

# 밀폐용기내에서 초음파 진동에 따른 상변화물질의 용융현상 연구

윤정환\*\* · 정대훈\*\* · 오을권\*

## An Experimental Study on melting phenomena of PCM affected by Ultrasonic Vibration in a square cavity

Oh, Yool-Kwon    Joung, Dae-Hun    Youn, Joung-Hwan

**Key Words:** Ultrasonic Vibration(초음파진동), Phase Change Material(PCM, 상변화물질), Phase Change Heat Transfer(상변화열전달), Natural Melting(자연용융)

### Abstract

Solid-liquid phase change (i.e. melting or solidification) occurs in a number of situations of practical interest. Some common examples include the melting of edible oil, metallurgical process such as casting and welding, and materials science applications such as crystal growth. Therefore, due to the practical importance of the subject, there have been a large number of experimental and numerical studies of problems involving phase change during the past few decades. Also, this study presented the effective way to enhance phase change heat transfer.

### 기 호 설 명

h ; 열전달계수  
 $\Delta h_f$  ; 잠열 [kJ/kg]  
 t ; 시간 [hour]  
 g ; 중력가속도 [m/sec<sup>2</sup>]  
 q" ; Heat Flux (열유속) [kcal/hrm<sup>2</sup>]  
 s ; 액-고상 인터페이스의 위치  
 u, v ; 수평 · 수직방향의 속도  
 C<sub>p</sub> ; 열용량 [kJ/kg°C]  
 H ; 파라핀의 높이 (특성길이) [cm]  
 K ; 액상파라핀의 열전도율 [J/m°Csec]  
 T ; 온도 [°C]

X, Y : 무차원 직교좌표

F<sub>o</sub> : Fourier 수,  $\frac{at}{H^2}$

Nu : Nusselt 수,  $\frac{q'' H}{\Delta T K}$

Pr : Prandtl 수,  $\frac{\nu}{\alpha}$

Ra : Rayleigh 수,  $\frac{g\beta\Delta TH^3 Pr}{\nu^2}$

Ra\* : 변형 Rayleigh 수,  $\frac{g\beta q'' H^4 Pr}{K\nu^2}$

Ste : Stefan 수,  $\frac{C_p \Delta T}{\Delta h_f}$

Ste\* : 변형 Stefan 수,  $\frac{C_p q'' H}{K\Delta h_f}$

\* 조선대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 대학원

### 그리스 문자

$\Gamma$  : 무차원 액-고상 인터페이스의 위치

- $\alpha$  : 열확산율
- $\beta$  : 열체적팽창계수
- $\theta$  : 무차원온도
- $\nu$  : 동점성계수

### 하첨자

- f : 용융상태
- h : 히터표면
- i : 액체영역
- s : 고체영역

## 1. 서 론

밀폐용기에서의 자연대류 열전달은 Cho와 Sunderland<sup>1)</sup>가 소개한 후로 Gau와 Viskanta<sup>2)</sup> 등의 고-액상이 존재하는 영역의 열전달 계수와 용융속도를 Nu, Ste, Ka와 같은 무차원수를 도입하여 측정하였다. 그 후 Hong<sup>3)</sup>과 Lee<sup>4)</sup> 등은 초음파 진동(Ultrasonic Vibrations)을 자연용융상태에 가하여 열전달을 향상시킬수 있는 결과를 제시하였다. 초음파 진동이 용해 속도에 영향이 있다는 것은 상변화 물질에 열전달을 촉진시켜 상변화가 일어나고 용해시간, 소요에너지량이 감소 될 수 있다는 것이다. 상변화 열전달은 식용오일의 용융, 금속의 주조 및 야금, 축열시스템등 응용분야가 산업전반에 걸쳐서 활발하게 이루어 지고 있음에도 불구하고 용융내지는 상변화를 촉진시키는 방법과 열전달을 증진시키는 방법의 자연대류 범위내에서 이루어지고 있으며 주로 벽면의 열원의 온도하에 의존하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 초음파를 가하지 않고 단순가열에 의한 자연대류 현상과 초음파 진동을 가한 용융 현상, 열전달에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 이론 해석

### 2.1 해석 모델

Hong<sup>3)</sup>과 Viskanta<sup>2)</sup>가 액-고상 인터페이스의 측

정에 관한 이론식을 도입하여 2차원의 용융모델을 제시한바 있다. 본 연구에서도 그들의 기본적인 이론식과 용융모델을 채택하고 초음파 진동을 가하여 이 관계식을 변형하도록 한다. 고상의 파라핀을 채운 단열되어 정사각형 용기의 한쪽 벽면에서 일정량의 유속을 가하게 되면 열량을 액상 파라핀을 거쳐 고상 파라핀에 열을 빼앗겨 하강하게 되는 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점 이후부터는 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어진다. 이를 위해서 Ra\*와 Ste\* 같은 변형된 무차원수를 도입하고 각각의 조건에 대해 상변화 현상을 고찰하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- 1)고상과 액상 파라핀의 물성치는 동일하다
- 2)부력을 유발시키는 액상 파라핀의 밀도 차에 관여한 온도변화를 제외하면 모든 물성치는 온도와 무관하다. (Boussinesq 근사)
- 3)액상부의 유동은 뉴튼성 층류이며 2차원이다.
- 4)점성소산과 압력에 의한 일은 무시한다.
- 5)초음파의 방사로 인하여 액상 파라핀에서 일어나는 화학반응은 무시한다.

### 2.2 지배방정식

용기내의 액상파라핀의 전달현상을 표현하기 위해서는 x,y 방향의 연속방정식 및 운동량방정식, 에너지수지식 등이 필요하며 각 조건을 일반화하여 무차원화한 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + (U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y}) = (\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}) + Gr\theta(2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + (U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y}) = (\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}) \quad (3)$$

에너지수지식

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Pr(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y}) = (\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}) \quad (4)$$

식(1)~(4)의 무차원화된 지배방정식을 구하기 위하여 사용된 무차원수는 다음과 같이 정의하였다.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{\nu}, V = \frac{vH}{\nu}, F_o = \frac{\alpha t}{H^2}$$

$$\tau = \frac{t\nu}{H^2}, \theta = \frac{T - T_f}{\Delta T}, Pr = \frac{\nu}{\alpha}, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2}$$

또한 이동하는 고-액상의 경계면을 추적하는 식이 필요하며 이는 경계면에서의 에너지수지식으로 부터 구해질 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste \frac{\partial \theta}{\partial X} \{1 + (\frac{\partial \Gamma}{\partial Y})^2\} \quad (5)$$

$$Nu = - \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} \quad (6)$$

여기서  $\Gamma = \frac{S}{H}$  이며, 본 실험에서는 가열부의 온도가 계속 상승하게 되므로 스테판수는 다음과 같이 변형된다.

$$Ste = \frac{C_p \Delta T}{\Delta h_f}, \quad \Delta T = \frac{q'' H}{K}$$

$$Ste^* = \frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f} \quad (7)$$

따라서 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \{1 + (\frac{\partial \Gamma}{\partial Y})^2\} \quad (8)$$

곧, Hong<sup>31)</sup> 지적한 것처럼  $Ra^*$ 가 일정하면 용융현상은  $F_o$ 와  $Ste^*$ 의 함수이다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

상변화 열전달 현상을 관측하기 위해 본 연구에서는 상변화물질(PCM)로 파라핀을 사용했으며 그 물성치는 Table.1에 정리되어 있다.

Table. 1 Thermophysical properties of paraffin

Properties	Value
Melting Temperature	53.2 °C
Thermal Conductivity	0.205 J/ m°Csec
Density	863.03 kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat	2872.47 kJ/kg°C
Viscosity	0.00028 m <sup>2</sup> /s
Heat of Fusion	241.60 kJ/kg
Thermal Expansion	0.001

Fig.1과 같이 정사각 테스트용기에 파라핀을 채

워넣고 바깥용기에 지름이 4cm인 원형의 초음파 진동자를 바닥쪽에 4개, 옆면에 2개씩 장착되고 바깥용기와 테스트용기 사이에 물을 넣은 뒤 끼워 넣는다. 초음파 발생장치는 28KHZ의 주파수를 발생하는 발전기와 진동자를 사용하였다. 한쪽면을 220V-150W의 전기판히터(7cm× 7cm)를 설치하여 일정한 Heat Flux를 공급하고 소용되는 전력량을 산출하기 위해 전력측정기를 통하여 전력이 공급될수 있도록 배선하였다.

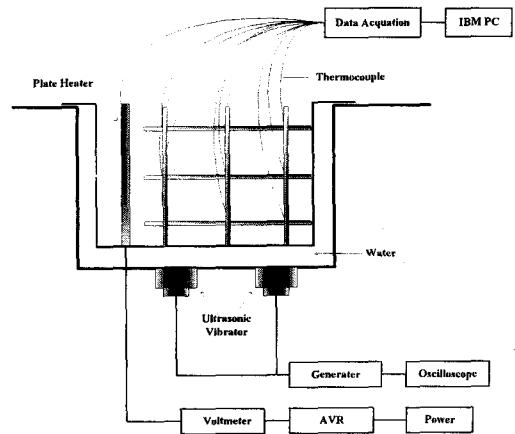


Fig. 1 Schematic diagram for experimental apparatus

용해과정동안에 온도분포를 측정하기 위하여 격자를 제작하여 크로멜-알루멜(k-type)의 열전대를 지지하여 각 채널로 나누어 용융시 온도 분포를 측정하였다. 격자의 재질을 열전달을 최소화하기 위해 나무를 사용하고 바닥에서 1cm이격후 2.5cm 간격으로 3단을 설치하고 축도 이와 같이 3단으로 하였다. 열판쪽 하단 부분부터 위쪽으로 채널을 1,2,3 중간축 하단부터 4,5,6 세 번째축을 7,8,9 마지막으로 히터판을 10으로 하는 10채널로 각각 구성한다. 또한 k-type의 열전대를 데이터 획득장치에 연결하고, 열전대를 통한 열전도를 최소화하기 위해 내열 실리콘과 절연테이프를 이용하여 구성하였다.

#### 3.2 실험 방법 및 절차

응고된 파라핀을 녹인 다음 테스트 용기에 6.5cm 높이까지 넣고 실온에서 응고되어 약20°C 일 때 전류를 가하여 용해한다. 파라핀은 온도가

200℃가 넘어서면 탄소결합의 붕괴로 물성치가 변하기 쉽기 때문에 액상의 파라핀 온도가 200℃를 넘지 않도록 용융하면서 다음과 같은 Heat Flux를 각각 공급하여 실험한다.

① $q'' = 12236.24\text{kcal/hrm}^2$

② $q'' = 7831.19\text{kcal/hrm}^2$

또한 초음파 진동의 주파수는 28KHZ의 고정주파수를 사용하였으며 초음파진동은 각각 밀부분, 옆면, 전체적(밀부분+옆면)으로 나누어서 실험을 수행하였다. 전력계에 의해 용해과정 동안의 소요된 전력량을 측정하고 파라핀의 상변화시 테스트 용기안의 온도 분포를 격자에 의해 지지되어 있는 thermocouple에 의해 검출되고 매 1분마다 데이터 획득장치에 저장된다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 용해특성

#### 4.1.1 히터 표면의 표면온도와 용융시간

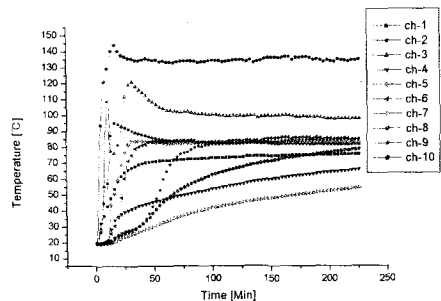
히터표면에서 고상의 파라핀에 에너지가 전도되고 초기 용융상태가 되어 그 이후로부터 자연대류에 의해 고상 파라핀에 열에너지가 전도되어 용융시킨다. 용융현상이 진행되는 동안의 히터표면의 열전달 계수는 액상층의 확산으로 인한 열저항, 자연대류등의 요인으로 인해 영향을 받는다.

#### 4.1.2 상변화 물질의 용융온도

Fig.2와 Fig.3는 히터판에 각각  $q'' = 12236.24\text{kcal/hrm}^2$ ,  $q'' = 7831.19\text{kcal/hrm}^2$ 의 Heat Flux만을 주는 상태를 도시하였고, Fig. 3에서 Fig.9은 각각의 Heat Flux를 가하면서 초음파를 밀부분, 옆면, 전체(밀부분+옆면) 순으로 가하면서 용융되는 시간에 대한 온도 분포를 도시하였다.

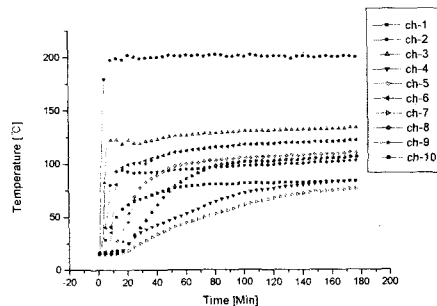
Fig.2에서 Fig.9의 그래프를 비교하면 자연용융상태보다 초음파를 가했을 때 용융시간이 2시간 이상이 단축되는 것을 볼 수 있고, 초음파 전체와 밀부분에 가했을 때보다 옆면에서 가했을 때가 10여분 정도 더 단축될 수 있다는 것을 도시하였다.

이는 최초 용융과정 동안에는 전도와 부양성 유도대류의 영향으로 열관과 근접한 지점중에 상단 지점의 채널 3-2-6-1-5순으로 온도가 상승하게 되고 상변화가 이루어진다. 이 상태에서 시간이 흐르게 되면 자연대류의 영향으로 모든 지점으로 확산되어 하단 부분(채널4,7)이 마지막으로 상변화를 이루어 용융이 된다. 이 과정중 고상이 액상으로 상변화시 초음파를 가하게 되면 초음파 효과로 대류유동을 강하게 작용시켜서 용해시간을 단축되는 것을 알 수 있다. 또한 상변화가 상단부분부터 일어나서 밀부분에서 초음파를 가한 경우보다 옆면에서 가한 경우가 10여분 정도 용융시간이 단축된다.



$q'' = 7831.19\text{kcal/hrm}^2$

Fig.2 Temperature profile using heater without ultrasonic(Natural Melting)



$q'' = 12236.24\text{kcal/hrm}^2$

Fig.3 Temperature profile using heater without ultrasonic(Natural Melting)

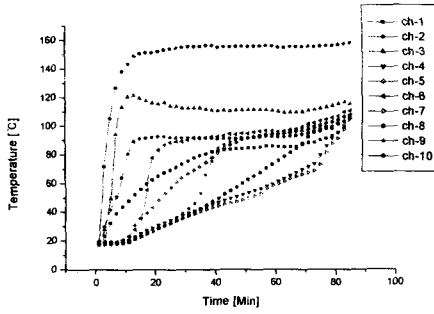


Fig.4 Temperature profile using heater ( $q''=7831.19\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(bottom)

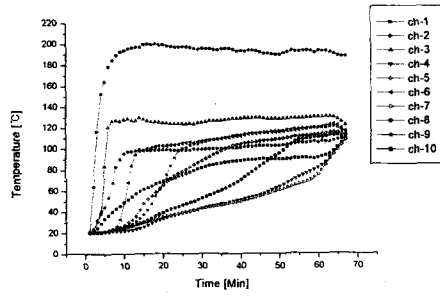


Fig.5 Temperature profile using heater ( $q''=12236.24\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(bottom)

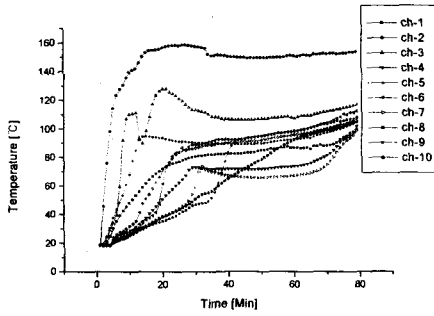


Fig.6 Temperature profile using heater ( $q''=7831.19\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(side)

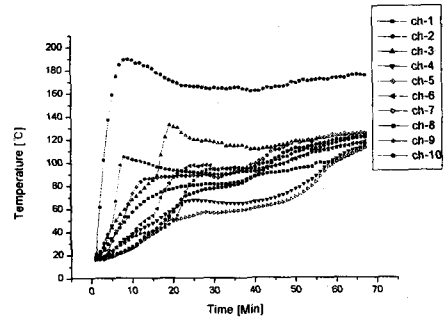


Fig.7 Temperature profile using heater ( $q''=12236.24\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(side)

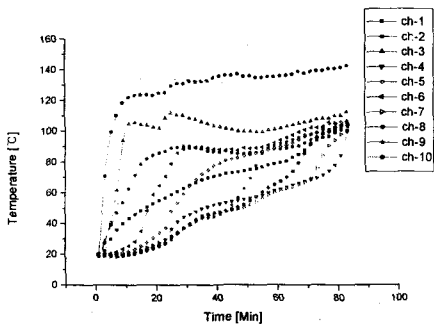


Fig.8 Temperature profile using heater( $q''=7831.19\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(bottom+side)  
 파라핀의 온도 분포는 용기의 바닥면에서 가까운 지점일수록 온도변화가 서서히 일어나고 있어 상부의 파라핀의 온도보다 더욱 안정적이다 이는 최고 온도에 달하여 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼앗겨 가는 자연대류의 흐름 때문에 파라핀 상부에서는 온도 변화가 심하다는 것을 알 수 있고 중간부의 온도 변화중 온도 요동현상은 초음파의 진동으로 발생된 공동현상의

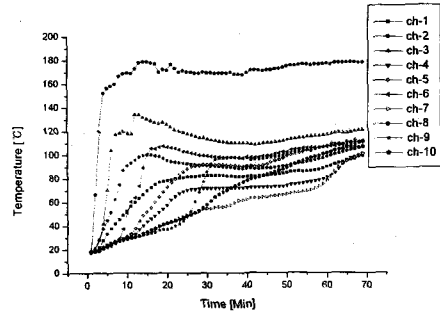


Fig.9 Temperature profile using heater( $q''=12236.24\text{kcal/hrm}^2$ ) with ultrasonic(bottom+side)  
 소멸로 인한 급격한 압력변화 때문으로 추정된다. 초음파 진동을 밀면에서 가했을 때 보다 옆면이나 전체(옆면+밀면)에서 가할 때가 온도 상승이 급하게 상승한다. 밀면에서 진동하는 초음파는 고상을 통과하지 못하여 유동대류에 영향을 주지 못한다. 그러나 옆면에서 초음파를 가할 경우에는 액상에 진동을 주어 대류현상을 강하게 작용시켜 상변화를 빠르게 하여 용융시간을 단축한다.

Table.2 Comparison of total consumed electricity for the overall melting process

Parameter	heater	U.V. device	Total consumed electricity	Melting time
$q''=7831.19$ (Natural Melting)	287.4Wh	-	287.4Wh	332Min
$q''=7831.19$ (bottom)	73.6Wh	202.4Wh	276Wh	85Min
$q''=7831.19$ (side)	68.4Wh	188.1Wh	256.5Wh	79Min
$q''=7831.19$ (bottom+ side)	72.7Wh	200Wh	272.7Wh	84Min
$q''=12236.24$ (Natural Melting)	252.5Wh	-	252.5Wh	179Min
$q''=12236.24$ (bottom)	87.1Wh	161.9Wh	249Wh	68Min
$q''=12236.24$ (side)	78.2Wh	145.2Wh	223.4Wh	61Min
$q''=12236.24$ (bottom+ side)	87.1Wh	161.9Wh	249Wh	68Min

Table.2는 본연구에서 주어진 각각의 Heat Flux 와 각 위치에서의 초음파를 방사한 경우 총전력량과 용융완료시간을 측정된 결과이다. 자연용융상태의 용융완료시간 보다 1시간에서 최고 4시간이 단축되고 초음파 방사 위치에 따라서도 용융완료시간이 단축된다는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 자연 용융상태와 자연 용융상태에 각 위치에 따라 초음파 진동을 가하여 그 용융과정을 살펴보고, 파라핀의 온도 분포, 소요된 에너지를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용해 과정중 초기에는 전도와 부양성 유도 대류현상으로 일정한 열전도에 영향을 미치나 초음파를 방사한 경우는 큰 영향을 미친다.
- 2) 고-액상 인터페이스의 위치는  $Fo$ ,  $Ste^*$ ,  $Ra^*$ 의 함수이다.

3) 액상의 파라핀에 초음파가 방사되면, 동일한 Heat Flux에서 용융종료 시점의 액상파라핀의 온도는 자연용융상태보다 훨씬 낮게 형성된다.

4) 초음파 진동을 가한 경우 열저항이 다소 증가하여 히터표면에서의 열전달 계수를 다소 감소시키나 공동현상, 진동유동, 음향효과 등을 유발시켜 같은 Heat Flux에서 2시간이상이 단축될 수 있다.

5) 자연용융상태에 초음파 진동을 가함으로써 에너지를 절약할 수 있다. 또한 고상의 하단부에 초음파의 방사하는 것보다 중·상부의 액상에 초음파를 방사하는 것이 용융시간이 단축되고 에너지도 절감되기 때문에 초음파 진동자 위치 선정도 고려해야만 효과를 극대화할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) S.H. Cho and J. E. Sunderland.,1969 : 『Heat-conduction Problems with Melting or Freezing』, *Journal of Heat Transfer*, August, pp 125-131
- (2) Gau, C. and Viskanta, R.,1986 : 『Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall』, *J.of Heat Transfer*, vol. 108,pp 204-209
- (3) J.S.Hong.,1988 : 『Experimental Study of Melting Phenomena with and without ultrasonic vibrations, M.S. Thesis, Univ. of Illinois at Chicago
- (4) J.H. Lee and C.J. Um., 1999 : 『An Experimental Study on the Ultrasonic Influence for Melting the Paraffin with Solid particles』, *SAREK*, pp 285-290
- (5) Yoshihiro Iida, Kentarou Tsutsui and Reiko Ishii., 1991 『Natural-convection Heat Transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure』, *J. of Chemical Engineering of Japan*, vol. 4, no. 6, pp794-796
- (6) Park.,2000 : 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향에 관한 실험적 연구, 대학기계학회, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp297-303
- (7) R. Viskanta., 1985 : 『Natural convection effects in phase change heat transfer』, Hemisphere, Washington D.C.