

## 액상용기에서 초음파에 의한 열전달촉진

강원종\* · 오을권\*\*

### Enhancement of heat transfer in the liquid bath by ultrasound

Won-Jong Kang\*, Yool-Kwon Oh\*\*

**Key Words :** *Ultrasonic Vibration(초음파진동), Phase-change heat transfer (상변화열전달), Acoustic streaming(음향흐름)*

#### Abstract

The present paper investigated the effect of ultrasonic vibrations on the melting process of a phase-change material (PCM). Furthermore, the present study considered constant heat-flux boundary conditions unlike many of the previous researches, which had adopted constant wall-temperature conditions. Therefore in the study, modified dimensionless numbers such as Stefan and Rayleigh were adopted to represent heat transfer results. The experimental results revealed that ultrasonic vibrations accompanied the effects like agitation, acoustic streaming, cavitation, and oscillating fluid motion, accelerating the melting process as much as 2.5 times, compared with the result of natural melting (i. e., the case without ultrasonic vibration). Such effects are believed to be a prime mechanism in the overall melting process when ultrasonic vibrations were applied. Subsequently, energy could be saved by applying the ultrasonic vibrations to the natural melting. In addition, various time-wise dimensionless numbers provided a conclusive evidence of the important role of the ultrasonic vibrations on the melting phenomena of the PCM.

#### 1. 서론

대다수의 고-액 상변화 열전달 문제는 전도와 대류의 현상을 포함하고 있다. 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 저장분야와 주조 공정 분야, 플라스틱 급형의 사출 분야, 금속의 용접 및 제련 분야, 반도체의 결정 성장 등이 있다. Cho와 Sunderland[1]은 용융이나 응고현상에 포함된 열전도 문제에 대해 연구했으며, Gau와 Viskanta[2]은 금속을 이용해서 열전달계수와 용융속도를 측정하였고 Rayleigh수, Stefan수, Nusselt수와 같은 무차원 파라미터를 사용하여 열전달 상관식을 구하였다. 하지만 이러한 연구들[1-2]은 전도 또는 자연대류열전달에 초점이 맞추어져 있다. 밀폐용기 또는 관로에서 온도 조건 변화에 의해 형성되는 자연대류 혹은 기타 강제대류에 의한 열전달 현상은 그동안 실험이나 수치계산을 통해 많은 연구가 이루어져 왔다[3]. 온도차가 주어졌을 때의 자연대류현상은 연료저장장치, 이중유리창, 건물의 내부 등에서 열손실을 파악하는데 많은 도움을 주고 있다. 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 메커니즘이 필요하다. 그러나 효율적인 강제대류의 메커니즘의 대안으로 국내외적으로 제시되고 있는 방법으로서, 수직 수평 격판을 사용한 강제 대류의 형성이나 가열부 표면의 거칠기를 조정하는 방법[4]에 국한되어 있다. 더욱이 본 연구에서 열전달 향상을 위해 적용하고자 하는 초음파 진동의 활용은 이미 컷팅이나 용접, 세척 분야에서 그 우수성이 인정되고 있으나 이를 활용한 열전달 향상에 관한 연구는 미비한 실정이다[5]. 본 연구에서는 상변화물질인 파라핀에 일정량의 열유속(Heat flux)을 가하여 고-액상 경계면이 존재하는 열전달 프로세스를 구성하고, 용융 과정을 고찰해 보고자 한다. 또한 초음파 진동을 열전달 프로세스에 가하여 상관관계를 통해 열전달 증진 원인을 규명해 보고자 한다.

#### 2. 해석모델

Viskanta 등[6]은 소위 이동하는 고-액상 경계면의 추적에 관한 이론식과 2차원의 용융모델을 제시한바 있다.

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

식(1)의 Fourier수와 Stefan수는 용융현상을 표현하는데 중요한 수이다. 가열부의 벽면의 온도가 일정하므로 본 실험에서는

\* 조선대학교 교육대학원, main0120@hanmail.net

\*\* 조선대학교 기계공학부, ygoh@mail.chosun.ac.kr

Heat flux의 온도가 일정히 상승하게 되므로 열유속을 포함하는 항( $\Delta T = \frac{q''H}{K}$ )으로 치환하여 식(2)와 같이 Stefan수를 변형하였다.

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

결국 식(1)로부터 고-액상의 인터페이스 위치를 다시 정의해보면, 식(3)으로 나타낼수 있다.

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

### 3. 실험장치 및 실험방법

상변화물질로는 녹는점이 53.2 °C인 파라핀을 선택하였고 그림 1에서와 같이 실험장치는 외부탱크와 내부용기로 구성되었다. 파라핀으로 채워진 내부용기는 물로 채워진 외부탱크안에 설치되어 있으며, 외부탱크내의 물은 초음파진동자가 작동하기 시작하였을때 고체 파라핀의 영역에 초음파방사로 인하여 발생할 수 있는 전기과부하로부터 초음파진동자를 보호하기 위하여 사용되었다. 또한 실험중 진동자 가열로 인하여 발생하는 열전도의 영향을 최소화 시킬수 있다. 내부 용기는 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 가로, 세로길이가 각각 12.5 cm인 정사각형으로 제작되었으며, 스티로폼육과 석면 그리고 베이클라이트 순으로 바닥을 제외한 모든 면이 단열되었다. 한쪽 벽면에 220V-800W의 전기 판히터가 장착되어있어 정전압공급장치(AVR)에서 발생된 정전압을 이용하여 용융이 지속되는 동안 일정한 열유속( $q'' = 5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$ )을 공급하였다.

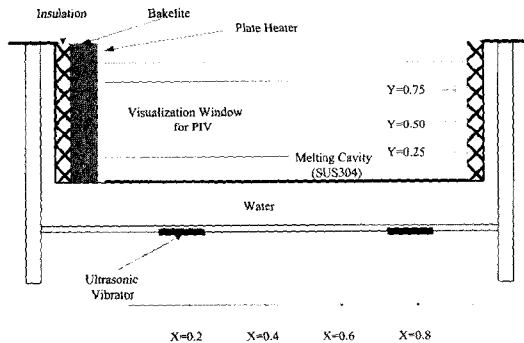


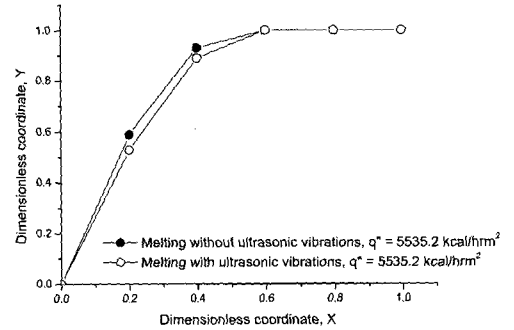
Fig. 1 Schematic diagram of test section

### 4. 실험결과

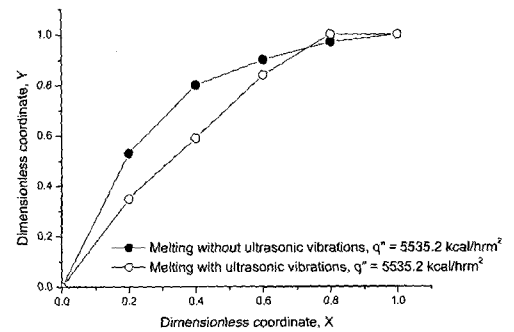
#### 4.1 무차원시간 ( $F_o Ste^*$ )에 따른 고-액상 경계면의 위치

그림 2는 자연 용융과 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 띠고 있다. 이는 히터표면을 따라 가열된 액상파라핀이 자유면(Free surface)에 이르러 최고온도에 달하고 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼앗겨 가는 자연대류의 흐름 때문에 발생된다. 그림 2에서 볼 수 있는 것처럼 열유속 ( $q''=5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$ )이 주어진 경우  $F_o Ste^*=0.9 \times 10^5$  이전

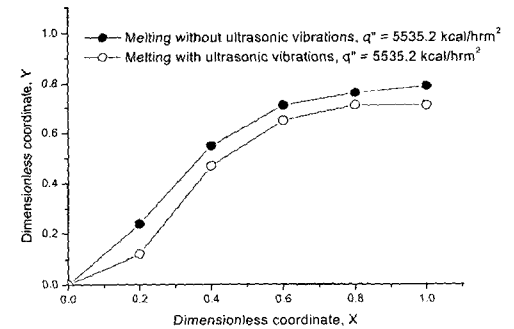
에는 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 용융 비율이 큰 차이가 없으나  $F_o Ste^*=0.9 \times 10^5$  이후 용융이 급속히 가속화되어 대부분의 용융이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 초음파와 진동의 영향은 열유속( $q''=5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$ )에서  $F_o Ste^*=0.9 \times 10^5$ 와  $F_o Ste^*=1.2 \times 10^5$  이후 각각 두드러짐을 의미한다.



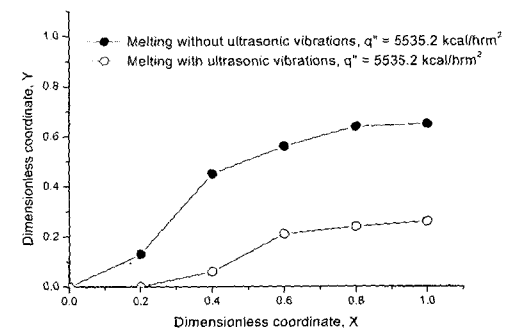
(a)  $F_o Ste^*=0.3 \times 10^5$



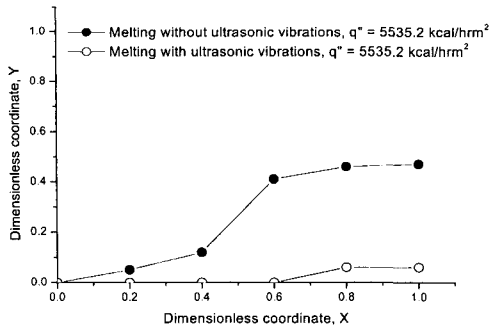
(b)  $F_o Ste^*=0.6 \times 10^5$



(c)  $F_o Ste^*=0.9 \times 10^5$



(d)  $F_o Ste^*=1.2 \times 10^5$



(a)  $F_oSte^*=1.5 \times 10^5$

Fig. 2 Melting shape variation in sequence of  $F_oSte^*$

#### 4.2 히터표면에서의 열전달계수

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

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

그림 3은 무차원 시간인  $F_oSte^*$ 에 대한 히터표면에서의 열전달 계수를 실험적으로 도기한 것이다. 여기서  $Ra^{0.25}$ 는 자연대류가 발생할 경우 취해지는 일반적인 값이다[7]. 본 연구에서는 일정한 열유속 조건을 가정했기 때문에 가열면의 온도는 용융이 끝날 때까지 계속 상승하게 된다. 따라서 Rayleigh수 ( $\frac{g\beta\Delta TH^3Pr}{\nu^2}$ )는 변형 Rayleigh수( $Ra^*$ ,  $\frac{g\beta q'' H^4 Pr}{K\nu^2}$ )로 정의된다.

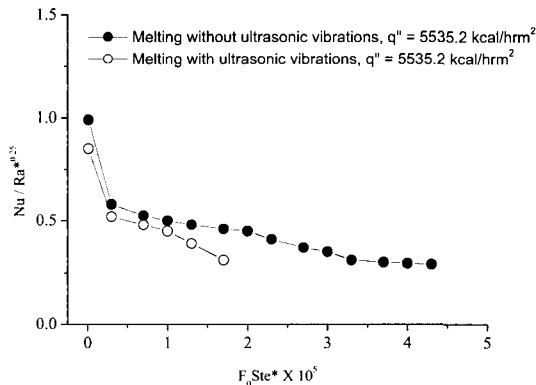


Fig. 3 Nusselt variations on a heater surface with respect to  $F_oSte^*$

그림 3에서 알 수 있는 것처럼 용융 초기에 열전달계수가 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 용융 초기에 전도의 영향이 지배적이기 때문에 얇은 파라핀 층을 사이에 두고 고-액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하고 점차 액상 층이 두터워짐에 따라 대류에 의한 열전달이 주를 이루기 때문이다. 그리고 각각의 열유속에 대해서 초음파진동이 가진된 경우, 히터표면에서의 열전달 계수는 예상과는 달리 자연용융의 경우에 비해 작고,  $F_oSte^*=0.9 \times 10^5$ 와  $1.2 \times 10^5$  이후에는 더욱

감소한다. 이는 초음파 진동으로 액상영역에서 발생한 공동이 히터 표면에서 이탈하면서 가열면에 마른 부분(Dry patch)이 형성되고 열전달 감소로 이어지기 때문이다. 실제로 Kirby 등[7]은 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액체막이 증발함에 따라 생성되는 마른 영역에서의 열전달 감소를 보고한 적 있다. 즉, 히터표면에서의 열전달 계수의 조사만으로 액상에서의 열전달 증진을 설명할 수 없다. 그러나 초음파와 진동의 가진 시 히터표면의 열전달 계수가 현저히 감소하기 시작하는 지점( $F_oSte^*=0.9 \times 10^5, 1.2 \times 10^5$ )은 4.1에서 언급한 용융이 급속히 이루어지기 시작하는 지점과 일치한다. 이는 곧 이 지점부터 열전달을 향상시키는 요소가 활성화됨을 의미한다.

#### 4.3 액상영역에서의 열전달촉진요소

액상에서의 열전달 촉진여부를 확인해 보기 위해서 자연용융과 초음파 가진 시의 용융시간과 완전용융 시간의 비를 의미하는 무차원 시간( $\tau$ )에 대해 도시하였다(그림3). 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 측정 지점( $X=0.2, Y=0.5$ )에서 각각의 열유속의 조건하에 초음파 진동이 가진 될 경우 자연 용융시보다 온도가 15~20 °C 더 낮게 형성됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 거의 모든 지점에서 관측되었으며 이는 초음파가 가진 될 경우 액상영역에서 열전달 계수의 향상을 의미한다.

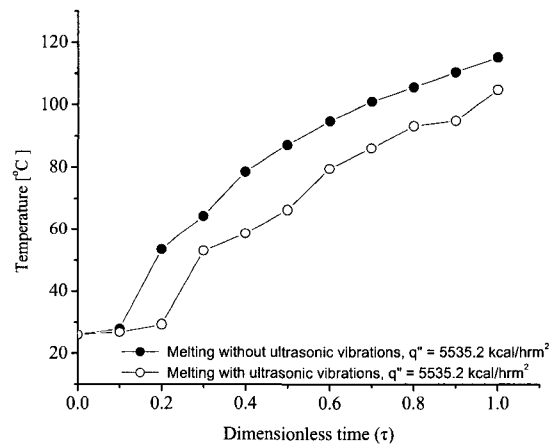


Fig. 4 Temperature history of PCM measured at  $X = 0.2$  and  $Y = 0.5$  against normalized time ( $\tau$ )

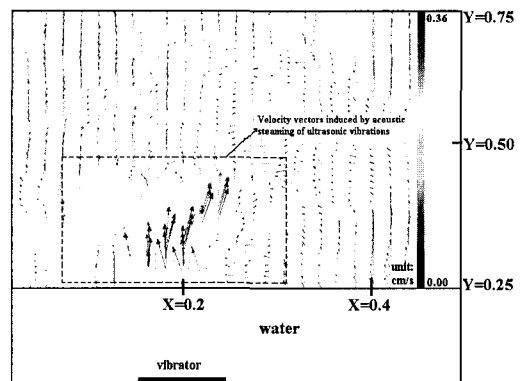


Fig. 5 Two dimensional velocity profiles induced by acoustic streaming of ultrasonic vibrations

액상에서의 열전달 상승의 요인을 알아보기 위하여 그림 1의 가시화 창을 통하여 초음파 가진 시 액상 파라핀에서 일어나는 물리적 거동을 입자영상추적계를 이용하여 초음파가 가진된 액상 영역에서 발생된 물리적 거동을 가시화 한 것으로 초음파 가진 시 액상영역에서 강한 유체의 흐름이 발생됨을 보여 주고 있다. Ro와 Loh[8]는 공기로의 초음파 진동 방식을 통해 냉각 효과의 증진 즉, 열전달 계수의 향상을 규명한 바 있다. 이와 마찬가지로 액상으로의 초음파 방사 또한 강한 음향 흐름(Acoustic streaming)을 발생시켜 에너지 전달 효율을 증진시킨다.



Fig. 6 Oscillating fluid motion formed by ultrasonic vibrations

또한 열화상카메라를 이용하여 초음파가진시 발생하는 음향흐름과 공동의 순간적 붕괴로 형성된 압력요동이 열유동(Thermally-oscillating flow)을 발달시킴을 관찰할 수 있었다(그림 6).

## 5. 결론

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

- 1) 액상 영역에 초음파 가진을 통하여 용융을 촉진시킬 수 있다.
- 2) 초음파 진동이 가해진 경우 액상에서 발생하는 공동현상(Cavitation)으로 인하여 히터표면의 열전달계수를 조사하는 기존의 방법으로는 용융 촉진의 원인을 규명할 수 없다.
- 3) 초음파 진동을 가진하여 용융시킬 경우 히터에만 의존하여 용융시킬때 보다 에너지를 더 절감할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] S.H. Cho, J. E. Sunderland: "Heat conduction Problems with Melting or Freezing, Journal of Heat Transfer"(1969), pp. 125-131.
- [2] C. Gau, R. Viskanta: "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall", J. of Heat Transfer 108,(1986), pp. 204-209.
- [3] 김기반: "밀폐공간의 정상상태 자연대류에 있어서 용기현상의 영향", 석사학위논문, KAIST, 1997.
- [4] 정인기, 김점수, 송동주: "수평격판을 갖는 정사각형 밀폐공간내에서 자연대류 유동 및 열전달", 대한기계학회논문집 제9호,(1993), pp. 2304~2314.
- [5] 박설현: "초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향에 관한 연구", 석사학위논문, 조선대학교, 2001.
- [6] C.J. Ho and R. Viskanta: "Heat-Transfer During Melting from the Isothermal Vertical Wall" , J. of Heat Transfer , Vol. 108 ,(1996), pp. 204-209.
- [7] J.G.Kirby , R.Stainforth, and L.H. Kinnier: "A Visual Study of Forced Convective Boiling Part II,(1967), AEEW-R506".
- [8] Paul I. Ro and Byoung G. Loh: "Feasibility of Using Ultrasonic Flexural Waves as a Cooling Mechanism", IEEE Transactions on Industrial Electronics 48(1),(2001), pp. 143-150.