

【論文】

상변화 물질을 이용한 잠열축열조에 관한 기초 연구
-수평원관내의 내향용융 열전달 실험-

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

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

ABSTRACT

Heat transfer phenomena during inward melting process of the phase change material were studied experimentally. N - docosane paraffin [$C_{22}H_{46}$] is used for phase change material and its melting temperature is $42.5^{\circ}C$.

Experiments were performed for melting of an initially no-subcooled or subcooled solid in a horizontal cylinder, in order to compare and investigate the radial temperature distribution, ratio of melting and melted mass, various energy components stored from the cylinder wall, figure of the melting front in the horizontal cylinder.

The solid-liquid interface motion during phase change was recorded photographically.

The experimental results reaffirmed the dominant role played by the conduction at early stage, by the natural convection at longer time during inward melting in the horizontal cylinder.

Ratio of melting and melted mass are more influenced by wall temperature, rather than by the initial temperature of solid.

The latent energy is the largest contributor to the total stored energy.

NOMENCLATURE

C_l : Specific heat of liquid
 C_s : Specific heat of solid

E_{s1} : Sensible energy stored in liquid
 E_{s2} : Sensible energy stored in solid
 E_{s3} : Sensible energy stored in remained solid
 E_{tot} : Total energy stored
 E_{λ} : Energy absorbed at latent heat
 K : Thermal conductivity
 M_Q : Melted mass

* 인하대학교 대학원

** 정회원 ; 유한공업전문대학

*** 정회원 ; 인하대학교 공대

M_s	: Solid mass
M_{tot}	: Total mass of phase change material
R	: Radius of solid - liquid interface
R_o	: Radius of tube wall
T	: Temperature
T_b	: Bulk temperature of liquid or solid
T_i	: Initial temperature of solid phase
T_m	: Melting temperature
T_w	: Temperature of tube wall
V	: Melted volume
V_o	: Total volume of phase change material

GREEK SIMBOL

λ	: Latent heat of melting
ϕ	: Degree

SUBSCRIPT

i	: Initial
liq	: Liquid phase
sol	: Solid phase
w	: Wall of tube
max	: Maximum value

1. 서 론

에너지 자원이 빈약한 국내 여건 하에서는 기존에너지의 효율적인 활용과 태양열, 지열, 풍력, 조력 등과 같은 대체에너지 이용기술의 개발이 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 열에너지는 공급과 사용에 있어 시간적, 질적, 양적으로 불일치가 발생하며 이러한 에너지의 사용을 극대화 시키기 위하여 열에너지 저장기술의 연구가 시급한 형편이다.

열에너지를 저장하는 방법에는 단상물질을

축열매질로 하는 현열이용형 열에너지 저장방법과 상변화물질 (Phase Change Material; 약칭 P.C.M.)을 축열매질로 사용하는 잠열이용형 열에너지 저장방법이 있으며, 이중 잠열이용형 열에너지 저장방법이 단위부피 및 단위무게당 열에너지의 저장용량이 크기 때문에 현열이용형 열에너지 저장방법보다 부피나 무게를 크게 줄일수 있는 효율적인 방법으로 주목받고 있다.

수직용기 [2,3,4,10,11] 혹은 수평용기 [5,6,7,8,9]내에 충전된 상변화물질이 용융 또는 응고될때의 열전달특성에 관한 연구보고들은 실험적인 방법 [2,3,4,5,6,9,11]과 수치해석적인 방법 [5,6,7,8,9,10]으로서 열원 혹은 냉각원이 축열조 내부에 있는 경우 [7,8,10]와 외부에 있는 경우 [2,3,4,5,6,9,11]에 대하여 발표되고 있으나 아직도 실질적인 축열장치를 설계하기 위한 기초자료로 이용하기에는 미흡한 실정이다.

본 연구는 축열조에 대한 효율을 증대시키고 실질적인 축열장치에 적용할 수 있는 기초자료를 얻고자 원통형 수평용기 내에 채워진 상변화물질 [n-docosane paraffin]이 등온벽면의 의해 축열되는 용융열전달 현상을 실험적방법으로 해석한것으로 상변화물질의 초기온도와 용기벽면의 과열도가 각기 다른 경우에, 임의시간 경과 후의 상변화 물질내의 온도 분포 및상경계면의 형상, 용융에너지, 용융율 등을 비교 검토한 것이다.

2. 이론적 배경

축열과정 중 상변화물질에 축열되는 에너지를 산출할때 상변화물질의 초기온도를 용융온도와 같게 하였을 경우 (No-Subcooling)에는 상변화에 따른 잠열 Energy 와 용융된 상변화물질의 과열에 따른 현열 Energy 로 분류되고,

상변화물질의 초기온도를 용융온도 이하로 과냉하였을 경우 (Subcooling)에는 4가지 성분의 Energy, 즉 용융된 질량분에 대하여는 과냉온도부터 용융온도까지 상승될때의 현열, 상변화시의 잠열, 상변화온도 이상으로 과열될때의 현열과 미용융질량 (잔류고상 PCM)분에 대한 초기 과냉도로부터 잔류고상 평균온도까지의 현열로 나뉘어진다.

상변화물질의 초기온도를 용융점 온도와 같게 하였을 경우 (No-Subcooling)에는 용융된 상변화물질의 질량을 M_l , 잔류고상 상변화물질의 질량을 M_s 라 하면, 용기내 상변화물질의 전체 질량 M_{tot} 는 M_l 과 M_s 의 합이 된다. 이때 축열되는 잠열 Energy E_λ 는

$$E_\lambda = \lambda M_l \text{이고,}$$

용융된 상변화물질이 용융점온도 이상으로 과열될때 축열되는 현열 Energy E_{s1} 은

$$E_{s1} = M_l \int_{T_m}^{T_b} C_l dT \text{ 가 된다.}$$

여기서 C_l 는 액상상태의 평균비열, T_m 은 상변화물질의 용융온도, T_b 는 액상 상변화물질의 혼합평균온도 (Bulk temperature)이다.

만일 상변화물질이 전부 용융된다면 이때 축열되는 잠열 Energy $E_{\lambda max}$ 는 $E_{\lambda max} = \lambda M_{tot}$ 가 되며, 축열되는 총 Energy E_{tot} 는

$$E_{tot} = E_\lambda + E_{s1} \text{ 이 된다.}$$

그러나 상변화물질의 초기온도가 용융점온도보다 낮을 경우 (Subcooling)에는 용융된 상변화물질의 초기온도 T_i 에서 T_m 까지 온도가 상승할때 축열되는 현열 Energy E_{s2} 와 고상으로 남아있는 상변화물질의 혼합평균온도 T_b 까지 상승함으로써 축열되는 현열 Energy E_{s3} 가 추가 되는데, 이들은 다음과 같다.

$$E_{s2} = M_l \int_{T_i}^{T_m} C_s dT$$

$$E_{s3} = M_s \int_{T_i}^{T_b} C_s dT$$

따라서 축열되는 총 Energy E_{tot} 는

$$E_{tot} = E_\lambda + E_{s1} + E_{s2} + E_{s3}$$

가 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 상변화물질이 채워진 용기 (Test Section)의 상세도는 Fig. 2에 나타냈다.

실험장치의 주요부는 가열 및 냉각 항온조, P.C.M이 담긴용기 (Test Section), 온도조절장치, 순환 Pump, 온도측정 및 기록장치 등으로 이루어져있다.

Test Section내 상변화물질의 온도평형상태를 만들기 위하여 3KW 용량의 전기히터를 내장한 가열항온조 (용량 100 ℓ)에서 일정온도로 가열된 순환수를 Pump(한일 Pump PDB-86)를 통해 Test Section 주위로 일정시간 순환시킨다. 그리고 열의 방출을 막기 위하여 항온조와 Test Section, 연결 Pipe 및 연결 고무호스등에 유리섬유와 스티로폴을 사용하여 단열시켰다.

Test Section의 동관규격은 내경 63.5 mm, 길이 121 mm, 두께 2 mm이며 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Test Section내의 상변화물질을 등온으로 유지시키기 위하여 내경 79.38 mm의 동관을 외부에 설치하여 그 사이로 항온수가 순환되도록 하였고, 순환수의 입출구는 가열면을 등온조건으로 하기위하여 각 2개씩 설치하였다.

용융형상을 가시화 하기 위하여 Test Sec-

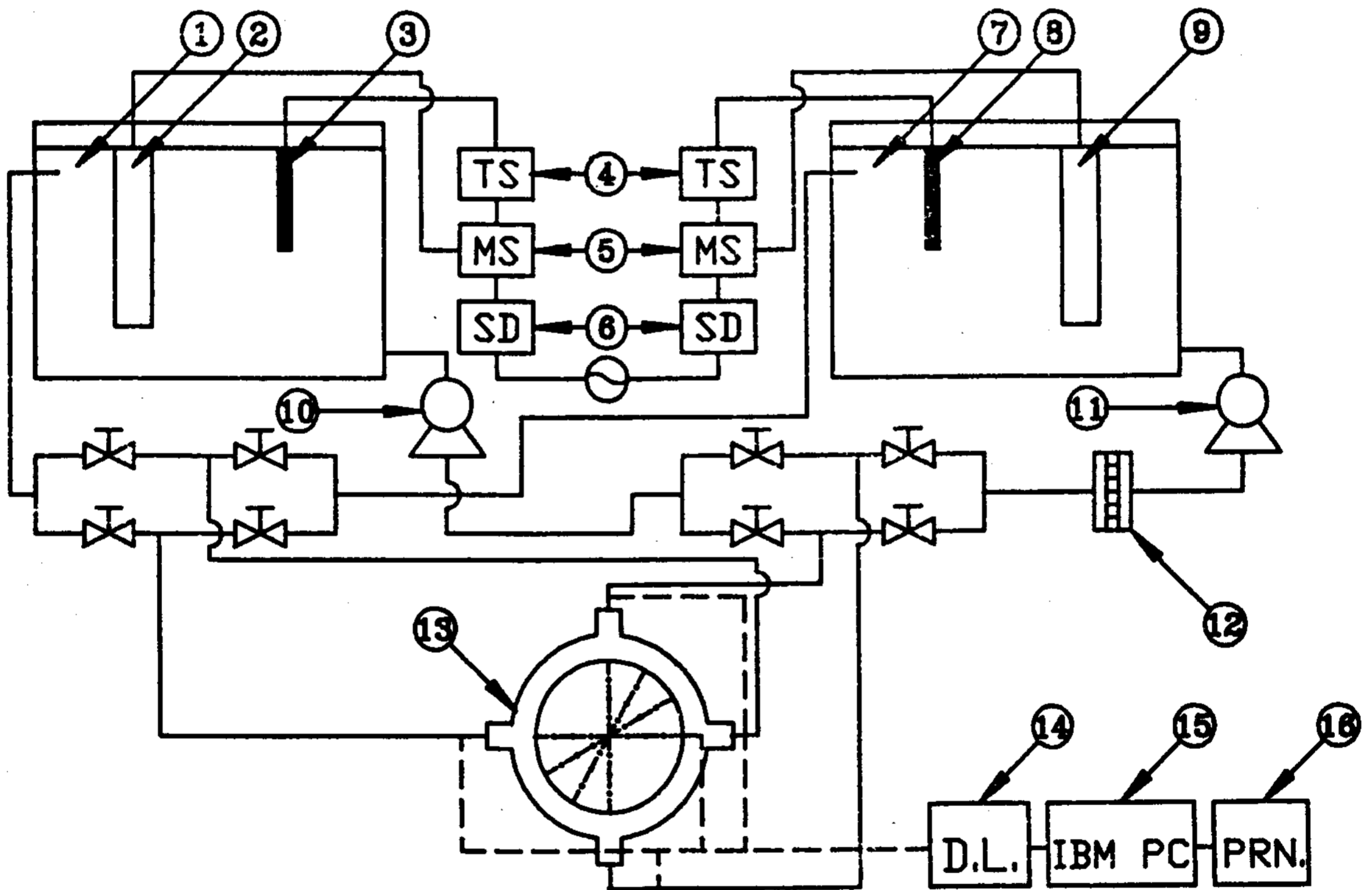
tion의 양측면에 두께 8 mm의 투명한 2중 Plexiglas disk를 부착하였고, 2개의 Plexiglas 사이에 공기층을 둠으로써 양측면을 통한 열의 방출을 최소화 하였다.

상변화물질은 상부의 overflow outlet tube를 통해 주입시키고, 하부의 drain valve를 통해 배출시키며, 또한 실험시 overflow outlet tube에는 용융된 Paraffin의 체적증가분이 채워진다.

축열실험 진행중 상변화물질 내부의 온도분포를 측정하기 위하여 열전대 (T-Type, 0.5 mm

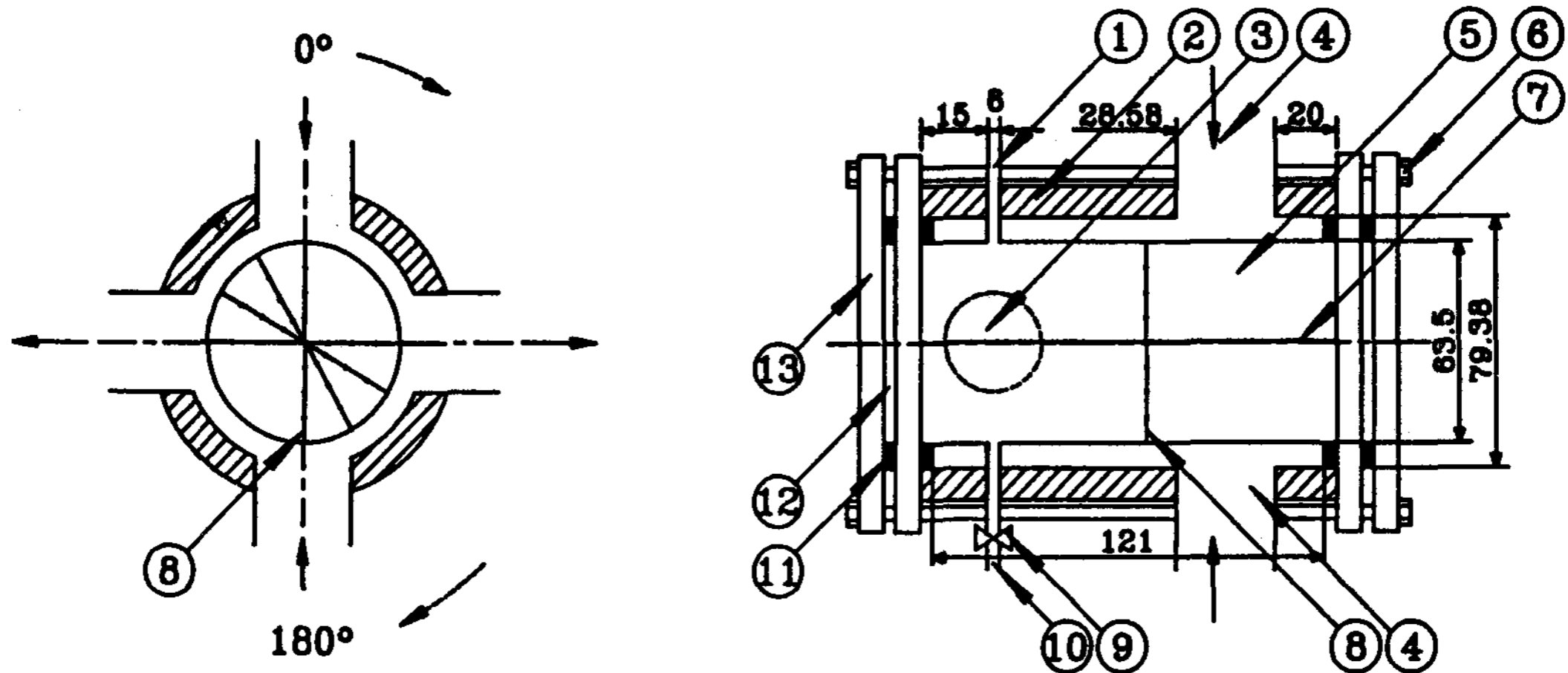
)를 설치하였으며, 열전대의 위치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Test Section내 원관 단면의 각 30° 지점에 3개씩 총 24개, 관 입출구에 2개, 가열 및 냉각향온조내에 2개, Test Section내 중심 수평지점에 2개등 총 30개의 열전대를 설치하였고, Test Section내의 열전대는 고정된 가는 대나무 막대에 순간접착제로 부착 고정시켰다.

이 열전대에서 측정된 온도는 Data-Logger (Fluke 2280 B)를 통해 RS-232 C Port가 장착된 IBM-PC(AT기종)에 수신되어 기록계



- | | | | |
|---------------------|---------------------|--------------|----------------|
| ① Heating Chamber | ⑤ Magnetic Switch | ⑨ Heater | ⑬ Test Section |
| ② Heater | ⑥ Solenoid | ⑩ Pump | ⑭ Data Logger |
| ③ Thermostat Sensor | ⑦ Cooling Chamber | ⑪ Pump | ⑮ IBM PC. |
| ④ Thermostat | ⑧ Thermostat Sensor | ⑫ Flow Meter | ⑯ Printer |

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus



- | | | |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| ① Overflow Outlet Tube | ⑥ Flanges | ⑪ Rubber Packing |
| ② Glass Wool | ⑦ Horizontal Pole | ⑫ Air Gap |
| ③ Water Outlet Tube | ⑧ Thermocouple Support Pole | ⑬ Plexiglas Window |
| ④ Water Inlet Tube | ⑨ Drain Cock | |
| ⑤ Phase Change Material | ⑩ Drain Tube | |

Fig. 2 Schematic diagram of test section

에 기록된다.

3.2 실험 방법

본 실험에서 사용한 상변화물질은 용융온도가 42.5°C 인 시약용 n-docosane paraffin (C₂₂H₄₆); (일본 Shiyo pure chemical 사 제품, 순도 99%)이며 용융잠열은 248.3 KJ/kg, 밀도는 액상에서 776 kg/m³ 이며 고상에서 788 kg/m³ 이고 열전도도는 0.1505 W/m °C 이다.

상변화물질의 초기온도 (T_i)가 42.5°C인 No-Subcooling 경우와 32.5°C인 Subcooling 경우에 벽면온도를 52.5°C, 62.5°C로 하여 용융실험을 행하였으며, 실험초기에 Test Section내 상변화물질의 초기온도를 열평형 상태로 유지시키기 위하여 약 8시간에서 16시간동안 등온수를 순환시켰다.

Test Section내의 상변화물질 온도와 초기

설정 온도와의 차가 0.05°C 이내일 때를 열평형 상태로 가정하여 실험을 시작하였다.

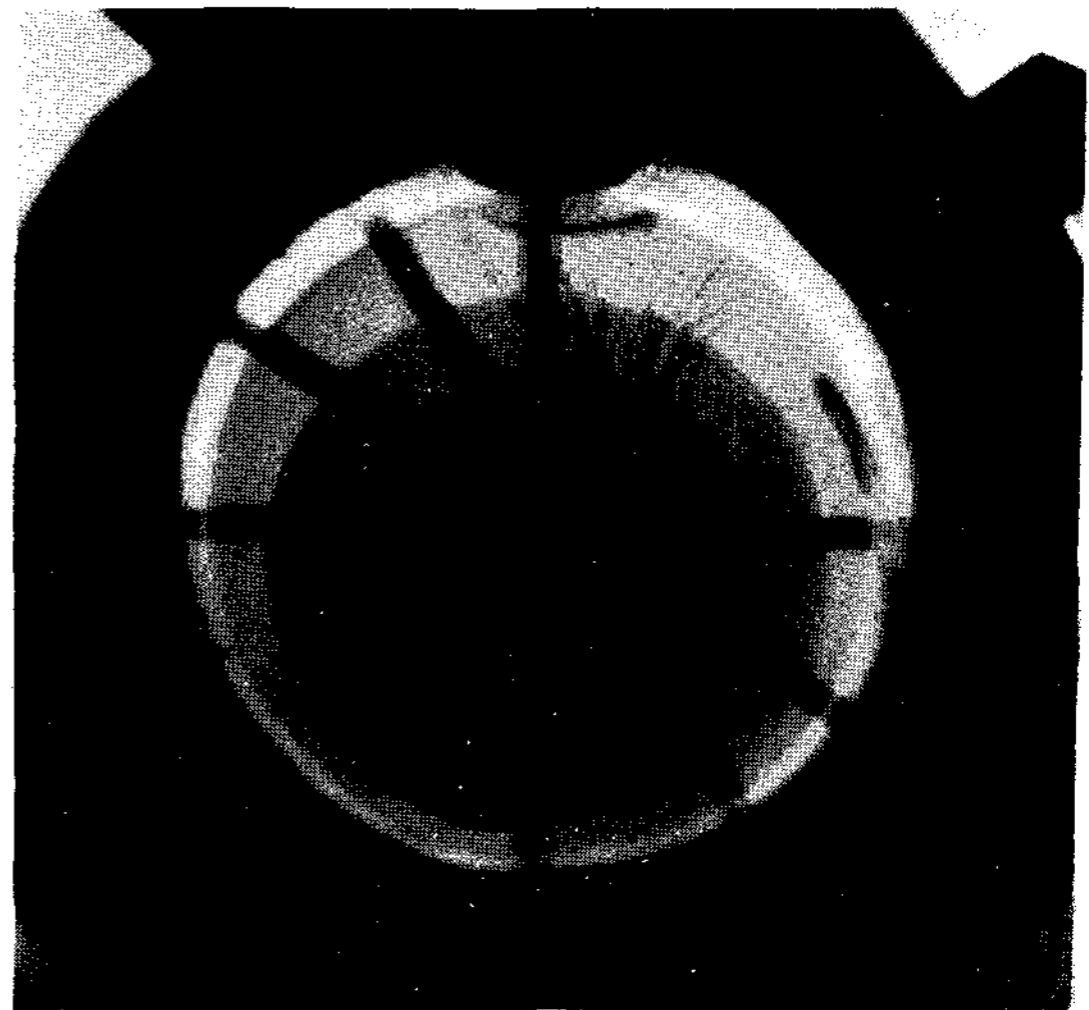


Photo 1. Photograph of melting front at time variation:
 T_i = 32.5°C, T_w = 62.5°C (5 Min, 15Min, 25Min)

용기내 상변화물질의 온도분포는 Data-Logger 를 통하여 1분 간격으로 측정하였고, 시간경과에 따른 상경계면의 형상과 용융량은 각 실험시간 step 마다 사진 촬영하여 측정하였다.

용융형상의 가시화로는 Test Section의 오른쪽에 광원을 두고, 왼쪽에서 35 mm Nikon FM2 Camera 로 Kodak Tri-X film(ASA 400)과 Ilford HP5DX film(ASA 400)에 촬영하는 방법을 사용하였으며, 그 한 예로 시간경과에 따른 상경계면의 형상을 다중촬영한 사진이 Photo. 1에 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 상변화물질이 채워진 원통형 수평용기 내에서의 용융 열전달현상을 실험적인 방법으로 해석하기 위하여, 상변화물질의 초기 과냉도 및 벽면 과열도가 각기 다를경우에 전도 및 자연대류의 영향으로 생성되는 고-액 상경계면의 형상과 원주방향의 온도분포 및 용융율, 용융에너지 등을 측정하였다.

4.1 온도 분포

No-Subcooling 조건과 Subcooling 조건에서 벽면과열도가 각기 다를 경우에 용기내부 중심 원점으로부터 각 반경방향 $R/R_0 = 0.75, 0.50, 0.25$ 인 지점에서의 시간경과에 따른 원주방향의 온도분포를 비교함으로써 용융열전달 현상을 규명하였다.

Fig. 3은 No-Subcooling 조건에서 벽면과열도가 10°C 일 경우에 각 원주방향의 온도분포를 나타낸 것이다. 용융초기에는 용기내부 각 원주방향의 온도분포가 거의 일정하나, 약 10분이 경과한 이후부터 $R/R_0 = 0.75$ 인 지점의 원주방향 온도차가 나타나기 시작하며 시간이 경과할수록 원주방향의 온도분포는 $\phi = 0^\circ (360^\circ)$ 에서 가장 높고, $\phi = 180^\circ$ 인 위치로 갈수록

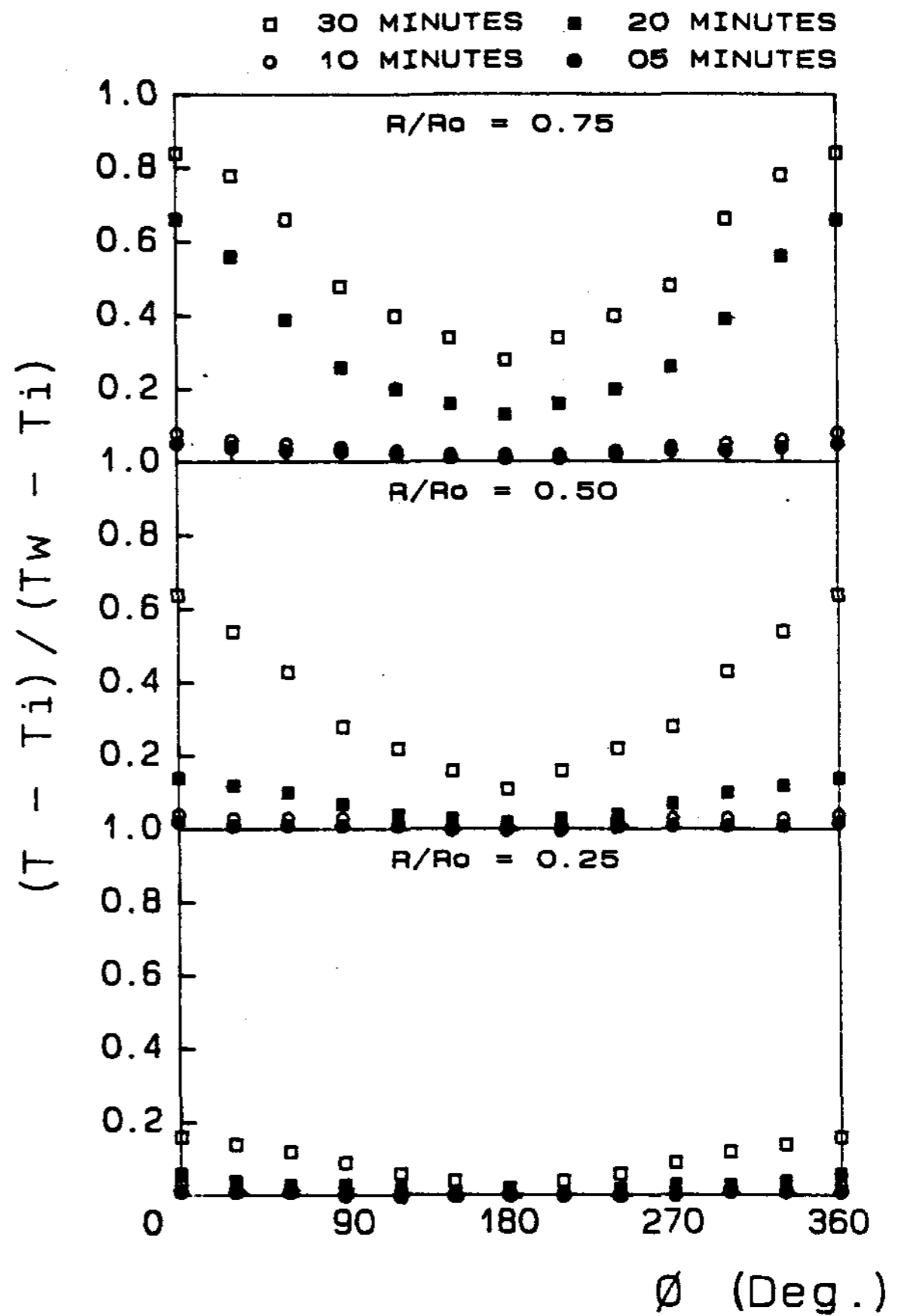


Fig. 3 Temperature profile at different R/R_0 : $T_m - T_i = 0^\circ\text{C}, T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$

낮아지게 된다.

위의 결과로 부터 초기 용융과정에서는 벽면을 통한 상변화 물질로의 열전달이 전도에 의한 것이 지배적이거나, 시간이 경과 할수록 자연대류에 의한 영향이 커지는 것을 유추할 수 있다.

Fig.4는 초기과냉도가 10°C 이고 벽면과열도가 20°C 인 Subcooling 조건에서의 각 원주방향의 온도분포를 나타낸 것으로 Fig.3에 서와 같이 초기에는 전도에 의한 열전달이 지배적이고, 시간경과에 따라 대류열전달이 점점 활발해짐을 알 수 있다.

그러나, Subcooling 조건이라 하더라도 Fig. 3보다 벽면과열도가 10°C 더 크기 때문에 원주방향의 온도분포가 Fig. 3에 비해 크게 나

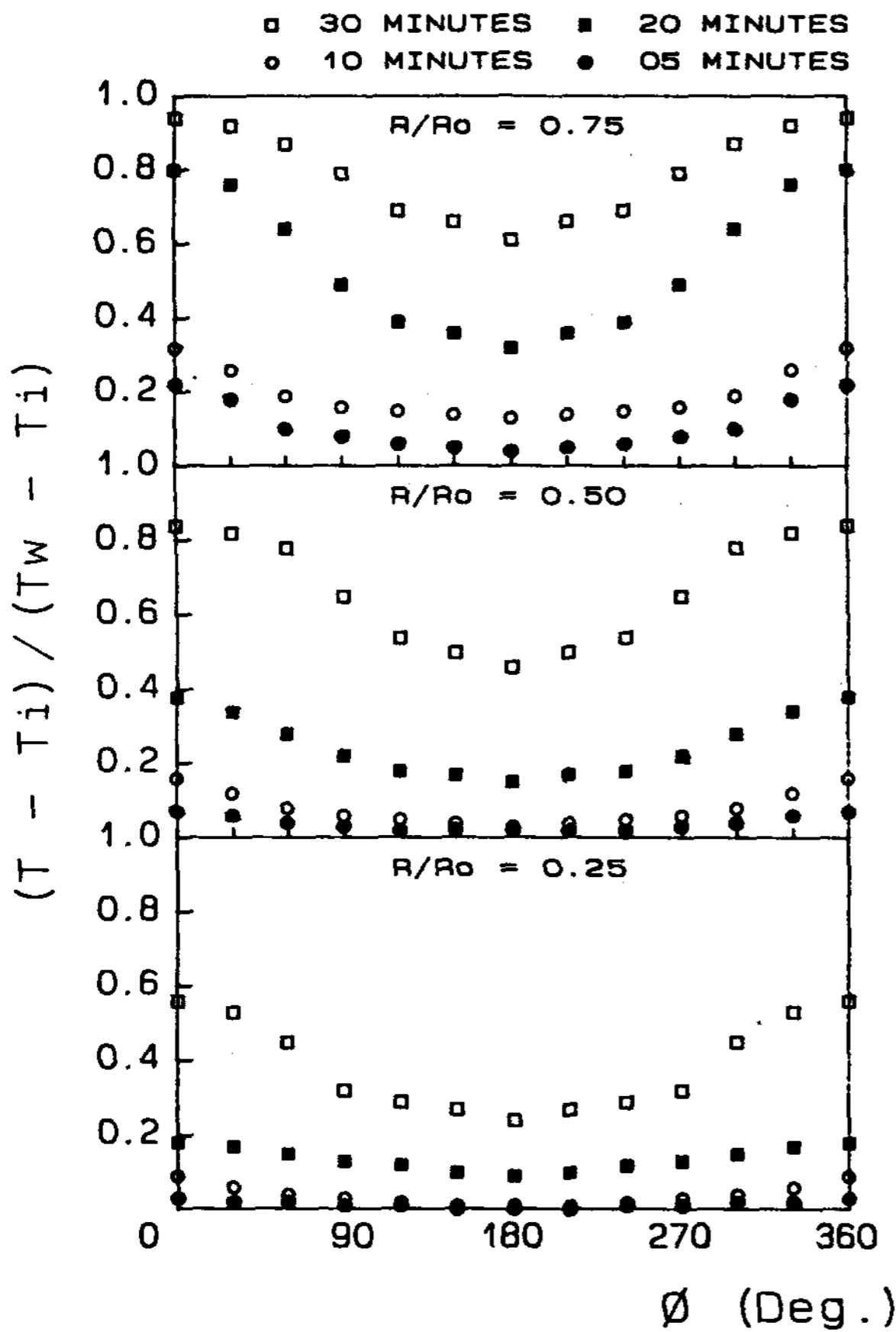


Fig. 4 Temperature profile at different R/Ro: $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$, $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$

타나고 있어 상변화물질의 용융과정중 벽면과 열도가 초기과냉도보다 열전달에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타난다.

4.2 상경계면의 형상

Fig.5~Fig. 8은 No-Subcooling과 Sub-cooling 조건에서 시간경과에 따른 상경계면 형상의 변화를 사진촬영한 후 이것을 다시 Cubic Spline Curve 를 이용하여 그림으로 나타낸 것으로 Fig. 5와 Fig. 6은 수평원관내 상변화물질이 원관중심 지지대에 고정되어 있는 경우이고, Fig. 7과 Fig. 8은 고정되어 있지 않은 경우이다.

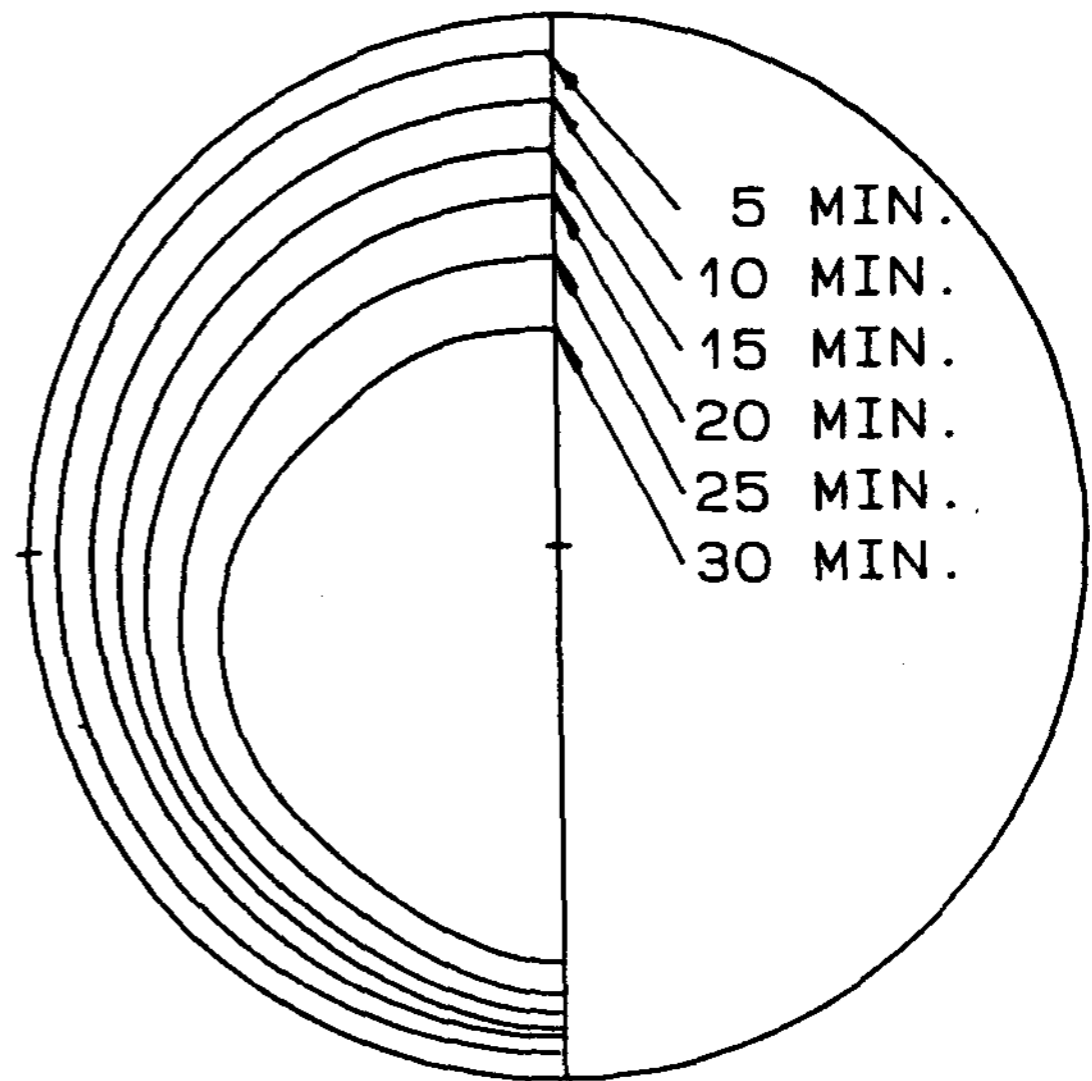


Fig. 5 Timewise motion of the melting front for $T_m - T_i = 0^\circ\text{C}$, $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$ (fixed P.C.M.)

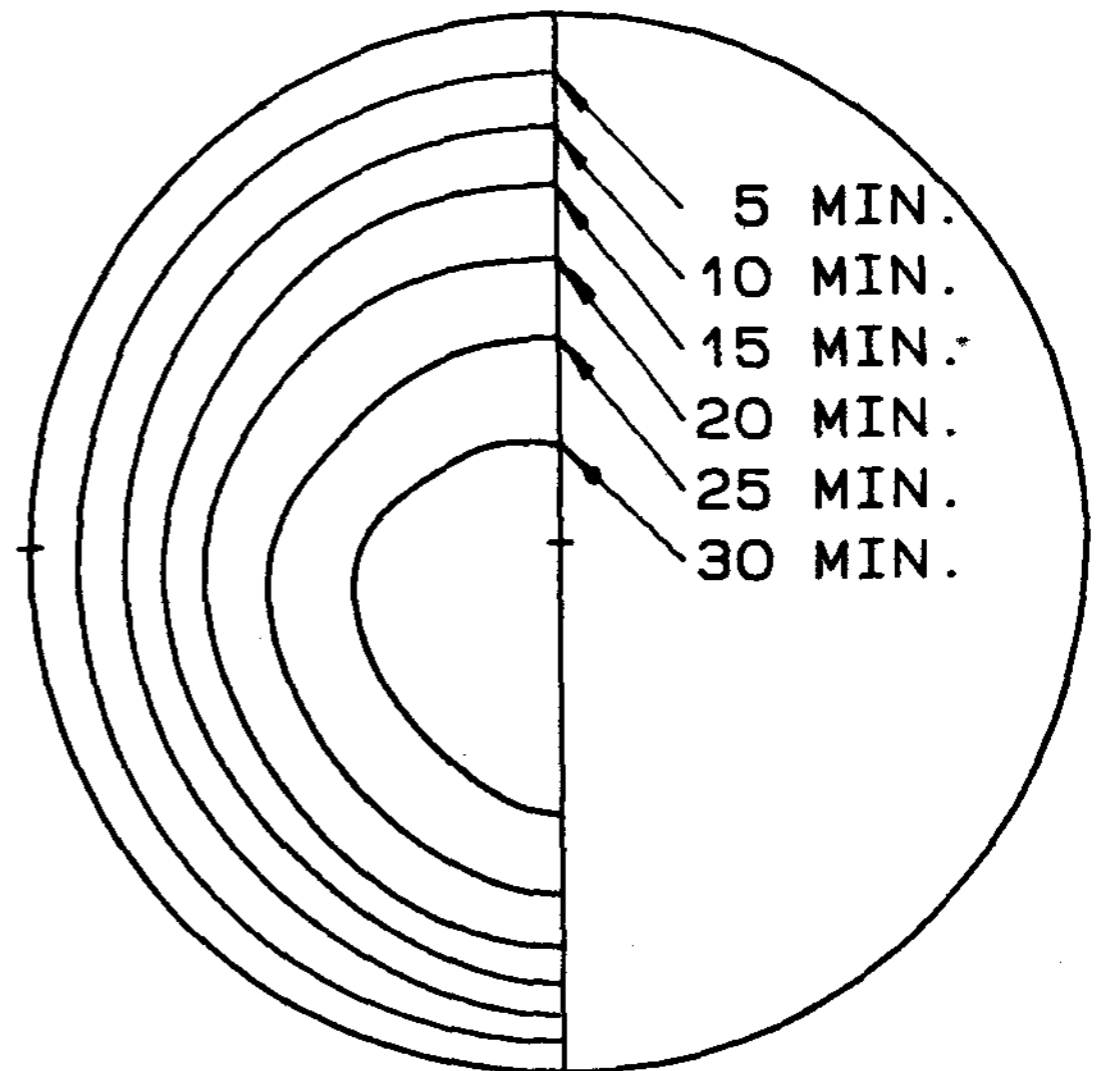


Fig. 6 Timewise motion of the melting front for $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$, $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$ (fixed P.C.M.)

Fig. 5에서는 가열초기인 5분 후에 전도에 의한 열전달이 지배적으로 되어 상경계면이 거의 원형상태이나, 10분이 경과된 후 부터 대류열전달의 영향으로 인한 상경계면 형상의 변

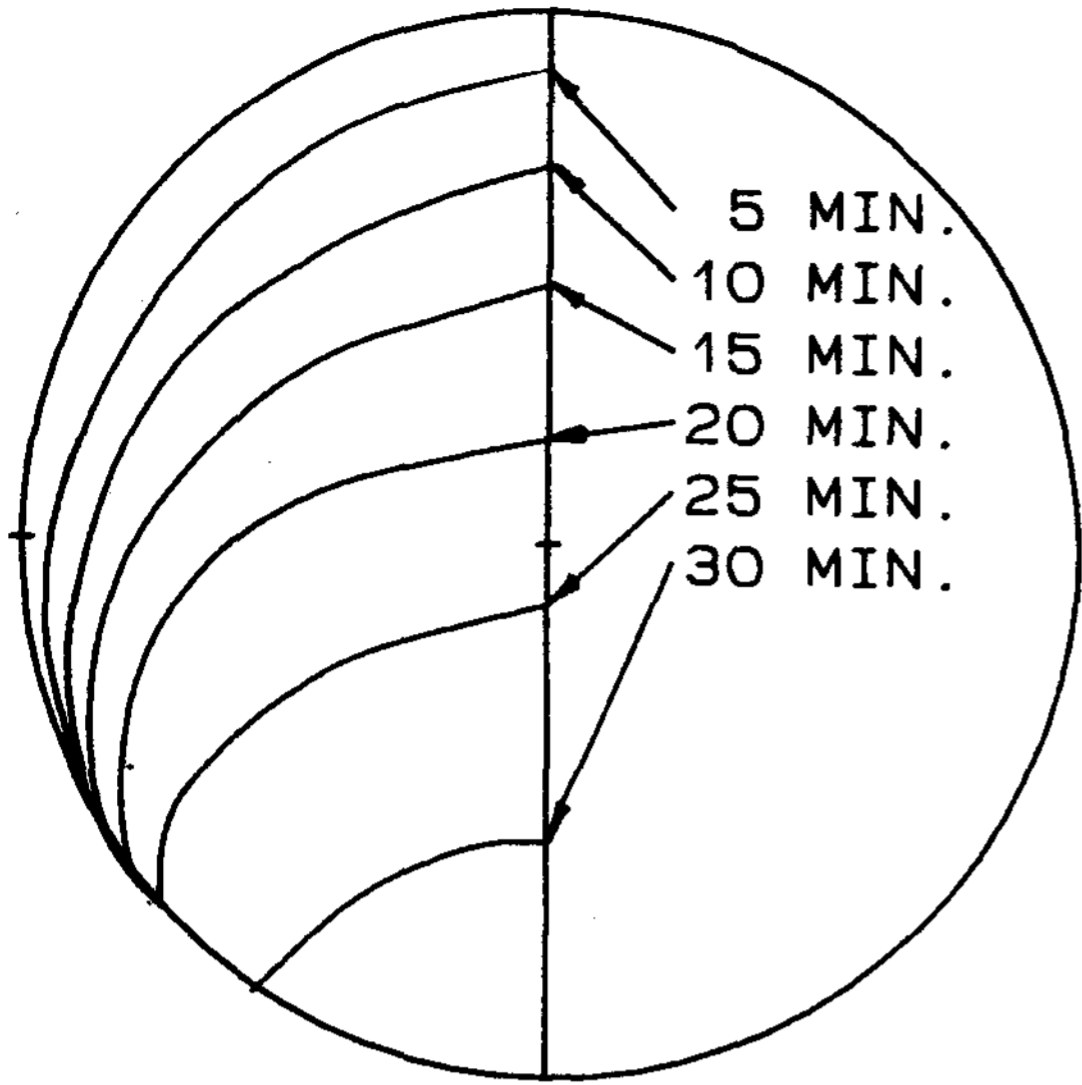


Fig. 7 Timewise motion of the melting front for $T_m - T_i = 0^\circ\text{C}$, $T_w - T_m = 10^\circ\text{C}$ (non-fixed P.C.M.)

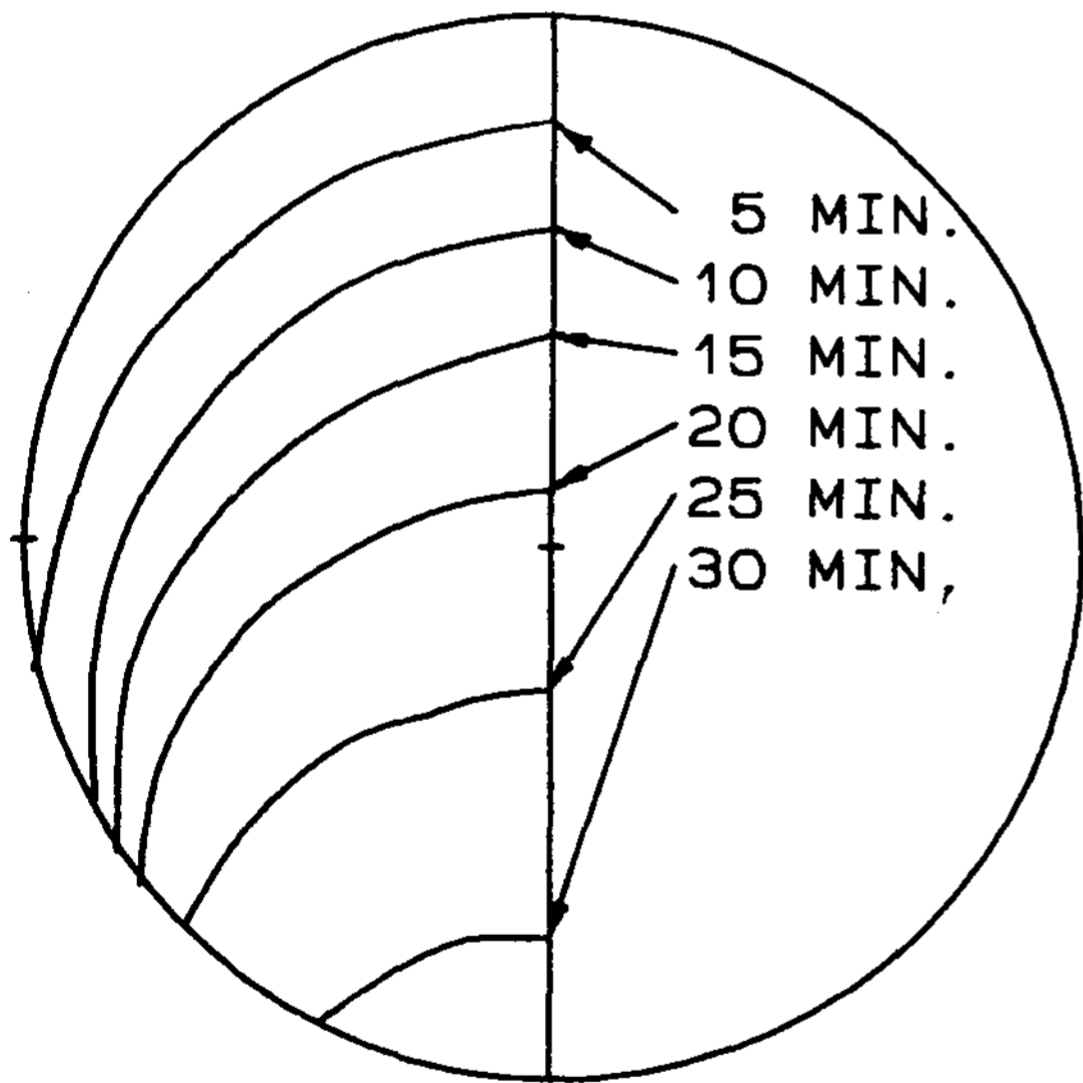


Fig. 8 Timewise motion of the melting front for $T_m - T_i = 10^\circ\text{C}$, $T_w - T_m = 20^\circ\text{C}$ (non-fixed P.C.M.)

화가 생기기 시작하였다. 즉 상경계면의 전진이 $\phi = 0^\circ$ 위치에서 가장 빠르고, $\phi = 180^\circ$ 위치로 갈수록 점점 느려진다.

Fig. 6은 초기과냉도가 10°C , 벽면과열도가

20°C 인 조건에서의 상경계면 형상변화를 나타낸 것으로 용융개시 5분부터 미소한 대류열전달 현상이 일어나 $\phi = 0^\circ$ 위치에서 상경계면의 전진이 $\phi = 180^\circ$ 위치에서보다 빠르게 진행되고 있음을 보여주고 있으며, 시간이 경과할수록 자연대류열전달의 영향이 크게 나타난다.

Fig. 7은 Fig. 5와 같은 온도조건에서 수평용기 내에 충전되어 있는 상변화물질이 고정되어 있지않은 경우에 시간경과에 따른 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. 8도 Fig. 7과 같은 유사한 형태의 열전달 현상이 일어나, 벽면과열도가 Fig. 7보다 크기 때문에 상경계면의 전진속도가 빠르게 나타난다.

이러한 결과들을 비교해 보았을때 상변화물질의 용융과정중 초기과냉도보다 벽면과열도가 상경계면의 전진속도에 더 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

4.3 용융에너지

Fig. 9와 Fig.10은 No-Subcooling 과 Subcooling 조건시 시간경과에 따른 전 에너지에 대한 각 에너지 성분의 비를 나타낸 것이다. 여기서 $E_{\lambda_{\max}}$ 는 상변화 물질이 전부 용융될때 축열되는 잠열에너지이며, E_{λ} 는 용융과정에서 축열되는 잠열에너지, E_{s1} 는 용융된 상변화물질이 용융온도 이상으로 과열될때 축열되는 현열에너지, E_{s2} 는 용융된 상변화물질이 초기온도 T_i 에서 용융온도 T_m 까지 상승할 때 축열되는 현열에너지, E_{s3} 는 고상으로 남아 있는 상변화물질이 초기온도 T_i 에서 고상의 혼

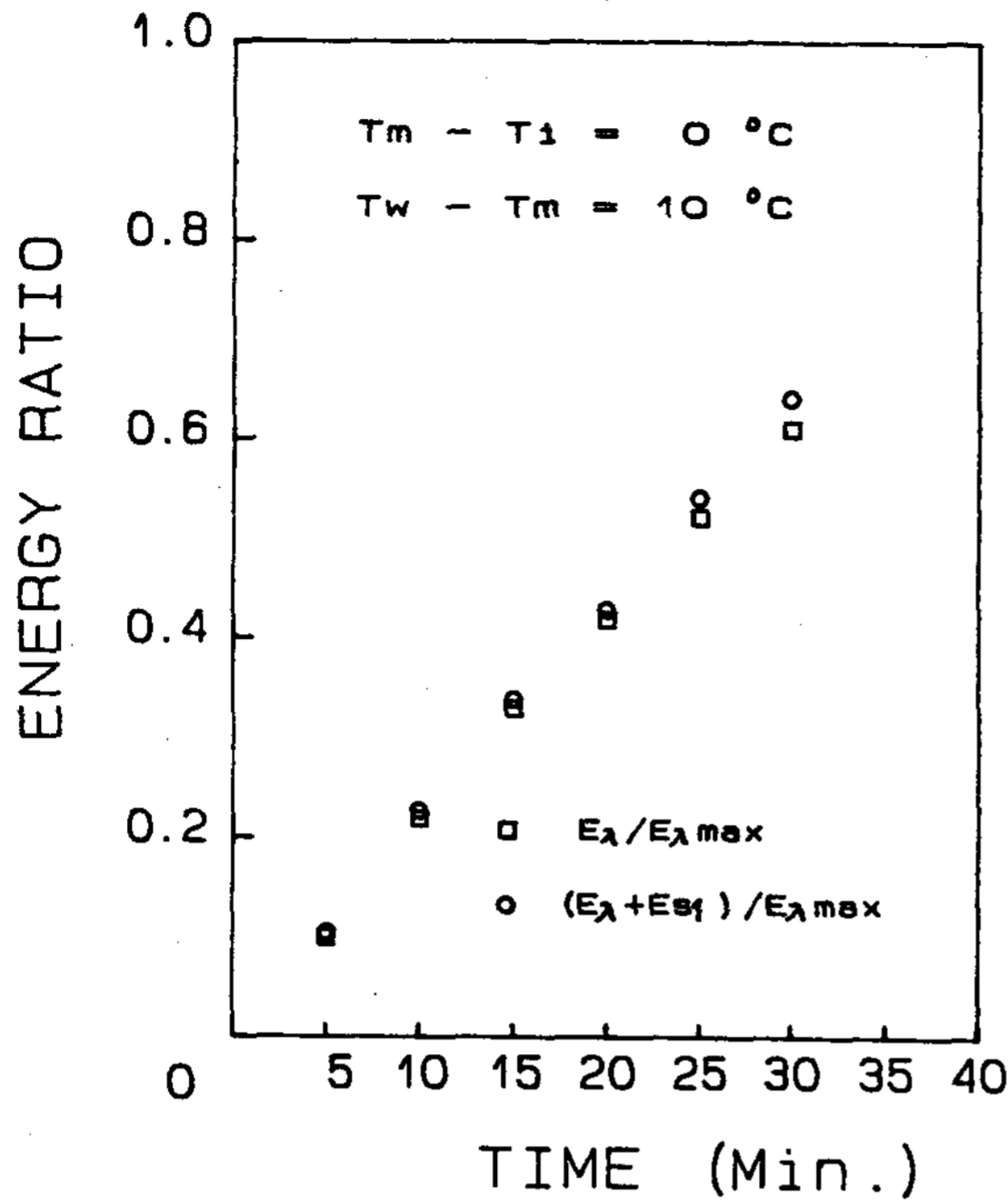


Fig. 9 Components stored energies for $T_m - T_i = 0^{\circ}\text{C}$, $T_w - T_m = 10^{\circ}\text{C}$

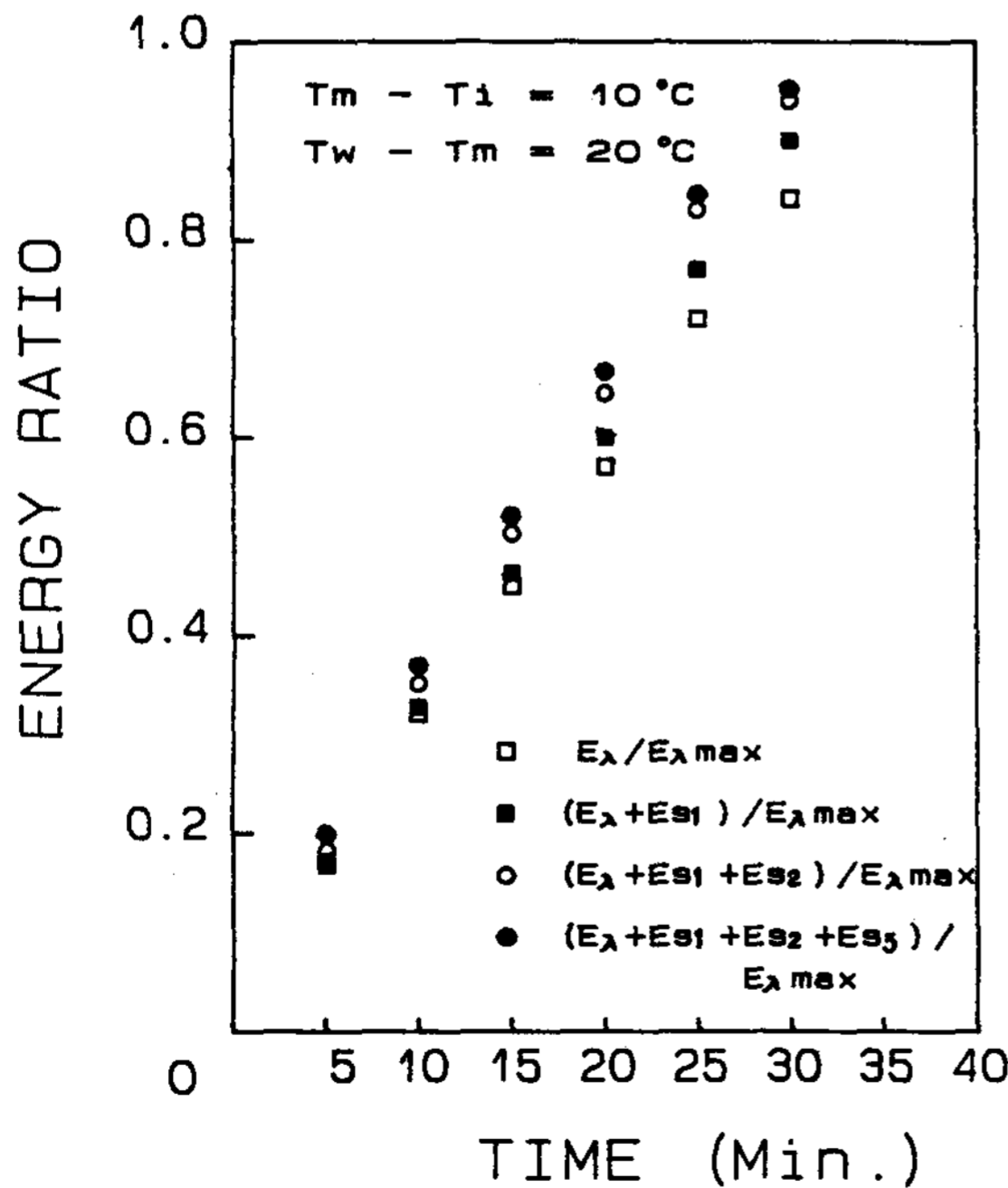


Fig. 10 Components stored energies for $T_m - T_i = 10^{\circ}\text{C}$, $T_w - T_m = 20^{\circ}\text{C}$

합평균온도 T_b 까지 상승할때 축열되는 현열에너지를 나타낸다.

Fig. 9는 벽면과열도가 10°C 인 No-Subcooling 조건에서 시간경과에 따른 각 에너지비의 변화를 나타낸것으로, 용융된 상변화 물질에 축열되는 현열에너지 E_{s1} 는 상변화에 의해 축열되는 잠열에너지 E_{λ} 에 비해 매우 작은것을 알 수 있고, 용융이 진행될수록 축열되는전 에너지의 증가율이 감소함을 알 수 있다.

Fig.10은 초기과냉도가 10° 이고, 벽면과열도가 20°C 인 Subcooling 조건에서 각 에너지 성분의 비를 나타낸것으로, 용융시간이 길어질수록 용융된 상변화물질에 축열되는 현열에너지 E_{s1} 과 상변화물질의 초기온도에서 용융온도까지 축열되는 E_{s2} 는 증가되고, 잔여고상 상변화물질에 축열되는 현열에너지 E_{s3} 는 감소하게 된다.

4.4 용융율

Fig.11은 No-Subcooling 조건과 초기과냉도가 10°C 인 Subcooling 조건에서 벽면과열도가 10°C , 20°C 일 경우에 구하여진 용융체적을 나타낸 것이며, 상변화물질의 초기과냉도와 벽면과열도가 용융율에 미치는 영향을 고찰하

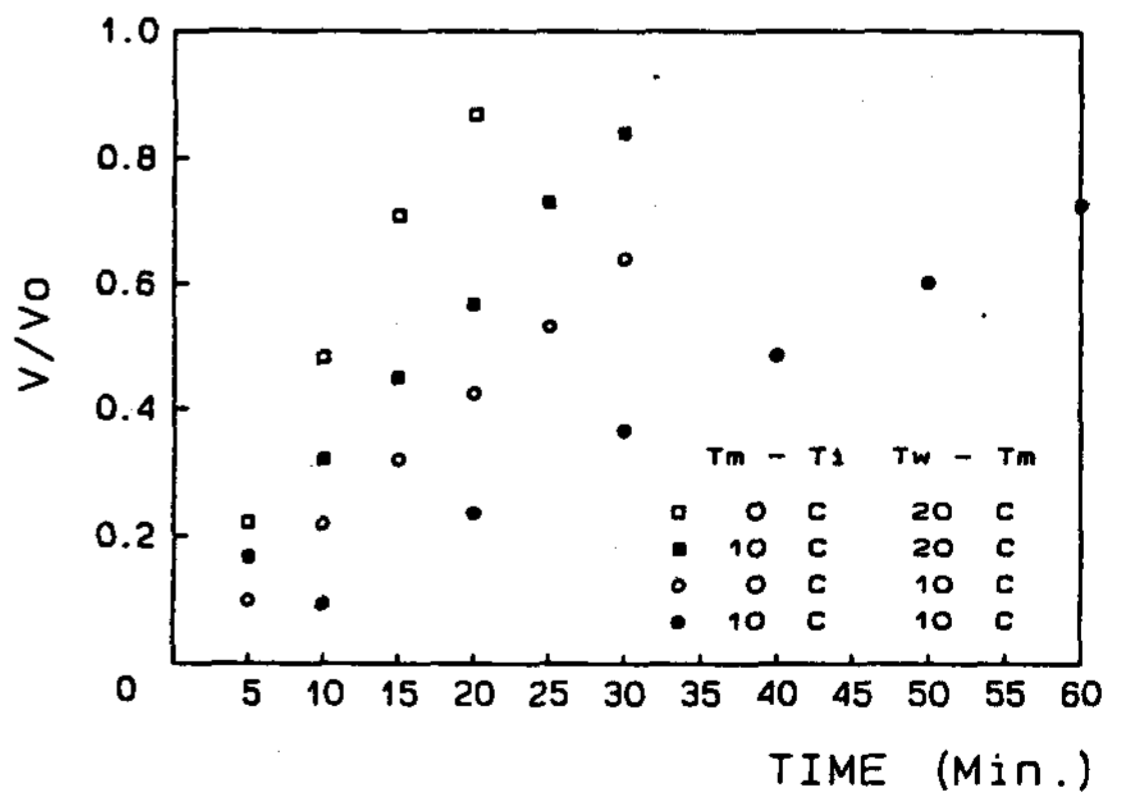


Fig. 11 Timewise variation of molten volume fraction for each condition

기 위하여 무차원 용융율 (V/V_0)을 시간의 함수로써 나타낸 것이다.

용융율은 초기과냉도가 적고 벽면과열도가 클수록 크게 나타나고 있다. 또한, 초기과냉도가 10°C 이고 벽면과열도는 20°C 인 경우가 초기과냉도가 없고 벽면과열도가 10°C 인 경우보다 용융율이 초기시간(약 5분)부터 커지기 시작하여 시간이 경과할수록 증가하고 있음이 나타난다. 이로부터 상변화물질의 용융과정중 벽면과열도가 초기과냉도보다 용융율에 미치는 영향이 큰것을 알 수 있다.

5. 결 론

수평 원통형 축열조 내에 채워진 상변화물질 [n-docosane paraffin ($\text{C}_{22}\text{H}_{46}$)]의 용융과정을 온도가 일정한 외벽을 열원으로 하는 경우에 No-Subcooling 과 Subcooling조건에서 내향 용융실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상변화물질의 용융 초기에는 전도에 의한 열전달 현상이 지배적으로 작용하여 거의 원형의 고-액상 경계면이 나타난다.
2. 용융이 시작된 후부터 시간이 경과함에 따라 액상영역에서 상경계면으로의 열전달은 용기 하부위치보다 상부위치에서 잘 이루어진다.
3. 용융율은 초기과냉도가 적고, 벽면과열도가 클수록 크며, 축열과정 중 벽면과열도가 초기과냉도보다 열전달에 더 큰 영향을 미친다.
4. 용융율은 전도에 의한 열전달현상이 지배적으로 나타나는 초기과정 동안은 직선적으로 증가하나, 시간이 경과함에 따라 자연대류 열전달의 영향으로 그 증가폭이 감소하는 경향을 보인다.
5. 상변화물질의 축열과정중 잠열에너지가 총에너지의 대부분을 차지하고 있지만, 초기과냉도가 10°C 이고, 벽면과열도를 20°C 로 하였

을 경우에는 현열에너지가 총에너지 중의 상당부분(약 15~25%)을 차지하는 것으로 나타났다.

부 기

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

REFERENCES

1. A. Abhat, "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage : Heat Storage Materials", Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332, 1983
2. C. Gau & R. Viskanta, "Melting and Solidification of a pure Metal on a Vertical Wall", ASME, Vol. 108, pp.174-181, 1986
3. 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
4. C.J. Ho & R. Viscanta, "Heat transfer during melting from an isothermal vertical wall", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 12-19, 1984
5. C. J. Ho & R. Viscanta, "Heat Transfer during Inward Melting in a Horizontal Tube", Int. J. Heat & Mass Transfer, Vol. 27, No.5, pp. 705-716, 1984
6. M. Bareiss & H. Beer, "An Analytic Solution of the Heat Transfer Process during Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material inside a Horizontal tube", Int. J.

- Heat & Mass Transfer, Vol.27, No.5, 739-746, 1984
7. J. Prusa & L.S. Yao, "Melting Around a Horizontal Heated Cylinder: Part 1 - Perturbation and Numerical Solutions for Constant Heat Flux boundary Condition", ASME, Vol.106, pp.376-383, 1984
 8. C.J. Ho & K.C. Lin, "Outward Melting in a Cylindrical Annulus", ASME, Vol.108, 240-245, 1986
 9. H. Rieger, H. Beer, "The Melting Process of Ice Inside a Horizontal Cylinder: Effects of Density Anomaly", ASME, Vol.108, 166-173, 1986
 10. 임장순, 김준근, "상변화물질의 용융과정에 있어서 좌표변환을 이용한 온도분포의 해석적 연구", 한국태양에너지 학회지 통권 8(2) pp.77-83 (1985.11)
 11. 임장순, 손화승, 황태인, 이채문, 최국광, "상변화물질을 사용한 축열조에서의 열전달", 한국태양에너지 학회지 9(1) pp.53-61(1989.4)