

정사각형 단면을 갖는 용기에서  
단면의 크기 변화가 용해 열전달에 미치는 영향  
Effect of the Height Change on the Melting Heat Transfer  
in a Rectangular Enclosure

한진호\*, 노승탁\*\*  
Jin Ho Han, Sung Tack Ro

**ABSTRACT**

A rectangular test section is devised by assuming two dimensional melting of a solid phase change material heated from two sides which are maintained at constant temperature and allowing a free expansion due to density difference between solid and liquid.

The timewise melting shape is recorded photographically by the shadow graph method for several experimental conditions. The analysis shows that the melting process consists of four regimes. At first, the pure conduction heat transfer is dominant, and as time goes by natural convection grows and plays a role greatly.

Experiments are carried out varying not only the wall temperature but height of the wall. Each effect of them on the melting process is obtained in the form of combination of dimensionless parameters,  $Ste^{0.8} FoRa^{0.2}$ . An algebraic correlation is suggested, which predicts the melted fraction well.

기 호 설 명

〈영문자〉

$A$  : 가열 벽면의 면적

$C_p$  : 정압 비열

$f$  : 함수

$Fo$  : Fourier 수,  $Fo = \frac{\alpha t}{H^2}$

$g$  : 중력 가속도

$H$  : 상변화물질의 초기 고상 높이

$h$  : 열전달 계수

$k$  : 열전도율

$L$  : 직사각형 용기의 길이

$L_H$  : 변화 물질의 잠열

$M_0$  : 상변화 물질의 초기 질량

$M$  : 액체 상태 상변화 물질의 질량

$m^*$  : 용해 질량비  $m^* = \frac{M}{M_0}$

$Nu$  : Nusselt 수,  $Nu = \frac{hH}{k}$

$\bar{Nu}$  : 평균 Nusselt

\* 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

Pr : Prandtl 수,  $Pr = \frac{\nu_1}{\alpha_1}$

Ra : Rayleigh 수,  $Ra_H = \frac{g\beta H^3(T_w - T_m)}{\alpha_1 \nu_1}$

Ste : Stefan 수,  $Ste = \frac{C_{p,1}(T_w - T_m)}{L_f}$

$T$  : 온도

$\bar{T}$  : 액상의 평균 온도

<회답문자>

$\alpha$  : 액체의 열확산 계수

$\beta$  : 액체의 열팽창 계수

$\nu$  : 동점성 계수

$\rho$  : 밀도

<하첨자>

l : 액체 상태

m : 용해 상태

w : 벽면

## 1. 서 론

에너지의 효율적 이용 방안으로 태양열, 폐열, 야간전력을 이용한 잠열 형태의 축열이 관심 대상이 되면서, 열에너지를 저장하기 위한 열저장시스템의 설계에 필요한 값들을 얻기 위한 상변화 문제에 대하여 실험과 계산이 많이 행해지고 있다.

상변화 문제는 상경계면이 이동하는 비정상 비선형 열전달 문제이기 때문에 극히 제한된 경우에만 해석적인 해가 존재하고 이 때문에 수치 계산과 실험에 의해 연구가 수행되고 있다.

축열시스템을 간략화한 모델로서 직사각형 용기내의 상변화 열전달 과정에 관한 연구도 활발하여 수직 한쪽 벽면이 가열되는 직사각형 용기내의 용해 과정을 사진 촬영을 통해 해석하기도 하였으며,<sup>1)</sup> 상변화 물질로 채워진 직사각형 용기의 한쪽 벽면이 등온으로 유지될 때 수직벽으로의 열전달을 수치적으로 모사하고 열전달특성을 상변화 과정을 지배하는 무차원수로 상관관계식을 구하는 시도가 이루어졌으며 이것이 실험을 통해 검증되기도 했다.<sup>2)</sup> 최근에는 자연대류 뿐만 아니라 고상 액상간

의 밀도차를 고려한 직사각형 용기내 상변화 과정을 좌표변환을 이용하여 수치해석으로 해석하기도 하였다.<sup>3)</sup> 실험을 통하여 벽면의 온도를 변화시키면서 용해현상을 관찰하고 열전달계수를 측정하였다.<sup>4)</sup> 그런데, Ra 수는 온도차 뿐만 아니라 벽면의 높이에 의해서도 변하므로 본 연구에서는 상변화과정을 지배하는 인자들 중 Ra 수를 온도차와 형상을 변화시켜가며 그 변화가 용해 과정에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 직사각형용기를 실험공간으로 하고 상변화 물질로는 파라핀을 택하여 양 벽면을 등온으로 유지하면서 용해과정을 크기가 각각 다른 경우에 대해 서로 비교하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험 장치

실험장치는 Fig.1과 같이 균일한 좌, 우 벽면온도를 얻기 위하여 열전도성이 좋은 1cm 두께의 구리판을 사용하였으며, 상·하편을 단열하기 위하여 열전도성이 낮은 스티로폼의 단열재를 사용하였고, 용해 현상을 관찰하기 위해 앞, 뒷면에 유리판을 사용하여 각각 구성하였다. 내부에는 상변화 물질이 들어 있으며 상변화시 부피팽창 고려하여 상부에 공기층을 두었으며, 이 공기층은 단열의 역할을 겸할 수 있다. 실험에 의하여 측정되는 용해물질의 2차원 형상을 개략적으로 Fig.2에 나타내었다.

4가지 크기의 실험공간에 대해 실험하였으며 단면의 가로변 길이와 세로변 길이비를 1:2 정도로 하였다. 상변화 물질이 접촉하는 구리판은 매끄럽게 하고 중심부에 작은 구멍을 뚫어 동-콘스탄탄열전대를 부착하였으며, 부착된 열전대는 디지털 온도계와 온도 조절장치에 연결되어 벽면의 온도를 나타내고 등온유지에 사용되었다. 구리판의 외부표면에는 종이를 절연재로 부착시키고 그 위에 니크롬선을 1cm 간격으로 고르게 배치하고 그 위에 석면 테이프에 붙여 고정하였으며, 구리판 외부표면의 단열효과를 얻었다.

실험공간의 앞, 뒷면에는 유리를 부착하여 상변화면의 관찰을 용이하게 하였다. 실험에

사용한 상변화 물질의 융점온도가 대기보다 25 °C 정도 높으므로 열이 공급되지 않는 유리벽면으로의 열손실로 벽면에서의 용해가 지연되어 용해형상을 2차원으로 만드는데 가장 큰 장애 요인이 된다. 이 문제를 해결하기 위해 실험공간 주위에 투명 아크릴 상자를 만들고 30W 전구 4개를 사용한 공기가열기를 설치하고 적당한 전압을 가하여 상자내의 온도를 일정하게 유지하여 실험에 미치는 3차원 효과를 최소화 하였다. 용해 형상은 헬륨-네온 레이저와 오목거울을 사용하여 평행광을 만들어 관찰하였다. 좌, 우 벽면의 온도 조절을 위해 4개의 온도 조절기를 이용해서 2개는 실험시의 벽면온도를 유지하도록 하고 2개는 초기 상변화 물질의 온도를 융점온도로 유지하는데

사용하였다. 벽면에 부착된 열전대를 온도 조절기에 연결하여 필요한 신호를 공급하고 각 온도 조절기에는 2개의 변압기를 이용하여 100 V 교류전원을 초기와 실험시 필요한 만큼 낮추어진 전압이 공급되도록 한다.

2.2 실험방법

상변화 물질을 주사기로 실험공간내에 주입하고 공기 가열기를 이용해 벽면의 온도가 융점온도보다 5 °C 정도 낮게 유지해서 응고를 시킨다. 융점 온도보다 지나치게 낮은 경우 응고시 밀도차에 따른 부피변화로 내부에 공동이 생길 수 있다. 응고 과정이 진행되는 동안 상변화 물질이 부피가 줄어들어 표면이 평평하지 않고 가운데가 오목하게 패이게 된다. 이 부분에 다시 상변화물질을 주입하고 또 벽면의 온도를 융점온도 이상으로 하여 10%가량 녹인후 다시 응고시킨다. 이 방법을 반복하여 상부면을 평평하게 만든다. 이 상태에서 벽면온도를 융점온도까지 상승시키고 응고 시간에 상당하는 시간만큼 유지시켜 상변화 물질이 융점온도에 이르도록 하고 이 때를 실험의 초기 상태로 간주하였다.

이 상태에서 벽면온도를 급격히 상승시켜 실험온도를 급격히 상승시켜 실험온도에 도달시킨다. 본 실험조건은 시간이 양(+)인 순간부

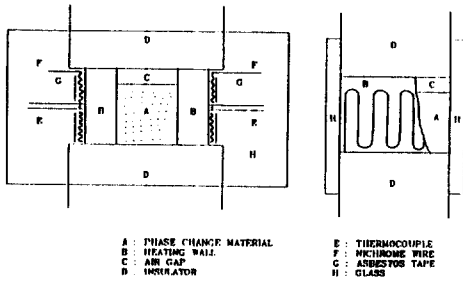


Fig.1 Schematic diagram of the experimental model

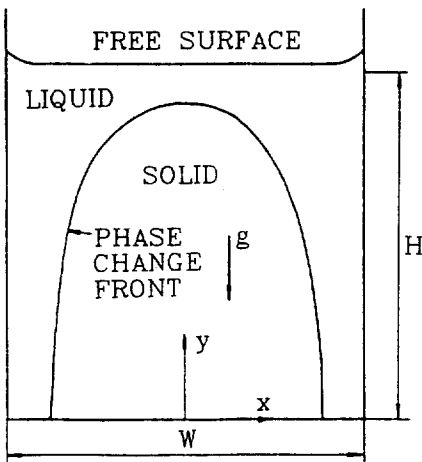


Fig.2 Coordinate system of the rectangular enclosure

Table 1. Experimental Condition

	Wall Temp (°C)	Height (cm)	Ste No.	Ra No.
case 1	52.5	2	0.0466	1.54 × 10 <sup>6</sup>
case 2	56.7	2	0.1000	3.24 × 10 <sup>6</sup>
case 3	59.7	2	0.1452	4.71 × 10 <sup>6</sup>
case 4	52.5	4	0.0466	1.21 × 10 <sup>6</sup>
case 5	56.7	4	0.1014	2.70 × 10 <sup>6</sup>
case 6	59.7	4	0.1452	3.77 × 10 <sup>6</sup>
case 7	52.5	5	0.0466	2.36 × 10 <sup>6</sup>
case 8	56.7	5	0.1014	5.28 × 10 <sup>6</sup>
case 9	57.9	5	0.1452	7.36 × 10 <sup>6</sup>
case 10	52.5	10	0.0466	1.89 × 10 <sup>7</sup>
case 11	56.7	10	0.1014	4.20 × 10 <sup>7</sup>
case 12	59.7	10	0.1452	5.90 × 10 <sup>7</sup>

더 벽면온도가 유지되는 것이나 큰 전압을 공급하여 급격히 온도를 상승시켜도 시간의 지연은 불가피한 것이나 실험 시간이 짧은 경우에는 그 영향이 무시될 수 있다.

실험이 시작되면 용해가 일어나게 되고 적당한 시간 간격으로 음영 사진을 촬영한다. 실험이 끝나면 벽면온도를 바꾸거나 다른 형상의 용기에 파라핀을 주입하여 위와 같은 실험을 반복한다. 실험조건은 Table 1에 제시한 것과 같이 12가지로 변화시켰다. 사진으로부터 용해형상면을 따라 오려서 상변화 물질과 고체 부분의 인화지 무게를 재어 용해 질량비를 측정하였다.

2.3 상변화 물질

본 연구에서는 상변화 물질로 파라핀은  $C_n H_{n+2}$ 의 구조를 가지며 따라서 순수물질이라기 보다는 혼합물이라 하는 것이 타당하나 전체적으로는 균일한 물성치를 가진다. 본 연구에서 사용한 파라핀은 Shinyo Pure Chemical Co.에서 제조된 것으로 용점과 잠열은 DSC (Differential Scanning Calorimeter)로 측정하였으며 이를 포함한 열역학적 물성치를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 두 가지 peak의 존재는 동질이형으로 상변화하기 때문으로 추측되며 큰 peak가 녹는 점을 뜻한다. 이 파라핀의 물성치는 Table 2에 나타낸 것과 같다.

Table 2. Thermophysical Properties

Properties	
Liquid density $\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	720
Solid density $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	820
Liquid specific heat $C_{p1}$ (kJ/kg °C)	2.11
Solid specific heat $C_{ps}$ (kJ/kg °C)	2.18
Latent heat $L_H$ (kJ/kg)	154
Thermal conductivity $k$ (W/m K)	0.336
Thermal expansion coefficient $\beta$ (°K <sup>-1</sup> )	$8.249 \times 10^{-4}$
Viscosity $\mu$ (kg/ms)	$4.85 \times 10^{-3}$
Melting temperature $T_m$ (°C)	49.1

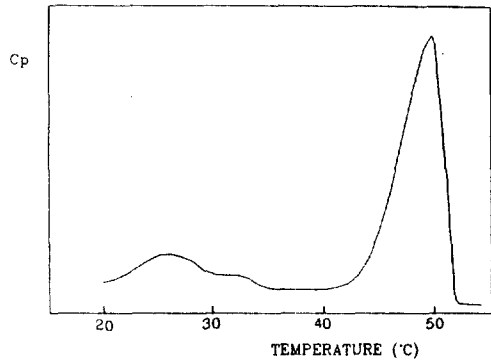


Fig. 3 DSC curve for Shinyo Paraffin

3. 결과 및 토론

3.1 실험 무차원수

해석에 일반성을 부여하고 시스템을 지배하는 파라미터의 영향을 정량적으로 고찰하기 위해 지배방정식을 무차원화 하였을 때 나타나는 무차원수는 상변화물질의 물성치에 관련된 것과 기하학적 형상에 관련된 것으로 구분된다. 용해 질량비는 열전달 특성을 나타내는 무차원수 Nu의 함수이며, Nu는 이러한 인자들의 함수로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$m^* = f(Nu) \dots\dots\dots (1)$$

$$Nu = f(Ste, Fo, Ra, Pr, H/L, y/H) \dots (2)$$

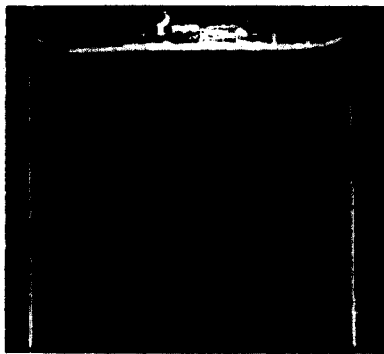
본 연구에서는 기하학적 형상비  $H/L$ 은 일정하고 동일한 paraffin을 사용하므로 수직 벽면 전체에 대한 평균치를 택하면 Nusselt수는

$$Nu = f(Ste, Fo, Ra) \dots\dots\dots (3)$$

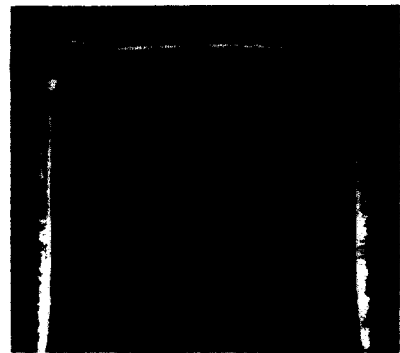
로 나타난다.

3.2 용해형상

상변화 열전달 문제를 해석함에 있어 가장 중요한 것은 고상과 액상의 상경계면 위치와 형상이다. 상경계면의 위치와 형상은 상변화의 진행 형태, 상변화된 질량비, 현열이 잠열에 비하여 작은 경우 축열량 등에 관한 정보를 제공하므로 그 의미가 크고 따라서 열전달량이



(a) 2 min



(b) 15 min



(c) 50 min



(d) 81 min



(e) 135 min



(f) 187 min

Fig. 4 Timewise change of melting front for the case of  $T_w=59.7^\circ\text{C}$

나 경계면의 이동속도 등 열전달 특성을 나타내는 양을 구하는데 가장 필수적인 것이다. 액상내의 자연대류에 의한 유동과 고체의 용해 과정이 서로 얽혀 있다는 것이 상변화 열전달 문제의 해석상 난점이다.  $H=10\text{cm}$ ,  $T_w=56.7^\circ\text{C}$  ( $Ste=0.1014$ ,  $Ra=4.20 \times 10^7$ )의 경우 본 실험에서 시간이 지남에 따라 나타나는 용해형상이 Fig. 4에 나타나 있다.

위의 그림에서 나타난 상변화 과정을 크게 4가지 영역으로 나누어 설명할 수 있다.<sup>5)</sup> 그 첫째는 전도에 의한 열전달이 주된 전도 영역으로 용해 초기 상변화면이 가열벽면과 거의 평행하게 이동하는 기간이다. 자유표면 부근에서는 상변화에 의해 발생한 잉여 체적에 의한 유동이 있다. 이 유동은 자연대류는 아니나 초기 상변화를 촉진시킨다.<sup>6)</sup> 둘째 영역은 전도-대류 영역으로 용해가 진행됨에 따라 액체 층이 두꺼워지고 가열면에서 온도가 상승된 유체가 부력에 의해 자연대류를 유발시켜 자유표면으로 이동하고 대칭면을 향하여 방향을 바꾸고 다시 상경계면을 따라 하강한다. 이에 따라 가열면에서 공급받는 열을 운반하므로 자유 표면에 의한 부분의 용해가 가속화되어 실제 용해가 일어나는 상변화의 길이가 증가한

다. 이 때 용해속도는 대칭면 부근 및 자유표면과 옆면의 경계부에 의한 상변화면 부근에서 최대가 되며 밀면으로 접근할수록 감소한다. 이는 밀면 부분은 전도에 의해 열전달이 이루어지고 상부는 시간이 갈수록 대류가 열전달에서 차지하는 비중이 커지게 되기 때문이며, 이 지역은 시간이 지남에 따라 아래 부분으로 확산된다. 세째 영역은 대류영역으로 상변화면 중 어느 부분도 가열면과 평행하지 않으며 열전달과정의 대부분이 대류에 의하며 그 비중이 시간의 경과에 따라 증가한다. 네째 영역은 고체의 최고점이 감소되는 상태, 즉 고체가 액체에 잠겨있는 상태로 이 때의 열전달과 용해율은 고체의 양에 의존한다. 넓게 본다면 세째 영역에 포함시킬 수 있다.

### 3.3 용해 질량비

실질적인 상변화 잠열 축열조의 설계, 제작에 있어 시간에 따른 용해 질량비는 가장 중요한 정보이다. 이를 바탕으로 효율적인 축열조를 구성할 수 있으며, 물리적으로 자연대류의 영향을 고찰하는 지표가 된다. 측정된 용해질량비를 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에 각각 실제 시간 및 무차원수의 조합에 대해 나타내었다.

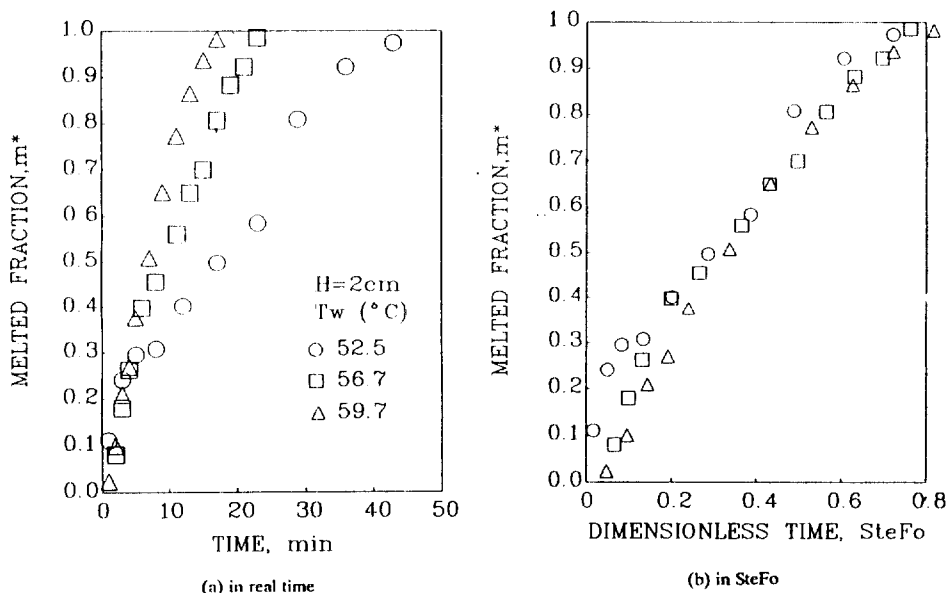


Fig. 5 Melted fraction for the case of  $H=2\text{cm}$

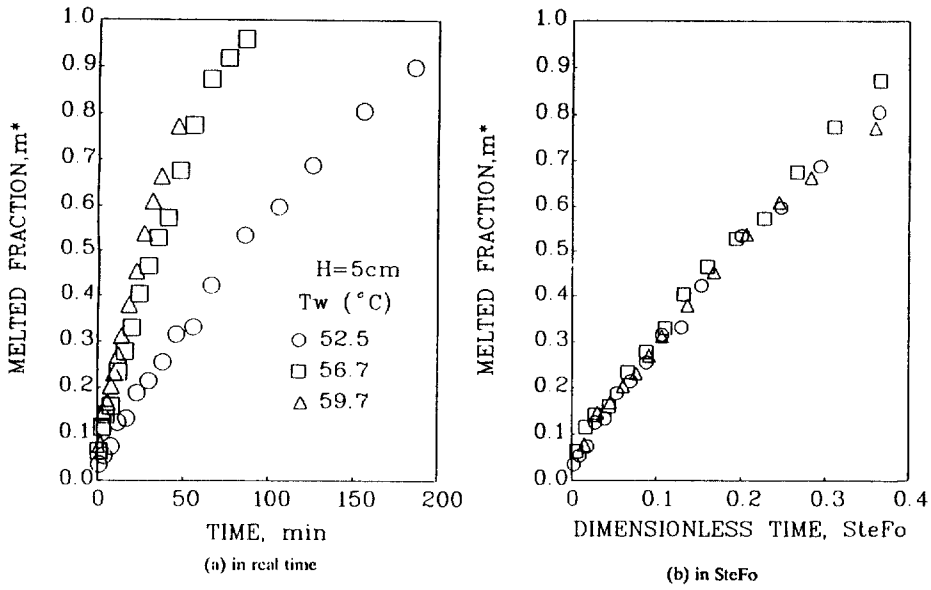


Fig. 6 Melted fraction for the case of  $H=5\text{cm}$

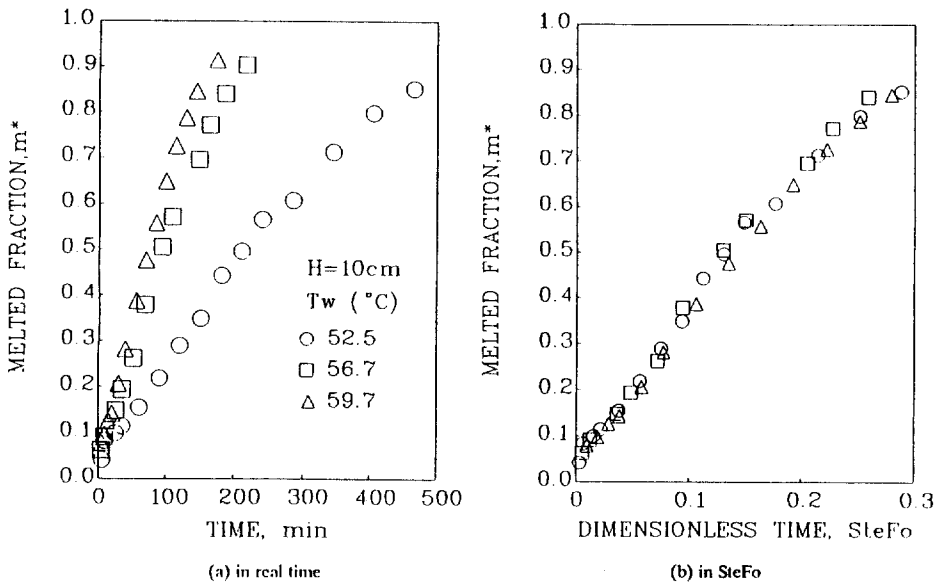


Fig. 7 Melted fraction for the case of  $H=10\text{cm}$

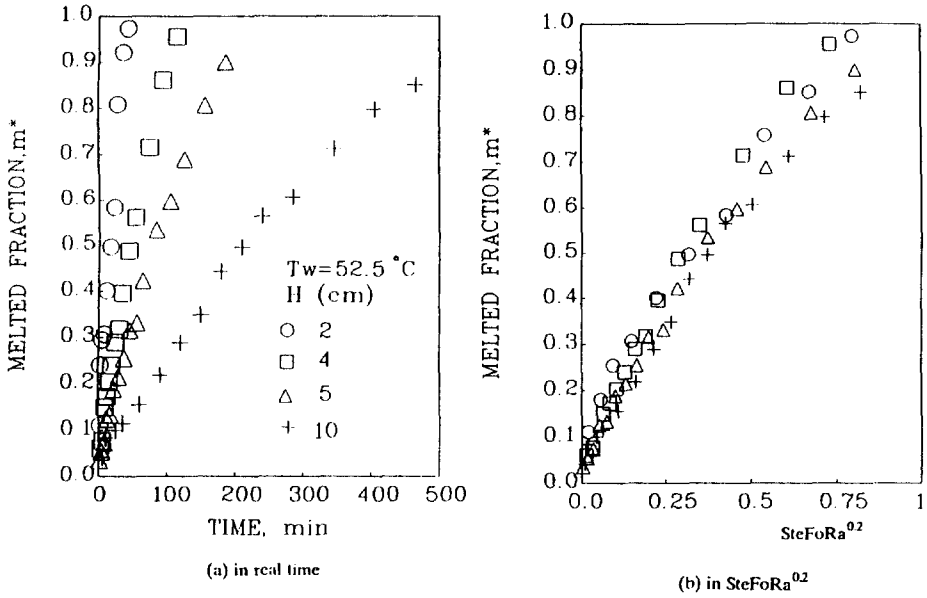


Fig.8 Melted fraction for the case of  $T_w = 52.5^\circ C$

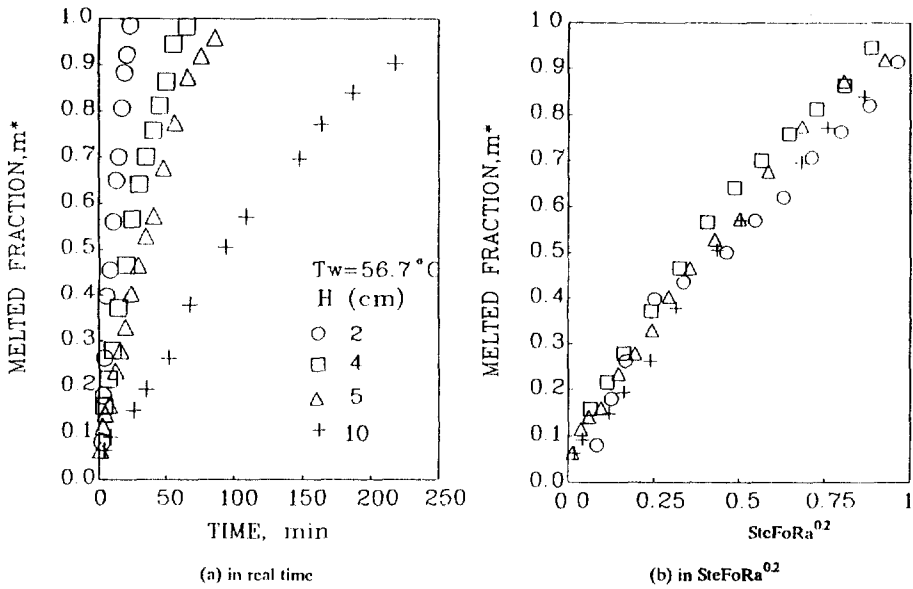


Fig.9 Melted fraction for the case of  $T_w = 56.7^\circ C$



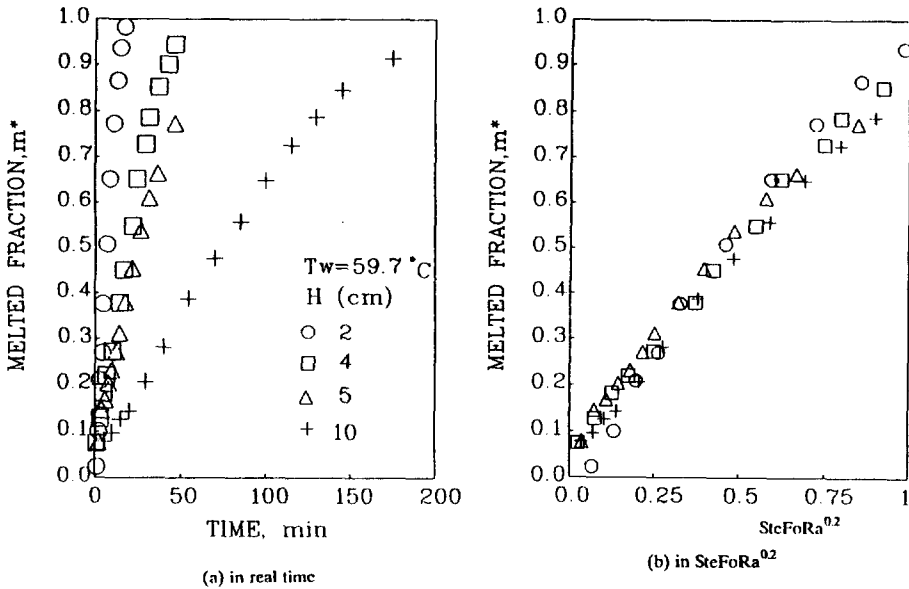


Fig.10 Melted fraction for the case of  $T_w = 59.7^\circ\text{C}$

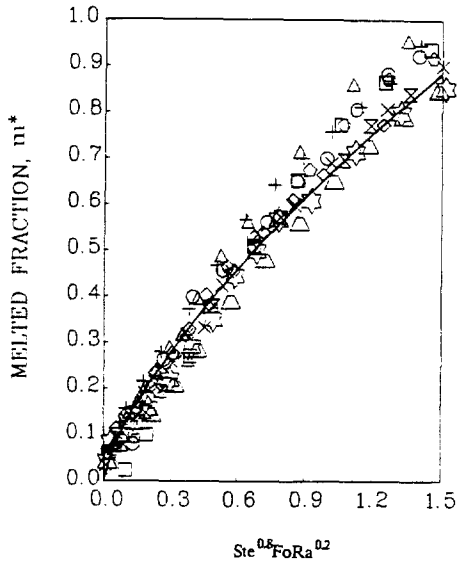


Fig.11 Correlation between melted fraction and nondimensional parameter  $Ste^{0.5} Fo Ra^{0.2}$

3.4 벽면 온도의 영향

한 변의 길이가 2cm, 4cm, 5cm, 10cm인 경우에 상이한 벽면 온도에 따른 용해 질량비가 Fig.5, Fig.6, Fig.7에 각각 나타나 있다. 용해 질량비를 벽면온도의 함수인 Ste수와 자연대류 강도를 나타내는 Ra수, 시간을 무차원한 Fo의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m^* = f(Ste^a Fo Ra^b) \dots\dots\dots (4)$$

여기서 a, b는 다시 결정하여야 하는 상수이다.

위의 Fig.5, Fig.6, Fig.7에서 보면 온도차에 따른 영향만을 고려할 때 Ste Fo의 함수로서, 즉  $\Delta T^1$ 의 함수로서 용해질량비  $m^*$ 가 비교적 잘 표시되므로  $\Delta T$ 가 포함된 무차원수인 Ra의 영향을 고려하는 경우에도

$$a + b = 1 \dots\dots\dots (5)$$

가 되어야 한다.

### 3.5 크기의 영향

동일한 벽면온도에 대해 형상의 크기를 변화시킨 경우의 결과가 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 각각 나타나 있다. 형상의 높이를 고려한 유일한 무차원수인 Ra 수를 이용하면 횡축을  $Ste FoRa^{0.2}$  으로 취하는 경우 한 곡선 위에 올라감을 알 수 있다. Ste는 모두 동일하므로 형상이 변하는 경우 시간에 따른 용해 질량비는  $Ra^{0.2}$ 에 선형적임을 알 수 있다. 이는 식 (4)에서  $b=0.2$ 임을 암시한다.

### 3.6 용해 질량비의 예측

벽면온도의 변화와 형상의 크기 변화에 의한 자료로부터 식 (4)의 지수는  $a=0.8$ ,  $b=0.2$ 가 되며 따라서  $Ste^{0.8} FoRa^{0.2}$ 을 횡축으로 취하는 경우 용해 질량비의 예측이 가능하며 그 결과 Fig. 13에 나타나 있다. Fig. 11의 선은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$m^* = \frac{M}{M_0} = 0.66(Ste^{0.8} FoRa^{0.2})^{0.72} \dots (6)$$

과거에 연구에 의하면  $Ste FoRa^{0.26}$ 을 횡축으로 하여 용해 질량비와의 상관관계를 예측하였는데,<sup>2,3)</sup> 이 경우 용해 질량비가 0.4 이하의 결과로서 본 실험의 결과로는 용해 질량비가 커지는 경우 편차가 심했고 그 대신  $Ste^{0.8} FoRa^{0.2}$ 을 횡축으로 하는 것이 더 잘 일치함을 Fig. 11를 통해 알 수 있다.

식 (6)에 의한  $m^*$ 와 실험치와의 비교는 최대 10% 범위 내에서 잘 일치한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 고상, 액상간의 밀도차에 의한 자유팽창을 고려한 정사각형의 용기를 실험공간으로 하고 상변화물질로 파라핀을 택하여 양 벽면이 등온으로 가열되었을 때 상변화 용해 과정을 실험적으로 고찰하였다.

용기의 크기와 벽면온도를 바꾸어 실험하였고 음영 방법으로 용해 형상을 기록, 시간에 따른 용해 질량비에 미치는 영향을 고찰하였으며, 벽면온도 및 형상변화를 고려해 무차원

변수로  $Ste^{0.8} FoRa^{0.2}$ 를 도입하여  $1.54 \times 10^5 < Ra < 5.9 \times 10^7$ 의 범위에서 용해 질량비를 예측할 수 있는 식을 제시하였다.

## 후 기

이 연구는 현대그룹 연구기금의 지원에 의하여 수행되었다.

## 참 고 문 헌

1. Hale, N.W. and Viskanta, R., 1978, "Photographic Observation of the Solid-Liquid Interface Motion During Melting of a Solid Heated From an Isothermal Vertical Wall", Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 5, pp. 329-337.
2. Ho, C.-J. and Viskanta, R., 1984, "Heat Transfer During Melting From an Isothermal Vertical Wall", J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 12-19.
3. 유호선, 노승탁, 1986. "좌표변환에 의한 상변화과정의 수치해석", 대한기계학회논문집, 제 10권, 제 4호, pp. 585-592.
4. 김민수, 노승탁, 1987. "직사각형 단면을 갖는 용기내 상변화 열전달과정에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집, 제 11권, 제 4호, pp. 697-707.
5. Jany, P. and Bejan, A., 1988, "Scaling Theory of Melting with Natural Convection in an Enclosure", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 31, pp. 1221-1235.
6. Viskanta, R., Kakac, S., and Aung, W., 1985, "Natural Convection-Fundamentals and Application", 2nd ed., Hemisphere, pp. 845-877.