

음향흐름이 상변화 열전달 과정에 미치는 영향

양호동* · 오을권†

Effect of Phase Change Heat Transfer Process by Acoustic Streaming

Ho Dong Yang and Yool Kwon Oh

Abstract. The present paper investigated the effect of ultrasonic vibrations on the melting process of a phase-change material (PCM). The melting process in the square cavity with a heated vertical wall has been studied in terms of acoustic streaming. In the present study, applying with ultrasonic vibrations to the liquid were found to induce acoustic streaming which was clearly observed using by a particle image velocimetry (PIV) and a thermal infrared camera. The experimental results revealed that acoustic streaming could accelerate the melting process as much as 2.5 times, compared to the rate of natural melting (i. e., the melting without acoustic streaming). In addition, temperature and Nusselt numbers over time provided conclusive evidence of the important role of the acoustic streaming on the melting phenomena of the PCM.

Key Words : Acoustic streaming (음향흐름), Particle Image Velocimetry (입자영상추적계), Phase Change Heat Transfer (상변화열전달), Phase Change Material (상변화물질)

기호설명

Δh_f : 잠열 [kJ/kg]
 s : 고-액상 인터페이스의 위치
 g : 중력가속도 [m/sec²]
 q'' : Heat Flux (열유속) [W/m²]
 C_p : 열용량 [kJ/kg · K]
 H : 파라핀의 높이 (특성길이) [cm]
 K : 액상파라핀의 열전도율 [W/m · K]
 T : 온도 [°C]
 X, Y : 무차원 직교좌표
 Fo : Fourier 수, at/H^2
 Nu : Nusselt 수, $q''H/(\Delta TK)$
 Ra : Rayleigh 수, $g\beta\Delta TH^3Pr/\nu^2$
 Ra^* : 변형 Rayleigh 수, $g\beta q''H^4Pr/K\nu^2$
 Ste : Stefan 수, $C_p\Delta T/\Delta h_f$
 Ste^* : 변형 Stefan 수, $C_p q''H/K\Delta h_f$

그리스 문자

Γ : 무차원 고-액상 경계면의 위치, s/H
 β : 열체적팽창계수
 θ : 무차원온도, $(T-T_f)/(T_h-T_f)$
 ν : 동점성계수
하첨자
 f : 용융상태
 h : 히터표면

1. 서 론

열전달 문제에서 상변화란 열전달 과정 중 어떤 물질이 하나의 상태에서 다른 상태로 변화하는 과정을 말한다. 일반적으로 상변화 과정 중에는 잠열의 흡수 및 방출이 수반되며 상변화 전후로 열적, 물리적 물성에 상당한 변화가 있게 된다. 이러한 상변화의 대표적인 예는 용융과 응고이지만 그 이외에도 기체의 응축, 액체의 증발, 금속 결정 구조의 변화, 자화 현상 등도 상변화에 포함된다. 상변화 문제의 대표적인 응용분야로는 잠열을 이용한 에너지 저장 분야와 주

* 조선대학교 대학원
†조선대학교 기전공학과
E-mail : ygoh@mail.chosun.ac.kr

조 공정 분야, 금속의 용접 및 제련분야, 플라스틱 급형의 사출 분야, 반도체 결정 성장 등이 있다. Cho와 Sunderland(1)는 용융이나 응고현상에 포함된 열전도 문제에 대해 연구했으며, Gau와 Viskanta(2)는 금속을 이용해서 열전달계수와 용융속도를 측정하였고 Rayleigh수, Stefan수, Nusselt수와 같은 무차원 파라미터를 사용하여 열전달 상관식을 구하였다. 그러나 이러한 연구들은 전도나 자연대류의 열전달에 초점이 맞추어져 있고, 밀폐용기 또는 관로에서 온도 조건 변화에 의해 형성되는 자연대류 혹은 기타 강제대류에 의한 열전달 현상은 그 동안 실험이나 수치해석을 통해 많은 연구가 이루어져 왔다. 실제로 자연대류현상은 밀도차에 의해 유동이 발생하는 현상으로 온도장과 유동장이 강하게 결합된 형태의 문제이다. 따라서 열전달을 효과적으로 증가시키기 위해서는 밀도차에 의해 형성되는 유동만으로는 부족하며 효율적인 강제대류의 메카니즘이 필요하다. 그러나 효율적인 강제대류의 메카니즘의 대안으로 국·내외적으로 제시되고 있는 방법으로서, 밀폐용기에 수직 또는 수평 격판을 설치하여 강제 대류를 형성하거나 가열부 표면의 거칠기를 조정하는 방법⁽³⁾에 국한되어 있다. 더욱이 본 연구에서 열전달 향상을 위해 적용하고자 하는 초음파 진동의 활용은 이미 커팅이나 용접, 세척분야에서 그 우수성이 인정되고 있으나 이를 활용한 열전달 향상에 관한 연구는 미비한 실정이다⁽⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 상변화 물질인 파라핀에 일정량의 열유속을 가하여 고-액상 경계면이 존재하는 열전달 과정을 구성하고, 상변화 과정시 초음파 진동을 가하여 상변화 과정에서 발생하는 물리적 거동을 입자영상추적계(Particle Image Velocimetry, PIV)와 열화상카메라(Thermal Infrared Camera)로 분석하여 용융과정을 고찰해 보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

상변화 물질(PCM)로는 용융점이 53.2°C인 파라핀을 사용하였으며 이 파라핀은 용융온도가 상온보다 높아서 상변화 영역에서의 상변화가 안정적으로 이루어지며 구입이 용이하고 가격이 저렴하기 때문에 상변화 물질로 선정하게 되었고, 그 물성치는 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로 파라핀으로 채워진 내부용기는 물로 채워진 외부탱크안에 설치되어 있으며, 외부탱크의 물은

초음파 진동자가 작동하기 시작하였을 때 고체 파라핀의 영역에 초음파방사로 인하여 발생할 수 있는 전기과부하로부터 초음파 진동자를 보호하기 위하여 사용되었다. Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 가로, 세로의 길이가 각각 12 cm인 용융용기는 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 초음파 진동자 2개가 바닥에 장착되어 있다. 용융용기의 벽면을 통한 공기 중으로의 열손실을 방지하기 위하여 스티로폼과 석면 그리고 베이크라이트 순으로 바닥을 제외한 모든 부분에 단열벽을 설치하였고 용기의 윗면은 용융현상을 관찰하기 위하여 Pyrex glass를 사용하였다. 한쪽 벽면에는 220V-800W의 전기 판히터가 장착되어 있어 정전압 공급장치(Automatic Voltage Regulator, AVR)로부터 일정한 열유속($q=6433.13 \text{ W/m}^2$)을 지속적으로 공급받는다. 일정한 열유속 경계조건은 $\pm 20\%$ 의 입력전압의 변동에도 $\pm 1\%$ 의 오차로 출력전압을 유지할 수 있는 정전압 공급장치에 의해 획득되었고 주파수 발생장치에서 발생한 40kHz의 주파수는 오실로스코프에서 모니터링되며, 용융용기의 정면에는 가시화창을 제작하여 입자영상추적계와 열화상카메라를 이용

Table 1. Thermal properties of paraffin

Properties	Value
Melting Temperature	53.2°C
Thermal Conductivity	0.205 W/m · K
Density	863.03 kg/m ³
Specific Heat	2,873.88 kJ/kg · K
Viscosity	0.00028 m ² /s
Heat of Fusion	241.60 kJ/kg
Thermal Expansion Coefficient	0.001

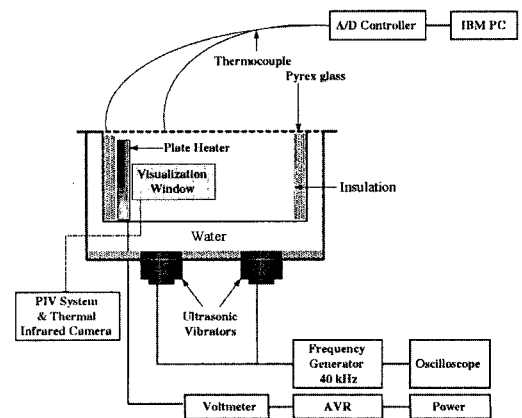


Fig. 1. Schematic diagram of test section.

해 초음파 가진시 매질내에서의 물리적 거동을 관찰할 수 있도록 하였다.

3. 해석모델

고상의 파라핀을 채운 단열된 정사각형 용기의 한쪽 벽면으로부터 일정량의 열유속을 가하면 액상 파라핀을 거쳐 고상 파라핀에 전달되며 따라서 고-액상 경계면에서 용융이 일어나게 된다. 이 때 가열된 히터 부 주위의 액상 파라핀은 초기온도에서 상변화 시점까지 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점 이후부터 액상 파라핀내의 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어지게 된다. Fig. 2는 본 연구에서 채택한 고-액상 경계면이 존재하는 상변화 물질의 열전달 모델이다. Fig. 2에서 X, Y는 각각 무차원으로 된 좌표이며, 이동하는 고-액상의 경계면을 추적하기 위해 경계면의 온도는 상변화물질인 파라핀의 용융점과 같다고 가정한다. Ho 와 Viskanta(5)는 소위 이동하는 고-액상 경계면의 추적에 관한 이론식과 2차원의 용융 모델을 제시한 바 있다.

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

식 (1)의 Fourier수와 Stefan수는 용융현상을 표현하는데 중요한 수이다. 본 실험에서는 열유속의 온도가 일정하게 상승하는 등열유속조건(Constant heat flux condition)을 사용하였기 때문에 $\Delta T = \frac{q''H}{K}$ 를 이용하여 변형 Stefan수를 다음과 같이 정의하였다.

$$Ste = \frac{C_p \Delta T}{\Delta h_f}, \quad \Delta T = \frac{q''H}{K}, \quad Ste^* = \frac{C_p q'' T}{K \Delta h_f} \quad (2)$$

결국 식 (1)로부터 고-액상의 인터페이스 위치를 다

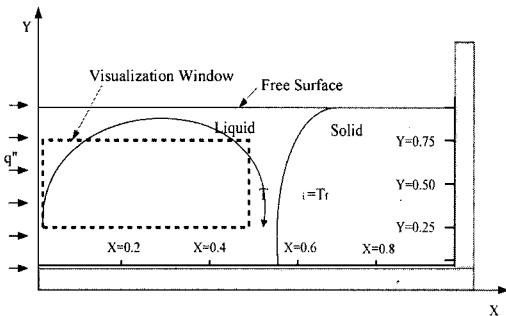


Fig. 2. Two dimensional model for a melting procedure.

시 정의해 보면 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \left\{ 1 + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial Y} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

4. 실험결과

4.1 무차원시간($F_o Ste^*$)에 따른 고-액상 경계면의 위치

Fig. 3은 자연용융과 초음파 가진 용융시 고-액상 경계면의 위치를 $F_o Ste^*$ 에 대해 도시한 것이다. 자연용융과 초음파 가진 용융시 모두 하부 영역보다는 상부 영역에서의 용융이 잘 이루어진 포물선 형태를 띄고 있다. 이는 히터표면을 따라 가열된 액상파라핀이 자유면(Free surface)에 이르러 최고온도에 달하고 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼앗겨 가는 자연대류의 흐름 때문에 발생된다. Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼, $F_o Ste^* = 0.3 \times 10^5$ 이전에는 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 용융 비율에는 큰 차이가 없으나, $F_o Ste^* = 1.2 \times 10^5$ 이후 용융이 급속히 가속화되어 대부분의 용융이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 용융에 대한 초음파 진동의 영향이 $F_o Ste^* = 1.2 \times 10^5$ 이후 두드러짐을 의미한다. 다만 용융 초기에는 용기 벽면을 타고 전달된 초음파 진동의 영향으로 인하여 고-액상 인터페이스의 위치, 즉 용융 양에 다소 차이가 나게 된다.

4.2 히터표면에서의 열전달계수

고-액상 경계면의 온도가 상변화 물질인 파라핀의 용융온도와 같다고 가정하면 히터표면에서 고-액상 경계면으로의 열전달계수는 다음식에 의해서 구해진다.

$$Nu = \frac{q''H}{K(T_h - T_f)} \quad (4)$$

Fig. 4는 무차원 시간인 $F_o Ste^*$ 에 대한 히터표면에서의 열전달 계수를 실험적으로 도시한 것이다. 여기서 $Ra^{*0.25}$ 는 자연대류가 발생할 경우 취해지는 일반적인 값이다(6). 본 연구에서는 등열유속조건을 가정했기 때문에 가열면의 온도는 용융이 끝날 때까지 계속 상승하게 된다. 따라서 Rayleigh수($g\beta\Delta TH^3 Pr/\nu^2$)는 변형 Rayleigh수($Ra^* = g\beta q'' H^4 Pr/K\nu^2$)로 정의된다.

Fig. 4에서 알 수 있는 것처럼 용융 초기에 열전달 계수가 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 것을 볼

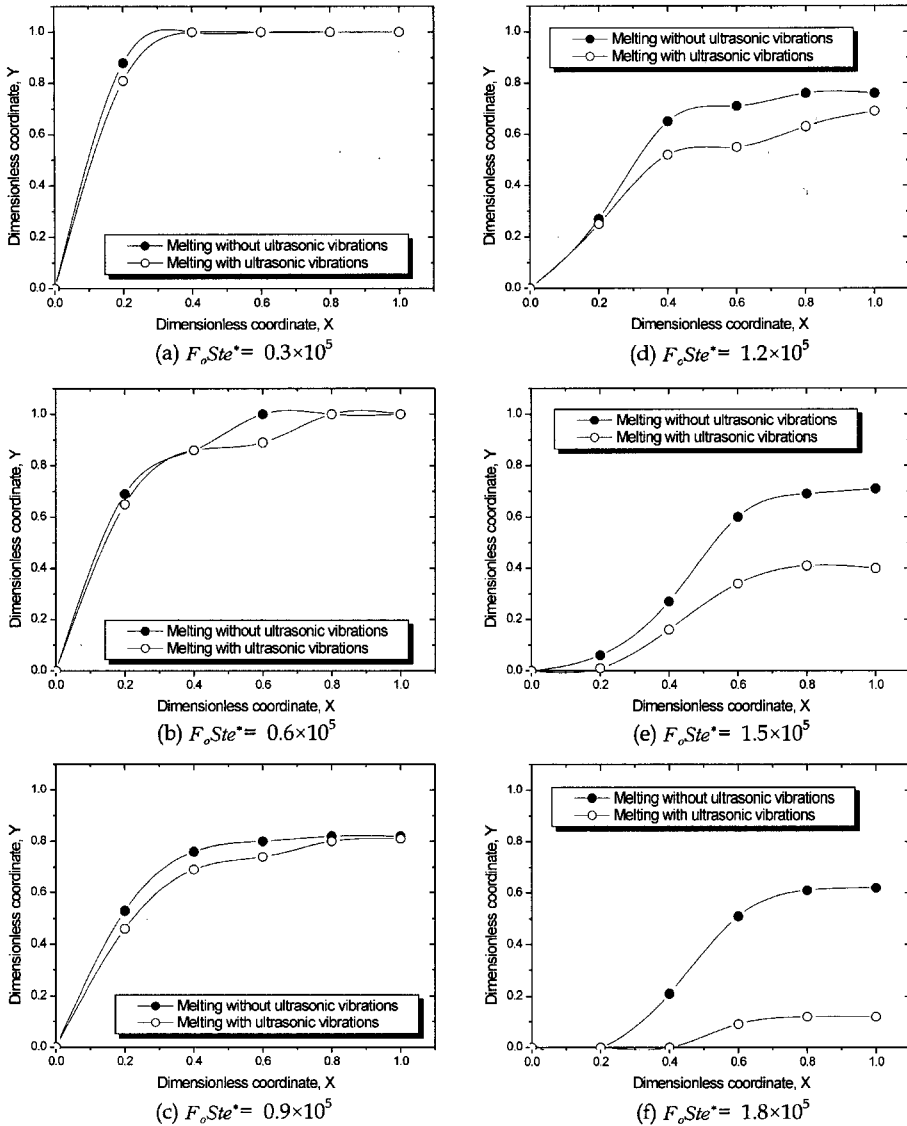


Fig. 3. Melting shape variation at $F_0 Ste^*$.

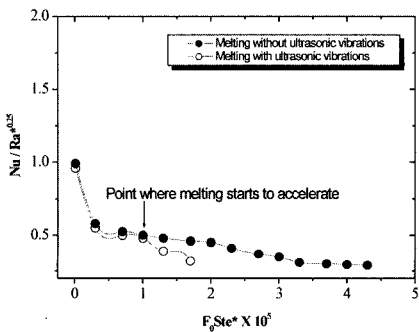


Fig. 4. Nusselt number variation on the heater surface with $F_0 Ste^*$.

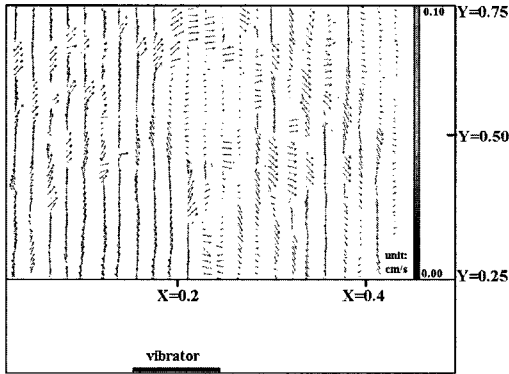
수 있다. 이는 용융 초기에 전도의 영향이 지배적이기 때문에 얇은 파라핀 층을 사이에 두고 고-액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하고 점차 액상층이 두터워짐에 따라 대류에 의한 열전달이 주를 이루기 때문이다. $F_0 Ste^* = 0.3 \times 10^5$ 이후 열전달계수의 감소 추이는 약화되는 점을 고려해 볼 때 이 지점부터 대류가 활성화됨을 예측할 수 있다. 하지만 각각의 열유속에 대해서 초음파 진동이 가진 경우, 히터표면에서의 열전달계수는 예상과 달리 자연용융의 경우에 비해 작고, $F_0 Ste^* = 0.9 \times 10^5$ 와 1.2×10^5 이후에는 더욱 감소한다. 이는 초음파 진동으로 액상영역에서

발생한 공동이 히터 표면에서 이탈하면서 가열면에서 마른 부분(Dry patch)이 형성되고 열전달 감소로 이어지기 때문이다. 실제로 Kirby 등⁽⁶⁾은 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액막의 증발이나 파괴에 따라 생성되는 마른 영역에서의 열전달 감소를 보고한 적 있다. 열전달률의 감소로 마른 부분의 가열면 온도는 상승하고 기포가 이탈할 때 마른 부분은 주위 액체에 의해 다시 적셔지며 전과정은 반복된다. 다시 말해서, 히터표면의 열전달계수는 히터표면에 형성되는 액막의 상태에 따라 영향을 받을 수 있으므로 초음파 진동과 같은 외적 요인이 열전달 프로세스에 가해질 경우, 히터표면의 열전달계수 조사만으로는 열전달 증진을 설명할 수 없다. 그러나 초음파 진동이 가진 될 경우 히터표면의 열전달 계수가 현저히 감소하기 시작하는 지점($F_0Ste^* = 0.9 \times 10^5, 1.2 \times 10^5$)은 4.1에서 언급한 용융이 급속히 이루어지기

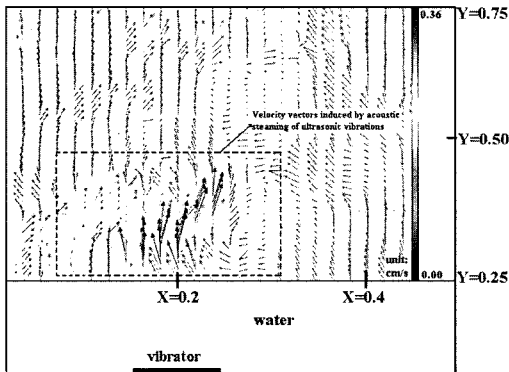
시작하는 지점과 일치한다. 곧 이 지점부터 초음파 진동의 가진으로 발생하는 물리적 요소가 열전달을 활성화 시킴을 의미한다.

4.3 상변화 물질의 액상영역에서의 열전달 촉진 요소

상변화 열전달 프로세스 중 초음파 진동으로 용융이 가속화되는 원인을 규명하기 위하여 Fig. 2의 가시창을 통해 초음파 가진 시 물리적 거동을 가시화 하였다. Fig. 5는 입자영상추적계를 이용하여 초음파가 가진 된 경우와 그렇지 않은 경우 액상영역에서 발생된 물리적 거동을 가시화 한 것이다. 초음파 진동의 가진 시 용기바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 acoustic streaming이 형성됨을 보여준다.(Fig. 5b). 반면 초음파 진동이 가진되지 않은 경우에는 부력으로 발생된 전형적인 자연대류의 흐름만이 발달된다(Fig. 5a). Ro 와 $Loh^{(7)}$ 는 공기로의 초음파 진동 방사를 통해 냉각 효과의 증진 즉, 열전달 계수의 향상을 규명한 바 있다. 이와 마찬가지로 액상에서의 초음파 진동 방사 또한 강한 음향 흐름(acoustic streaming)을 발생시켜 에너지 전달 효율을 증진시킨

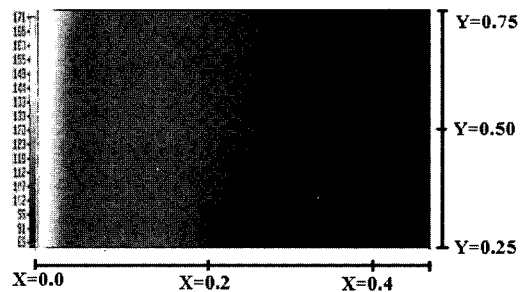


(a) Melting without ultrasonic vibration

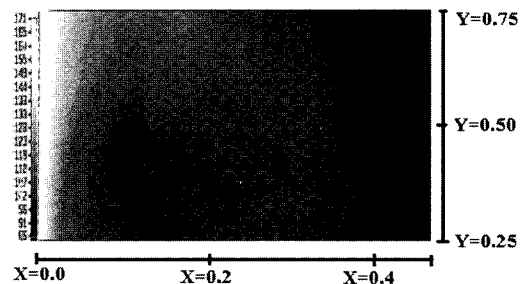


(b) Melting with ultrasonic vibrations

Fig. 5. Two dimensional velocity profiles measured at the visualization window for two cases: (a) melting without ultrasonic vibrations and (b) with the vibrations.



(a) Melting without ultrasonic vibration



(b) Melting with ultrasonic vibrations

Fig. 6. Comparison of thermal flow fields for two cases : (a) melting without ultrasonic vibrations and (b) with the vibrations.

다. Fig. 6는 열화상카메라를 사용하여 가시창 안쪽의 열흐름을 측정된 결과이다. Fig. 6 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 초음파 진동이 가진되지 않은 경우 한 쪽 벽면에 설치된 히터에서 가열된 파라핀(붉은색, 약 100~110°C)이 시계방향의 큰 타원을 형성하면서 비교적 온도가 낮은 파라핀(파란색, 약 80~85°C)쪽으로 에너지를 공급하는 것을 볼 수 있다. 즉, 밀도차로 발생하는 시계방향의 부양성 유도대류를 관찰할 수 있다. 이는 Fig. 5 (a)의 입자영상추적 결과와도 잘 일치한다. 하지만 초음파 진동을 가진할 경우 강한 음향흐름으로 인하여 열유동(thermally-oscillating flow)이 발달되고(Fig. 6b) 이로 인하여 열전달은 촉진된다.

5. 결 론

본 연구에서는 상변화 물질의 자연 용융상태와 자연 용융상태에 초음파 진동을 가하여 상변화 물질의 용융시 열전달 현상과 상변화 과정을 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 액상 영역에 초음파 진동 가진을 통하여 용융을 촉진시킬 수 있다.

(2) 초음파 진동이 가해진 경우 액상에서 발생하는 공동현상(Cavitation)으로 인하여 히터표면의 열전달 계수를 조사하는 기존의 방법으로는 용융 촉진의 원인을 규명할 수 없다.

(3) 액상 파라핀에 초음파 진동을 가진하면 강한 유체흐름인 acoustic streaming이 발생하여 열전달을 촉진시킨다.

(4) 초음파 진동을 가진하여 용융시킬 경우 히터에만 의존하여 용융시킬 때 보다 약 2.2Wh 정도 소비 전력량면에서 에너지를 절감할 수 있다.

참고문헌

- 1) Cho, S. H. and Sunderland, J. E., 1969, "Heat conduction Problems with Melting or Freezing," *Journal of Heat Transfer.*, pp. 125-131.
- 2) Gau, C. and Viskanta, R., 1986, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall," *Journal of Heat Transfer.*, pp. 204-209.
- 3) Chung, I. K., Kim, J. S. and Song, D. J., 1993, "Natural Convective Flow and Heat Transfer in a Square Enclosure with a Horizontal Partition," *Journal of KSME.*, Vol. 17, No. 9, pp. 2304-2314.
- 4) Park, S. H., 2001, "Effect of Ultrasonic Vibrations on Phase Change Heat Transfer," M.S. Thesis, Chosun University.
- 5) Ho, C. J. and Viskanta, R., 1986, "Heat-Transfer During Melting from the Isothermal Vertical Wall," *Journal of Heat Transfer*, 108, pp. 203-209.
- 6) Kirby, J. G., Stainforth, R. and Kinner, L. H., 1967, "A Visual Study of Forced Convective Boiling Part II, AEEW-R506".
- 7) Ro, P. I. and Loh, B. G., 2001, "Feasibility of Using Ultrasonic Flexural Waves as a Cooling Mechanism," *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 48(1), pp. 143-150.