

상변화 물질의 상변이 촉진에 관한 실험적 연구

박 설 현* · 오 율 권** · 차 경 옥***

Experimental Study on Accelerating Phase Change Heat Transfer

S-H Park* · Y-K Oh** · K-O Cha***

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
 Δh_f : 잠열 [kJ/kg]
 t : 시간 [hour]
 g : 중력가속도 [m/sec²]
 q" : 열유속 [kcal/hrm²]
 s : 액-고상 인터페이스의 위치
 u, v : 수평방향의 속도
 C_p : 열용량 [kJ/kg°C]
 H : 파라핀의 높이 (특성길이) [cm]
 K : 액상파라핀의 열전도율 [J/m°C sec]

T : 온도 [°C]
 U, V : 무차원 수평방향의 속도
 X, Y : 무차원 직교좌표
 F₀ : Fourier 수, $(\frac{at}{H^2})$
 Nu : Nusselt 수, $(\frac{q''H}{\Delta TK})$
 Pr : Prandtl 수, $(\frac{\nu}{\alpha})$
 Ra : Rayleigh 수, $(\frac{g\beta\Delta TH^3Pr}{\nu^2})$
 Ra* : 변형 Rayleigh 수, $(\frac{g\beta q''H^4Pr}{K\nu^2})$

* 조선대학교 대학원 기계공학과
 ** 조선대학교 기계공학부
 *** 명지대학교 기계공학부

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

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

그리스 문자

Γ : 무차원 액-고상 인터페이스의 위치

α : 열확산율

β : 열체적팽창계수

θ : 무차원온도

ν : 동점성계수

하 첨 자

f : 용융상태

h : 히터표면

i : 액체영역

s : 고체영역

1. 서 론

상변화 열전달은 식용오일의 용융, 금속의 주조 및 용접 등 산업전반에 걸쳐서 그 응용이 활발하게 이루어지고 있는 분야이다. 특히 현재에는 반도체 결정 성장의 해석에 있어서 중요한 이론으로 각광 받고 있다. 그러나 대부분의 연구가 자연대류의 관점에서 상변화 물질의 축열, 응고 과정 등에 국한되고 있는 실정이다. 또한 열전달을 촉진시키기 위한 방법으로 Rayleigh수의 증감이나 밀폐용기에 수직격판 또는 수평격판을 설치하여 진동유동을 유발시키는 정도에 머물러 있다. Cho와 Sunderland¹⁾가 자연용융현상을 소개한 이후로 관련된 수많은 연구가 진행되어 왔으며, Gau와 Viskanta²⁾는 갈륨(Ga)을 상변화 물질로 사용해서 고-액상이 존재하는 영역의 열전달계수와 용융속도를 Nu, Ste, Ra와 같은 무차원수를 도입하여 측정하였다. 또한 수평원판이나 직각 밀폐용기에서의 상변화 열전달현상 역시 축열시스템 연구의 연장선상에서 활발하게 논의되고 있다. 그러나 Hong³⁾과 Lee, Um⁴⁾등이 초음파 진동을 자연 용융 상태에 가하여 열전달을 향상시킬 수 있다라는 결과를 제시하였음에도 불구하고 그 응용 분야가 의

약분야나 세척분야 그리고 용접 및 커팅 부분에 제한되어 있는 실정이다 따라서, 본 연구는 초음파 진동을 가하여 상변화 물질의 용융현상에 미치는 영향과 또한 열유속에 따른 열전달 영향의 특성 등을 제시하고자 하였다.

2. 이론 해석

2.1 해석 모델

고상의 파라핀을 채운 단열된 정사각형 용기의 한 쪽 벽면에서 일정량의 열유속을 가하게 되면 열량은 액상 파라핀을 거쳐 고상 파라핀에 전달되며 따라서 고액경계면에서 용융이 일어나게된다. 이때 가열된 히터부 주위에 액상의 파라핀은 밀도가 낮아져 상승하게되고 고상 파라핀에 열을 빼앗겨 다시 하강하게된다. 즉, 초기온도에서 상변화 시점까지 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점 이후부터는 액상 파라핀 내의 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어지게된다. Fig. 1은 본 연구에서 채택한 고-액상 인터페이스가 존재하는 상변화 물질의 열전달 현상 모델을 나타낸 것이다.

위의 설정된 모델에서 일어나는 전달현상을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 고상과 액상 파라핀의 물성치는 동일하다.
- ② 부력을 유발 시키는 액상 파라핀의 밀도차에 관여한 온도변화를 제외하면 모든 물성치는 온도와 무관하다. (Boussinesq 근사)
- ③ 액상부의 유동은 뉴턴성 층류이며 2차원이다.
- ④ 점성소산과 압력에 의한 일은 무시한다.
- ⑤ 초음파의 방사로 인하여 액상 파라핀에서 일

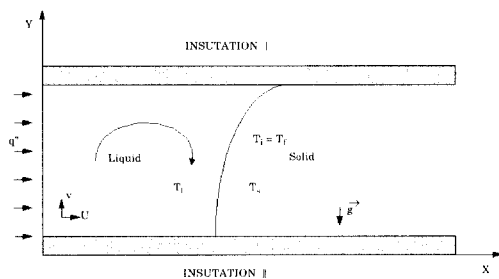


Fig. 1 Two dimensional model for melting procedure

어나는 화학반응은 무시한다.

2.2 지배방정식

용기내의 액-고상인터페이스를 추적하기 위해서는 에너지방정식이 필요하며 각 조건을 일반화하여 무차원화한 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} + \text{Pr}(U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y}) = (\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}) \quad (1)$$

또한, 이동하는 고-액상의 경계면을 추적하는 식은 경계면에서의 에너지방정식으로부터 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_0} = -\text{Ste} \frac{\partial \theta}{\partial X} \{1 + (\frac{\partial \Gamma}{\partial Y})^2\} \quad (2)$$

$$\text{Nu} = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} \quad (3)$$

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

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

$$\text{Ste}^* = \frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f} \quad (4)$$

따라서 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_0} = -\text{Ste}^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \{1 + (\frac{\partial \Gamma}{\partial Y})^2\} \quad (5)$$

한편 Hong³⁾이 지적한 것처럼 Ra^* 가 일정하면 용융현상은 F_0 와 Ste^* 의 함수로 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

상변화물질(PCM)로는 용융점이 52.3°C인 파라핀을 사용하였으며 그 물성치는 Table 1과 같다. 실험장치는 Fig. 2와 같이 가로, 세로길이가 각각

12.5cm인 정사각형 테스트 용기를 지름이 6cm인 원형의 초음파 진동자 6개가 바닥에 장착되어 있는 보조 탱크에 물을 채워 넣은 뒤 끼워 넣었다. 초음파 발생장치는 40kHz의 주파수를 발생시키며 발진된 주파수는 오실로스코프에서 모니터링된 후 초음파 진동자에서 다시 기계적 에너지로 전환된다. 또 정사각형의 테스트 용기는 스티로폼을 과석면 그리고 베이크라이트 순으로 바닥을 제외한 모든 면이 단열되어 있으며, 한쪽 벽면에는 220V-800W 전기 관히터가 장착되어 있어 정전압 공급장치(AVR)를 통해서 실험이 실시되는 동안 일정한 열유속이 공급된다.

3.2 실험 방법 및 절차

고상의 파라핀을 녹인 다음 정사각형 용기에 8.5cm 높이까지 채워 넣고 응고시킨 다음 응고된 파라핀의 전체 영역의 온도가 실내온도와 평형을 이루게 하기 위해서 하루동안 실온에 놓아둔다. 이 과정이 끝난 다음 액상파라핀의 수축으로 인한 함몰

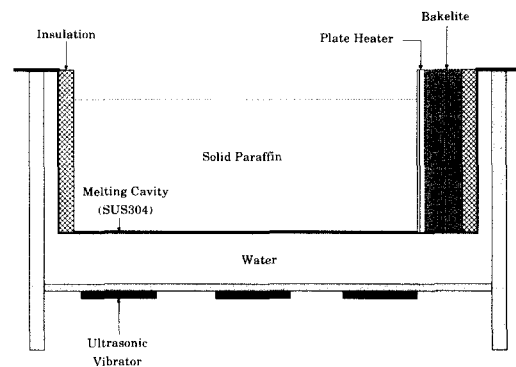


Fig. 2 Schematic diagram for test enclosure

Table 1 Thermophysical properties of paraffin

Properties	Value
Melting Temperature	52.2 °C
Thermal Conductivity	0.205 J/m°C sec
Density	863.03 kg/m³
Specific Heat	2872.47 kJ/kg°C
Viscosity	0.00028 m²/s
Latent Heat of Fusion	241.60 kJ/kg
Thermal Expansion	0.001

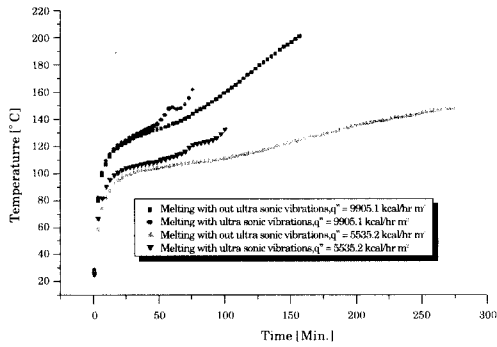


Fig. 3 Average temperature distribution on the heater surface

부위를 다시 보정하기 위하여 액상의 파라핀을 보충하고 응고되면 표면의 불규칙한 면을 긁어내거나 뜨거운 공기를 불어넣어서 평평하게 만든다. 일반적으로 파라핀은 온도가 200℃ 넘어서면 탄소결합의 붕괴로 물성치가 변하기 쉽다.⁵⁾

따라서 본 연구에서는 액상파라핀의 온도가 200℃를 넘지 않도록 용융현상이 끝날 때까지 다음과 같은 열유속을 각각 공급하였다.

- ① $q'' = 9905.1 \text{ kcal/hrm}^2$ ($Ra^* = 5.80 \times 10^7$)
- ② $q'' = 5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$ ($Ra^* = 3.24 \times 10^7$)

Hong⁴⁾에 따르면 초음파 진동의 주파수가 35~50kHz 대역에서 가장 효율적이며, 보편적으로 초음파 진동을 이용한 제품들도 대부분 40~50kHz 대역의 주파수를 사용하고 있다.⁶⁾ 아울러 본 연구에서는 초음파 진동이 상변화 물질의 용융현상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 40kHz 대역의 고정 주파수를 사용하였다.

4. 실험 결과

각각의 열유속이 주어졌을 때 자연용융 상태와 초음파 진동이 주어진 경우의 히터표면의 평균 온도 분포를 Fig. 3에 도시하였다. 용융초기에 용융속도가 초음파 진동이 가해진 경우 최고 2.5배정도 단축되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 초음파 진동으로 인해 발생하는 공동현상 및 진동유동 교반효과 등에 따라서 기인한 것으로 보이고 있다.

4. 1 히터 표면에서의 열저항

히터표면으로부터 열전달은 초기에 에너지가 전도에 의존하여 액상 파라핀으로 전달되다가 그 이후부터는 자연대류에 의해 고상 파라핀에 전달되며 전달에너지는 고상파라핀을 용융시키거나 액상파라핀의 온도를 높인다. 용융현상이 진행되는 동안에 히터표면의 열전달계수는 액상층의 확산으로 인한 열저항, 자연대류의 영향 등의 요인들에 의해 영향을 받는다. 열전달을 방해하는 요소 중 가장 큰 영향을 미치는 대류 열저항은 다음과 같이 나타내어 지고 있다⁷⁾.

$$R_{conv} = \frac{T_h - T_f}{q} = \frac{1}{hA} \quad (6)$$

Fig. 4는 윗식으로부터 구해진 열저항을 시간에 대해서 도시한 것이다. 같은 열유속에서 초음파 진동이 주어진 경우 열저항이 자연용융 상태보다 부

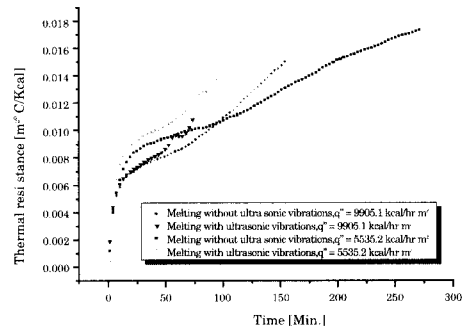


Fig. 4 Thermal resistance variation with time.

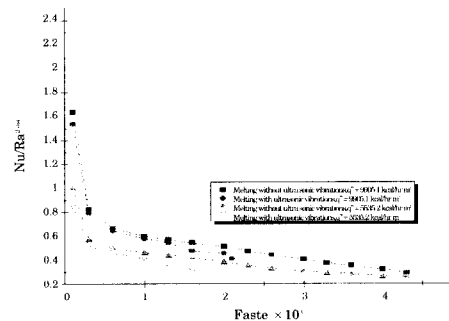


Fig. 5 Nusselt number variation on the heater surface with FoSt*

분적으로 약간 높게 나타났고 이는 열전달계수에 미소한 영향을 미치고 있다고 볼 수 있다.

4.2 히터표면에서의 열전달계수

히터표면에서의 열전달계수는 상변화물질의 전도영역과 대류영역을 고려하여 Nusselt 수로 다시 주어질 수 있다.

$$Nu = \frac{q''H}{\Delta TK} \quad (7)$$

Fig. 5는 무차원 시간인 FoSte*에 대한 히터표면에서의 열전달계수를 실험적을 구한 것이다. 여기서 Ra*^{0.25}는 자연대류가 발생할 경우 취해지는 일반적인 값이다⁸⁾. 그림에서 알 수 있는 것처럼 용융 초기에는 열전달계수가 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 용융 초기에 전도의 영향이 지배적이기 때문에 얇은 파라핀층을 사이에 두고 고-액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하나 점차 액상층이 두터워짐에 따라 열저항이 빠르게 증가하여 에너지의 이동을 방해하기 때문이다. 어느 정도 용융이 진행되면 자연대류가 시작되고(FoSte*=0.3) 액상 상하부의 혼합으로 다수의 에너지가 이동하므로 용융 말기에는 액상의 전체적인 온도가 상승하게 된다. 또한 용융초기에는 자연 용융상태나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 전도의 영향을 받아 온도가 급격히 상승하다가 자연대류가 일어나면서부터 그 증가세가 서서히 감소한다. 결국 이러한 영향의 상대적인 크기에 따라 열전달 속도가 결정된다. 따라서 가열부의 온도가 높을수록 열전달이 잘 일어날 것이라는 예상과는 상반된다. 또한 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우는 상관없이 FoSte* 0.3 부근에서 자연대류가 시작된다는 사실에 주목할 필요가 있다. 그리고 자연용융의 경우 Heat Flux에 관계없이 FoSte*가 4.3 근처에서 용융이 완전히 끝남을 알 수 있다. 결국 이는 식(5)에서 언급한 것과 같이 고-액상 용융현상은 Fo, Ste*, Ra*의 함수임을 나타내고 있다고 할 수 있다.

4.3 초음파의 상변이 촉진 요소

Fig. 5를 통해서 Hong⁹⁾이 언급한 것처럼 초음파 진동은 열전달계수에는 큰 영향을 미치지 않는다.

오히려 열전달에 영향을 미치는 큰 원인은 Heat Flux의 강도이며, 초음파 진동은 용융속도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 단지 초음파 진동만을 가한 경우 Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 열저항이 다소 증가하여 열전달계수가 FoSte* 1.0와 1.3 이후에 각각 약간 감소한다. 또한 이 지점 (FoSte* 1.0 and 1.3)을 기준으로 하여 열전달계수가 서서히 감소하기 시작하고 대부분의 용융현상이 일어

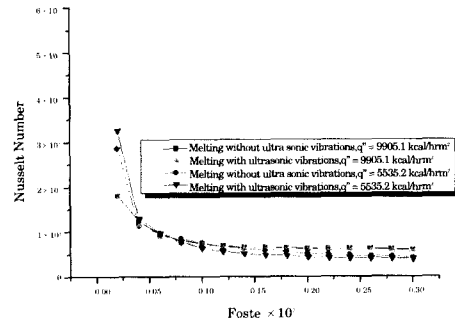


Fig. 6 Nusselt number variation on the heater surface during conduction with FoSte*

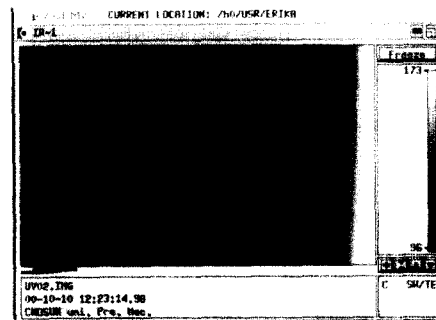


Fig. 7 Oscillating fluid motion formed by ultrasonic vibrations

Table 2 Consumed melting time under variable output power level at vibration generator

Heat Flux (kcal/hrm²)	Output Power Level at Vibration Gnerator (Wh)	Melting Time (Min.)
5535.2	70	164
5535.2	185	94
5535.2	340	72
4000.7	100	185
4000.7	185	105

나게 된다. 이는 초음파 진동에 의한 용융축진 요소가 이 지점 이후에 활성화되는 것을 의미하는 것으로 다음과 같은 이유들로 상변이가 촉진되는 것으로 사료된다.

- ① 공동현상으로 인한 고상 파라핀 표면의 분리촉진
- ② 기포의 진동으로 인한 교반효과
- ③ 방사압에 의한 진동유동의 생성
- ④ 초음파 방사로 인한 음향효과

그리고 초음파 진동은 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 FoSte*가 0.3 이전, 즉 전도 영역에서는 초음파 진동을 가한 경우나 가하지 않은 경우 모두 그 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있다. Table 2는 초음파 발생기에서의 출력을 변화시켰을 경우 용융 시간을 나열한 것이며, 여기서 알 수 있는 것처럼 초음파 발생기의 출력을 높일수록 용융시간이 단축됨을 알 수 있다. 이는 출력이 증대되면서 높은 음압이 형성되고³⁾ 상대적으로 큰 버블의 형성은 억제되나 미세한 버블의 주기적인 생성소멸로 인한 효과와 이러한 미세한 버블들의 활발한 진동유동 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 상변화 물질의 자연 용융상태와 자연 용융상태에 초음파 진동을 가하여 그 상변화과정을 살펴보고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고-액상 인터페이스의 위치는 Fo, Ste*, Ra*의 함수이다.
- 2) 용융현상에 중요한 역할을 하는 대류는 초음파 영향의 여부, 열유속의 강도와 상관없이 FoSte*가 0.3 근처에서 그 징후가 나타난다. 결국 고-액상 인터페이스가 일정한 지점에 이르렀을 때, 즉 일정한 액상의 체적이 형성되었을 때 대류현상은 활성화된다.
- 3) 초음파 진동은 전도영역에서 용융현상에 거의 영향을 미치지 못한다.
- 4) 초음파 진동을 가한 경우 열저항이 다소 증가하여

히터표면에서의 열전달 계수를 다소 감소시키거나 공동현상, 진동유동, 음향효과 등을 유발시켜같은 열유속에서 최고 2.5배 용융시간이 단축될 수 있다.

후 기

본 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구조성비에 의하여 이루어졌습니다.

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) C.S. Hong, 1990, Studies on Heat Storing and Retrieving Characteristics in a Paraffin-Filled Horizontal Circular Tube, Ph.D. Thesis, Seoul University.
- (6) Ultrasonic Research Assembly, 1994, Application of ultrasonics, Kimoon-sa,
- (7) P. Incropera and P. DeWitt, 1996, Introduction to Heat Transfer, Wiley.
- (8) M. Okada ; Analysis of Heat Transfer during Melting from Vertical Wall, Int. J. of Heat Transfer, vol. 27, no. 11, pp 2057~2066, 1984.
- (9) Yoshihiro Iida, Kentarou Tsutsui and Reiko Ishii ; 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 1991.

저 자 소 개



박설현(朴設賢)

1974년 8월 22일생. 1999년 조선대학교
정밀기계공학과 졸업. 2001년 조선대학교
대학원 졸업(석사).



오을권(吳栗權)

1949년 9월 9일생. 1972년 조선대학교
기계공학과 졸업. 1991년 경희대학교 대
학원 졸업(박사). 현 조선대학교 기계공학부
교수.



차경옥(車京玉)

1945년 1월 4일생. 1972년 한양대학교
기계공학과 졸업. 1977년 단국대학교 대
학원 기계공학과 졸업(석사). 1984년 동
대학원(박사). 1986년 일본 도요다대학원
연구원. 1998. 1~1999. 12 대학기계학
회 사업이사 및 총무이사. 1991. 1~현재
한국자동차학회 사업이사. 현 명지대학교
기계공학과 교수.