

음향 흐름에 의한 고-액 상변화 열전달의 촉진

박설현 · 오윤권[†]

조선대학교 기계공학부

Acoustic Enhancement of Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer

Seul-Hyun Park and Yool-Kwon Oh[†]

School of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Abstract — The present paper investigated the effect of ultrasonic vibrations on the melting process of phase-change materials (PCM). Furthermore, the present study considered constant heat-flux boundary condition, whereas many of the previous researches had adopted constant wall-temperature condition. The results of the present study revealed that ultrasonic vibrations accompanied the effects like acoustic streaming, cavitation, and thermally-oscillating flow. Such effects are a prime mechanism in the overall melting process when ultrasonic vibrations are applied. They speed up the melting process as much as 2.5 times, compared with the result of natural melting. Also, energy can be saved by applying ultrasonic vibrations to the natural melting. In addition, temperature and Nusselt numbers over time provided a conclusive evidence of the important role of ultrasonic vibrations on the melting phenomena.

1. 서 론

상변화는 대표적인 이동 경계의 문제이다. 열전달 문제에서 상변화란 열전달 프로세스 중 어떤 물질이 하나의 상태에서 다른 상태로 변화하는 과정을 말한다. 대다수의 고-액 상변화 열전달 문제는 전도와 대류의 현상을 포함하고 있으며 일반적으로 상변화 과정 중 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 응용 분야로는 잠열을 이용한 에너지 저장분야와 구조 공정 분야, 플라스틱 금형의 사출 분야, 금속의 용접 및 제련 분야, 반도체의 결정 성장 등이 있다. 그러나 대부분의 연구가 자연대류의 관점에서 상변화 물질의 축열, 응고 과정 등에 국한되고 있는 실정이다. 또한 열전달을 촉진시키기 위한 방법으로는 Rayleigh수의 증감이나 밀폐 용기에 수직 또는 수평격판을 설치하여 진동유동을 유발시키는 정도에 머물러 있다^[1]. 따라서 본 연구에서는 단열된 정사각형 용기에서 상변화 물질(phase change material, PCM)인 파라핀에 일정량의 열유속(heat flux)을 가하여 고-액상 경계면이 존재하는 열전달 프로세스

를 구성하고 용융 과정을 고찰해 보고자 한다. 또한 초음파 진동을 열전달 프로세스에 가하여 열전달 증진 원인을 실험적으로 규명해 보고자 한다.

2. 이론해석

2-1. 해석모델

고상 파라핀을 채운 정사각형 용기의 한 쪽 벽면에서 일정량의 열유속을 가하게 되면 열량은 액상 파라핀을 거쳐 고상 파라핀에 전달되며 따라서 고-액상 경계면이 존재하는 용융이 일어나게 된다. 이때 가열된 히터 주위의 액상 파라핀은 밀도가 낮아져 상승하게 되고 고상 파라핀에 열을 빼앗겨 다시 하강하게 된다. 즉, 초기온도에서 상변화 시점까지 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점 이후 액상 파라핀내의 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어지게 된다. Fig. 1은 본 연구에서 채택한 고-액상 경계면이 존재하는 상변화 물질의 열전달 모델이다. Fig. 1에서 X, Y는 각각 무차원화된 좌표이며, 초음파 가진시 액상 파라핀에서 일어나는 물리적 현상을 관찰하기 위해 가시창(visualization window)을 설치하였다.

2-2. 액-고상 경계면의 위치 결정 이론

Ho와 Viskanta^[2]은 소위 이동하는 고-액상 경계면의 위

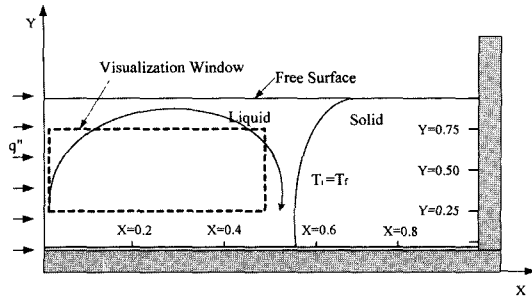


Fig. 1. Two dimensional model for a melting procedure.

치결정에 관한 이론식을 다음과 같이 제시하였다.

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

여기서 Γ 는 고액상 경계면의 위치를 의미하는 무차원 파라미터이며 X, Y 는 특성길이(H)와 해당좌표로 정의되는 무차원좌표이다. 또한 θ 는 무차원 온도 파라미터이며, F_0 는 Fourier수를 의미한다. 이 식의 기본적인 가열조건은 일정한 벽면 온도 조건(constant wall temperature condition)이다. 그러나 본 연구에서는 일정한 열유속 조건(constant heat flux condition)을 채택했기 때문에 가열면의 온도는 용융이 끝날 때까지 계속 상승하게 된다. 따라서 식 (1)의 Stefan수($C_p \Delta T / \Delta h_f$)에서 $\Delta T (=T_s - T_l)$ 를 구하기 힘들어진다. 그러므로 본 연구에서는 $\Delta T = q'' H / K$ 를 이용하여 변형 Stefan수를 다음과 같이 정의하였다.

$$Ste^* = \frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f} \quad (2)$$

결국 식 (1)은 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_0} = -Ste^* \frac{\partial \theta}{\partial X} \left\{ 1 + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial Y} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

3. 실험장치 및 실험절차

상변화 물질(PCM)로는 용융점이 53.2°C인 파라핀(n-octadecane)을 사용하였으며 그 물성치는 Table 1에 정리되어있다. 파라핀을 상변화 물질로 선정한 이유로는 첫째 가격이 저렴하고 쉽게 구할 수 있기 때문이다. 반면에 정제된 파라핀의 일종인 헥사디케인이나 테트라테케인은 국내에서 구하기 힘들뿐더러 가격도 매우 비싸다. 둘째 파라핀은 용융온도가 상온보다 높아서 실험에 적

Table 1. Thermophysical properties of paraffin.

Properties	Value
Melting temperature	53.2°C
Thermal conductivity	0.210 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

합하고 상변화가 안정적으로 이루지기 때문이다.

Fig. 2에서처럼 가로, 세로길이가 각각 12.5 cm인 정사각형 용융용기를 지름이 6 cm인 원형의 초음파 진동자 4 개가 바닥에 장착되어 있는 보조 용기에 물을 채워 넣은 뒤 끼워 넣었다. 이는 용융 초기에 초음파 진동이 고상 파라핀에 바로 가진 될 경우 전기 부하에 의해 진동자가 파손되는 것을 막기 위함이다. 한쪽 벽면에는 220 V~800 W의 전기판히터가 장착되어있어 정전압공급장치(automatic voltage regulator, AVR)로부터 일정한 열유속(6433.13 W/m²)을 용융이 지속되는 동안 공급받는다. 일정한 열유속 경계조건은 ±20%의 입력전압

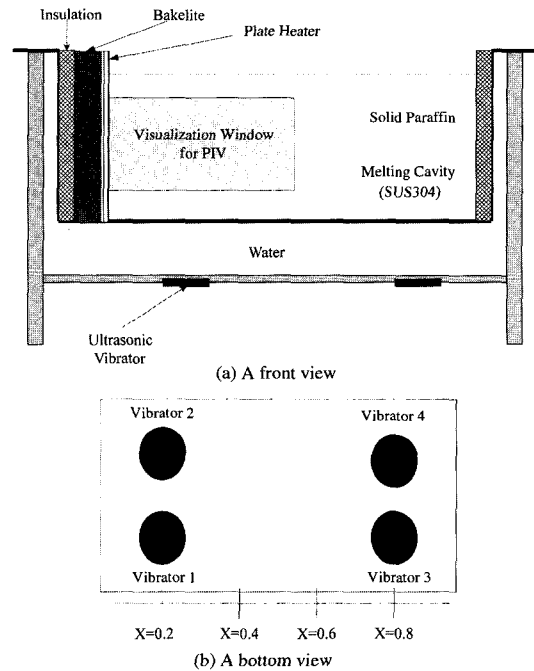


Fig. 2. Schematic diagram of (a) the present test section consisting of melting cavity and water chamber and (b) the positions of two pairs of ultrasonic vibrators ($X=0.2$ and 0.8).

의 변동에도 $\pm 1\%$ 의 오차로 출력전압을 유지할 수 있는 정전압 공급장치에 의해 획득되었다. 용융과정 중 상 변화물질의 온도를 측정하기 위하여 K-type의 열전대를 미리 선정한 위치($X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 와 $Y=0.5$, Fig. 1 참조)에 설치하였다. 열전대에서 측정된 온도 분포는 데이터획득장치(A/D Controller)에 의해 매 1분마다 PC에 기록되었다. 또한 정확한 온도 데이터 획득을 위하여, 실험 전에 모든 열전대는 보정되었으며 동일 조건 하에서 3번의 용융을 실시하여 평균 온도를 사용하였다. 히터에서 실측된 온도와 히터 평균 온도 차이는 최대 5°C 이었으며, 상변화 물질의 경우는 최대 3°C 였다. 용융용기는 스티로폼과 석면 그리고 베이크라이트 순으로 바닥을 제외한 모든 면이 단열되어있고, 용기의 윗면은 용융현상을 관찰할 수 있도록 Pyrex glass를 사용하여 열손실을 최소화하였다. 초음파 주파수 발생장치에서 발생된 40 kHz의 주파수는 오실로스코프에서 모니터링된 후 진동자에 전달되어 기계적에너지로 변환된다. 초음파 진동 가진 액상영역에서 물리적 거동을 확인하기 위해 입자영상추적기(particle image velocimetry, PIV)와 열화상카메라(thermal infrared camera)를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다.

3. 실험 결과

3-1. 무차원 시간($F_0\text{Ste}^*$)에 따른 액-고상 경계면의 위치
상이한 조건의 여러 결과를 비교하기 위해 Fourier수와 변형 Stefan수를 곱하여 무차원 시간으로 표시하였다. 이런 방식으로 시간을 설정하면 특성높이(Fourier수)와 고액상의 열전달 추진력(Stefan수)에 무관한 무차원 파라

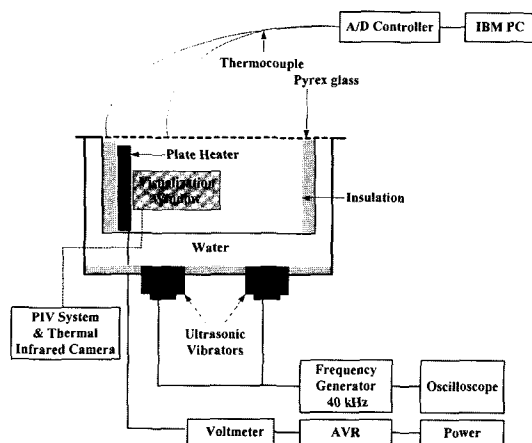


Fig. 3. Schematic diagram for the experimental set-up.

미터가 설정된다^[1]. 초음파 진동이 가해지지 않은 자연 용융의 경우, 식 (3)은 유한차분법(finite difference method, FDM)이나 유한 요소법(finite element method, FEM) 등을 사용하여 수치적 해법으로 결과가 구해 질 수 있다. 하지만 초음파 진동이 가해진 경우 수학적 모델링의 어려움과 심화 연구를 위하여 수치해석 과정은 생략하고 실험적 결과만을 도시하였다(Fig. 4).

Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼, $F_0\text{Ste}^*=0.3 \times 10^5$ 이전에는 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 용융 비율에는 큰 차이가 없다. 그러나 $F_0\text{Ste}^*=0.9 \times 10^5$ 이후 대부분의 용융이 이루어진다. 이는 용융에 대한 초음파 진동의 영향은 $F_0\text{Ste}^*=0.9 \times 10^5$ 이후 두드러짐을 의미한다.

3-2. 히터표면에서의 열전달계수

고액상 경계면의 온도가 상변화 물질인 파라핀의 용융온도와 같다고 가정하면 히터표면에서 고액상 경계면으로의 열전달계수는 식 (4)에 의해서 구해진다.

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

식 (4)에서 H 는 파라핀의 특성 높이(Characteristic height)를 나타내며, K 는 파라핀의 열전도율이다. 또한 q'' 는 본 실험에서 주어진 열유속(6433.13 W/m^2)이고 T_h 와 T_f 는 각각 히터표면의 온도와 파라핀의 용융 온도를 나타낸다.

Fig. 5는 무차원 시간인 $F_0\text{Ste}^*$ 에 대한 히터표면에서의 열전달계수를 도시한 것이다. Fig. 5에서 $\text{Nu}/\text{Ra}^{0.25}$ 는 자연대류가 발생할 경우 적용되는 일반적인 값이다^[5]. 또한 2.2절에서 언급한 것처럼, 본 연구에서는 일정한 열유속 조건을 가정했기 때문에 가열면의 온도는 용융이 끝날 때까지 계속 상승하게 된다. 따라서 Rayleigh수($g\beta\Delta T H^3 \text{Pr}/\nu^2$)는 변형 Rayleigh수(Ra^* , $g\beta q'' H^4 \text{Pr}/K\nu^2$)로 치환된다.

Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼, 용융 초기에 열전달계수는 급격히 감소하다가 차츰 서서히 감소한다. 이는 용융 초기에 전도($F_0\text{Ste}^* < 0.3 \times 10^5$)의 영향이 지배적이기 때문에 얇은 파라핀 층을 사이에 두고 고액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하고 점차 액상 층이 두터워짐에 따라 대류에 의한 열전달이 주를 이루기 때문이다. 그리고 초음파 진동이 가해진 경우, 히터표면에서의 열전달 계수는 예상과 달리 자연용융에 비해 작고, $F_0\text{Ste}^* = 0.9 \times 10^5$ 이후에는 더욱 감소한다. 이는 초음파 진동으로 액상영역에 발생한 공동이 히터 표면에서 이탈하면서 가열면에 마른 부분(dry patch)을 형성하고 열전달 감소로 이어지기 때문이다. 실제로 Kirby 등^[6]은 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액체막이 증

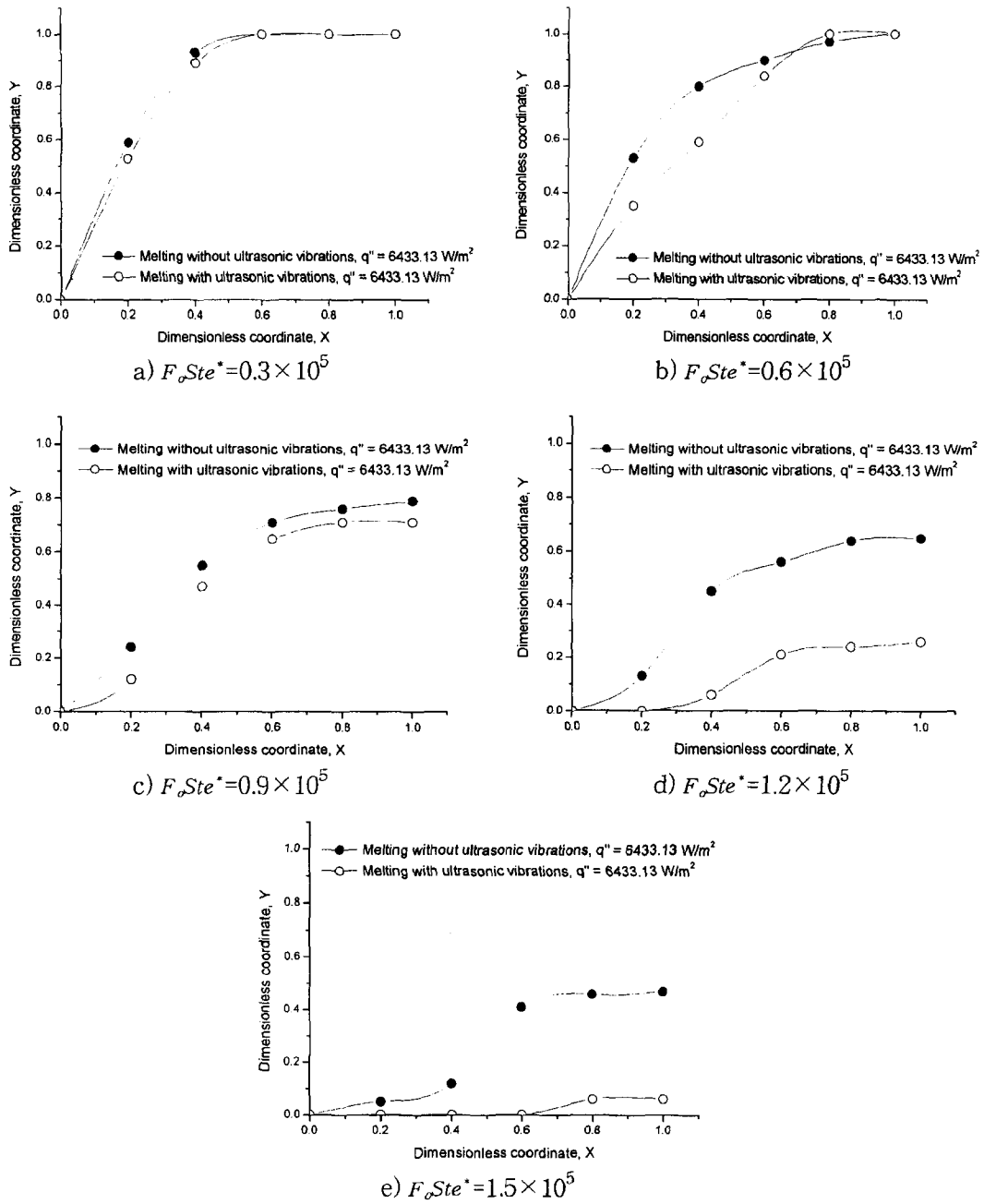


Fig. 4. Locations of liquid-solid interface with $F_0 Ste^*$.

발함에 따라 생성되는 마른 영역에서의 열전달 감소를 보고한 바 있다. 즉, 히터표면에서 열전달 계수의 조사만으로 액상에서의 열전달 향상을 설명할 수 없다. 그러나 초음파 진동 가진 시 히터표면의 열전달 계수가 현저히 감소하기 시작하는 지점($F_0 Ste^* = 0.9 \times 10^5$)은 3.1절

에서 언급한 용융이 급속히 이루어지기 시작하는 지점과 일치한다. 전도의 영향이 두드러지는 $F_0 Ste^* = 0.3 \times 10^5$ 이전에는 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 용융 비율에는 큰 차이가 없다. 하지만 이 지점 이후, 자연대류의 발달과 함께 용융 비율의 차이를

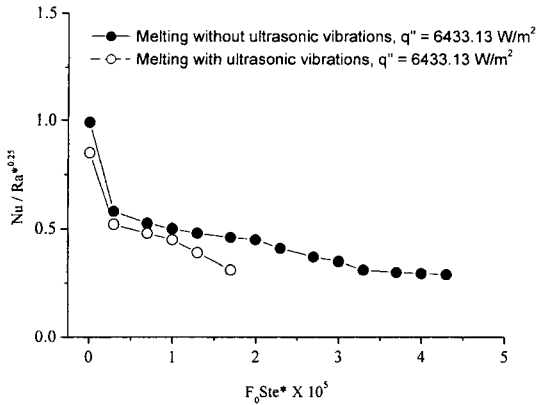


Fig. 5. Nusselt variations on a heater surface with respect to $F_0 Ste^*$.

보이다가 $F_0 Ste^* = 0.9 \times 10^5$ 이후에 용융이 급속하게 촉진된다. 이는 초음파 진동으로 생성된 압력파가 용융용기에 물을 통해 전달될 때 전도영역($F_0 Ste^* < 0.3 \times 10^5$)에서는 액상 파라핀보다 고상 파라핀이 더 많은 영역을 차지하고 있어 초음파 진동으로 인해 발생하는 물리적 거동이 활성화되지 않기 때문이다. 그러나 자연대류가 발달되기 시작($F_0 Ste^* > 0.3 \times 10^5$)하면서 액상 영역이 확장되고 용융용기의 바닥을 덮고 있는 파라핀의 두께가 얇아지면서 초음파 진동으로 인한 물리적 거동이 활성화되어 $F_0 Ste^* = 0.9 \times 10^5$ 이후에 용융이 더욱 촉진된다. 이는 곧 초음파 진동에 의해 발생하는 공동현상은 히터표면의 열전달 계수를 감소시키나, 공동현상과 함께 발생하는 다른 요소가 용융을 촉진시킴을 의미한다.

3.3. 상변화 물질의 액상영역에서의 열전달 촉진 요소

Fig. 6에서는 액상의 열전달 촉진여부를 확인해 보기 위해 용융시간에 대한 완전 용융시간의 비를 의미하는 무차원 시간(τ)에 대해 온도분포를 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 측정 지점($X=0.2, Y=0.5$)에서 초음파 진동이 가진 될 경우 자연 용융시보다 파라핀의 온도가 15~20°C 더 낮게 형성된다. 이러한 경향은 거의 모든 지점에서 관측되었으며 이는 초음파가 가진 될 경우 액상영역에서 열전달 계수의 향상을 의미한다.

액상에서의 열전달 상승 요인을 알아보기 위하여 Fig. 1의 가시창을 통해 초음파 가진 시 액상 파라핀에서 일어나는 물리적 거동을 관찰해 보았다. 물리적 거동은 입자영상추적계와 열화상카메라의 측정결과를 통해 분석되었다. 정확한 측정결과를 위하여 액상파라핀 영역이 충분히 발달된 $F_0 Ste^* = 1.2 \times 10^5$ 이후 물리적 거동을 가시화하였다. 우선 입자추적을 위해 입자(particle)로 직경 12 μm 의 나일론12를 사용하였다. 아르곤 가시광 레이저(최대

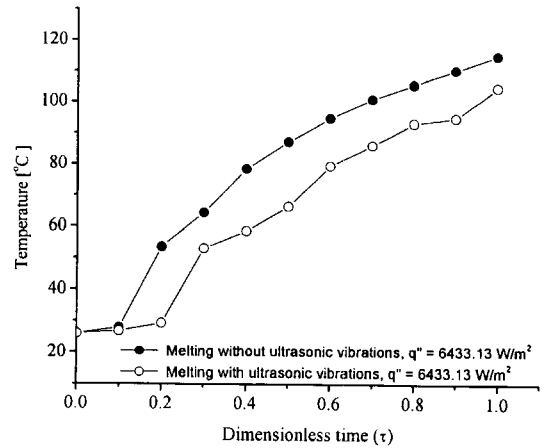


Fig. 6. Temperature history of PCM measured at $X=0.2$ and $Y=0.5$ against normalized time (τ).

7 W)를 사용하여 용융용기에 2차원 검사단면을 생성시키고 고속카메라(최대 240 pps, 640×240 pixel)를 가시광 레이저와 수직방향으로 설치하여 입자의 경로를 기록하였다. 이미지보드의 화상처리 과정(digital image processing)중 입자 경로의 해석을 위해 가장 널리 사용되는 상호상관알고리즘^[6]을 도입하였다.

Fig. 7은 입자영상추적계를 이용하여 초음파가 가진 된 경우와 그렇지 않은 경우 액상영역에서 발생한 물리적 거동을 가시화 한 것이다. 초음파 진동의 가진 시 진동자 부근에서 최대 3.8 cm/sec의 강한 유체의 흐름이 발생됨을 보여 주고 있다(Fig. 7b). 그러나 초음파 진동이 가진되지 않은 경우에는 비교적 느린 속도의 자연대류만이 관측되었다(Fig. 7a). Ro 와 Loh ^[7]는 공기의 초음파 진동 방식을 통해 냉각 효과의 증진 즉, 열전달 계수의 향상을 규명한 바 있다. 이와 마찬가지로 액상으로의 초음파 진동 방식은 강한 음향 흐름(acoustic streaming)을 발생시켜 에너지 전달 효율을 증진시킨다.

Fig. 8은 열화상카메라를 사용하여 가시창 안쪽의 열흐름을 측정된 결과이다. Fig. 8a)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. 7a)의 입자영상추적의 결과와도 잘 일치한다. 하지만 초음파 진동을 가진 할 경우 강한 음향흐름으로 인하여 열유동(thermally-oscillating flow)이 발달된다(Fig. 8b).

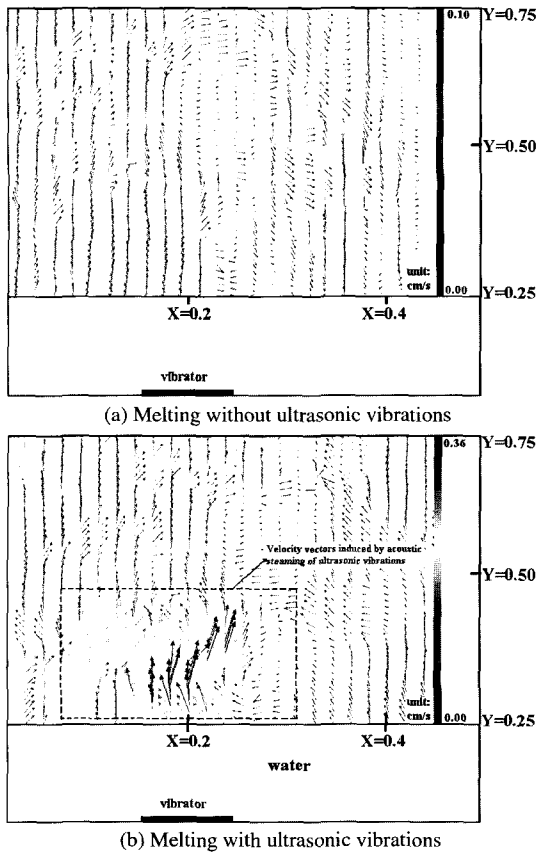


Fig. 7. Two dimensional velocity profiles measured at the visualization window for two cases: (a) melting without ultrasonic vibrations and (b) with the vibrations.

3.4. 초음파 가진 용융시와 자연 용융시의 소모 전력량 비교

전력량계를 사용하여 자연 용융 시 소비된 전력량과 초음파 가진 용융 시 소비된 전력량을 측정하였다. 자연 용융의 경우에는 순수 히터에서만 소비된 전력량을 측정하였고 초음파 가진 용융의 경우에는 히터에서 소비된 전력량과 초음파를 발생시켜 진동자를 구동시키는 초음파 진동 발생장치에서의 전력량을 동시에 측정하였다. 측정결과(Table 2) 초음파 가진 용융의 경우가 자연용

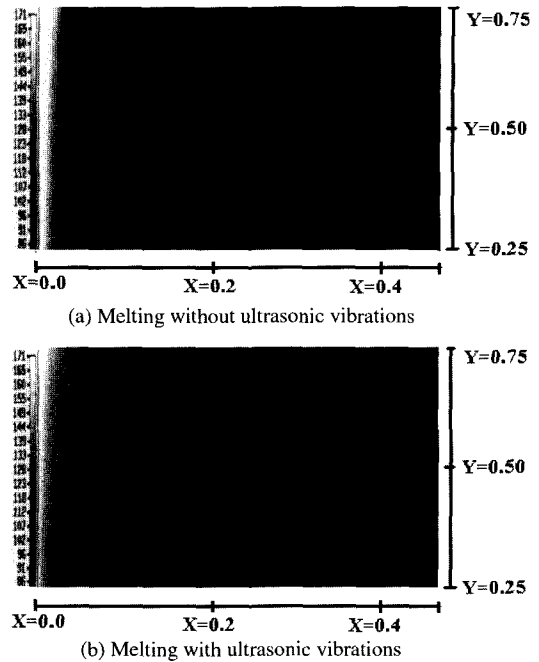


Fig. 8. Comparison of flow fields for two cases: (a) melting without ultrasonic vibrations and (b) with the vibrations.

융의 경우 보다 약 3 Wh 정도 소비 전력량면에서 유리하다. 그러나 초음파 진동을 물을 통해서 용융 용기에 간접전달했기 때문에(Fig. 2 참조) 소비 전력량 절감이 기대치 보다는 적게 나타난 것으로 추측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 상변화 물질의 자연 용융상태와 자연 용융상태에 초음파 진동을 가하여 상변화 과정을 살펴 보고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 상변화물질의 액상 영역에 초음파 진동 가동을 통하여 용융을 촉진 시킬 수 있다.
- 2) 초음파 진동이 가해진 경우 액상에서 발생하는 공동현상때문에 히터표면의 열전달계수를 조사하는 기존의 방법으로는 용융 촉진의 원인을 규명할 수 없다.

Table 2. Total consumed electricity for a melting process.

Heat flux (W/m ²)	Heater (Wh)	Ultrasonic generator (Wh)	Total	Melting time (Min.)
6433.13 (Melting without ultrasonic vibrations)	444.6	-	444.6	275
6433.13 (Melting with ultrasonic vibrations)	152.0	289.8	441.8	94

3) 용융 시 액상영역에의 열전달 향상 원인(acoustic streaming)을 규명하였다.

4) 초음파 진동을 가진 하여 용융시킬 경우 히터에만 의존하여 용융시킬 때 보다 에너지를 더 절감할 수 있다.

하첨자

f : 용융상태
h : 히터표면
l : 액상영역

사용기호

Δh_f : 잠열 [kJ/kg]
s : 고-액상 인터페이스의 위치
t : 시간 [hour]
g : 중력가속도 [m/sec²]
q" : Heat Flux(열유속) [W/m²]
C_p : 열용량 [kJ/kg · K]
H : 파이프의 높이(특성길이) [cm]
K : 액상파이프의 열전도율 [W/m · K]
T : 온도 [°C]
X, Y: 무차원 직교좌표
F_o : Fourier 수 [$\alpha t/H^2$]
Nu : Nusselt 수 [$q"H/\Delta T K$]
Ra : Rayleigh 수 [$g\beta\Delta T H^3 Pr/\nu^2$]
Ra* : 변형 Rayleigh 수 [$g\beta q"H^4 Pr/K\nu^2$]
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]
 α : 열확산율
 β : 열체적팽창계수
 θ : 무차원온도 [$T-T_b/T_b-T_b$]
 ν : 동점성계수

인용문헌

1. Seul H. Park: "Effect of Ultrasonic Vibrations on Phase Change Heat Transfer", M.S. thesis, Chosun University. Gwangju Korea (2000).
2. Ho, C.J. and Viskanta, R.: "Heat-Transfer During Melting from the Isothermal Vertical Wall", J. of Heat Transfer, 108, pp. 204-209 (1986).
3. Hong, C.S.: "Studies on Heat Storing and Retrieving Characteristics in a Paraffin-Filled Horizontal Circular Tube", Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul Korea (1990).
4. Okada, M.: "Analysis of heat transfer during melting from a vertical wall", Int. J. Heat Mass Transfer, 27(11), pp. 2057-2064 (1984).
5. Kirby, J.G., Stainforth, R. and Kinnier, L.H.: "A Visual Study of Forced Convective Boiling Part II", AEEW-R506 (1967).
6. Lee, D.G.: "A Study on the Flow Characteristics in Dividing Rectangular Duct by using PIV and CFD", M.S. Thesis, Chosun University (2002).
7. Paul I. Ro and Byoung G. Loh: "Feasibility of Using Ultrasonic Flexural Waves as a Cooling Mechanism", IEEE Transactions on Industrial Electronics 48(1), pp. 143-150 (2001).