

음향장 내의 상변화 열전달 촉진에 관한 연구

양호동 · 나기대* · 오울권**

조선대학교 대학원, *조선대학교 기계정보공학과, **조선대학교 기전공학과

E-mail : ygoh@mail.chosun.ac.kr

A Study on the Enhancement of Phase Change Heat Transfer in Acoustic Fields

Ho-Dong Yang, Gee-Dae Na* and Yool-Kwon Oh**

Graduate School, Chosun University

*Department of Mechanical Information Engineering, Chosun University

**Department of Mechatronics Engineering, Chosun University

요 약

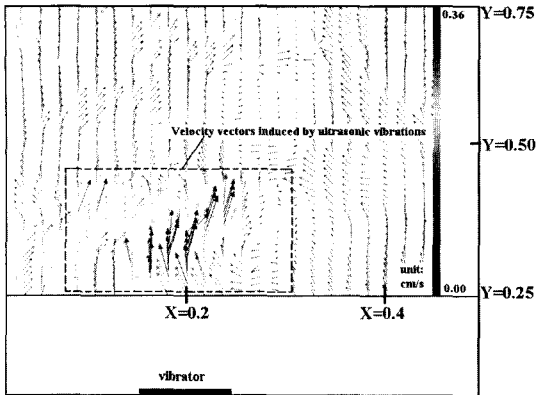
본 연구에서는 초음파 진동의 가진에 의하여 유도되어진 음향장 내에서의 열전달 결과를 실험과 수치적 해법을 통해 조사해 보았다. 초음파 가진시 용기 바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 “음향흐름”은 입자영상추적계(PIV)를 통하여 가시화 하였다. 또한, 음향흐름이 존재하는 상태에서 실험을 통해 구해진 열전달 향상비와 수치적 해법에 의해 구하여진 음압분포를 비교하여 보았으며, 수치적 해법을 위하여 결합형 유한요소-경계요소법(Coupled FE-BEM)을 적용하였다. 실험을 통한 연구결과와 수치적 해법을 통한 연구결과에서 우리는 매질내에서 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 음압 변동이 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다.

Abstract — The present study investigates on the experimental and numerical results of heat transfer in the acoustic fields induced by ultrasonic waves. The strong upwards flow which moves from the bottom surface in a cavity to the free surface called as “acoustic streaming” was visualized by a particle image velocimetry (PIV). In addition, the augmentation ratio of heat transfer was experimentally investigated in the presence of acoustic streaming and was compared with the profiles of acoustic pressure calculated by the numerical analysis. A coupled finite element-boundary element method (FE-BEM) was applied for a numerical analysis. The results of experimental and numerical studies clearly show that acoustic pressure variations caused by ultrasonic waves in a medium are closely related to the augmentation of heat transfer.

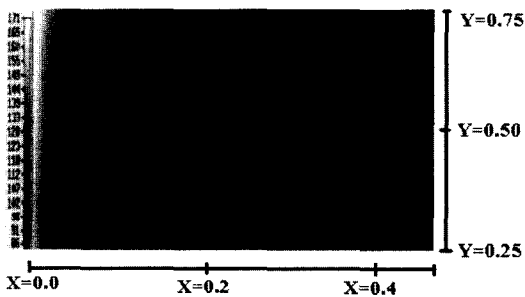
1. 서 론

열전달 문제에 있어서, 응용 혹은 응고와 같은 상변화는 일상 생활에서 흔히 접할 수 있는 현상이며, 공학적인 측면에서도 다양한 분야에 걸쳐 많은 응용 분야가 있는 문제이다. 예를 들어, 잠열을 이용한 에너지 저장 분야와 주조 공정 분야, 플라스틱 금형의 사출 분야, 금속의 용접 및 제련 분야, 반도체의 결정 성장과 같은 분야에서 그 응용이 이루어지고 있다. 특히, 근래에 들어 상변화 물질(phase change material, PCM)의 잠열을 이

용한 에너지 저장 기술은 태양열, 심야전기 등의 사용이 증가함에 따라 각광받는 연구 분야로 활발한 응용이 이루어지고 있다. 우리 일상 생활에서 상변화 물질의 활용이 보편화되고 있음을 감안해 볼 때, 보다 적은 에너지와 시간으로 상변이를 촉진할 수 있는 기술의 필요성이 대두되었다. 이 중에서 초음파 진동을 이용한 방법은 발열량이 큰 마이크로 칩의 전 영역에 대한 직접냉각시 그 효과를 증대시키는 가능성을 가지고 있으며, 이를 위해 김 등^[1]이 물의 비등 열전달 촉진을 위해서 제안한 초음파 진동을 사용하여 연구하였고, Lida 등^[2]은 수



(a) velocity field of acoustic streaming



(b) thermally-oscillating flow

Fig. 1. Fluid dynamics phenomena measured by Oh and Park (2002).

중에 초음파 진동으로 형성된 음장이 열전달을 증가시킬 수 있음을 보고한 바 있다. 또한 오와 박¹³⁾은 초음파 진동을 열전달 프로세스에 가하여 열전달 증진원인을 규명한 결과, 초음파 진동의 가진지 진동자 부근에서 강한 유체의 흐름(acoustic streaming)이 발생하였고(Fig. 1a), 초음파 진동에 의해 유도되어진 강한 음향흐름으로 인하여 열유동(thermally-oscillating flow)이 발달됨을 확인하였으며(Fig. 1b), 이를 통하여 초음파 진동을 사용함으로써 열전달이 촉진된다고 하였다. 이러한 유동장 가시화를 통해 열전달 촉진요소로 명백히 드러난 음향흐름은, 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에 기인하는 것¹⁴⁾이라고 알려져 있으며, 열전달 증진과 초음파 진동에 의해 형성된 음압과의 관계를 고찰해 보는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 초음파 진동을 사용하여 단열된 용융용기를 채운 액상파라핀에 음장을 형성하여, 실험을 통해 구해진 열전달 향상비와 초음파 진동 가진지 액상파라핀내에 발생하는 압력분포를 수치해석(coupled FE-BEM)을 통하여 알아보고, 음향장

내에서 열전달과 압력분포 사이의 상관관계를 규명해 보고자 한다.

2. 실험

본 연구에서는 상변화 물질로서 용융점이 53.2°C인 파라핀(n-octadecane)을 사용하였다. n-octadecane은 다른 정제된 파라핀에 비하여 가격이 저렴하고, 용융온도가 상온보다 높아서 상변화 영역에서의 상변이가 안정적으로 이루어지기 때문에 파라핀을 상변화 물질로 선정하였으며, 그 물성치는 다른 열적 특성 실험 없이 제조사(Shinyo Pure Chemical Co.)에서 제시한 값을 준용하여 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로서, 가로, 세로, 높이가 각각 13 cm×12.5 cm×12.5 cm 인 용융용기에는 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 지름이 40 mm인 볼트 조임 란즈방형 진동자 2개가 부착되어 40±1 kHz의 주파수를 방사할 수 있도록 하였

Table 1. Thermal properties of paraffin.

Properties	Unit	Value
Melting temperature	°C	53.2
Thermal conductivity	W/m · K	0.210
Density	kg/m ³	863.03
Specific heat	kJ/kg · K	2,873.88
Viscosity	m ² /s	0.00028
Heat of fusion	kJ/kg	241.60
Thermal expansion coefficient	-	0.001

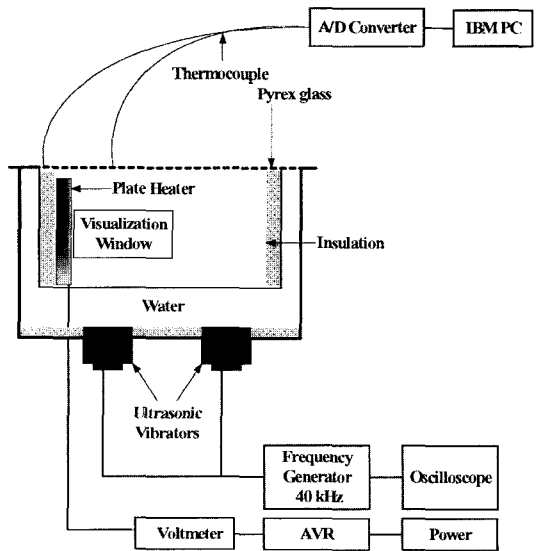


Fig. 2. Schematic diagram for the present experimental set-up.

으며, 주파수 발생기의 특성상 발진주파수의 영역은 40 kHz로 고정되었지만, 초음파 진동 강도의 영향이 상변화 열전달에 미치는 영향을 조사해 보기 위하여 전압출력을 70~340 W로 변화시켜가며 용융을 실시하였다. 주파수의 변화로 발생하는 영향을 최소화하기 위해 주파수 발생기에서는 일정한 주파수를 실험이 지속되는 동안 발생시키고, 발생된 주파수는 오실로스코프에서 모니터링 되었다. 본 연구에서는 가열 방식으로 등열유속 가열조건(constant heat flux condition)을 택하여 일정한 열유속 조건의 열전달 프로세스를 구성하기 위해서 자동전압공급장치(automatic voltage regulator, AVR)를 이용해 일정한 열유속($q''=6433.13 \text{ W/m}^2$)을 용융이 지속되는 동안 한쪽 벽면에 부착된 전기판히터에 공급하여 가열하도록 하였다. 가열이 지속되는 동안 발생된 열유속이 용기 내의 파라핀으로만 향하게 하기 위해 히터의 뒷부분은 석면 및 베이클라이트로 절연시켰고, 용융용기의 벽면을 통한 공기중으로의 열손실을 방지하기 위하여 용

기외부에 6 mm의 석면판, 20 mm의 압축 스티로폼과 5 mm의 베이클라이트 순으로 단열벽을 설치하였으며, 용기의 상부는 Pyrex glass를 이용하여 단열이 되도록 하였다. 또한, 용융과정 동안에 파라핀의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 0.5 mm의 정밀도를 가진 Traverse를 사용하여 열전대의 위치를 정확하게 제어할 수 있도록 하여 K-type의 열전대를 미리 선정된 위치($x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 과 $Z=0.5$, Fig. 2 참조)에 설치하였다. 여기서, 정확한 온도 데이터 획득을 위하여 실험 전에 모든 열전대들은 보정을 실시하였고, 동일한 조건하에서 용융을 3회 실시하여 평균 온도를 사용하였으며, 열전대에서 측정된 온도 분포는 데이터획득장치(A/D Converter)에 의해 매 1분마다 PC에 기록되었다. 초음파 진동 가진시 액상영역에서의 가시화를 위해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 Argon-Ion레이저를 이용하여 시험부에 수직으로 가시광을 조사하고, CCD 카메라를 레이저 가시광에 의해 형성된 조사면과 수직방향으로 설치하여 30 fps(frame per second)의 속도로 촬영한 후, CCD 카메라에 의해 획득된 영상을 이미지보드를 통해 저장하고 이를 상호상관알고리즘을 사용하는 Cactus2000을 이용하여 해석하였다.

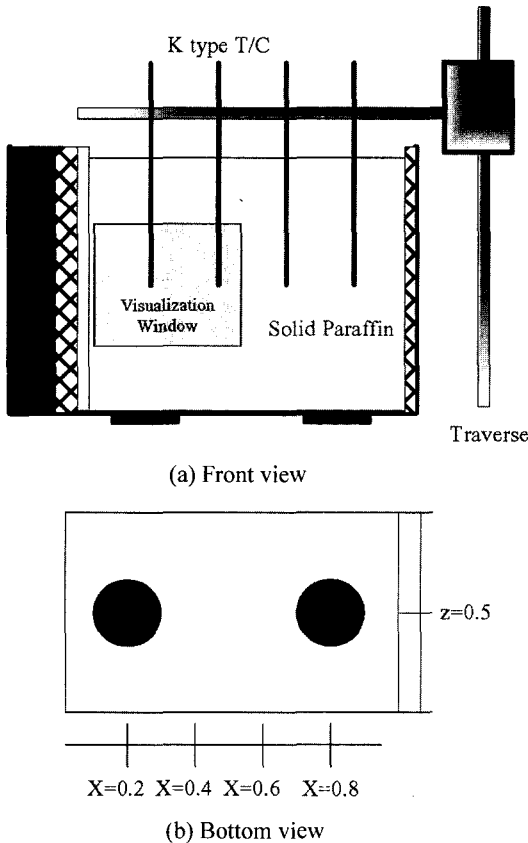


Fig. 3. Schematic diagram of the present test section showing the position of ultrasonic transducers and thermocouples.

3. 수치해석

일반적으로 액체에서의 음압은 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 구할 수 있다. 하지만, 본 연구에서와 같이 등열유속 가열조건하에서 용융용기내의 액상파라핀 온도가 135°C 이상 가열되는 경우, 액상파라핀의 온도가 120°C 이상 가열된 경우에는 하이드로폰으로 측정할 수 없는 실험상의 제약이 따른다. 따라서, 하이드로폰을 이용하여 액상파라핀내의 음압을 측정하는 방법 대신에 수치해석을 통해 음압분포를 알아보고자 하였다. 1960대에 들어서 Gladwell과 Zimmerman^[5]에 의해 음향 유한요소법의 모델링이 소개된 후 Arlett와 Zienkiewicz^[6]는 헬름홀츠(Helmholtz)방정식에 유한요소법을 적용하여 복잡한 경계조건을 가진 문제를 해결하는 방법을 소개하였다. 음향 및 음압해석에 유한요소법이 적용되기 시작한 후 구조-음향 연성해석을 위한 노력이 시도되었다. 1980년대에 와서 음향계의 수치계산에 유한요소법 대신 경계요소법의 사용이 급격히 늘어나기 시작하였다. 유한요소법 대신 경계요소법을 사용하게 되면 경계면만 모델링하면 되므로 모델링하는 시간을 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 무한 경계영역에서의 음압 및 소음예측이 가능하게 되어 경계요소법의 사용은 빠르게 확산되어 왔다. 하지만 경계요소법 또한 아직까지 선형방정식과 균일매체에만 응용이 가능할 뿐

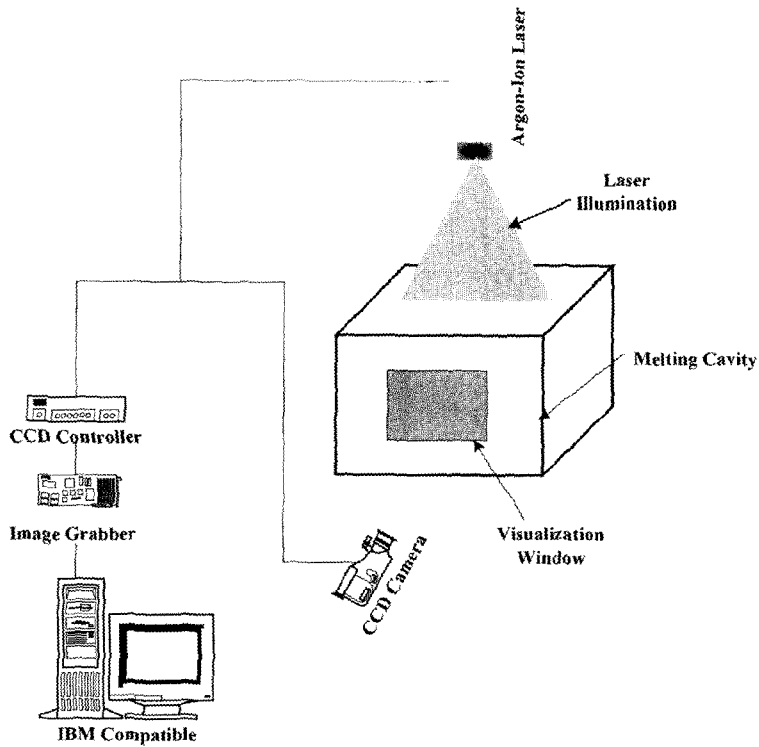


Fig. 4. Experimental set-up for visualization.

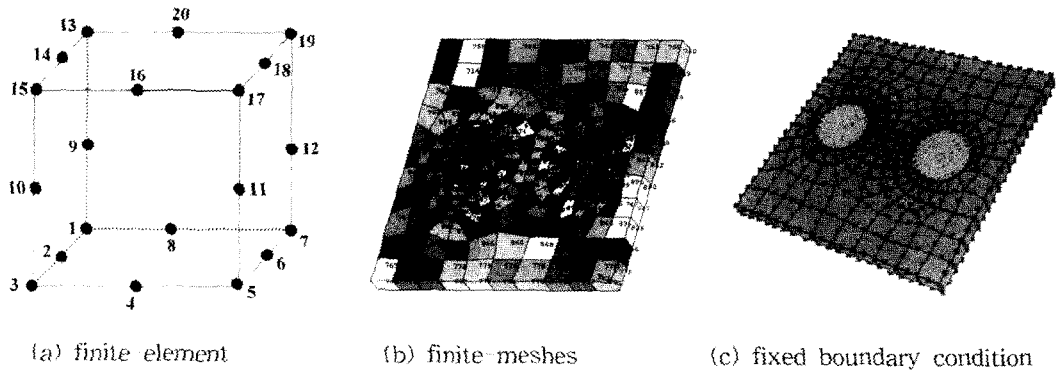


Fig. 5. Schematic diagram of a modeling for the numerical analysis.

만 아니라 계산시간이 길며, 구조물의 진동이나 동적거동을 파악하는 데에는 유한요소법 보다 우위를 확보하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 MacCollum과 Clementia⁷⁾, Jarn⁸⁾ 등이 보고한 바 있는 결합형 유한요소-경계요소법(coupled FE-BEM)을 적용하여 초음파 진동에 의해 파생되는 각종 물리량을 유한요소법을 이용하여 계산한 뒤 메질에서의 음압 분포를 경계요소법을 도입하여 해석하였으며, 구조물-음향의 연성해석에 있

어서 구조제는 유한요소법을 음향제는 경계요소법을 적용한 상용코드, SVS¹⁾(Structural Vibration Simulator)를 사용하였다.

초음파 진동부는 Fig. 2와 같이 진동판 밑면에 부착된 진동자들의 가진에 의해 진동판에 횡진동이 발생한

¹⁾SVS(Structural Vibration Simulator)는 조선대학교 제어계측공학과 장순석교수 연구팀의 개발로 제작된 상용 Package임.

다. 이러한 진동판의 진동해석을 위해서 유한요소법을 이용하였고, 한 진동부 안의 진동자들은 모두 병렬연결로 하나의 발전기에 의해 구동되므로 동일 위상의 진동을 진동판에 가하는 것으로 전제하였다. 진동부는 ANSYS™의 Brick 20 node type 95를 이용하여 유한요소 모델링한 후, Fig. 5의 (a)와 같이 SVS의 Node 정렬 순서에 맞게 재배열하였다. 이를 통해 형성된 유한요소 모델의 예를 Fig. 5의 (b)에 나타내었으며, 동그라미를 형성하는 영역이 밀면에 2개의 진동자가 부착되어 있는 부위로서, 185 W 진동부에 대한 것이다. 해석 평판의 모델링은 ANSYS™의 전처리기를 이용하여 실시하였으며 203개의 요소(element)와 1524개의 절점(node)으로 구성되어 있다. 또한, Fig. 5의 (c)는 원형의 진동자에 가해진 고정조건을 보여주는 것으로써, 진동자를 제외한 나머지 진동판의 모든 절점을 고정시킨 것을 나타내고

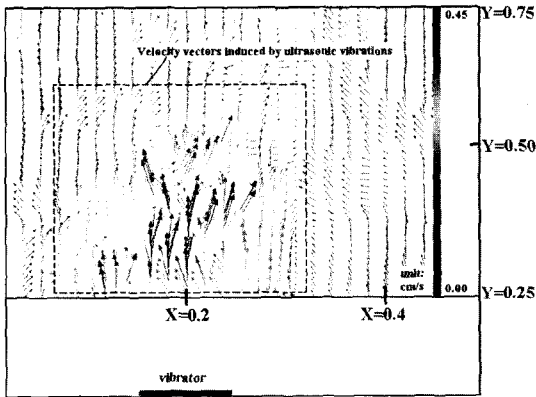
있다.

음향해석을 위해 경계요소법을 이용하여, 요소의 크기는 파장의 1/6 이내로 하였다. 액상 파라핀에서 전파속도 c 는 온도에 따라 다르지만 대략 1000 m/s이고, 진동 주파수, f 는 40 kHz이므로 파장 $\lambda(=c/f)$ 는 약 25 mm이다. 따라서, 요소 크기의 최대 한계는 약 4.2 mm이다. 실제 해석을 위한 모델링에서는 이보다 훨씬 작은 요소(최대 3.6 mm)를 사용하였으므로, 주파수의 진동을 해석하는데에 필요한 기본조건을 충분히 만족한 상태에서 해석이 이루어졌다.

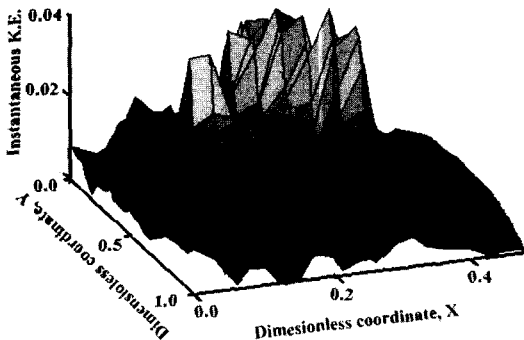
4. 실험결과

4-1. PIV 측정결과

일반적으로 매질내에서 음파에 의해 발생하는 음향흐름은 크게 두 종류로 구분될 수 있다. 하나는, 관이나 수

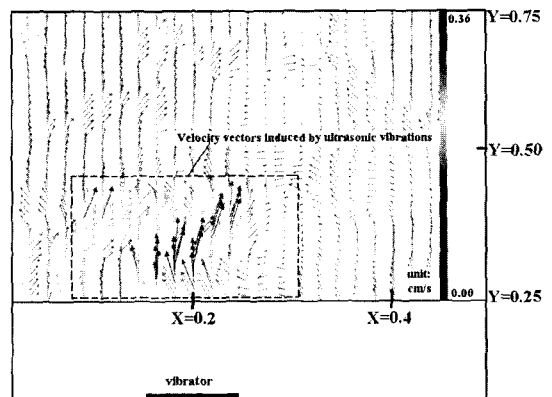


(a) velocity profiles

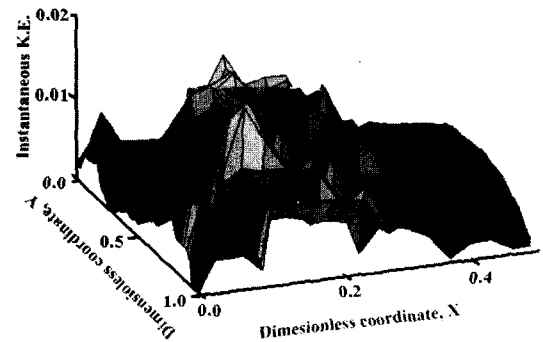


(b) kinetic energy distribution

Fig. 6. Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window in case of the output power level of 340 W.

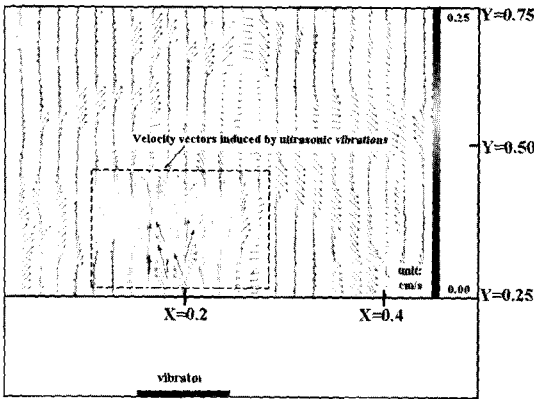


(a) velocity profiles

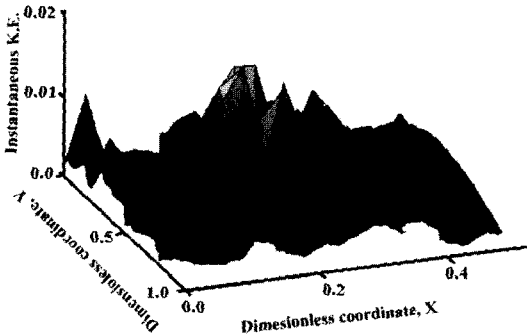


(b) kinetic energy distribution

Fig. 7. Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window in case of the output power level of 185 W.



(a) velocity profiles



(b) kinetic energy distribution

Fig. 8. Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window in case of the output power level of 70 W.

로에서 Standing wave로 인해 acoustic boundary layer 외부에 생기는 Rayleigh streaming이고, 다른 하나는 자유롭고 불규칙하게 음파 영역에서 생기는 Eckart streaming으로써 Quartz wind로 잘 알려져 있다^[9].

Fig. 6, 7, 8은 6433.13 W/m²의 열유속이 주어졌을 때 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위해서 초음파 출력강도를 340 W, 185 W, 70 W로 구분하여 적용한 후, PIV 계측을 통해 계산된 음향흐름의 속도분포와 운동에너지 분포결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a), 7(a), 8(a)에서 보는 바와 같이, 입자영상추적계 분석결과 초음파 가진시 용기바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 음향흐름이 형성됨을 보여주고 있으며, 본 연구에서 발생된 음향흐름은 quasi-Eckart Streaming의 한 형태이다. 또한, Fig. 6(b), 7(b), 8(b)에서 보는 바와 같이, 높은 출력이 주어질수록 운동에너지 분포가 초음파 진동자 부근에서 높

게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 높은출력이 주어질수록 상향의 강한 음향흐름이 발생하고 운동에너지 역시 높은 값을 나타내었다. 초음파 강도가 매질 속에서 발생하는 운동에너지와 밀접한 관련이 있음을 고려해 볼 때, 고출력의 초음파 진동이 파동의 진폭에 영향을 끼쳐 초음파 강도를 강화시키는 것으로 판단된다. 다시 말하면, 초음파 진동 출력의 증가는 매질을 통과하는 초음파 강도를 증가시키고 용융시간을 단축시킬 수 있으며, 실제로 초음파를 가진하여 용융하였을 경우가 자연 용융의 경우 보다 용융시간이 단축되고 소비 전력량면에서도 유리하다고 보고한 바 있다^[3].

4-2. 열전달 향상비

일반적으로 액상영역에서의 국부 열전달 계수는 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$h = \frac{q''}{T_b - T_\infty} \quad (1)$$

식 (1)에서, q''는 열유속이고, T_b는 히터표면의 온도를 나타내며 T_∞는 선정된 위치에서의 액상파라핀의 온도를 나타내고 있다. 결국, 음압 분포와 열전달과의 상관관계를 알아보기 위해 임의의 지점(X=0.2, 0.4, 0.6, 0.8 과 Y=0.25, 0.5, 0.75의 교점)에서 국부 열전달 계수를 식(1)을 통해 구하고, 다음의 식을 이용하여 열전달 향상율(Δh)을 계산하였다.

$$\Delta h = \frac{h}{h_0} \quad (2)$$

식(2)에서, h는 초음파가 가진된 경우의 열전달 계수를 나타내며, h₀는 초음파가 가진되지 않은 경우에 계산된 열전달 계수이다.

4-3. 액상영역에서의 음압분포

액상 파라핀내에서 초음파 진동의 가진시 파동전파에 의해 발생하는 음압 p(r[→], t)는 다음과 같은 파동방정식의 지배를 받는다.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

식(3)에서, r[→] 과 t는 각각 공간좌표축과 시간좌표축을 나타내고, ∇²은 공간좌표에 대해 2차 미분(Laplacian)이며, c는 파동 전파속도이다. 40 KHz로 가진되는 진동판의 진동변위는 유한요소해석에 의해 구해졌으므로, 그 결과를 여기에서는 진동판 면에서의 진동속도로 환산하여 액상파라핀에서의 경계조건으로 받아들여 해석하였으며, 각 경계조건을 부과한 후 해석영역내의 원하는 위치에

서 음압을 구하였다. 단, 용기벽면이나 자유수면으로의 반사파는 무시하였다. 일반적으로 음파의 전파속도와 매질의 밀도는 온도와 밀접한 관련이 있으므로 온도의 영향을 반드시 고려해야 한다. 그러나 가열되고 있는 유체의 정확한 평균온도를 구한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서, Hong^[10], Mashiro^[11] 등이 가열된 유체의 평균온도를 구하고자 할 때 사용한 다음의 식을 이용하여 액상파라핀의 평균온도를 구하였다.

$$T_{avg} = \frac{1}{2}(T_h + T_w) \tag{4}$$

식(4)를 이용해서 액상 파라핀의 대략적인 평균온도를 구한 다음 액상 파라핀의 밀도는 시약 제조회사인 Shinyo Pure Chemical Co.에서 제시한 밀도 변화식(5)를 이용

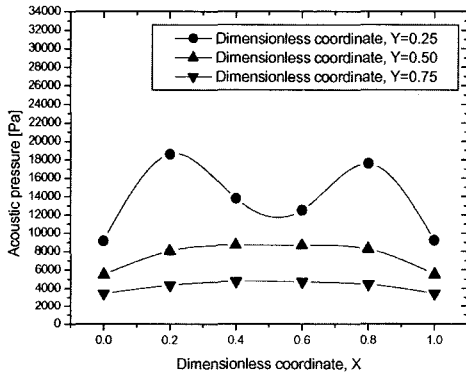
Table 2. Bulk modulus of elasticity of n-octadecane

Temperature [°C]	Bulk modulus of elasticity (N/m ²)	
	1 atm	100 atm
60.0	1.06×10 ⁹	1.96×10 ⁹
79.4	9.61×10 ⁸	1.82×10 ⁹
98.9	8.62×10 ⁸	1.72×10 ⁹
115.0	7.81×10 ⁸	1.64×10 ⁹
135.0	6.94×10 ⁸	1.56×10 ⁹

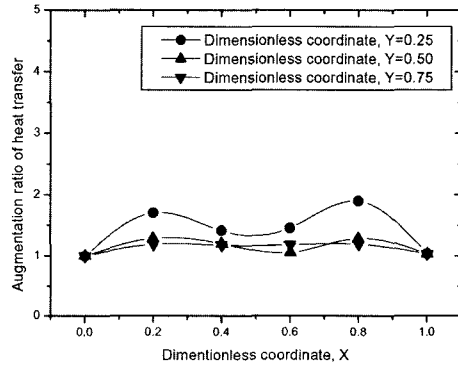
하여 밀도를 구하였다.

$$\rho = 778.3 \exp[-8.249 \times 10^{-4}(T - 50)] \tag{5}$$

밀도와 체적탄성계수, E(혹은 압축계수, k_T)의 관계로부터 매질을 투과하는 음파의 속도를 구할 수 있다.

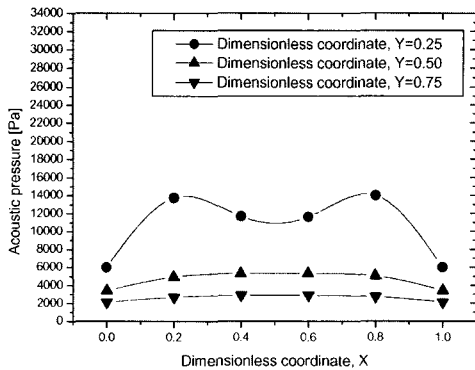


(a) acoustic pressure variations

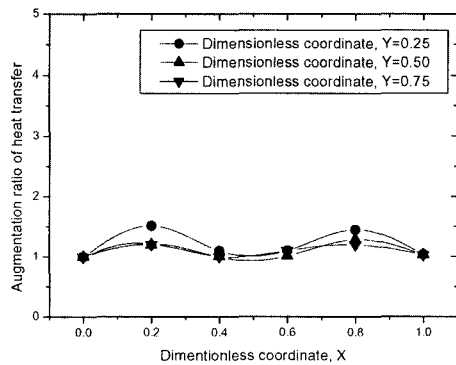


(b) augmentation ration of local heat transfer

Fig. 9. Profiles of acoustic pressure distribution and heat transfer augmentation in case of the output power level of 340 W.

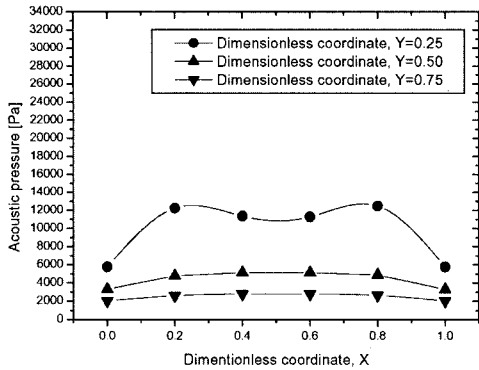


(a) acoustic pressure variations

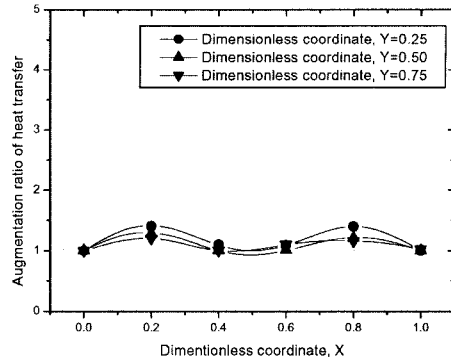


(b) augmentation ration of local heat transfer

Fig. 10. Profiles of acoustic pressure distribution and heat transfer augmentation in case of the output power level of 185 W.



(a) acoustic pressure variations



(b) augmentation ration of local heat transfer

Fig. 11. Profiles of acoustic pressure distribution and heat transfer augmentation in case of the output power level of 70 W.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_i \rho}} \quad (6)$$

결국, 식(5)와 식(6)을 이용하여 본 연구에서는 대략적인 음파의 속도 범위를 978 m/s <math>v < 1074 \text{ m/s}</math>로 결정하여 음압을 계산하였다.

Table 2는 1기압과 100기압에서의 액상 파라핀 (n-Octadecane)의 압축계수를 실험적으로 구한 것으로 CRC handbook of chemistry and physics^[12]의 값을 준용하였다.

4.4. 열전달 향상비와 음압분포 결과 및 비교

Fig. 9~11은 초음파 출력강도가 70 W~340 W로 변화하였을 때, 임의의 무차원 지점에서 압력변화 추이와 열전달 계수의 증가율을 도시한 것이다. 수치해석을 통해 구한 압력변화 추이 결과를 나타내는 Fig. 9(a), 10(a), 11(a)에서 고찰할 수 있는 것처럼, 초음파 진동자가 부착되어 있는 지점 즉, X=0.2와 X=0.8에서 Y축의 무차원 좌표가 0.25일 때, 액상파라핀내에 발생하는 압력분포가 초음파 진동자가 부착되지 않은 지점보다 높게 나타나 그 주위와의 압력차가 확연하게 드러나는 것을 확인할 수 있다. 또한 초음파 출력강도가 340 W일 때, 압력분포가 185 W나 70 W일 때 보다 초음파 진동자 부근에서 훨씬 높게 나타나며 압력변화 추이가 심하게 나타남을 알 수 있다. 하지만, Y축의 무차원좌표가 0.5, 0.75 일 경우에는 압력 변화 추이가 거의 일정하게 나타나고 있는데 이는 압력 파동이 전달되는 과정에서 중첩과 간섭이 일어나기 때문에 거의 압력 평형을 이루게 되는 것이다. Fig. 12는 액상파라핀에 40 kHz의 초음파 진동이 가해진 경우 발생하는 압력 분포를 수치해석을 통해 계

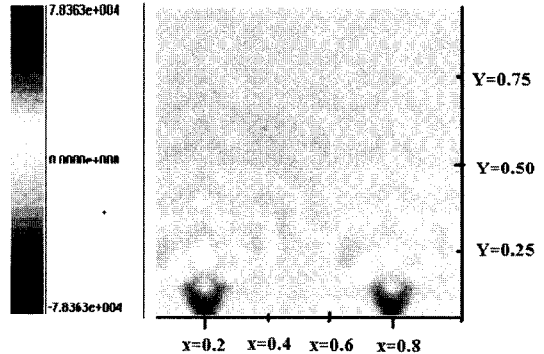


Fig. 12. Acoustic pressure distribution in the liquid solved by a coupled FE-BEM.

산하여 가시화 한 것으로, 여기서도 확인할 수 있듯이 Y축의 무차원 좌표가 0.25일 때 초음파 진동자 부근 (X=0.2와 0.8)에서 높은 압력이 형성됨을 확인할 수 있으며, Y축의 무차원 좌표가 0.5 이상이 되면 압력 분포가 거의 평형을 이루고 있다. 김 등^[13]은 초음파 진동을 가진하였을 경우 액상 영역내에 음압분포 패턴을 확인한 결과 초음파 진동자 부근에서 거의 sine곡선 형태를 이루며 음압의 고저가 반복적으로 나타나고 있다고 하였다. Fig. 12 결과에서도 마찬가지로 액상파라핀내에 정압과 부압이 반복적으로 형성되고 있는데 이를 절대압으로 환산하였을 경우 초음파 진동자 부근에서 압력패턴이 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9(b), 10(b), 11(b)는 실험을 통해 구한 국부 열전달 계수의 증가율 결과를 나타내는 것으로써, 열전달 계수의 증가율은 초음파 진동자 부근에서 상대적으로 높게 나타나고 있다. 또한, 초음파 출력강도가 강할수록 열전달 계수의

증가율은 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 열전달 계수의 증가율이 압력분포 결과와는 다소 불규칙적이기는 하지만 열전달계수의 증감추세 역시 압력 변화 추이선과 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 매질내에서의 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 압력 변동이 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 보여준다. 즉, 초음파 진동의 가진을 통해 액상 파라핀에서 발생하는 물리적 거동과 열전달의 촉진의 궁극적인 원인은 매질내에서의 심한 압력요동과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 열전달을 촉진시키기 위한 방법으로 초음파 진동을 사용하여 용융용기내에 음향장을 형성하고, 형성된 음향장내에 발생하는 압력분포를 수치적 해법(FE-BEM)을 이용해 계산하여 열전달과의 상호 관계를 규명하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 입자영상추적계(PIV)를 통해 확인된 음향흐름, 즉 *quasi-Eckart Streaming*의 속도분포와 운동에너지 분포의 측정결과, 초음파 출력강도가 높을수록 초음파 진동자 부근에서 상향의 강한 음향흐름이 발생하고 운동에너지 역시 높은 값을 나타내었다.

2) 초음파 진동의 가진시 수치해석을 통해 계산된 액상파라핀내에 발생하는 압력분포는 초음파 진동자 부근에서 압력분포가 높게 나타났으며, 초음파 출력강도가 높을수록 압력변화 추이가 심하게 나타남을 확인하였다.

3) 초음파 진동의 가진시 실험을 통해 구한 열전달 계수의 증가율은 초음파 진동자 부근에서 높게 나타났으며, 초음파 출력강도가 높을수록 열전달 계수의 증가율은 높게 나타났다.

4) 결국, 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 압력 변동이 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있으며 액상 파라핀에서 발생하는 압력분포는 열전달 향상에 기여한다.

논문후기

이 논문은 2003년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. Kim, Y.G., Kim, H.Y. and Kang, B.H.: "Fundamental Mechanism of Boiling Heat Transfer Enhancement via Ultrasonic Vibration", Proceedings of the KAMES 2002 Joint Symposium, 1522 (2002).

2. Iida, Y., Tsutsui, K., Ishii, R. and Yamada, Y.: "Natural Convection Heat transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure", J. of Chemical Engineering of Japan, 24, 794 (1991).

3. Oh, Y.K. and Park, S.H.: "Acoustic Enhancement of Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer", Journal of Energy Eng., 11(3), 262 (2002).

4. Frenkel, V., Gurka, R., Liberzon, A. and Shavit, U.: "Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming using Particle Image Velocimetry", Ultrasonics, 39, 153 (2001).

5. Gladwell, G.M. and Zimmerman, G.: "On Energy and Complementary Energy Formulation of Acoustic and Structural Vibration Problems", Journal of Sound and Vibration., 3, 233 (1966).

6. Arlett, P.L. and Zienkiewicz, O.C.: "Application of Finite Element to the Solution of Helmholtz's Equation", Proc. IEE., 115, (1968).

7. MacCollum, M.D. and Clementia, M.S.: "Modal Analysis of a Structure in a Compressible Fluid Using a Finite Element/Boundary Element Approach", Journal of Acoust. Soc. Am., 99, 1949 (1996).

8. Jarng, S.S.: "Sonar Transducer Analysis Using a Coupled FE-BE Method", Proc. of the 12 Korea Automatic Control Conf., 12, 1750 (1997).

9. Haydock, D. and Yeomans, J.M.: "Lattice Boltzmann Simulations of Acoustic Streaming", J. of Physics A, 34, 5201 (2001).

10. 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).

11. Mashiro: Heat Transfer, Korean ed., Sigma Press, Seoul, Korea, 200~2001, (1995).

12. Cutler, W.G., McMickle, R.H., Webb, W. and Schiessler R.W.: J. Chem. Phys., 29, 727 (1958).

13. Kim, J.O., Kim, J.H., Choi, Y.J. and Jho, M.J.: "A Study on Improving the Life and Performance of an Ultrasonic Cleaner by Vibration and Acoustic Analyses", Journal of KSME, 19(11), 2939 (1995).