2005年 8月 教育學 碩士學位論文

# 超音波 振動이 相變化 熱傳達 促進에 미치는 影響

朝鮮大學校 教育大學院

技術・家庭教育專攻

劉性林

# 超音波 振動이 相變化 熱傳達 促進에 미치는 影響

Effect of Ultrasonic Vibrations on Enhancement of Phase Change Heat Transfer

## 2005年 8月 日

朝鮮大學校 教育大學院

技術・家庭教育專攻

## 劉性林

# 超音波 振動이 相變化 熱傳達 促進에 미치는 影響

## 指導教授 吳 栗 權

이 論文을 敎育學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

### 2005年 4月 日

朝鮮大學校教育大學院

技術・家庭教育專攻

劉性林

## 劉性林의 敎育學碩士學位論文을 認准함.

- 委員長 朝鮮大學校 敎 授 金 鎭 與 印
- 委員朝鮮大學校教授 鄭洛奎印
- 委員朝鮮大學校教授 吳栗 權 印

## 2005年 6月 日

## 朝鮮大學校 教育大學院

제	1 7	장	서	론	1	
	1.1	연	구배기	경 ·	1	-
	1.2	연	구목	적	및 내용2	)

제	2 장	이론해석		•••••	••••		•••••	•••••	•••••	•••••	•••••		•••••		4
	2.1 해	석모델 및	지배방정식		••••					•••••	•••••				4
	2.2 PI	V의 기본기	내념과 알고리즘	•••••			•••••		•••••			•••••			7
	2.3 적	외선 열화	상 카메라 열 해석	방법·		•••••				•••••					9
	2.4 결	합형 유한.	요소-경계요소법의	해석										1	.1

제	3 장 실험장치12	) -
	3.1 실험장치 구성1	2
	3.2 실험과정1	6
	3.3 수치해석 방법 및 절차1	8
	3.3.1 유한요소법에 의한 평판의 수치해석1	8
	3.3.2 경계요소법에 의한 수치해석2	0

제	4 장	실험결과	22
	4.1 ই	터표면의 온도분포	22
	4.2 F <sub>o</sub>	Ste*(무차원 시간)에 따른 고-액 경계면의 위치	24
	4.3 열	전달계수 측정	30

4.3.1 F <sub>o</sub> Ste*(무차원 시간)에 따른 열전달계수
4.3.2 τ((무차원 시간)에 따른 열전달계수의 예측34
4.4 가시화를 통한 열전달 촉진 규명
4.5 자연용융과 초음파 가진 용융시의 소모 전력량 비교
4.6 매질내의 음압분포 측정 결과41

제	5 2	장	결	론4	6
---	-----	---	---	----	---

친기모친	4	-
삼꼬군언	 ···· 4	:/

## LIST OF FIGURES

Fig.	1	Two dimensional model for a melting procedure of a phase-change
		material ····· 4
Fig.	2	Schematics of PIV image analysis
Fig.	3	Schematic diagram of Cross-Correlation Function (CCF) 8
Fig.	4	Electromagnetic spectrum
Fig.	5	Schematic diagram for the present experimental set-up
Fig.	6	Schematic diagram of the present test section showing the position of
		ultrasonic transducers and thermocouples
Fig.	7	Experimental set-up for visualization
Fig.	8	Schematic diagram of each finite element composed of 20 quadratic nodes 18
Fig.	9	Finite-element meshed for a vibrating plate
Fig.	10	) Fixed boundary condition of a vibrating plate
Fig.	11	Variations of heater surface temperature over time
Fig.	12	2 Melting shape variations at $F_0$ Ste*= $0.3 \times 10^5$
Fig.	13	B Melting shape variations at $F_0Ste^*=0.6 \times 10^5 \cdots 26$
Fig.	14	Helting shape variations at $F_0$ Ste*= $0.9 \times 10^5$
Fig.	15	5 Melting shape variations at $F_0$ Ste*=1.2×10 <sup>5</sup>
Fig.	16	5 Melting shape variations at $F_0$ Ste*=1.5×10 <sup>5</sup>
Fig.	17	7 Nusselt number variations on the heater surface with $F_oSte^*$
Fig.	18	8 Nusselt number variations on the heater surface during conduction
		with F <sub>o</sub> Ste*

## LIST OF FIGURES (Continued)

Fig.	19	Temperature history of PCM measured at X=0.2 and Y=0.5 against
		normalized time( $\tau$ )
Fig.	20	Two dimensional velocity profiles measured at the visualization window 37
Fig.	21	Two dimensional velocity profiles induced by ultrasonic vibrations measured
		at the visualization window
Fig.	22	Comparison of thermal flow fields in the liquid paraffin
Fig.	23	Acoustic pressure distribution in the liquid induced by
		ultrasonic vibrations 41
Fig.	24	Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer
		augmentation in case of output power level of 300W 42
Fig.	25	Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer
		augmentation in case of output power level of 175W 43
Fig.	26	Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer
		augmentation in case of output power level of 50W 44

## LIST OF TABLES

Table	1	Thermophysical properties of n-Octadecane	12
Table	2	Bulk modulus of elasticity of n-Octadecane	21
Table	3	Comparison of the total consumed electricity under the output power level	
		of 175W	40

## NOMENCLATURE

f	주파수
h	열전달계수
$\Delta h_{\rm f}$	잠열
t	시간
g	중력가속도
р	압력
q"	열유속
S	액-고상 인터페이스의 위치
u, v	수평·수직방향의 속도
А	히터 단면적
C <sub>P</sub>	열용량
E	체적탄성계수
E <sub>m</sub>	총방사량의 온도값
Н	파라핀의 높이(특성길이)
Ι	전류
Κ	액상파라핀의 열전도율
Ks	압축계수
Q	피검사체의 신호
R	저항
S	CCD 카메라의 상관계수
Т	온도
U, V	수평·수직방향의 무차원 속도
X,Y	무차원 직교좌표

## NOMENCLATURE (continued)

Fo	Fourier 수
Gr	Grashof 수
Nu	Nusselt 수
Pr	Prandtl 수
Ra	Rayleigh 수
Ra*	수정 Rayleigh 수
Ste	Stefan 수
Ste*	수정 Stefan 수

### Greeks

α	열 확산율
β	열체적 팽창계수
3	방사능
Г	무차원 액-고상 인터페이스의 위치
θ	무차원 온도
V	동점성 계수
ρ	밀도
τ	무차원 시간
X	유효한 대기 전달

## NOMENCLATURE (continued)

$\infty$	임의의 지점				
i	액-고상 인터페이스				
1	액체영역				
S	고체영역				
avg	평균				
aug	열전달계수 향상비				
atm	대기온도				
amb	주위온도				

## ABSTRACT

## Effect of Ultrasonic Vibrations on Enhancement of Phase Change Heat Transfer

Yoo, Sung-Lim

Advisor : Prof. Oh, Yool-Kwon Ph.D.

Major in Technology & Home Economics Education Graduate School of Education, Chosun University

This study presents experimental and numerical works on the effect of ultrasonic vibrations on enhancement of Phase Change Heat Transfer. In order to investigate the melting process of a phase change material (PCM), the present study was applied experimental condition as following : one without ultrasonic vibrations (i.e., natural melting) and the other with ultrasonic vibrations. And a constant heat flux condition was considered and modified dimensionless number such as Ste\* and Ra\* were adopted. Also, heat flow phenomena were visually measured by a particle image velocimetry (PIV) and a thermal infrared camera with and without ultrasonic vibrations. Numerical work was applied to calculate the acoustic pressure in the liquid paraffin, instead of experimental measurement. For the numerical work, a coupled finite element-boundary element method (coupled FE-BEM) was applied.

The experimental results revealed the acoustic streaming could accelerate the melting process as much as 2.5 times, compared to the rate of the melting without ultrasonic vibration and was saved the total consumed electricity about  $2.3 \sim 2.9$  Wh. In addition, temperature and Nusselt number over time provided conclusive evidences which are the important roles of acoustic streaming on the melting phenomena of the phase change material. The numerical results of the profiles of acoustic pressure variation are consistent with those of augmentation of heat transfer. That is, the higher acoustic pressure distributions are, the higher augmentation ratio of heat transfer is near to ultrasonic transducers. In the end, it is concluded that acoustic pressure variations are closely related to the augmentation of heat transfer.

### 제1장서 론

#### 1.1 연구배경

열전달 문제에 있어서 상변화라 함은 열전달 프로세스 중 어떤 물질이 하나 의 상태에서 다른 상태로 변화하는 과정을 말하며, 대다수의 상변화 열전달 해 석은 전도와 대류의 현상을 포함하고 있다. 일반적으로 상변화 과정 중 잠열의 흡수 및 방출이 수반되고 상변화 전·후로 열적, 물리적 물성에 상당한 변화가 형성된다. 이러한 상변화 문제의 대표적인 예는 용융 혹은 응고를 들 수 있지 만, 이 외에도 기체의 응축, 액체의 증발, 금속 결정 구조의 변화 등도 상변화 문제에 포함된다. 실제로, 상변화 문제의 대표적인 응용분야를 살펴보면, 주조 공정분야, 플라스틱 금형의 사출분야, 반도체의 결정 성장 및 금속의 용접 및 제련분야, 잠열을 이용한 에너지 저장분야 등이 있다. 특히, 최근에 들어 상변 화 물질(phase change material, PCM)의 잠열을 이용한 에너지 저장 기술은 심야 전기 및 태양열 등의 사용이 증가함에 따라 각광받는 연구 분야로 응용이 활발 하게 이루어지고 있다.

이러한 상변화 물질을 이용한 열전달에 관한 연구는 실험이나 수치해석을 통 해 진행되어 오고 있다. Cho와 Sunderland[1], Gau와 Viskanta[2]는 고-액상에 존 재하는 영역의 열전달 계수와 용융속도를 Nusselt수, Stefan수, Rayleigh수와 같 은 무차원수를 도입하여 측정하였고, Sparrow와 Broadbent[3,4]는 수직원관 내에 서의 용융 및 응고에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Saitoh와 Hirose[5], Reiger 등[6]은 n-Octadecane과 물을 대상으로 액상에서의 자연대류에 의한 유동장과 온도분포에 대한 이론적 해석과 실험적 연구를 수행한 바 있다. 이러한 연구의 대부분은 전도나 자연대류의 열전달에 초점이 맞추어져 있으며, 밀폐용기나 관 로에서 온도 조건 변화에 의해 형성되는 자연대류에 의한 열전달 현상도 많은 연구가 이루어져 왔다. 이 가운데 온도차가 주어졌을 때의 자연대류현상은 연

료저장장치, 이중유리창, 건물의 내부 등에서 열손실을 파악하는데 많은 도움을 주고 있으나, 이중 상당수는 상변화를 동반하지 않은 균일유체(homogeneous fluid)를 대상으로 한 자연대류와 열전달과의 상호관계를 규명하는 연구들이다. 결론적으로, 지금까지의 연구는 해석 대상매질이 상변화 물질이냐 유체냐에 상 관없이 특정 가열조건에서 존재하는 액상영역의 대류 열전달 해석에만 초점이 맞추어져 있다고 할 수 있다. 하지만, 생산 공정의 특성상 주조나 용접은 상변 화 과정, 즉 용융과정에 많은 양의 에너지를 소비하므로, 효과적인 상변화 물질 의 용융방법이 반드시 필요하다. 이런 점들을 고려해 본다면, 용융을 효과적으 로 촉진시키고 이에 필요한 에너지를 최소화하기 위해서는 상이한 가열조건 (Rayleigh 수의 증감)에 의해 형성된 유동만으로는 한계가 있다. 따라서, 고-액 상변화시 발생하는 용융을 촉진시킬 수 있는 기술적 대안이 필요한 시점이라 할 수 있다.

#### 1.2 연구목적 및 내용

지금까지의 열전달 해석에 관한 논의는 열전달 방식에 대한 수치적해석이나 실험적 해석에 집중되어 있다. 특히, 상변화 열전달의 경우에는 열전달 방식에 따른 응고나 용융과정에 관한 연구가 주를 이루고 있는 반면, 열전달 방식 중 의 하나인 자연대류를 촉진하고자 하는 연구는 소수에 지나지 않는다. 더욱이 상변화 열전달 과정 중 용융을 촉진하는 방법은 대부분 대류 열전달 방식에 의 존하고 있으며, 대류 열전달을 촉진시키기 위한 연구 방법은 크게 3가지로 나 누어 살펴볼 수 있다. 첫째, 유동장의 형상을 변경하기 위해 격판을 설치하는 방법, 둘째, 유동장에 유체의 농도차에 의해 부력장을 형성하는 방법, 그리고 셋째, 유동장에 음장을 형성하는 방법이다. 이 중, 일상 생활에서 상변화 물질 의 활용이 보편화되고 있는 현 시점에서 유동장 내에 음장을 형성하는 방법이 적은 에너지와 시간으로 상변이를 촉진하는데 가장 용이하다고 할 수 있겠다.

음장에 의한 입자의 맥동운동은 고체면 가까이에 정상류인 음향흐름(acoustic streaming)을 유발시키는데, 이는 Schliting[7]에 의해 처음으로 수학적으로 해석 되었다. Fand 등[8]은 등온 음장에 의한 국소 열전달율을 측정한 결과 수평으로 음장이 가해질 때, 원통의 상부와 하부에서 열전달이 크게 증가하고 양 측면에 서 오히려 감소하는 것을 발견하였고, 유동 가시화를 통해 상부에서 맥동하는 와류 운동이 발생하는 것을 관측함으로써, 열전달이 증가한 원인을 설명하기에 이르렀다. 이후, Iida 등[9]은 수중에 초음파 진동으로 형성된 음장이 열전달을 증가시킬 수 있음을 보고하였다. 비록, 초음파 진동의 활용은 이미 컷팅이나 용 접, 세척분야에서 그 우수성을 인정받고 있지만 이를 활용한 상변화 열전달 향 상에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Kim 등[10]이 물의 비등 열전달 촉진을 위해서 제안 한 초음파 진동을 사용하여 상변화 과정 중 발생하는 유동장에 음장을 형성시 켜 상변화 열전달과의 상관관계를 조사해 보고자 한다. 이를 위해, 단열된 직사 각형 용융용기내에 고상 파라핀(n-Octadecane)을 채우고 일정량의 열유속을 가 하여 고-액 경계면이 존재하는 열전달 프로세스를 구성하여 용융과정을 고찰하 고, 초음파 진동의 가진시 액상 파라핀내에 발생하는 물리적 거동을 입자영상 추적계(particle image velocimetry, PIV)와 열화상카메라(infrared thermal camera)를 사용하여 분석하며, 매질내에 발생하는 압력분포를 결합형 유한요소-경계요소법 (coupled FE-BEM)을 이용하여 계산함으로써 열전달 증진 원인 또한 규명해 보 고자 한다.

### 제 2 장 이 론 해 석

#### 2.1 해석모델 및 지배방정식

Gau와 Viskanta[2], Hong[11]은 소위 「이동하는 고-액상 경계면의 추적에 관 한 이론식과 2차원의 용융모델」을 제시한 바 있으며, Oh 등[12]은 Rayleigh수 (Ra\*)와 Stefan수(Ste\*) 같은 무차원 수를 도입하여 고-액 상변화 과정을 고찰하 였다. 본 연구에서도 그들의 기본적인 이론식과 용융모델을 채택하고 경계조건 에 맞는 무차원 수를 도입한 뒤 상변화 과정에 있어 다음과 같은 가정하에 이 론해석을 하였다.

액상 파라핀의 밀도 차에 관여하는 온도 변화를 제외하면 모든 물성치
 의 변화는 온도변화와 무관하다. (boussinesg 근사)



Fig. 1 Two dimensional model for a melting procedure of a phase-change material

- ② 고상과 액상 파라핀의 물성치는 동일하다.
- ③ 액상 파라핀은 뉴턴유체로 간주한다.
- ④ 점성소산과 압력에 의한 일은 무시한다.
- ⑤ 초음파 방사로 인하여 액상 파라핀에서 발생할 수 있는 물성치 변화는 무시한다.

Fig. 1은 본 연구에서 채택한 고-액상 경계면이 존재하는 상변화 물질의 열전 달 해석을 위한 2차원 모델로써, 용기내에서 액상파라핀의 열전달 현상을 해석 하기 위해 무차원 좌표 X, Y 방향의 연속방정식 및 운동량방정식과 에너지수 지식 등이 필요하며, 각 조건을 일반화하여 무차원화 한 지배방정식은 다음과 같다.

#### 연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{2.1.1}$$

#### 운동량방정식

$$X \stackrel{\stackrel{>}{\Rightarrow}}{=} \frac{\partial V}{\partial \tau} + \left( U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Gr\Theta$$
(2.1.2)

$$Y \stackrel{\geq}{=} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y}\right) = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)$$
(2.1.3)

에너지수지식

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_o} + \Pr\left(U\frac{\partial \Theta}{\partial X} + V\frac{\partial \Theta}{\partial Y}\right) = \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2}\right)$$
(2.1.4)

식 2.1.1~2.1.4의 무차원화 된 지배방정식을 구하기 위하여 사용된 무차원수는 다음과 같다.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uH}{v}, V = \frac{vH}{v}, F_o = \frac{at}{H^2}$$
$$\pi = \frac{tv}{H^2}, \Theta = \frac{T - T_f}{\Delta T}, Pr = \frac{v}{a}, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{v^2}$$

결국, 상변화 용융현상은 경계면에서의 에너지수지식으로부터 다음과 같이 표 현할 수 있다.

$$\frac{\partial\Gamma}{\partial F_o} = -Ste \frac{\partial\Theta}{\partial X} \left\{ 1 + \left(\frac{\partial\Gamma}{\partial Y}\right)^2 \right\}$$
(2.1.5)

$$Nu = -\frac{\partial \Theta}{\partial X} \mid_{x=0}$$
(2.1.6)

여기서  $\Gamma = \frac{S}{H}$ 이며, 본 실험에서는 가열부의 온도가 계속 상승하게 되므로  $\Delta T = \frac{q''H}{K}$  를 이용하여 식 2.1.7의 Stefan수와 Rayleigh수는 식 2.1.8과 같이 변 형된 수정 Stefan수 (Ste\*)와 수정 Rayleigh수 (Ra\*)로 나타낼 수 있다.

$$Ste = \frac{C_f \Delta T}{\Delta h_f}$$
,  $Ra = \frac{g \beta \Delta T H^3 Pr}{v^2}$  (2.1.7)

$$Ste* = \frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f} , \qquad Ra* = \frac{g \beta q'' H^4 \Pr}{K v^4}$$
(2.1.8)

따라서 식 2.1.5는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial F_o} = -Ste * \frac{\partial \Theta}{\partial X} \left\{ 1 + \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial Y} \right)^2 \right\}$$
(2.1.9)

즉, Ra\*가 일정하면 용융현상은 F<sub>o</sub>, Ste\*, Ra, X, Y의 함수이며 고-액 인터페 이스는 열유속, 높이(H), 시간을 포함한 F<sub>o</sub>Ste\* 로 나타낼 수 있다. 여기서 높이 는 상변화 물질의 높이(characteristic height)를 의미하며, 본 실험에서와 같이 고-액상의 경계면이 천천히 이동하는 경우 액상영역에서는 자연대류가 일어난다. 실제로 Ra수가 10<sup>6</sup> < Ra < 10<sup>9</sup> 범위안에서는 층류 유동이 일어나고 Ra > 10<sup>9</sup> 이상인 경우 난류가 발생한다[13]는 연구결과로 비추어 볼 때, 본 연구에서도 역시 Ra\* = 5.80×10<sup>7</sup> 와 Ra\* = 3.24×10<sup>7</sup> 상응하는 열유속이 주어졌으므로 액상 영역에서 자연대류의 형성은 타당하다.

#### 2.2 PIV의 기본개념과 알고리즘

본 연구에서는 상변화물질의 용융시 초음파 가진으로 인해 액상영역에서 발 생하는 물리적 거동을 관찰하기 위해 입자영상추적기를 도입하였으며[14], 유동 영역에서 입자영상추적기의 입자추적 과정을 Fig. 2에 나타내었다.



Fig. 2 Schematics of PIV image analysis

입자영상추적기는 유동장의 속도 벡터를 얻기 위하여, 고속카메라를 이용하 여 상관영역이라고 하는 2개의 작은 영상 프레임을 획득하고 이를 바탕으로 미 리 액상에 넣어둔 미세한 Particle의 궤적을 추적한다. 결국 프레임 1과 프레임 2의 분석을 통해 Particle 간의 거리 *dx*를 구하고 레이저 조명의 펄스 간격을 통하여 시간 *dt*를 결정함으로써 속도 벡터는 식 2.2.1으로 계산될 수 있다.

입자의 궤적 및 속도 벡터를 구하는 알고리즘 중 가장 널리 사용되는 방법은 상호상관함수법이다[14]. Fig.3과 같은 영역에서 2차원적 이산 상호상관함수 (Cross-Correlation Function)는 다음의 식으로 계산된다.

$$C(s, t) = \sum_{x} \sum_{y} f(x, y) \omega(x - s, y - t)$$
(2.2.2)



Fig. 3 Schematic diagram of Cross-Correlation Function (CCF)

단, 여기서 미소영역 w(x,y)의 크기는 J×K이며 전체영역 f(x,y)의 크기는 M×N이다. 또한 s = 0, 1, 2, 3,..., M-1, t = 0, 1, 2, 3,..., N-1이다. 함수식의 f(x,y) 및 w(x,y)는 진폭의 변화에 매우 민감하므로 다음의 식으로 정의되는 상호상관관계를 구하여 최대상관의 위치를 찾아내는 것이 합리적이다.

$$\chi(s,t) = \frac{\sum_{x} \sum_{y} [f(x,y) - f(x,y)] [\omega(x-s,y-t) - \omega']}{\{\sum_{x} \sum_{y} [f(x,y) - f(x,y)]^2 \sum_{x} \sum_{y} [\omega(x-s,y-t) - \omega']^2\}^{-1/2}}$$
(2.2.3)

여기에서 w'는 w(x,y)영역내의 평균치이며 f'(x,y)는 w가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의미한다. 이때 상관계수 γ(s,t)는 -1과 1사이의 값을 갖게 되 며, 상관에 관한 식으로부터 알 수 있는 바와 같이 상관함수 또는 상관계수는 주파수영역에서 구해질 수 있다.

#### 2.3 적외선 열화상 카메라 열 해석방법[15]

적외선 열화상 카메라는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 2µm~13µm 대역을 사용한 다. SW(shortwave) 영역은 2µm~5µm의 대역을 사용하고 LW(longwave) 영역은 8 µm~12µm의 대역을 사용한다. SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다. 어떤 파장이라도 대상체에 부 딪히는 모든 복사선을 흡수하는 물체를 흑체(blackbody)라고 정의하는데, 이 흑 체는 모든 빛을 똑같이 방출시킬 수 있으므로, 온도 검출은 흑체를 기준으로 하여 보정된 값으로 나타낸다. 흑체 온도 함수로 나타내는 보정기능은 대상물 의 정확한 온도를 측정하기 위하여 실시되며, 방사에너지 변환에 사용된다.



Fig. 4 Electromagnetic spectrum

스캐너 디텍터에 의해 받아들여진 방사에너지는 물체로부터 뿐만 아니라 대기, 스캐너 광학계에서 나오는 방사에너지도 포함되기 때문에 대상물의 온도 계산 에 영향을 미친다. 따라서, 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄 및 물체에서 반사되어진 방사에너지를 모두 고려하여야 한다. 이 모든 인 자를 고려한 온도 측정공식은 식 2.3.1과 같이 표현된다. 여기서, 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$E_m = E(T_{obi}) \times r \times \varepsilon + r(1-\varepsilon) \times E(T_{amb}) + (1-r) \times E(T_{atm})$$
(2.3.1)

여기서, *E*(*T*)는 온도 *T*일 때 흑체로부터 방사된 방사량에 비례하는 신호 값 으로서 물체, 대기에 관한 함수이다. *E<sub>m</sub>*은 측정된 총 방사량의 온도 값이며 χ 는 유효한 대기 전달이다. ε은 물체의 복사능(emissivity) 또는 방사율로서 0<ε <1의 범위를 갖으며 *Q<sub>atm</sub>*와 *Q<sub>amb</sub>*은 각각 대기와 주위의 온도이다.

#### 2.4 결합형 유한요소-경계요소법의 해석

1960년대에 들어서 Gladwell과 Zimmermann[16]에 의해 음향 유한요소법의 모 델링이 소개된 후 Arllett와 Zienkiewicz[17]는 헬름홀츠(Helmholtz)방정식에 유한 유소법을 적용하여 복잡한 경계조건을 가진 문제를 해결하는 방법을 소개하였 고, 이를 바탕으로 음향 및 음압해석에 유한요소법을 적용하면서 구조-음향 연 성해석을 위한 노력이 시도되었다. 이후, 1980년대에 와서 음향계의 수치계산에 유한요소법 대신 경계요소법의 사용이 급격히 늘어나기 시작하였다. 유한요소 법 대신 경계요소법을 사용하게 되면 경계면만 모델링하면 되므로 모델링하는 시간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 무한 경계영역에서의 음압 및 소음예측 이 가능하게 되어서 경계요소법의 사용은 빠르게 확산되어왔다. 하지만 경계요 소법 또한 아직까지 선형방정식과 균일 매체에서만 응용이 가능할 뿐만 아니라 계산시간이 길며, 구조물의 진동이나 동적거동을 파악하는 데에는 유한요소법 보다 우위를 확보하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 구조물-음향의 연성 해석에 있어서 구조계는 유한요소법을, 음향계는 경계요소법을 적용한 상용코 드, SVS<sup>1</sup>) (structural vibration simulator)를 사용하여 해석하였다.



<sup>1)</sup> SVS (structural vibration simulator)는 조선대학교 정보제어계측공학과 장순석교수 연구팀의 개발로 제작된 상용 Package임.

### 제 3 장 실험장치

### 3.1 실험장치 구성

본 실험에서는 상변화물질로 녹는점이 53.2℃, 끓는점이 300℃인 파라핀 (n-Octadecane)을 사용하였으며, 그 물성치는 Table 1과 같다.

Properties	Unit	Value	
Melting Temperature	°C	53.2	
Boiling Temperature	$^{\circ}\mathrm{C}$	300	
Thermal Conductivity	W/m · K	0.210	
Density	$\mathbf{kg}/\mathrm{m}^{3}$	863.03	
Specific Heat	kJ/kg • K	10.56	
Viscosity	$m^2/s$	0.00028	
Heat of Fusion	kJ/kg	241.60	
Thermal Expansion Coefficient	-	0.001	

Table 1 Thermophysical properties of n-Octadecane

Fig. 5는 실험장치의 개략도로써 용융용기의 크기는 가로 × 세로 × 높이가 각각 15cm × 15cm × 12cm이며, 용융용기의 구성은 크게 발열을 위한 장치와, 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 장치 그리고 액상 파라핀에서 발생하는 물리 적 거동을 관찰할 수 있는 가시화부로 나눌 수 있다. 파라핀으로 채워진 내부 용기는 물로 채워진 외부탱크안에 설치되어 있는데, 이는 초음파 진동자가 작 동하였을 때 고체 파라핀의 영역에 초음파의 가진으로 인해 발생할 수 있는 과 부하로부터 진동자를 보호하고, 실험도중 초음파 진동자의 가열로 인한 열전도



Fig. 5 Schematic diagram for the present experimental set-up



(a) Front view



(b) Bottom view

Fig. 6 Schematic diagram of the present test section showing the position of ultrasonic transducers and thermocouples

의 영향을 최소화하기 위함이다. 또한 용융용기의 벽면을 통한 공기 중으로의 열손실을 방지하기 위하여 용기외부에 6mm의 석면판, 20mm의 압축 스티로폼 그리고 5mm의 베이크라이트 순으로 단열벽을 설치하였고 용기의 상부는 단열 과 함께 용융현상을 관찰할 수 있도록 Pvrex glass를 사용하였다. 용융용기의 한 쪽 벽면에는 220V-800W의 가열판히터가 장착되어 있고, 자동전압공급장치 (automatic voltage regulator, AVR)를 이용하여 용융이 지속되는 동안 인가된 전 압을 일정하게 공급함으로써 등열유속 가열조건(constant heat flux condition)을 만족시킬 수 있도록 하였다. 또한, 40kHz의 일정한 주파수를 발생하기 위하여 주파수 발생장치(frequency generator)를 제작하여 초음파 진동자로부터 40±1kHz 의 주파수를 방사할 수 있도록 하였다. 주파수 발생장치에서 발생된 주파수는 오실로스코프에서 실시간으로 모니터링된 후 용융용기에 부착된 진동자에 전달 되어 용기의 바닥 면을 높은 주파수로 여기시킴으로써 유동장에 강력한 음장을 형성하게 된다. 또한, 용융과정 중 파라핀의 온도를 측정하기 위해 K-type의 열 전대를 미리 선정한 위치(x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 과 z=0.5, Fig 6(b) 참조)에 설치하 였고, 열전대의 위치를 정확하게 제어하기 위해서 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같 이, 0.5mm의 정밀도를 가진 위치제어시스템(Traverse)을 사용하였으며, 모든 열 전대는 온도 측정부분을 제외한 나머지 부분을 절연테잎과 스테인레스 튜브로 절연하여 열전대 자체를 통한 열전도 현상까지도 최소화시켜 상변화 물질의 정 확한 온도를 측정할 수 있도록 하였다. 열전대에서 측정된 온도 데이터는 데이 터획득장치(data aquisition system)에 의해 매 1분마다 PC에 기록되었다.

또한 열전달 과정 중 액상 파라핀에 초음파 진동을 가진한 경우 유동장에서 발생하는 물리적 거동을 고찰하기 위하여 입자영상추적계와 열화상카메라를 도 입하였다. 용융과정 중 발생하는 물리적 거동을 관찰하기 위해서 용융용기의 전면에 가로 × 세로가 120mm × 100mm인 가시화 창을 특수 제작하였고, 입자 영상추적계는 Argon-Ion레이저와 CCD카메라, CCD제어기, 이미지보드와 해석 프로그램(cactus2000)으로 구성되어 있으며, Fig. 7은 가시화 실험장치의 개략도 이다.



Fig. 7 Experimental set-up for visualization

#### 3.2 실험과정

고체 상태의 파라핀을 녹여 용융용기에 10cm 높이까지 채워 넣고 응고시킨 후 응고된 파라핀의 전체 영역의 온도가 실내온도와 평형을 이루게 하기 위해 서 하루 동안 실온(26℃)에 놓아둔다. 그 다음 액상파라핀의 응고과정 중 수축 으로 인한 함몰부위에 액상의 파라핀을 보충시켜 다시 응고시킨 후 표면의 불 규칙한 면은 긁어내거나 뜨거운 공기를 불어넣어서 평평하게 만든다. 본 연구 에서는 열전달 프로세스를 구성하기 위하여 가열조건으로 등열유속조건을 채택 하였고, 단위 면적당 열유속(q")은 판히터의 단면적(A)과 히터에 가해지는 전류 (I)와 전압차(V)를 통하여 얻어진 저항값(R=V/I)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$q'' = \frac{I^2 R}{A} \tag{3.2.1}$$

일반적으로 파라핀은 온도가 200℃를 넘어서면 탄소결합의 붕괴로 물성치가 변하기 쉽다[11]. 따라서 본 연구에서는 액상파라핀의 온도가 200℃를 넘지 않 도록 용융현상이 끝날 때까지 다음과 같은 열유속[18]을 각각 공급하였다.

(1)  $q'' = 11511.91 \text{ W/m}^2$  (Ra\*=5.80×10<sup>7</sup>) (2)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$  (Ra\*=3.24×10<sup>7</sup>)

일정한 열유속의 경계조건은 ± 20%의 입력전압의 변동에도 ± 1%의 오차로 출력전압을 유지할 수 있는 정전압 공급장치에 의해 획득되었다. 또한 정확한 온도 데이터 획득을 위하여 실험 전에 모든 열전대들을 보정(Calibration)하였으 며 동일 조건 하에서 용융을 3번 실시하여 측정된 온도의 평균 온도를 사용하 였다. 히터에서 실측된 온도와 히터 평균 온도 차이는 최대 ± 5℃ (± 3.3%)이었 으며, 상변화 물질의 경우는 최대 ± 3℃(± 2.4%) 정도였다.

본 연구에서는 주파수 발생기의 특성상 발진주파수의 영역을 40kHz로 고정 하였지만, 초음파 진동 강도의 영향이 상변화 열전달에 미치는 영향을 조사해 보기 위하여 전압출력을 50~300W로 변화시켜가며 용융을 실시하였다.

또한, 가시화를 위해서 가시화 입자인 나일론 12를 시험부에 투입하고 초음 파 가진 출력에 따라 Argon-Ion레이저의 출력을 1W~1.5W 정도로 조정하여 시 험부에 수직으로 가시광을 조사하였다. 또한 CCD카메라를 레이저 가시광에 의 해 형성된 단면과 수직방향으로 설치하여 30fps(frame per second)의 속도로 촬 영하였다.

#### 3.3 수치해석 방법 및 절차

#### 3.3.1 유한요소법에 의한 평판의 수치해석

초음파 진동부는 Fig. 5와 같이 진동판 밑면에 부착된 진동자들의 가진에 의 해 진동판에 횡진동이 발생한다. 이러한 진동판의 진동변위 분포를 구하는 데 에는 이론적 해석이 어렵기 때문에 수치해법을 이용하였으며, 진동판의 진동해 석을 위해서 유한요소법을 이용하였다. 진동부는 ANSYS<sup>TM</sup>의 Brick 20 node type 95를 이용하여 유한요소 모델링을 한 다음 Fig. 8과 같이 SVS의 Node 정 렬순서에 맞게 재배열하였으며, 이와 같이 형성된 유한요소 모델링의 예를 Fig. 9에 나타내었다. 해석 평판의 모델링은 ANSYS<sup>TM</sup>의 전처리기를 이용하여 실시 하였으며, 273개의 요소(element)와 1996개의 절점(node)으로 구성되었다. Fig. 9 의 유한요소 모델링에서 동그라미를 형성하고 있는 영역이 진동판 밑면에 진동 자가 부착되어 있는 부위를 나타내며, 진동자에 의한 가진 주파수 *f* 는 실험조 건에서 제시된 바와 같이 40kHz를 사용하였다.



Fig. 8 Schematic diagram of each finite element composed of 20 quadratic nodes



Fig. 9 Finite-element meshed for a vibrating plate



Fig. 10 Fixed boundary condition of a vibrating plate

Fig. 10은 원형의 진동자에 가해진 고정조건을 보여주는 것으로 원형의 진동 자를 제외한 나머지 부분의 절점은 모두 고정되어 있다.

#### 3.3.2 경계요소법에 의한 수치해석

본 연구에서는 음향해석을 위해 경계요소법을 이용하였으며, 요소의 크기는 파장의 1/5 이내로 하였다. 즉, 매질인 액상파라핀의 전파속도 *c*는 온도에 따라 다르지만 대략 1000m/s이고, 진동주파수 *f*는 40kHz이므로 파장 λ (=*c/f*)는 약 25mm가 되므로, 요소 크기의 최대 한계는 약 5mm가 된다. 하지만, 실제 해석 을 위한 모델링에서는 이보다 훨씬 작은 요소(최대 3.5mm)를 사용하였으므로, 주파수의 진동을 해석하는 데에 필요한 기본조건은 충분히 만족한 상태에서 해 석이 이루어졌다.

매질에 가해진 압력분포를 구하기 위해서 경계요소법을 이용할 경우, 매질을 투과하는 음파의 전파속도와 매질의 밀도가 중요한 변수로 작용된다. 게다가 음파의 전파속도와 매질의 밀도는 온도와 밀접한 관련이 있기 때문에 온도의 영향을 반드시 고려해야하나 가열되고 있는 유체의 정확한 평균온도를 구한다 는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 국부 열전달계수 등 각종 물리량을 측 정하고자 할 경우 가열된 유체의 평균온도를 구하기 위해서 일반적으로 식 3.3.1이 이용된다.[11].

$$T_{avg} = \frac{1}{2} (T_h + T_{\infty})$$
(3.3.1)

식 3.3.1을 이용해서 액상파라핀의 대략적인 평균온도가 구해지면 시약 제조회 사에서 제시한 밀도 변화식 3.3.2를 이용하여 액상파라핀의 밀도를 구한다.

$$\rho = 778.3 \exp[-8.249 \times 10^{-4} (T-50)]$$
(3.3.2)

위에서 구해진 밀도와 체적탄성계수, E(혹은 압축계수,  $k_T$ )의 관계로부터 매 질을 투과하는 음파의 속도는 식 3.3.3을 이용하여 구한다.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_T \rho}}$$
(3.3.3)

$T_{anter}$ another $\Gamma^0 C^1$	Bulk modulus of elasticity (N/m <sup>2</sup> )				
Temperature [C]	1 atm	1000 atm			
60.0	$1.06 \times 10^{9}$	$1.96 \times 10^{9}$			
79.4	$9.61 \times 10^{8}$	$1.82 \times 10^{9}$			
98.9	$8.62 \times 10^8$	$1.72 \times 10^{9}$			
115.0	$7.81~\times~10^8$	$1.64 \times 10^9$			
135.0	$6.94 \times 10^8$	$1.56 \times 10^{9}$			

Table 2 Bulk modulus of elasticity of n-Octadecane

Table 2는 1기압과 1000기압 하에서 액상파라핀(n-Octadecane)의 압축계수를 실험적으로 구한 것으로 CRC handbook of chemistry and physics[19]의 값을 준 용하였다. 또한, 일반적으로 유체 매질에서의 음파의 속도는 매질의 온도와 비 례관계가 있는 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서는 식 3.3.2와 3.3.3을 이용 하여 대략적인 음파의 속도 범위(978m/s < v < 1074m/s)를 결정하여 음압을 계 산하였다. 또한, 계산된 음압분포와 열전달과의 상관관계를 알아보기 위해 임의 의 지점(x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8과 y=0.25, 0.5, 0.75의 교점)에서 국부열전달계수를 구하고, 식 3.3.4를 이용하여 초음파 진동이 가진된 경우와 가진되지 않은 경우 의 비로써 열전달 향상율을 계산하였다.

$$h_{aug} = \frac{h_{with ultrasonics}}{h_{without ultrasonics}}$$
(3.3.4)

### 제 4 장 실 험 결 과

#### 4.1 히터표면의 온도분포

히터표면으로부터의 열전달은 초기에는 에너지가 전도에 의존하여 액상 파라 핀으로 전달되다가 그 이후부터는 자연대류에 의해 고상 파라핀에 전달되는데, 이때 전달에너지는 고상 파라핀을 용융시키거나 액상 파라핀의 온도를 높인다. 용융현상이 진행되는 동안 열전달계수는 액상층의 확산으로 인한 열저항, 자연 대류 등의 영향을 받는다. Fig. 11은 열전달 현상을 규명하기 위하여, 각각의 열 유속 조건 하에서 히터표면의 평균 온도분포를 도시한 것이다. 앞 절에서 언급 한 것처럼 동일 조건 하에서 용융을 3번 실시하여 측정된 온도의 평균 온도를 도시하였으며 히터에서 실측된 온도와 히터의 평균 온도 차이는 최대 ± 5°C (± 3.3%)였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 초음파 진동이 가진된 경우 용융시간이 최고 약 1/2.5배 단축되었다. 또한 초음파 진동이 가진된 때 용융 중반 이후에 히터표면의 온도 상승이 관찰되는데, 이는 용기 바닥면의 파라핀이 제거되면서 부터 초음파 진동에 의해 활성화된 공동(cavity)과 용기 바닥면에서 전이된 초음 파 진동이 히터 표면에 전달되어 히터표면에 형성된 공동을 이탈시키고, 히터 표면의 액막이 파괴됨으로 인해 건조영역(dry patch)이 형성되어 가열되기 때문 이다.



Fig. 11 Variations of heater surface temperature over time

#### 4.2 FoSte\*(무차원 시간)에 따른 고-액 경계면의 위치

상이한 조건의 여러 결과를 비교하기 위하여 Fourier수(F<sub>o</sub>)와 변형 Stefan수 (Ste\*)를 곱하여 무차원 시간으로 표시하였다. 이런 방식으로 시간을 설정하면 특성높이(fourier수)와 액-고상의 열전달 추진력(stefan수)에 무관한 시간축이 설 정된다[11]. 초음파 진동이 가해지지 않은 자연 용융의 경우 식 2.1.9를 유한차 분법이나 유한요소법 등으로 계산하여 고-액 인터페이스의 위치를 구할 수 있 으나, 본 연구에서는 초음파 진동이 가해진 경우 수학적 모델링의 어려움과 심 화 연구를 위하여 수치해석 과정은 생략하고 실험적 결과만을 도시하였다.

Fig. 12~16은 각각의 열유속 조건 하에서 자연 용융과 초음파 진동을 가진 하여 용융하였을 때 고-액상 경계면의 위치를 F<sub>o</sub>Ste\*에 대해 도시한 것이다. 각 각의 열유속 조건에서 용융시 용기바닥면의 하부 영역보다는 상부 영역에서의 용융이 발달된 포물선 형태를 띠고 있다. 이는 히터표면을 따라 가열된 액상파 라핀이 자유면(free surface)에 이르러 최고온도에 달하고 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼앗겨 가는 자연대류의 흐름 때문에 발생된 것이다.

Fig. 14(a)에서 볼 수 있듯이 열유속 q"=11511.91 W/m<sup>2</sup>이 주어진 경우 약 F<sub>o</sub>Ste\*=0.9×10<sup>5</sup> 이전에는 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우 모두 용융 비율이 큰 차이가 없으나 F<sub>o</sub>Ste\*=0.9×10<sup>5</sup> 이후 용융이 급속히 가속화되어 대부분의 용융이 이루어짐을 알 수 있다. 또한, 열유속 q"=6433.13 W/m<sup>2</sup> 이 주 어진 경우 역시 Fig. 15(b)에서 보는 바와 같이, 초음파 진동이 가해지면 자연용 융에 비하여 용용이 F<sub>o</sub>Ste\*=1.2×10<sup>5</sup> 이후에 급격하게 이루어지는 것을 볼 수 있 다. 이는 용융에 대한 초음파 진동의 영향이 각각의 q"=11511.91 W/m<sup>2</sup>, q"=6433.13 W/m<sup>2</sup> 열유속조건 하에서 F<sub>o</sub>Ste\*=0.9×10<sup>5</sup>와 F<sub>o</sub>Ste\*=1.2×10<sup>5</sup> 이후 각각 두드러짐을 의미한다. 다만 용융 초기에는 용기 벽면을 타고 전달된 초음파 진 동의 영향으로 인하여 고-액상 인터페이스의 위치, 즉 용융양에서 다소 차이가 나게 된다.



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 12 Melting shape variations at  $F_oSte^{*}\!\!=\!\!0.3{\times}10^5$ 



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 13 Melting shape variations at  $F_oSte^{*}\!\!=\!\!0.6{\times}10^5$ 



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 14 Melting shape variations at  $F_oSte^{*}\!\!=\!\!0.9\!\!\times\!\!10^5$ 





(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 15 Melting shape variations at  $F_oSte^{*}{=}1.2{\times}10^5$ 



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 16 Melting shape variations at  $F_0Ste^*=1.5 \times 10^5$ 

#### 4.3 열전달계수 측정

#### 4.3.1 FoSte\*(무차원 시간)에 따른 열전달계수

일반적으로 자연대류가 지배적인 정상상태의 계에서는 Nusselt수를 Rayleigh수 의 함수로 표시하여 열전달 계수를 표현한다. 그러나 용융이 진행되는 비정상 상태에 대한 상관식은 흔히 두가지 형태로 표시된다. 첫째, 기하학적 길이에 대 하여 무차원화한 시간, Fourier수와 최대 액상축열을 잠열로 무차원화한 Stefan 수를 곱한 F<sub>o</sub>Ste과 일정한 특성길이를 사용한 Rayleigh수로 Nusselt수와 관계 맺 는 방법이 있고 둘째, Stefan수와 시간에 따라서 변하는 특성길이를 사용한 Rayleigh수로 Nusselt수와 관계 맺는 방법[11]이 있다. 본 연구에서는 전자를 사 용하였으며, 고-액 경계면의 온도가 상변화 물질인 파라핀의 용융온도와 같다고 가정한다면 히터표면에서 액-고상 경계면으로의 열전달계수는 식 4.3.1에 의해 계산할 수 있다.

$$Nu = \frac{q^{''}H}{K(T_h - T_f)}$$
(4.3.1)

Fig. 17은 식 4.3.1에 의해 구해진 히터표면에서의 열전달계수를 실험적으로 도시한 것이다. 여기서 Nusselt number (Nu/Ra\*<sup>0.25</sup>)는 상변화 용융과정동안 자연 대류가 발생하였을 때 열전달계수의 계산에 적용하는 일반적인 값이다[11],[20].
본 연구에서는 등열유속 조건을 적용하였기 때문에 가열면의 온도는 용융이 끝날 때까지 계속 상승하게 된다. 따라서 Rayleigh수(Ra) 대신 수정 Rayleigh수(Ra\*)를 사용하였다. Fig. 17에서 보는 바와 같이, 열전달계수가 용융초기에는 급격히 감소하다가 점차 완만하게 감소하고 있는데, 이런 현상이 나타타는 원 인은 용융 초기에는 전도에 의한 열전달이 주를 이루기 때문에 얇은 파라핀 층 을 사이에 두고 고-액 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하다가 점차 액상 층 이 두터워지면서 대류에 의한 열전달이 주를 이루기 때문이라 할 수 있다.
F₀Ste\*=0.3×10<sup>5</sup> 이후 열전달계수의 감소 추이가 약화되는 점을 고려해 본다면



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 17 Nusselt number variations on the heater surface with FoSte\*

이 지점부터 대류가 활성화됨을 예측할 수 있다. 하지만 각각의 열유속에 대해 서 초음파 진동이 가진된 경우, 히터표면에서의 열전달계수는 예상과 달리 자 연용육의 경우에 비해 작고. F<sub>o</sub>Ste\*=0.9×10<sup>5</sup>와 1.2×10<sup>5</sup> 이후에는 더욱 감소하다. 이는 초음파 진동으로 액상영역에서 발생한 공동이 히터 표면에서 이탈하면서 가열면에 마른 부분이 형성되고 이로 인해 열전달이 감소되기 때문이다. 실제 로 Kirby 등[21]은 기포가 가열면 상에서 성장할 때 기포 아래의 얇은 액막의 증발이나 파괴에 의해 생성되는 마른 영역에서의 열전달 감소를 보고한 바 있 다. 또한, 열전달의 감소로 마른 영역의 가열면 온도는 상승하고 기포가 이탈하 면서 마른 부분이 주위 액체에 의해 다시 적셔지며 전 과정은 반복된다. 즉, 히 터표면의 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 시작 하는 지점(F<sub>o</sub>Ste\*=0.9×10<sup>5</sup> 1.2×10<sup>5</sup>)은 4.2절에서 언급한 용융이 급속히 이루어지 기 시작하는 지점과 일치한다. 다시 말해, 이 지점부터 초음파 진동의 가진으로 발생하는 물리적 요소가 열전달을 활성화시킴을 의미하며, 이 지점 이후부터는 바닥면의 파라핀 두께가 얇아지면서 초음파 진동의 영향이 바로 액상파라핀에 전달되고 히터표면에 형성된 액막이 심하게 파손되면서 열전달계수가 급감하여 용융이 촉진되는 것이다. Fig. 18은 용융초기에 히터표면의 열전달계수가 급속 히 감소하는 영역 즉, 0 ≤ F₀Ste\* < 0.3×10<sup>5</sup>에서 초음파 진동이 열전달에 미치 는 영향을 고찰해보기 위해 액상영역에서 자연 대류를 고려하기 위해서 나눈 값인 Ra\*<sup>0.25</sup>를 제거한 뒤, 순수 전도영역에서의 Nusselt수 값을 무차원 시간에 대해 도시한 것이다. Fig. 18에서 볼 수 있듯이 순수 전도영역에서는 초음파가 가진된 경우에도 열전달계수의 감소는 관측되지 않았다. 따라서, 상변화 과정시 전도 영역에 초음파 진동을 방사하는 것은 열전달 증진에 아무런 영향을 미치 지 못하므로 에너지절약 차원에서 보면 비효율적이라 하겠다.



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 



#### 4.3.2 τ(무차원 시간)에 따른 열전달계수의 예측

본 연구에서는 액상에서의 열전달 촉진여부를 확인해 보기 위해서 자연용용 과 초음파 진동 가진 시 용융에 걸리는 시간과 완전 용융 시간의 비를 의미하 는 무차원 시간(τ)을 정의하였다. Fig. 19는 초음파 진동자가 부착된 지점 (X=0.2)과 Y축의 무차원좌표가 0.5인 지점에서 각각의 열유속이 주어졌을 때, 자연용융과 초음파 진동 가진 시 무차원 시간파라미터, τ에 따라 형성되는 온 도를 보여주고 있다. 각각의 열유속 조건하에 초음파 진동이 가진 될 경우 자 연 용융시보다 용융이 시작되는 온도가 15~20 ℃ 더 낮게 형성됨을 알 수 있 다. 이러한 경향은 거의 모든 지점에서 관측되었으며 이는 초음파가 가진 될 경우 액상영역에서 열전달 계수의 향상을 의미하며, 에너지 절약 차원에서 보 면 효율적이라 하겠다.



(b)  $q'' = 6433.13 \text{ W/m}^2$ 

Fig. 19 Temperature history of PCM measured at X=0.2 and Y=0.5 against normalized time( $\tau$ )

#### 4.4 가시화를 통한 열전달 촉진 규명

본 연구에서는 상변화 열전달 프로세스 중 초음파 가진시 용융이 가속화되는 원인을 규명하기 위하여 입자영상추적계(PIV)와 열화상 카메라를 이용하여 초 음파 가진 시 물리적 거동을 가시화하고, 가시화 실험을 통하여 가열중인 액상 파라핀내에 방사된 초음파 진동이 강한 음향흐름을 발생시켜 에너지 전달 효율 을 향상시킴을 규명하였다.

입자영상추적계 분석결과 Fig. 20에서 볼 수 있듯이, 초음파 가진시 용기바닥 면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 음향흐름이 형성됨을 보여준다. 반면 자연용융의 경우에는 부력으로 발생된 전형적인 자연대류의 흐름만이 나 타났다. 이에 더하여 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향을 구체적으 로 알아보기 위해 6433.13 W/m<sup>2</sup>의 열유속 하에서 출력강도를 300W, 175W(기준 출력강도)와 50W로 구분하여 계측한 결과는 Fig. 21에 나타난 바와 같다. Fig. 21에서 볼 수 있듯이 높은 출력이 주어질수록 상향의 강한 음향흐름이 발생하 는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고출력의 초음파 진동이 파동의 진폭에 영향 을 끼쳐 초음파 강도를 강화시키는 것으로 판단된다.

Fig. 22는 열화상카메라를 사용하여 음향흐름의 발달로 인해 형성된 열유동 현상을 가시화 한 것이다. Fig. 22(a)에서 볼 수 있듯이 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. 20의 입자영상추적의 결과와도 비교적 잘 일치하며, 초음파 진동을 가진 한 경우 강한 음향흐름으로 인하여 Fig. 22(b)에서 보듯이 열유동(thermally-oscillating flow)이 발달되었고, 그 결과 열전달이 촉진됨을 알 수 있다.



(a) Melting without ultrasonic vibrations



(b) Melting with ultrasonic vibrations

# Fig. 20 Two dimensional velocity profiles measured at the visualization window



(a) output power level of 300W



(b) output power level of 175W



(c) output power level of 50W

Fig. 21 Two dimensional velocity profiles by changed output power level measured at the visualization window



(a) Melting without ultrasonic vibrations



(b) Melting with ultrasonic vibrations

Fig. 22 Comparison of thermal flow fields in the liquid paraffin

### 4.5 자연용융과 초음파 가진 용융시의 소모 전력량 비교

전력량계를 사용하여 자연 용융시와 초음파 가진 용융시 소비된 전력량을 측 정하였다. 자연 용융의 경우에는 순수 히터에서 소비된 전력량을 측정하였고 초음파 가진 용융의 경우에는 히터에서 소비된 전력량과 초음파를 발생시켜 진 동자를 구동시키는 초음파 진동 발생장치에서 소비된 전력량을 함께 측정하였 다. 측정결과(Table 3)를 살펴보면, 초음파 진동을 가진하여 용융시킨 경우가 자 연용융의 경우보다 약 2.3 ~ 2.9Wh 정도 소비 전력량이 절약됨을 알 수 있다.

Table	3	Comparison	of the	total	consum	ned	electricity	under
		the out	put po	wer le	evel of	175	W	

Heat Flux (W/m <sup>2</sup> )	Consumed electricity at heater (Wh)	Consumed electricity at U.V. device (Wh)	Total consumed electricity (Wh)	Melting time (Min)
11511.91 (Melting without ultrasonic vibrations)	442.6	_	442.6	160
11511.91 (Melting with ultrasonic vibrations)	209.8	230.5	440.3	72
6433.13 (Melting without ultrasonic vibrations)	437.6		437.6	278
6433.13 (Melting with ultrasonic vibrations)	149.6	285.1	434.7	93

#### 4.6 매질내의 음압분포 측정 결과

액상 파라핀의 유동장 가시화를 통해서 알게 된 열전달 촉진요소의 하나인 음향흐름은 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에서 기인된다[22]. 일반적으로 액체에서의 음압은 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 구할 수 있 으나, 본 실험과 같이 액상 파라핀의 온도가 120°C 이상으로 가열될 경우는 하 이드로폰으로 측정한 데이터를 신뢰할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 결합형 유한요소-경계요소법을 도입하여 초음파 진동에 의해 파생되는 각종 물리량을 유한요소법을 이용하여 계산하고, 매질에서의 음압 분포는 경계요소법을 도입 하여 해석함으로써 액상에서의 압력분포의 변화를 규명하고 열전달과의 상관관 계를 찾고자 하였다. Fig. 23은 액상파라핀에 40 kHz의 초음파 진동이 가해진 경우 발생하는 압력 분포를 수치적으로 계산하여 가시화한 것으로, 초음파 진 동자 부근에서 높은 압력이 형성됨을 가시적으로 확인할 수 있다.



Fig. 23 Acoustic pressure distribution in the liquid induced by ultrasonic vibrations



(a) Acoustic pressure variations



(b) Augmentation ratio of local heat transfer coefficient

Fig. 24 Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer augmentation in case of output power level of 300W



(a) Acoustic pressure variations



(b) Augmentation ratio of local heat transfer coefficient

Fig. 25 Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer augmentation in case of output power level of 175W



(a) Acoustic pressure variations



(b) Augmentation ratio of local heat transfer coefficient

Fig. 26 Comparison between profiles of acoustic pressure and heat transfer augmentation in case of output power level of 50W

Fig. 24~26은 임의의 무차원 지점에서 압력 변화 추이와 열전달계수의 증가 율을 음파의 전파속도 (즉, 온도에 따라 변하는 음파의 속도)를 고려하여 각각 의 초음파 출력강도 300W, 175W, 50W로 나누어 도시한 것이다.

Fig. 24(a)~26(a)의 결과에서 확인할 수 있는 것처럼, 형성되는 압력분포는 초 음파 진동자가 부착된 지점(즉, X=0.2와 X=0.8)에서 주위보다 높은 압력이 형성 되는 것을 보여주고 있다. 특히, Y=0.25일 때, 초음파 가진시 초음파가 부착된 지점에서 압력이 가장 높게 형성되는 것을 볼 수 있으며, Y=0.5이상인 경우에 는 형성되는 압력분포가 큰 편차를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 압 력파동이 액상 파라핀 내에 전달되는 과정에서 중첩과 간섭이 일어나 압력의 평형이 이루어지기 때문이다. 또한 초음파 출력강도가 클수록 진동자 부근에서 의 압력 변화 추이가 심하게 나타남을 알 수 있는데, 열전달계수의 증감추세 역시 압력 변화 추이선과 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 24(b)~26(b)는 실험 을 통해 얻어진 국부열전달 계수를 식 3.3.4를 이용하여 열전달 향상비로 나타 낸 그래프이다. 열전달 향상비도 압력분포와 유사하게 초음파 진동자 부근에서 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 초음파 출력강도가 높을수록 열전달 향상비 도 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 매질 내에서의 초음파 진동의 가진으 로 인해 발생하는 압력 변동이 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 보여준 다. 결국, 초음파 진동을 가진 하였을 때 액상 파라핀에서 발생하는 물리적 거 동과 열전달 촉진 원인은 매질에서의 심한 압력변동과 밀접한 관계가 있는 것 으로 판단된다.

### 제 5 장 결 론

본 연구에서는 상변화 물질의 자연 용융과 초음파 진동 가진시의 용융과정을 살펴보고 열전달 촉진요소에 대하여 고찰해 보았다. 또한, 초음파 진동 가진시 액상영역에서 발생하는 압력분포 해석을 위해 결합형 유한요소-경계요소법 (coupled FE-BEM)을 이용하여 계산하고 열전달과의 관계를 알아보았다. 본 연 구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 액상 영역에 초음파 진동을 가진하여 용융시킬 경우 자연용융의 경우보다 용융시간을 최대 1/2.5배 정도 단축시킬 수 있으며, 소비 전력량 면에서는 약 2.3 ~ 2.9Wh 정도 에너지를 절감할 수 있다.
- 초음파 진동을 가진하면 상향의 강한 유체흐름인 음향흐름이 발생하게 되고, 음향흐름은 열경계층을 파괴하는 열유동을 발달시킨다.
- 3) 초음파 진동 가진시 매질내에 발생하는 압력분포는 열전달 향상에 기여한다.

### 참 고 문 헌

1. S.H. Cho, J.E. Sunderland, "Heat conduction Problems with Melting or Freezing, Journal of Heat Transfer", pp. 125-131, 1969.

2. C. Gau, R. Viskanta, "Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall", J. of Heat Transfer 108 pp. 204-209, 1986.

3. E.M. Sparrow, J.A. Broadbent, "Inward Melting in a Vertical Tube Which Allows Free Expansion of the Phase-Change Medium", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 309-315, 1982.

4. E.M. Sparrow, J.A. Broadbent, "Freezing in a Vertical Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 217-225, 1983.

5. T. Saitoh, K. Hirose, "High Rayleigh Number Solutions to Problems of Latent Heat Thermal Energy Storage in a Horizontal Cylinder Capsule", J. of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 534-553, 1982.

6. H. Reiger, U. Projahn, M. Bareiss, H. Beer, "Heat Transfer during Melting inside a Horizontal Tube", J. of Heat Transfer, Vol. 105, pp. 226-234, 1983.

7. H. Schliting, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, 1968.

8. R.M. Fand, J. Roods, P. Cheng, J. Kaye, "The Local Heat Transfer Coefficient Around a Heated Horizontal Cylinder in an Intense Sound Field", Trans. ASME, pp. 245-256, 1962.

9. Y. Iida, K. Tsutsui, R. Ishii, Y. Yamada, "Natural Convection Heat transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure", J. of Chemical Engineering of Japan, 24, pp. 794-796, 1991.

10. Y.G. Kim, H.Y. Kim, B.H. Kang, "Fundamental Mechanism of Boiling Heat Transfer Enhancement via Ultrasonic Vibration", Proceedings of the KAMES 2002 Joint Symposium, pp. 1522-1528, 2002.

11. C.S. Hong, "Studies on Heat Storing and Retrieving Characteristics in a Paraffin-Filled Horizontal Circular Tube", Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1990.

12. Y.G. Oh, S.H. Park, K.O. Cha, "An Experimental Study of Accelerating Phase Change Heat Transfer", KSME Int. J., Vol. 15, pp. 1882-1891, 2001.

13. A. Gadgil, D. Gobin, "Analysis of Two-Dimensional Melting in Rectangular Enclosures in Presence of Convection", Trans. of the ASME Vol. 106, pp. 20-26, 1984.

14. 이덕구, "PIV와 CFD를 사용한 분기사각 덕트내의 유동특성 연구", 석사학 위논문, 조선대학교, 2002.

15. 양동조, "적외선 열화상 카메라를 이용한 주행중 타이어 트레드부 온도 분 포해석", 석사학위논문, 조선대학교, 2002.

16. G.M. Gladwell, G. Zimmermann, "On Energy and Complementary Energy Formulation of Acoustic and Structural Vibration Problems". J. Sound. and Vib., Vol. 3, pp. 233-241, 1966.

17. P.L. Arlett, O.C. Zienkiewicz, "Application of Finite Element to the Solution of Helmholtz's Equation", Proc. IEE., Vol. 115, 1968.

18. 박설현: "초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향에 관한 연구", 석사 학위논문, 조선대학교, 2001.

19. W.G. Cutler, R.H. McMickle, W. Webb and R.W. Schiessler, J. Chem. Phys., 29, 727, 1958.

20. C.J. Ho, R. Viskanta, "Heat Transfer during Melting from an Isothermal Vertical Wall", Trans. of the ASME, Vol. 106, pp. 12-19, 1984.

21. J.G. Kirby, R.Stainforth, L.H. Kinnier, "A Visual Study of Forced Convective Boiling. Part II : Flow Patterns and Burnout for a Round Test Section", AEEW-R506, 1967.

22. V. Frenkel, R. Gurka, A. Liberzon, U. Shavit, "Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming using Particle Image Velocimetry", Ultrasoines, Vol. 39, pp. 153-156, 2001.