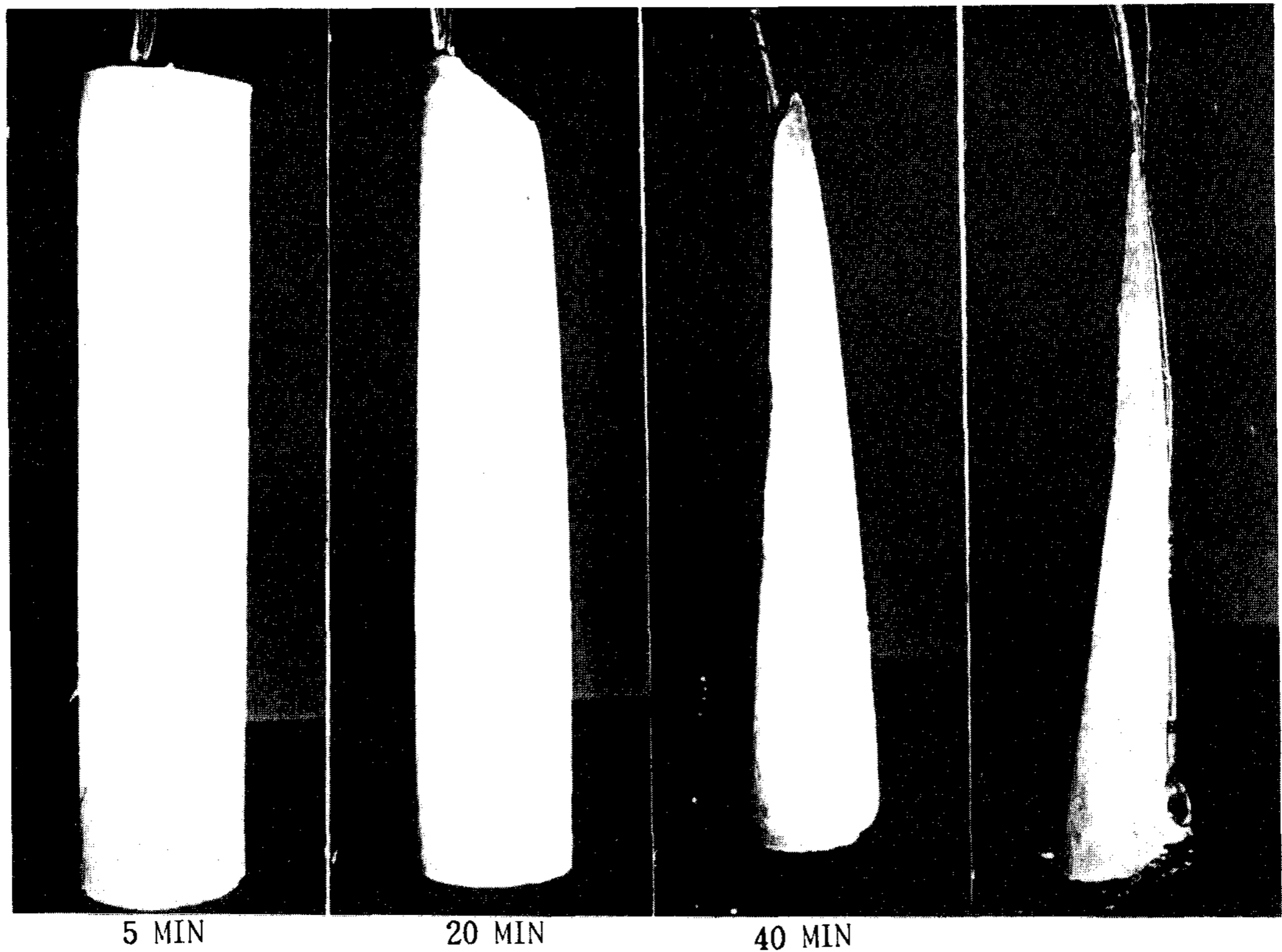


Photo. 3-2 Photograph of solid PCM in a inclined tube(30deg.) : 5, 20, 40, and 60 min. :  
 $T_w - T_m = 30^\circ\text{C}$       $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

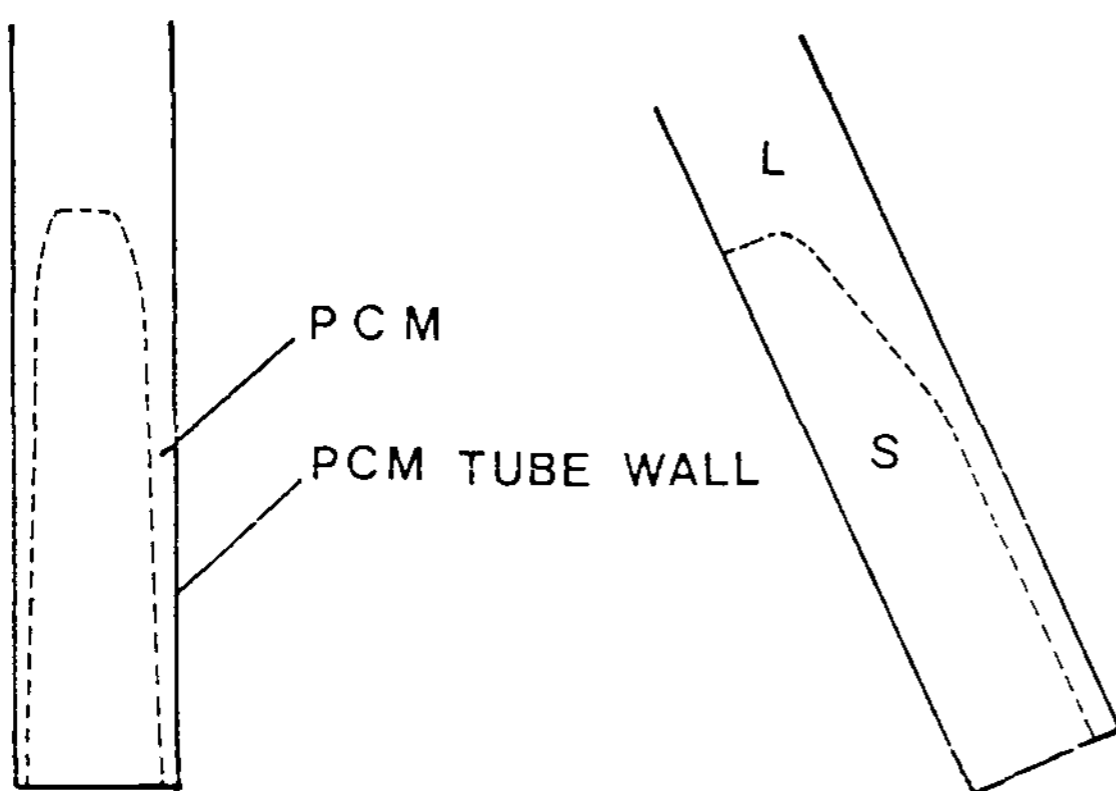


Fig.3-1 Patterns of melting in a vertical and inclined tube

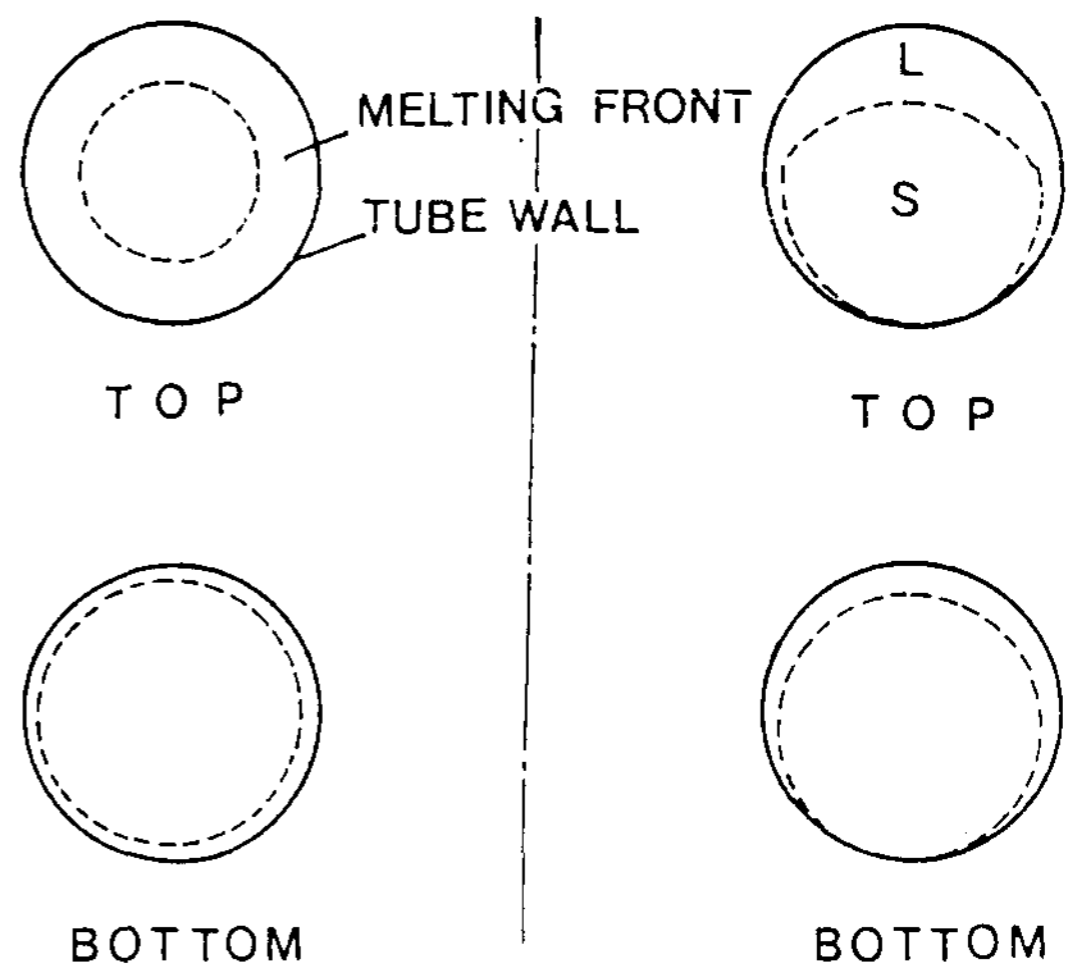


Fig.3-2 Top and bottom cross sections corresponding to the melting patterns of a vertical(left hand side) and inclined(right hand side) tube.

수직 원통형 용기 및 경사진 용기에 고온수를 순환 시킨 후 5, 20, 40, 60분이 경과할 때 고상 PCM의 용융 형태를 나타낸 사진이다.

Fig.3-1은 용기에 일정시간 고온수를 순환시킨 후 수직 및 경사진 용기에서 상변화 물질이 채워진 용기의 종단면에서 PCM의 형상을 나타낸다. 수직용기 내에서 PCM의 용융 형상과 경사진 용기 내에서 PCM의 용융 형상은 뚜렷한 차이가 있는 것으로 관찰되었다. 수직용기 내에서의 PCM의 상경계면은 축에 대칭인 포물선의 형태로 나타나는데 이것은 용융된 PCM의 밀도차에 의한 자연 대류 현상만에 의해 기인된 것으로 사료된다. 그러나 경사진 용기 내에서의 PCM 용융의 주된 기구는 고상 PCM이 용기의 벽면에서 열전도에 의한 열전달 즉 직접 접촉에 의해 일어나는 용융과 자연대류에 의한 조합된 용융이므로 경사진 용기내에서 PCM의 상경계면의 형상은 비대칭적인 형태로 나타난다.

Fig.3-2는 수직 용기 및 경사진 용기 내에서의 PCM용기의 윗면 및 밑면에 대한 PCM의 횡단면을 나타낸것이다. 수직 용기 내에서 PCM의 상경계면은 원형의 형태를 나타내는 반면 경사진 용기내에서의 상경계면은 원형이 아닌 형태를 나타낸다.

### 3.3 용융율

Fig.3-3은 PCM의 용융점 온도와 초기 온도와의 차인 초기 과냉도( $T_m - T_i$ )가  $22.5^\circ\text{C}$ 인 Subcool 조건에서 벽면과열도( $T_w - T_m$ )가  $10^\circ\text{C}$ 이고 PCM용기의 경사 각도 0, 10, 20, 30, 45, 60 및 90도 일때 시간에 따른 용융율을 나타낸 것이다. Y축의  $M/M_{\max}$ 는 용융율을 나타내며 여기서 M은 용융개시( $t=0$ )으로 부터 임의 시간 t까지 용융된 질량이며  $M_{\max}$ 는 용기내 상변화 물질의 전질량을 나타낸다. 또한 수직인 용기에서 용융율의 실험값을 경사진 용기에서 용융율의 값들과 구별하기 위하여 Cubic spline(Beat fit method)을 사용하여 기준선을 표시 하였다.

그림에서 나타낸 바와 같이 용기의 각도가 10도 및 20도 인 경우의 용융율을 수직인 원통형 용

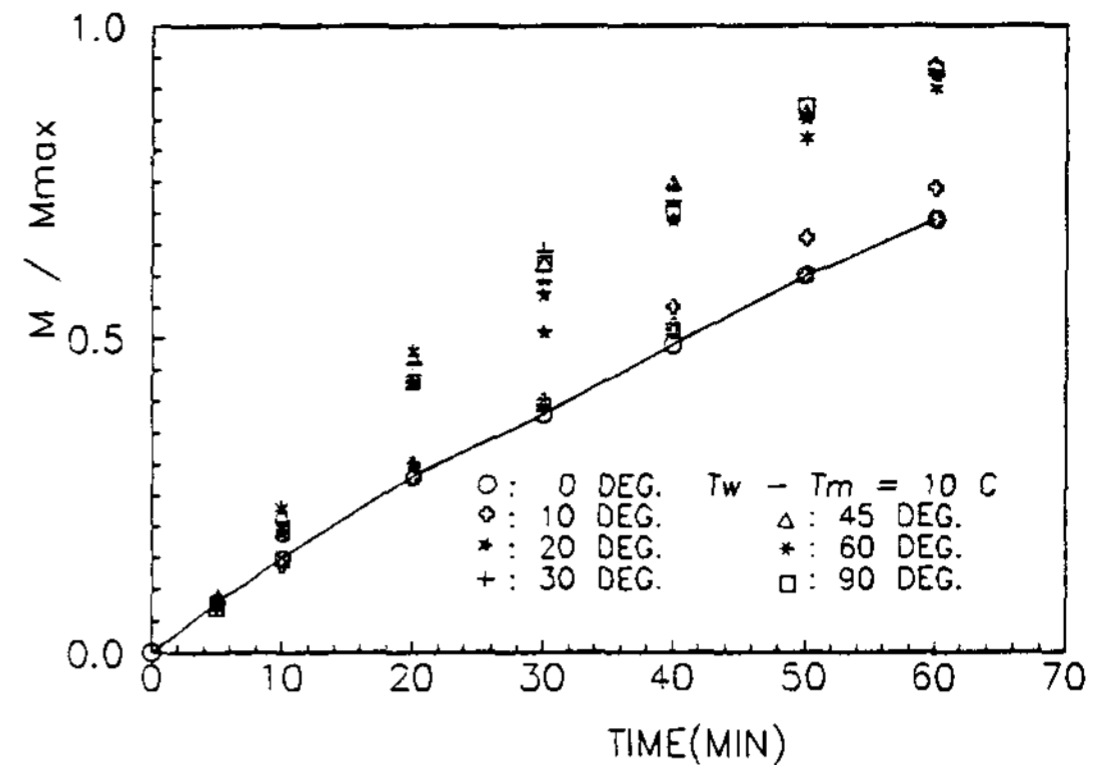


Fig.3-3 Timewise variation of the melted mass at 0, 10, 20, 30, 45, 60 and 90 degree inclinations :  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$   $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

기와 비교할 때 약간 차이가 나는데 이것은 고상 PCM이 용기 벽면에 미끄러지지 않고 고상 PCM과 용기의 벽면 사이에 약간의 간격을 두고 용융하기 때문이라고 생각된다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 PCM용기의 각도가 30도 이상인 경우의 용융율은 용기의 각도가 0도일때에 비하여 용융 시간 30분 이후 그 증가율은 약 25% 향상 되었는데 이것은 고상 PCM이 자체 중력에 의해 원통형 용기의 벽면에 직접 접촉하여 대류가 지배적인 열전달로 부터 전도의 영향이 커진 열전달로 변화 된것을 의미한다.

그리고 원통형 용기의 경사각이 45, 60, 90도인 경우를 30도인 경우와 비교할 때 거의 같은 용융율을 나타낸다. 그러므로 용융율을 향상 시키기 위하여 원통형 용기의 경사각을 30도 이상으로 경사지게 하는 것은 무의미하다는 것을 알 수 있다.

따라서 용기의 경사각이 30도가 될 때 고상 PCM과 용기 벽면이 완전한 직접 접촉이 성립함을 알 수 있다.

Fig.3-4는 초기 과냉도( $T_m - T_i$ )가  $22.5^\circ\text{C}$ 이고 벽면과열온도( $T_w - T_m$ )가  $20^\circ\text{C}$ 일때 PCM용기의 경사 각도를 0, 10, 20, 30, 45, 60 및 90도로 변화시킨 경우 시간에 따른 용융율을 나타낸 것이다.

Fig.3-4는 벽면 과열도( $T_w - T_m$ )가 Fig.3-3보다

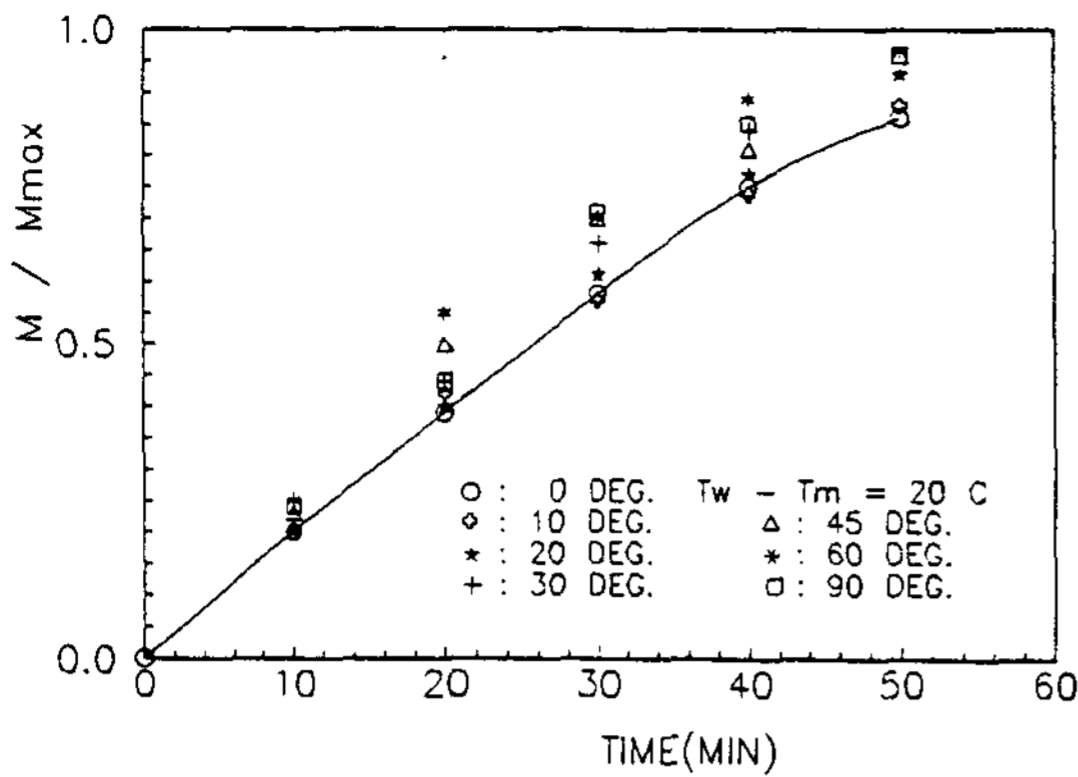


Fig.3-4 Timewise variation of the melted mass at 0, 10, 20, 30, 45, 60 and 90 degree inclinations :  $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$   $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

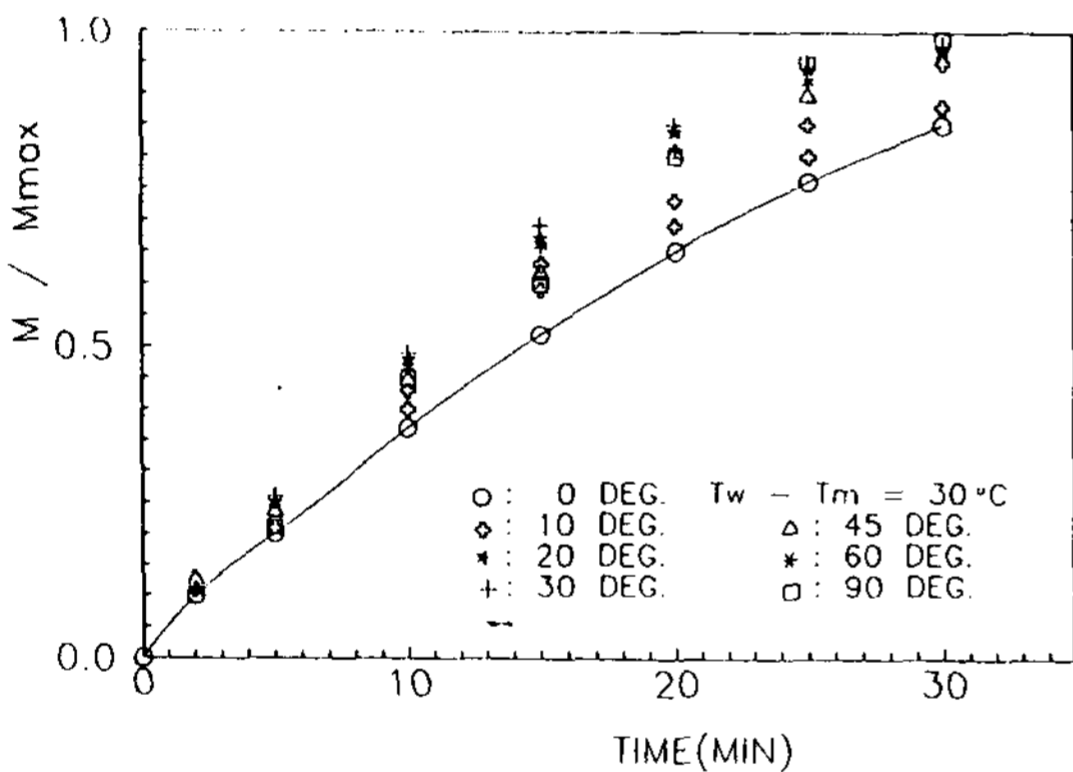


Fig.3-5 Timewise variation of the melted mass at 0, 10, 20, 30, 45, 60 and 90 degree inclinations :  $T_w - T_m = 30^\circ\text{C}$   $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

10°C 높은 조건이므로 동일 시간에서 Fig.3-3보다 용융율은 향상되고 질량 분포는 Fig.3-3과 거의 유사한 형태를 나타낸다.

Fig.3-5는 초기 과냉도가 22.5°C이고 벽면 과열도가 30°C이며 용기의 각도가 0, 10, 20, 30, 45, 60 및 90도인 경우에 시간에 따른 용융율을 나타낸 것이다. 벽면 과열도가 10°C일 때 즉 Fig.3-3과 비교하여 보면 벽면 과열도가 30°C인 경우가 10°C인 경우 보다 동일 시간 경과 후에서 거의 두배의 용융율의 증가를 나타내며 이것은 용융 시간으로 볼때 거의 1/2정도로 짧아지는것을 나타낸다.

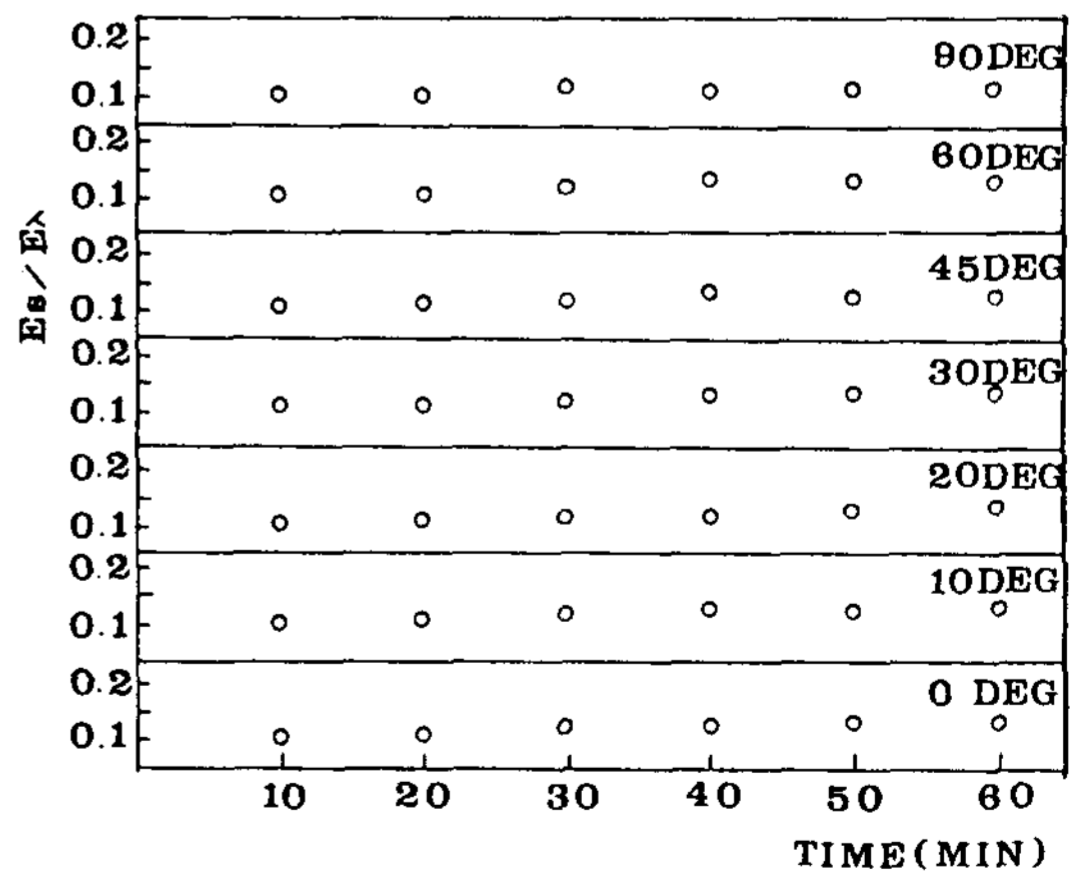
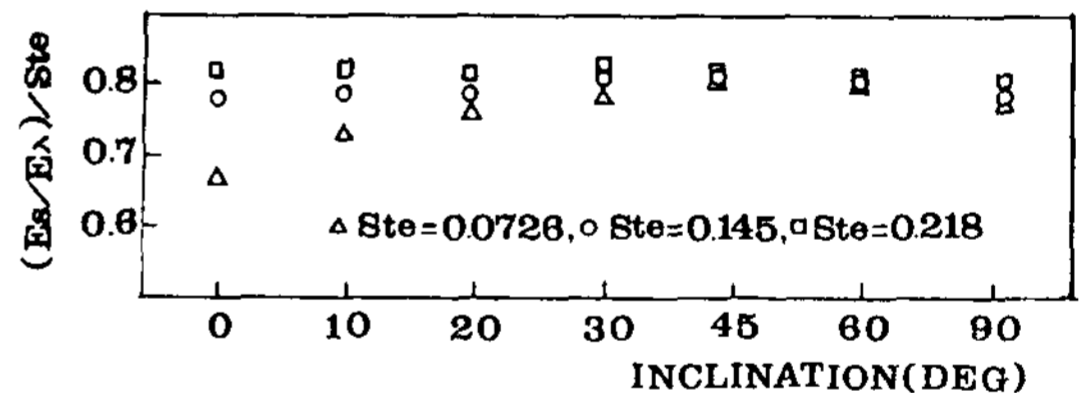
용기의 각도가 10도 및 20도 일때는 벽면 과열도가 10°C 및 20°C인 경우와 마찬가지로 고상 PCM과 용기의 벽면 사이에 약간의 간격을 두고 용융 하기 때문에 용융율의 측정값이 매 실험마다 약간의 차이를 나타내고 있다.

### 3.4 용융 에너지

Fig.3-6의 하단 그림은 초기 과냉도가 22.5°C이고 벽면 과열도( $T_w - T_m$ )가 20°C인 경우, PCM 용기의 경사각이 0, 10, 20, 30, 45, 60 및 90도로 변화될 때 잠열 에너지와 현열에너지의 비( $E_s/E_\lambda$ )를 나타낸 것이다.

Fig.3-6의 상단 그림은 액상 Ste수가 0.0726, 0.145 및 0.218인 경우에 용기의 경사각이 0, 10, 20, 30, 45, 60 및 90도로 변화될 때 액상 Ste수에 대한 용융에너지의 비 즉  $(E_s/E_\lambda)/Ste$ 를 나타낸 것이다.

하단 그림에서 보는 바와같이 용융 에너지의



$T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$  ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

Fig.3-6 Relation between the sensible and latent heat energy components



비( $E_s/E_\lambda$ )는 시간의 경과 및 용기의 경사도의 변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한  $(E_s/E_\lambda)/Ste$ 의 값은  $E_s/E_\lambda$ 의 값을 평균하여 액상 Ste수로 나눈 값이고 그 date의 범위는 0.65에서 0.85사이에 존재하며 그 관계식은

$$E_s = 0.8 Ste E_\lambda \quad (9)$$

로 정리된다.

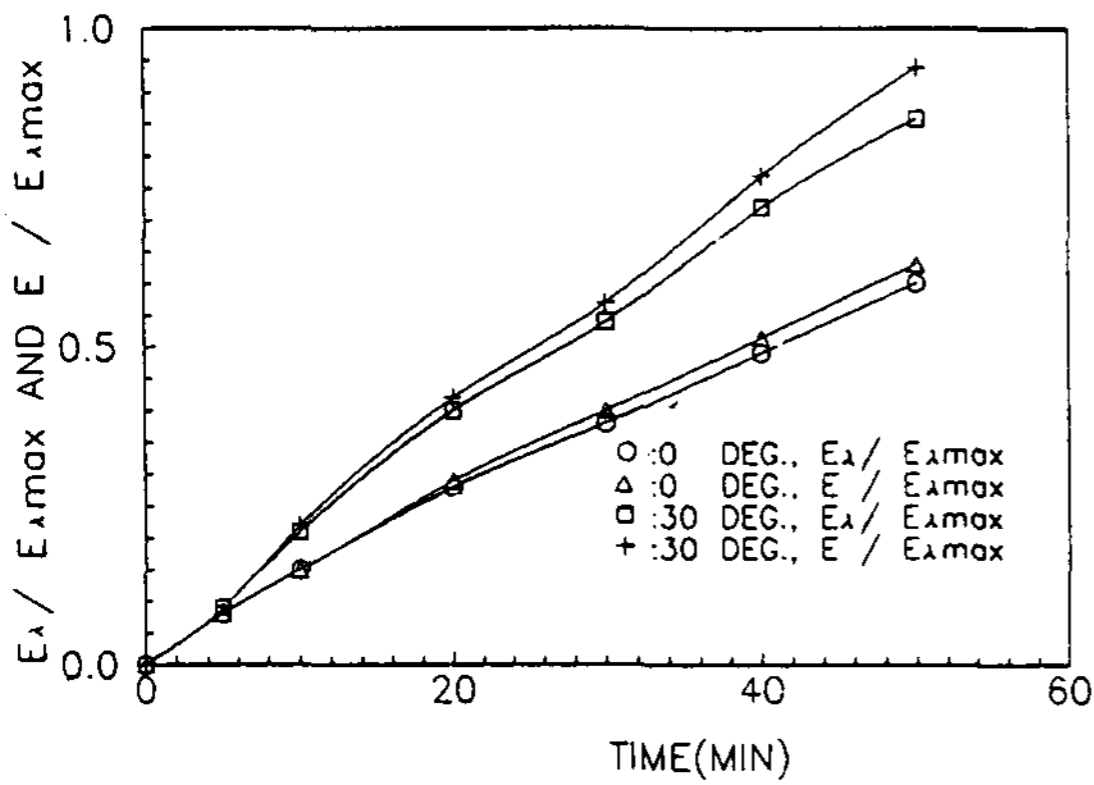


Fig.3-7 Energy accounting for  $Ste=0.0726$  in a vertical and inclined tube,  $T_w - T_m = 10^\circ C$ ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ C$

Fig.3-7은 벽면과열도가  $10^\circ C$ 이고 초기과냉도 ( $T_m - T_i$ )가  $22.5^\circ C$ 인 경우 PCM용기의 경사각이 0도 및 30도의 조건에 대하여 시간경과에 따른 최대 잠열 에너지  $E_{\lambda max}$ 에 대한 잠열 에너지  $E_\lambda$ 의 비, 즉  $E_\lambda/E_{\lambda max}$ 와 최대 잠열 에너지  $E_{\lambda max}$ 에 대한 총 에너지  $E$ 의 비 즉  $E/E_{\lambda max}$ 를 나타낸 것이다. 여기서 총에너지  $E$ 는 잠열에너지  $E_\lambda$ 와 용융점 온도  $T_m$ 부터 부피 온도  $T_b$ 까지 용융된 상변화 물질에 축열되는 현열에너지  $E_{s2}$ 와의 합이다. 용기의 동일 경사각에서 용융된 상변화 물질에 축열되는 최대잠열 에너지  $E_{\lambda max}$ 에 대한 잠열 에너지  $E_\lambda$ 의 비( $E_\lambda/E_{\lambda max}$ )와 최대 잠열에너지  $E_{\lambda max}$ 에 대한 총에너지  $E$ 의 비( $E/E_{\lambda max}$ )는 적은 차이를 나타내고 있는데 이것은 현열 에너지  $E_{s2}$ 에 직접 영향을 주는 벽면 과열도( $T_w - T_m$ )의 크기가 적기 때문이라고 생각된다. 또한 이 그림에서 보는 바와 같이 30도로 경사진 용기내에서 PCM의 용융에너지의 비들을 수직용기 내에서의 용융에너지의

비들보다 증가의 폭이 시간의 경과에 따라 커짐을 표시하고 있다.

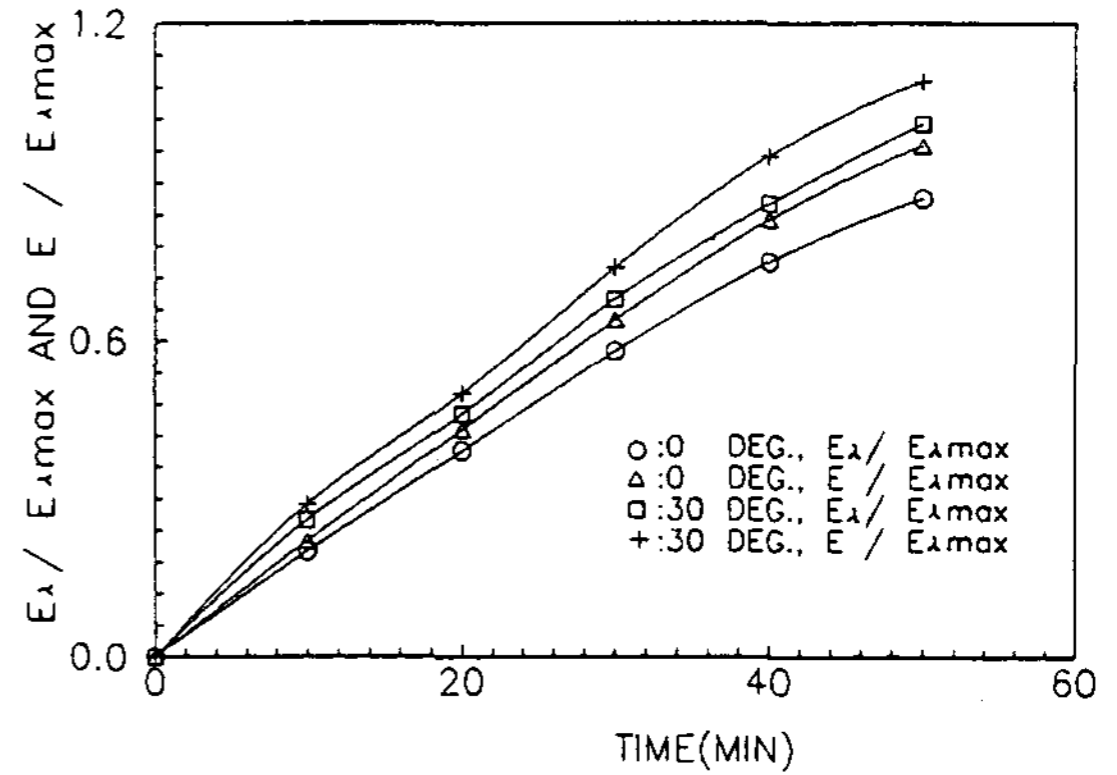


Fig.3-8 Energy accounting for  $Ste=0.1456$  a vertical and inclined tube,  $T_w - T_m = 20^\circ C$ ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ C$

Fig.3-8은 벽면과열도가  $20^\circ C$ 이고 초기과냉도가  $22.5^\circ C$ 에서 PCM용기의 경사각이 0도 및 30도의 조건에 대하여 시간에 따른 각 용융에너지 비들을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 상변화 물질에 축열되는 최대 잠열에너지에 대한 잠열에너지의 비( $E_\lambda/E_{\lambda max}$ )가 최대 잠열에너지에 대한 총에너지 비( $E/E_{\lambda max}$ )의 차가 Fig.3-7보다 약간 큰 차이를 나타내고 있는데 이것은 벽면과열도( $T_w - T_m$ )가 증가함에 따라 총 에너지 중 현열에너지  $E_{s2}$ 의 비중이 크게 차지하고 있음을 의미한다.

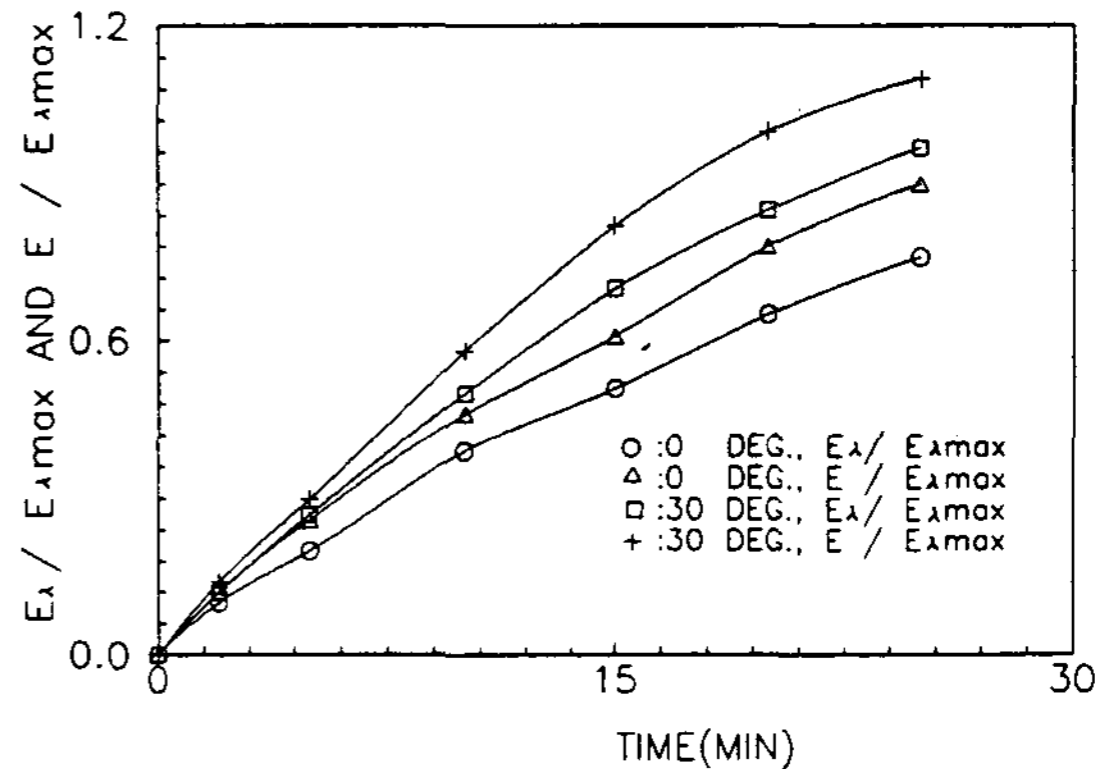


Fig.3-9 Energy accounting for  $Ste=0.218$  in a vertical and inclined tube,  $T_w - T_m = 30^\circ C$ ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ C$

Fig.3-9는 벽면과열도가 30°C이고 초기과냉도가 22.5°C에서 PCM용기의 경사각이 0도 및 30도의 조건에 대하여 시간에 따른 각 용융에너지 비들을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와같이 시간이 경과함에 따라 상변화물질에 축열되는 최대 잠열에너지에 대한 잠열에너지의 비( $E_{\lambda}/E_{\lambda,max}$ )와 최대잠열에너지에 대한 총에너지 비( $E/E_{\lambda,max}$ )가 현저한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig.3-7, 3-8과 비교해 볼 때 벽면 과열도( $T_w - T_m$ )가 클수록 총 에너지 E중에 현열 에너지  $E_{s2}$ 의 비중은 커졌으며 현열 에너지  $E_{s2}$ 로 인한 총 에너지 E의 증가율은 30도로 경사진 용기 및 수직인 용기 내에서 각각 거의 같은 증가율로 증가한다는 것을 알 수 있다.

### 3.5 온도분포

Fig.3-10은 초기과냉도( $T_m - T_i$ )가 22.5°C이고 벽면과열도( $T_w - T_m$ )가 10°C인 경우에 수직 PCM 용기에 대한 고상부의 축방향에 대한 온도 분포를 나타낸 것이다. 용융초기 5분까지는 중심축 방향의 위치에 따라 온도분포가 거의 같게 나타났고 시간이 경과할수록 축방향에 대한 각 지점의 온도분포는 용기의 하부에서 상부로 갈수록 크게 증가하고 있음을 나타낸다. 이와같은 현상은 시간이 경과할수록 자연대류에 의한 영향으로 PCM용기의 상부에서 PCM의 온도가 하부

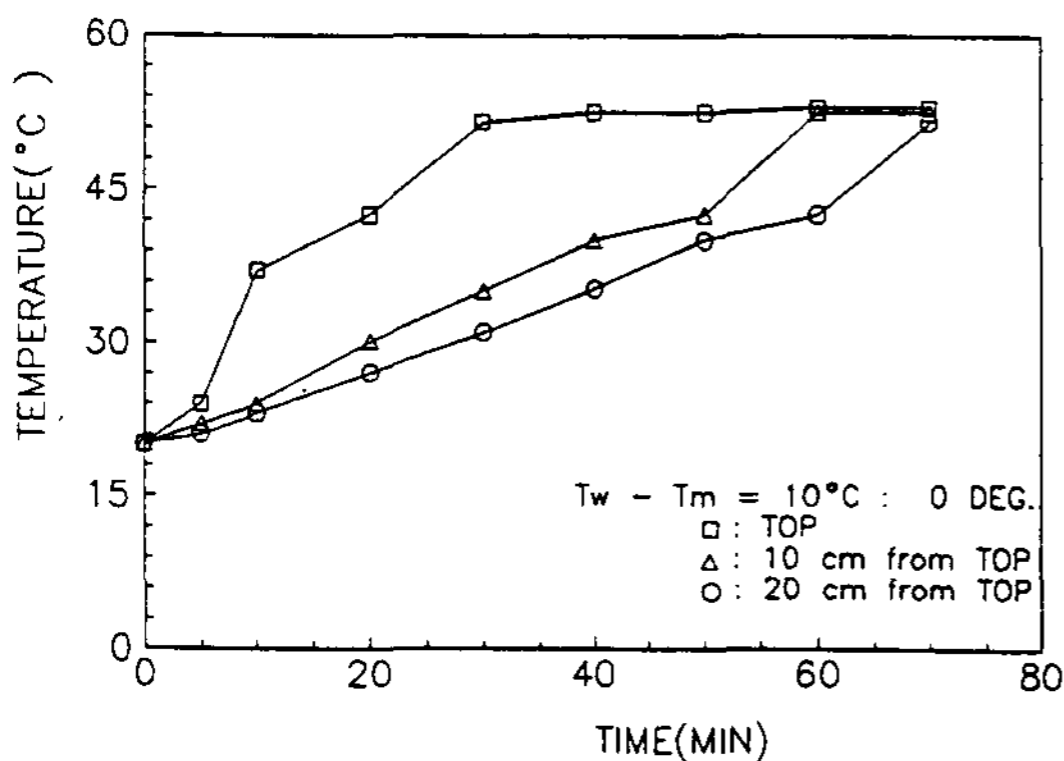


Fig.3-10 Temperature history inward from heating tube wall in a vertical tube,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$ ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

보다 크게 증가하는것으로 해석된다. PCM의 용융점 온도인 42.5°C부근에서는 완만한 경사를 보이는데 이것은 잠열 구간이라고 생각된다. 이러한 잠열구간은 용기의 상부부터 하부로 10cm 및 20 cm로 내려 갈수록 비교적 완만하게 나타나고 있다.

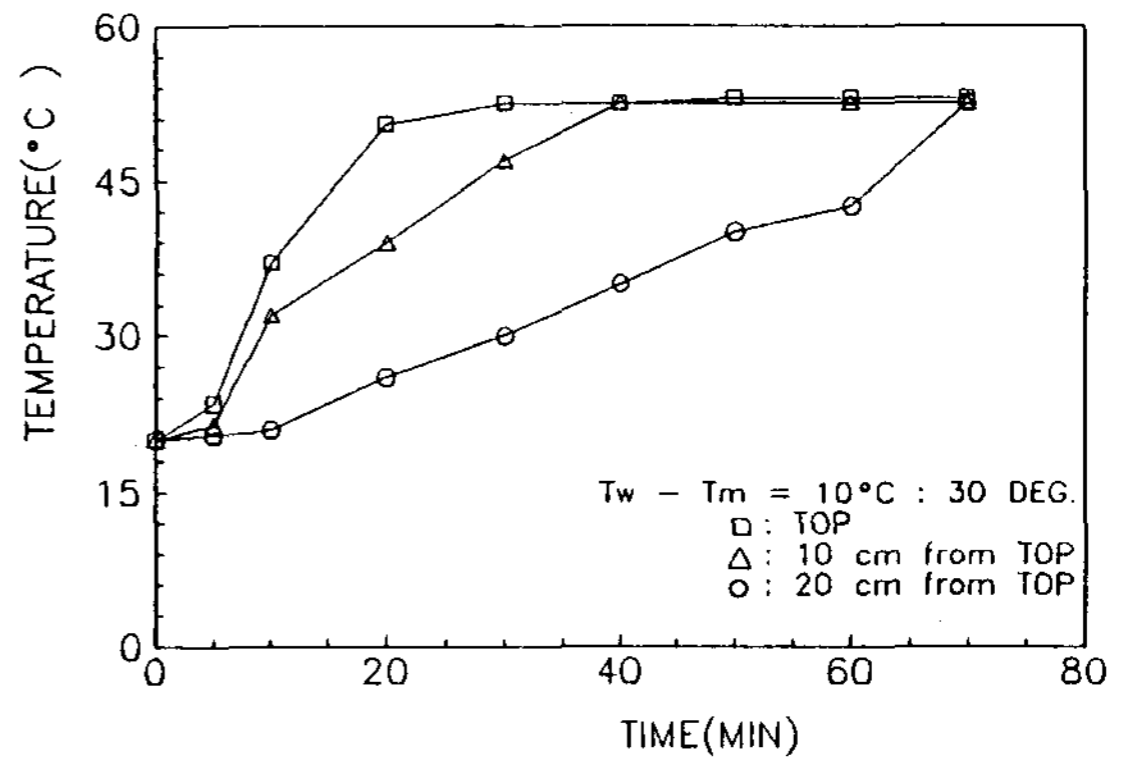


Fig.3-11 Temperature history inward from heating tube wall in a inclined tube,  $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$ ;  $T_m - T_i = 22.5^\circ\text{C}$

Fig.3-11은 용융시 초기과냉도( $T_m - T_i$ )가 22.5°C이고 벽면과열도( $T_w - T_m$ )가 10°C인 경우이며 PCM용기의 각도가 30도로 경사져 있을때 고상 PCM의 축방향에 대한 온도분포를 나타낸 것이다. PCM용기의 각도가 0도인 경우와 비교 할때 경사진 PCM용기에서의 온도 분포가 약간 높게 나타났으며 특히 용기의 윗면으로 부터 10cm 되는 위치에서의 온도 분포는 용융 개시 15분 후 수직인 용기 에서 보다 급속히 증가하여 최고 온도에 도달하게 된다. 이것은 고상 PCM이 용기의 벽면에 직접 접촉함으로써 용융율이 향상됨에 따라 용융 온도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 상변화물질(n-docosane paraffin)이 채워져 있는 수직 원통형 용기의 외부벽면을 등은 조건으로 한 용융 과정에서 용기의

경사도를 변화시켰을 때 용융량, 용융 에너지, 온도 분포 등에 관하여 고찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 수직인 용기내 PCM의 열전달 현상은 자연 대류에 의한 용융이 지배적인 반면 경사진 용기 내에서의 용융은 고상 PCM과 용기 벽면의 직접 접촉에 의한 열전도 및 자연 대류의 조합된 열전달 현상으로 나타난다.
2. 동일 온도 조건에서 경사진 용기 내에서 PCM의 용융율은 수직 용기 내부에서 보다 더 큰 증가율을 보였다.
3. 벽면 과열도가 작을때( $Ste=0.0726$ )에는 총 에너지 E에 대한 액상 영역에 저장되는 현열 에너지  $Es_2$ 의 영향은 작으나 벽면 과열도가 클수록 ( $Ste=0.218$ ) 그 영향은 크게 나타났다.

## 후 기

본 연구는 1990년도 한국 과학 재단의 학술 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사의 뜻을 표한다.

## REFERENCES

1. E.M.Sparrow and J.A.Broadbent, "Inward melting in a vertical tube which allows free expansion of the phase-change medium", ASME J. of Heat Transfer, Vol.104, pp.309-315, 1982.
2. E.D.Larson and E.M.Sparrow, "Effect of inclination of freezing in a sealed cylindrical capsule", ASME, Vol.106, pp.533-540, 1985.
3. 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.
4. 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, "상변화 물질을 사용한 축열조에서의 열전달", 한국 태양에너지 학회지 9(1), pp. 53-61, 1989.
5. 임장순, 이채문, 김준근, 조남철, 김일겸, "수평원관 내에서의 내향용융 및 응고 열전달 실험", 공기조화. 냉동공학회지 1(4), pp.319-329, 1989.
6. C.J.Ho and R.Viskanta, "Heat Transfer during melting from an isothermo vertical wall", ASME J. of Heat Transfer, Vol.106, pp.12-19, 1984.
7. R.G.Kemink and E.M.Sparrow, "Heat transfer coefficients for melting about a vertical cylinder of the phase-change medium with or without subcooling transfer" ASME J. of Heat Transfer, Vol.104, pp.309-315, 1982.

*Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ*

Laminar natural convection heat transfer from a hot body in a square enclosure has been studied for various inclination angles at  $Gr=1.5 \times 10^5$ ,  $Pr=0.71$  and  $k_s/k_f=14710$ . The area of a hot body is 1/25 of the enclosure and the aspect ratio is 1.0. The total mean Nusselt number decreases as the inclination angle increases and in case of  $\theta=90^\circ$  is 14% lower than that of  $\theta=0^\circ$ .

## **A Study on the Air System for Space Heating**

**Chun, Won-gee · Lim, Sang-Hoon · Jeon, Myung-Seok · Yoon, Jong-Ho**

*Korea Institute of Energy Research*

The present study has carried out thermal performance evaluation of air systems for space heating in Daejeon by the f-chart method. The various effects with the change in air flow rate, number of glazings, storage capacity of pebble bed, and coating materials of absorber plate are analyzed with regard to the effectiveness of air systems for space heating. A comparison is also made with liquid systems under the same operating conditions.

## **Design of Telecommunications Office Building with Passive Solar Schemes**

*Korean Solar Energy Society*

The present study has been carried out to investigate various passive solar technologies for their possible application to telecommunications office buildings. HVAC systems utilizing the solar energy are analyzed in this regard to elicit the most feasible design. The proposed design is unique, for it has been devised to promote the working spirit with an efficient space planning as well.

## **Experimental Study on Inward Melting of Phase Change Material in Inclined Circular Tube**

**Yim, Chang-Soon, Song, Ha-Jin**

*Inha University, Graduate School, Inha University*

In the present investigation, experimental analysis was performed to research heat transfer phenomena generated by means of conduction and natural convection at a succession of tube-inclinations relative to the vertical tube during inward melting process of a phase change material.

The phase change material used in the experiments is 99 percent pure n-docosane paraffin( $C_{22}H_{46}$ ).

When the tube is vertical, the dominant mode of energy transfer between the tube wall and the melting interface is natural convection. On the other hand, when the tube is inclined to the vertical, the melting solid is brought into direct contact with the tube wall by the action of gravity.

In the experimental results, direct contact gave rise to substantial enhancements in the amount of melted mass, relative to those for natural-convection-dominated melting.

## Indoor Air Temperature Distribution in a Floor Heating Space with PCM Panels

Cho, Soo\* · Sohn, Jang Yeul\*\*

\*Korea Institute of Energy Research

\*\*Dept. of Architectural Engineering, Hanyang Univ.

The purposes of the present study are to investigate the characteristics of heat storage and emission of the PCM( $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ) panel, and to analyze the distribution of indoor air temperature in a floor heating space with PCM panels for the heating system. Two identical unit test cells sized  $1.8m^W \times 1.8m^L \times 1.8m^H$  were built and installed with specially designed aluminium Ondol-panels. It held 1.2kg of calcium chloride hexahydrate(CCH).

It was found that PCM panels could reduce the indoor air temperature fluctuations and maintain the phase changing temperature for considerably long duration, 2~3 times longer in heating hour over no-CCH one. When the elapsed time was 6 hours, the average temperature difference between PCM panel and Ondol panel was  $7.7^\circ C$

## An Investigation into the Building's Thermal Mass Effect on the Variation of Indoor Temperature

Chun, Wongee, Jeon, Myung Seok

Korea Institute of Energy Research

This paper is concerned with the accurate estimation of the thermal mass effect on the variation