

## 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

박설현\*\*\* · 서동표\*\*\* · 차경옥\*\*\* · 오을권\*

### An Experimental Study of the effect of Ultrasonic Vibration on Phase Change Heat Transfer

Oh, Yool-Kwon, Soe, Dong-Pyo, Cha, Kyung-Ok and Park, Seul-Hyun

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

#### Abstract

Natural convection heat transfer have been paid attention because it can be applied to various areas such as cooling of nuclear reactor, heat storing system and so on. Among such applications, the melting process of phase change material(PCM) has been actively studied. However, most researches have focused on phase change heat transfer in natural melting. Therefore, In this paper, ultrasonic vibration was adopted to increase the melting rate. In addition, general relationship and corelationship between melting with ultrasonic vibration and melting without ultrasonic vibration have been established during the melting of PCM.

#### 기 호 설 명

$h$  ; 열전달계수

$\Delta h_f$  ; 잠열

$t$  ; 시간

$g$  ; 중력가속도

$q''$  ; Heat Flux (열유속)

$s$  ; 액-고상 인터페이스의 위치

$u$  ; 수평방향의 속도

$v$  ; 수직방향의 속도

$C_p$  ; 열용량

$H$  ; 파라핀의 높이 (특성길이)

$K$  ; 액상파라핀의 열전도율

$T$  ; 온도

$U$  ; 무차원 수평방향의 속도

$V$  ; 무차원 수직방향의 속도

$X, Y$  ; 무차원 직교좌표

$F_o$  ; Fourier 수

$Gr$  ; Graho

$Nu$  ; Nusselt 수

$Pr$  ; Prandtl 수

$Ra$  ; Rayleigh 수

$Ra^*$  ; 변형 Rayleigh 수

$Ste$  ; Stefan 수

$Ste^*$  ; 변형 Stefan 수

#### 그리스문자

$\Gamma$  ; 무차원 액-고상 인터페이스의 위치

$\alpha$  ; 열확산율

$\beta$  ; 열체적팽창계수

$\theta$  ; 무차원온도

\* 조선대학교 기계공학부

\*\* 명지대 기계공학부

\*\*\* 조선대학교 대학원

$\nu$  ; 동점성계수  
 $\tau$  ; 무차원 시간

**하첨자**

f ; 용융상태  
h ; 히터표면

**1. 서 론**

대다수의 상변화 열전달은 전도와 대류의 현상을 포함하고 있으면서 그 용융분야가 광범위하기 때문에 꾸준한 연구가 이루어지고 있다. Cho와 Sunderland<sup>1)</sup>가 자연용융현상을 소개한 이후로 관련된 수많은 연구가 진행되어 왔으며 Gau와 Viskanta<sup>2)</sup> 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 Hong<sup>3)</sup>과 Lee<sup>4)</sup>등이 초음파 진동을 자연 용융 상태에 가하여 열전달을 향상시킬 수 있다라는 결과를 제시하였음에도 불구하고 그 용융 분야가 의약분야나 세척분야 그리고 용접 및 커팅 부분에 제한되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 초음파 진동을 자연 용융 현상에 적용하여 그 영향 및 효과를 실험적으로 측정하였다. 그리고 기존의 대다수의 연구가 일정한 관벽 온도하에 이루어진 반면 본 연구에서는 일정한 Heat Flux를 고려하였기 때문에 가열부의 벽면 온도는 용융이 이루어지는 동안 꾸준히 상승하며, 이를 보정해 주기 위해서 Ste\*와 Ra\*와 같은 변형된 무차원수를 도입하였다.

**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 일어나게 된다. 이때 가열된 히터부 주위의 액상의 파라핀은

밀도가 낮아져 상승하게되고 고상 파라핀에 열을 빼앗겨 다시 하강하게된다. 즉, 초기온도에서 상변화 시점까지 전도의 지배적인 영향을 받다가 용융점이후 부터는 액상 파라핀 내의 대류현상에 의해 대부분의 열전달이 이루어지게된다. Fig. 1은 본 연구에서 채택한 고-액상 인터페이스가 존재하는 상변화 물질의 열전달 현상의 모델을 보여준다.

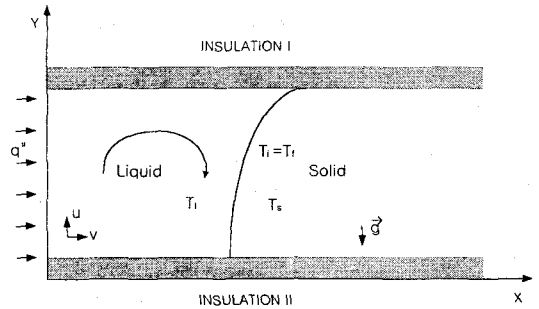


Fig. 1. Two dimensional model for melting procedure

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

- ① 고상과 액상 파라핀의 물성치는 동일하다.
- ② 부력을 유발 시키는 액상 파라핀의 밀도 차에 관련한 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 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

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{1}$$

운동량방정식

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

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

에너지수지식

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

따라서 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

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

곧, Hong<sup>3)</sup> 지적한 것처럼  $\text{Ra}^*$ 가 일정하면 용융현상은  $F_o$ 와  $\text{Ste}^*$ 의 함수이다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치의 구성

상변화물질(PCM)로는 녹는점이 52.3°C인 파라핀을 사용하였으며 그 물성치는 Table 1에 나타내었다. 또한 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 진

동자에서 다시 기계적 에너지로 전환된다. 또 정사각형의 테스트 용기는 스티로폼과 석면 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 Heat Flux가 공급된다.

또한 Fig. 2.에서 볼수 있는 것처럼 K-type의 열전대를 데이터 획득 장치에 연결시켜 1분 간격으로 자료를 전송함으로써 용융현상이 진행되는 동안의 온도분포를 측정하였다. 또한 열전대를 통

Table I. 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

한 열전도를 최소화하기 위해서 절연테잎으로 절연한 뒤 1.5mm 두께의 스테인레스틸 원형관으로 감싼 뒤 내열실리콘을 이용하여 밀봉하였다.

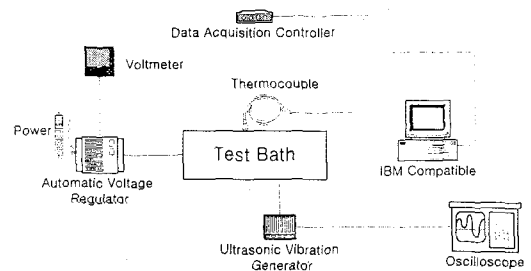


Fig. 2. Schematic diagram for experimental apparatus

#### 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 함몰부위를 다시 보정하기 위하여 액상의 파

라핀을 보충하고 응고되면 표면의 불규칙한 면을 끊어내거나 뜨거운 공기를 불어넣어서 평평하게 만든다. 일반적으로 파라핀은 온도가 200℃ 넘어서면 탄소결합의 붕괴로 물성치가 변하기 쉽다.<sup>5)</sup> 따라서 본 연구에서는 액상파라핀의 온도가 200℃를 넘지 않도록 용융현상이 끝날 때까지 다음과 같은 Heat Flux를 각각 공급하였다.

①  $q'' = 9905.1 \text{ kcal/hrm}^2$  (100 Volt)

②  $q'' = 5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$  (75 Volt)

일단 Heat Flux가 공급되기 시작하면 액상 및 고상 파라핀의 온도가 매 1분마다 데이터획득장치에 의해서 PC에 기록된다.

Hong<sup>3)</sup>에 의하면 초음파 진동의 주파수가 35~50kHz 대역에서 가장 효율적이며, 보편적으로 초음파 진동을 이용한 제품들도 대부분 40~50kHz 대역의 주파수를 사용하고 있다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 40kHz 대역의 고정 주파수를 사용하였고 출력(70~340W)을 변화시켜가며 그 변화를 관측하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 히터 표면 및 파라핀의 온도분포

각각의 Heat Flux가 주어졌을 때 자연용융 상태와 초음파 진동이 주어진 경우의 히터표면의 평균온도 분포를 Fig. 3에 도시하였다. 용융초기에

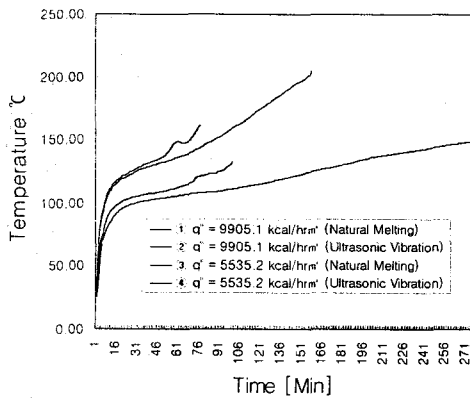
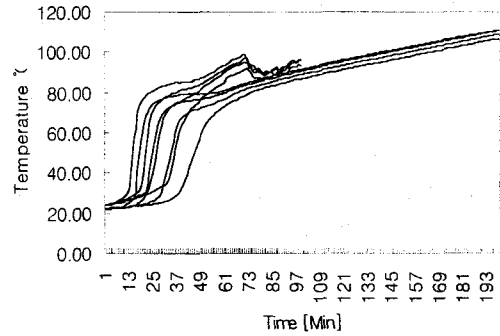


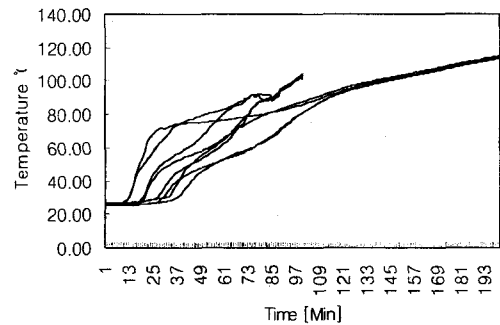
Fig. 3 Average temperature distribution on the heater surface

는 자연 용융상태나 초음파 진동이 가해진 경우

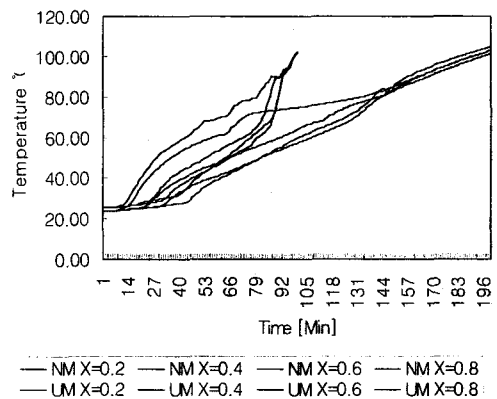
나 다같이 전도의 영향을 받아 온도가 급격히 상승하다가 자연대류가 일어나면서부터 그 증가세가 서서히 감소한다. 그러나 초음파진동이 가해진 경우는 Fig. 3.에서 볼 수 있는 것처럼 용융속



(a) Temperature distribution of paraffin, Y=0.75



(b) Temperature distribution of paraffin, Y=0.50



(c) Temperature distribution of paraffin, Y=0.25

Fig.4 Temperature distribution in sequence of time, at heat flux  $q'' = 5535.2 \text{ kcal/hrm}^2$

도가 초음파 진동이 가해진 경우 최고 2.5배정도 단축되는 것을 확인할 수 있다. 이는 초음파 진동으로 인해 발생하는 공동현상 및 진동유동 교환효과 등으로 기인한 것으로 보이며, 다음 절에서 다시 논의하기로 한다.

Fig. 4에서 파라핀의 온도분포를 살펴보면 용기의 바닥면에서 가까운 지점일수록 온도변화가 서서히 일어나고 더욱 안정적인 것을 알 수 있다. 이는 히터표면을 따라 가열된 액상의 파라핀이 자유면(Free surface)에 이르러 최고온도에 달하고, 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼아겨 가는 자연대류의 흐름 때문에 파라핀 상부에서 온도 변화의 폭은 크고 하부에서는 안정적이다. 또한 초음파 진동이 가해진 경우 파라핀의 온도가 같은 시간대에서 더 높음을 알 수 있다. Yoshihiro<sup>7)</sup> 등은 초음파 진동이 바닥에서 주어진 경우의 음압의 분포와 열전달계수의 상관관계를 조사하였다. 그에 의하면 초음파 진동을 가한 경우 용기 내의 음압의 분포는 바닥면 가까이에서 최고값을 갖고 자유면에 최소값을 갖는다. 결국 초음파 영향에 의한 음압의 분포와 미세한 기포의 소멸시 순간적인 고온고압의 형성때문에 초음파를 가해진 경우 자연용융상태보다 온도 분포가 다소 높게 나타난 것으로 사료된다. 그러나 용융이 완전히 끝났을 때의 온도는 초음파 진동을 가한 경우가 전체적인 가열시간이 짧기 때문에 훨씬 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 자유면 근처에서의 온도요동(Thermal Fluctuation)현상은 초음파 진동으로 발생한 공동현상의 소멸로 인한 급격한 압력변화 때문으로 추정된다.

#### 4.2 히터 표면에서의 열전달과 용융시간

히터표면으로부터 열전달은 초기에 에너지가 전도에 의존하여 액상 파라핀으로 전달되다가 그 이후부터는 자연대류에 의해 고상 파라핀에 전달되며 전달에너지는 고상파라핀을 용융시키거나 액상파라핀의 온도를 높인다. 용융현상이 진행되는 동안의 히터표면의 열전달계수는 액상층의 확산으로 인한 열저항, 자연대류의 영향 등의 요인들에 의해 영향을 받는다. 열전달을 방해하는 요소 중 가장 큰 영향을 미치는 대류 열저항은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{T_h - T_f}{q} = \frac{1}{hA} \quad (9)$$

Fig. 5는 식(9)에서 구해진 열저항을 시간에 대해 도시한 것이다. 같은 Heat Flux에서 초음파 진동이 주어진 경우 열저항이 자연용융 상태보다 부분적으로 약간 높게 나타났고 이는 열전달계수에 미소한 영향을 미친다. 히터 표면에서의 열전달계수,  $h$ 와 Nusselt 수,  $Nu$ 는 히터표면의 온도 분포와 상변화 물질의 물성치가 주어진 경우 구해질 수 있다. 열전달계수는 Heat Flux가 일정한

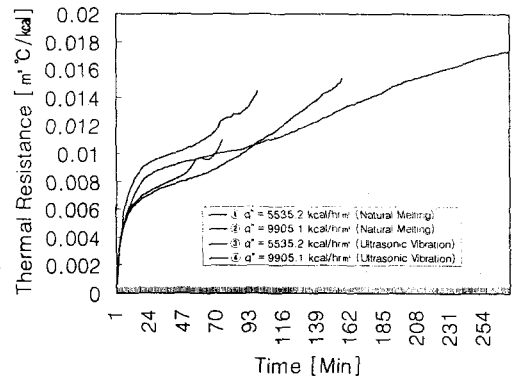


Fig. 5 Thermal resistance variation with time

경우 식(10)으로 주어진다.<sup>8)</sup>

$$h = \frac{q''}{T_h - T_f} = \frac{q''}{\Delta T} \quad (10)$$

히터표면에서의 열전달계수는 상변화물질의 전도 영역과 대류영역을 고려하여 Nusselt수로 다시 주어질 수 있다.

$$Nu = \frac{q'' H}{\Delta T K} \quad (11)$$

Fig. 6는 무차원 시간인  $FoSt^*$ 에 대한 히터표면에서의 열전달계수를 실험적을 구한 것이다. 여기서  $Ra^{*0.25}$ 는 자연대류가 발생할 경우 취해지는 일반적인 값이다.<sup>9)</sup> Fig. 5에서 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( $FoSt^*=0.3$ ) 액상의 상하부의 혼합으로 다수의 에너지가 이동하고 용융 말기에는 액상의 전체적인 온도가 상승하게 되므

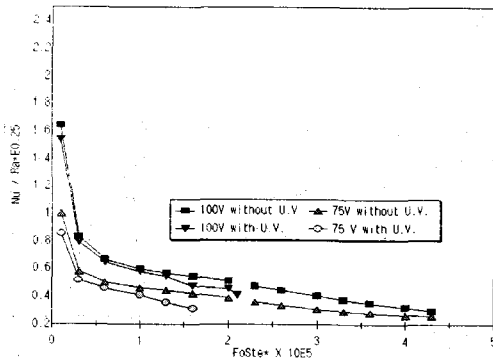


Fig. 6 Nusselt number variation on the heater surface with  $FoSte^*$

로 이러한 영향의 상대적인 크기에 따라 열전달 속도가 결정된다. 따라서 가열부의 온도가 높을수록 열전달이 잘 일어날 것이라는 예상과는 상반된다. 한가지 흥미있는 사실은 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우든 상관없이  $FoSte^*=0.3$  부근에서 자연대류가 시작된다는 것이다. 그리고 자연용융의 경우 Heat Flux에 관계없이  $FoSte^*$ 가 4.3 근처에서 용융이 완전히 끝남을 알 수 있다. 결국 이는 식(8)에서 언급한 것과 같이 고-액상 용융현상은  $Fo$ ,  $Ste^*$ ,  $Ra^*$ 의 함수이다. Fig. 6를 통하여 Hong<sup>3)</sup>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 진동을 가한 경우 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 열저항이 다소 증가하여 열전달계수가 약간 감소한다. 그러나 용융시간에 있어서는 초음파 진동을 가한 경우가 그렇지 않은 경우보다 현저히 줄어들음을 알 수 있다. 이는 초음파 진동으로 인해 유발된 다음과 같은 요소들에 의한 것이라 사료된다.

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

Table II는 초음파 발생기에서의 출력을 변화시켰을 경우 용융시간을 나열한 것이며, 여기서 알

수 있는 것처럼 초음파 발생기의 출력을 높일수록 용융시간이 단축됨을 알 수 있다. 이는 출력이 증대되면서 높은 음압이 형성되고 상대적으로 큰 버블의 형성은 억제되나 미세한 버블의 주기적인 생성소멸로 인한 효과와 이러한 미세한 버블들의 활발한 진동유동 때문이다.

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

Heat Flux (kcal/hrm <sup>2</sup> )	Output Power Level at Vibration Generator (Wh)	Melting Time (Min.)
5535.2	70	164
5535.2	185	94
5535.2	340	72
4000.7	100	185
4000.7	185	105

#### 4.3 자연용융과 초음파 용융의 소모 에너지 비교

Lee<sup>4)</sup>는 초음파 진동을 가한 경우와 자연용융 상태의 총 용융시간 및 총 적산 전력량을 비교하였다. 그에 의하면 초음파를 방사한 경우 용융시간과 총전력량(히터소비전력량 Vs 히터소비전력량+초음파발전기소비전력량) 모두 줄어든다. 그는 초음파 진동자를 용융이 일어나는 용기의 바로 밑에 초음파 진동자를 장치한 반면 본 연구에서는 용융초기 고상의 파라핀에 초음파 방사로 인한 진동자의 과부하를 방지하고 진동자를 통한 파라핀으로의 열전도를 최소화하기 위하여 Fig. 6과 같이 초음파 진동자가 부착된 용기에 물을 채우고 보조탱크를 삽입하여 실험을 실시하였기 때문에 그의 결과에 비해 전력소비량의 차가 두드러지게 나타나지는 않았다. Table III은 본 연구에서 주어진 각각의 Heat Flux에서 초음파를 가한 경우와

Table III Comparison of total consumed electricity for the overall melting process

Total consumed electricity	Consumed electricity at heater	Consumed electricity at U.V. device	Melting time
448.1W	448.1W	—	161Min
445.9W	211.5W	234.4W	76Min
444.6W	444.6W	—	275Min
441.8W	152.0W	289.8W	94Min

그렇지 않은 경우의 총전력량과 용융시간을 측정

한 결과이다. 또한 전력량을 더 절약하기 위해서는 초음파 진동의 영향이 거의 미치지 않는 전도의 영역 ( $FoSte^* < 0.3$ )에서는 초음파를 방사하지 않고 히터만으로 용융을 지속해야함을 유추할 수 있다.

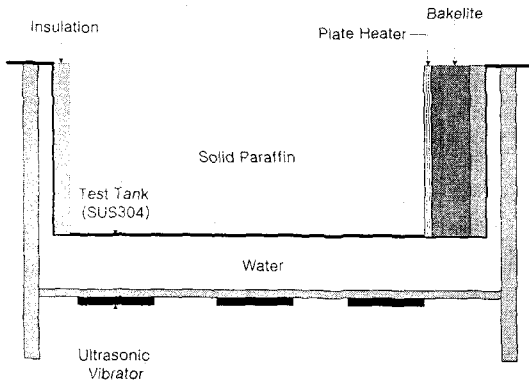


Fig. 7 Schematic diagram of Melting cavity

## 5. 결 론

본 연구에서는 자연 용융상태와 자연 용융상태에 초음파 진동을 가하여 그 용융과정을 살펴보고, 파라핀의 온도 분포 및 히터 표면의 열전달 계수의 변화, 에너지 효율을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고-액상 인터페이스의 위치는  $Fo$ ,  $Ste^*$ ,  $Ra^*$ 의 함수이다.
- 2) 용융현상에 중요한 역할을 하는 대류는 초음파 영향의 여부, Heat Flux의 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) 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 최고 2.5배 용융시간이 단축될 수 있다.
- 5) 자연용융상태에 초음파 진동을 가함으로써 에

너지를 절약할 수 있다. 또한 초음파의 방사시기를 선별하여 조사함으로써 에너지 절약효과를 극대화할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) S.H. Cho and J. E. Sunderland : Heat conduction Problems with Melting or Freezing, Journal of Heat Transfer, August , pp 125-131, 1969
- (2) Gau, C. and Viskanta, R. : Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall, J. of Heat Transfer, vol. 108, pp 204-209 Feb, 1986
- (3) J.S. Hong : Experimental Study of Melting Phenomena with and without ultrasonic vibrations, M.S. Thesis , Univ. of Illinois at Chicago , 1988
- (4) 이재효, 엄철준 ; 고체입자가 있는 파라핀 용해에 대한 초음파의 영향에 관한 실험적 연구, 공기조화 냉동공학회 99학술발표대회는 문집, pp285-290, 1999
- (5) 홍창식 ; 파라핀을 채운 수평원관 내에서의 축열 및 방열특성에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교, 1990
- (6) 초음파연구회, 초음파활용, 기문사, 1994,
- (7) 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
- (8) 윤정인의 3인 공역 ; 열전달, 시그마프레스, 1997
- (9) M. Okada ; Analysis of Heat Transfer during Melting from Vertical Wall, Int. J. of Heat Transfer, vol. 27, no. 11, pp 2057-2066, 1984