

초음파 진동 가진시 발생하는 압력과 열전달 촉진과의 상관관계에 관한 연구

오을권†, 양호동*

A Study on Correlation Between Acoustic Pressure and Heat Transfer Augmentation via Ultrasonic Vibration

Yool-Kwon Oh and Ho-Dong Yang

Abstract

The present paper investigated the correlation between acoustic pressure and heat transfer augmentation in acoustic fields. The acoustic pressure predicted by numerical work and compared with the augmentation ratio of heat transfer coefficient was experimentally measured. Also, particle image velocimetry(PIV) was used for the visualization of velocity vectors and kinetic energy distribution inside liquid region. For the numerical work, SVS programed with Fortran language and based on a coupled FE-BEM was used. Results of the present study, the acoustic pressure is increased by 60% and the largest augmentation of heat transfer about 28% was measured. Finally, the profiles of acoustic pressure is consistent with that of augmentation of heat transfer. It is concluded that a correlation exists between the acoustic pressure and the heat transfer augmentation.

Key Words : Ultrasonic vibration(초음파 진동), Heat Transfer Augmentation(열전달 촉진), Acoustic Pressure(음압), A Coupled FE-BEM(결합형 유한요소-경계요소법)

1. 서론

우리 일상생활에서 상변화 물질의 활용이 보편화되고 있음을 감안해 볼 때, 보다 적은 에너지와 시간으로 상변이를 촉진할 수 있는 기술의 필요성이 대두되었고, 이 중에서 초음파 진동을 이

용한 방법은 발열량이 큰 마이크로 칩의 전 영역에 대한 직접 냉각시 그 효과를 증대시키는 가능성을 가지고 있으며, 이미 커팅이나 용접, 세척분야에서 그 우수성이 인정되고 있다. Topp and Eisenkranz⁽¹⁾과 West and Taylor⁽²⁾는 초음파 진동이 용융과정동안 미치는 영향에 관하여 연구하였으며, 최근에 들어 Iida et al.⁽³⁾과 Frenkel et al.⁽⁴⁾ 그리고 Oh et al.⁽⁵⁾는 액상영역에서 초음파 진동이 열전달 과정에 미치는 영향에 관하여 연구한 바 있다. 초음파 진동의 가진시 매질내에 강한 유체의 흐름, 즉 음향흐름(acoustic streaming)이 형성되고⁽⁴⁾, 상변화 물질의 용융시 초음파 진동을 가진 경우와 가진하지 않은 경우에 있어서 음향흐

† 조선대학교 기전공학과
E-mail : ygoh@mail.chosun.ac.kr

* 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

름은 대류과정동안 열전달을 촉진시키고, 열 경계층에 영향을 미치며 열유동을 발달시킨다⁽⁵⁾고 하였다. 이러한 열전달 촉진요소중의 하나로 드러난 음향흐름은, 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에 기인하는 것⁽⁴⁾이라고 알려져 있으며 열전달 촉진과 초음파 진동에 의해 형성된 음압과의 관계를 고찰해 보는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 초음파 진동을 사용하여 단열된 용융용기를 채운 파라핀에 일정한 열유속을 가하고 초음파 진동을 이용하여 음장을 형성한다. 이를 통해, 입자영상추적계에 의해 가시화된 음향흐름과 운동에너지 분포 및 실험을 통해 구해진 열전달 항상비와 용기 내에 발생하는 압력분포를 수치해석을 통하여 계산한 뒤 형성되는 압력과 열전달 항상과의 상관관계에 관하여 알아보고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 방법

실험은 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 진동자 2개가 부착되어 40±1kHz의 주파수를 방사할 수 있는 가로, 세로, 높이가 각각 13.5cm×13.5cm×12cm인 용융용기를 제작하여 사용하였으며 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 상변화 물질로는 끓는점이 300℃인 파라핀(n-octadecane)을 선정하여 사용하였으며, 그 물성치는 다른 열적 특성 실험 없이 제조사(Shinyo Pure Chemical Co.)에서 제시한 값을 준용하여 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 가열방식으로 등열유속 가열조건을 택하여 일정한 열유속 조건의 열전달 프로세스를 구성하기 위해서 $q''=6433.13 \text{ W/m}^2$ 의 일정한 열유속을 용융이 지속되는 동안 용기내의 판히터에 공급하여 가열하도록 하였다. 판히터 및 용융용기는 열손실을 최대한 방지하도록 석면 및 베이클라이트 스티로폼을 이용하여 절연 및 단열벽을 설치하였으며, 용융과정동안에 파라핀의 온

Table 1. Thermal properties of paraffin

Properties	Unit	Value
Boiling Temperature	°C	300
Thermal Conductivity	W/m · K	0.210
Density	kg/m ³	863.03
Specific Heat	J/kg · K	2,873
Viscosity	m ² /s	0.00028
Heat of Fusion	kJ/kg	241.60
Thermal Expansion Coefficient	-	0.001

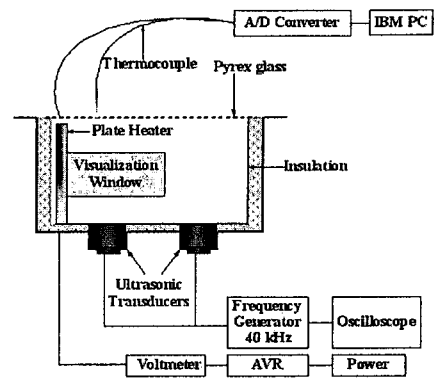


Fig. 1 Schematic diagram for the present experimental set-up.

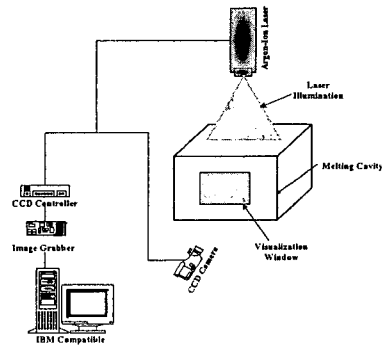


Fig. 2 Experimental set-up for visualization.

도를 측정하기 위해 K-type의 열전대를 미리 선정한 위치에 설치하였다. 실험은 초음파 출력강도의 변화에 따라 용융과정 동안 상변화 열전달에 미치는 영향을 조사해 보기 위해 전압출력을 70~340W로 변화시키면서 수행하였다. 또한, 열전달계수를 구하기 위하여 동일한 조건하에서 용융을 2회 실시하여 평균온도를 사용하였으며, 열전대에서 측정된 온도 분포는 데이터획득장치에 의해 매 1분마다 PC에 기록되었다. 초음파 진동 가전시 액상파라핀내에서 발생하는 물리적 현상을 가시화하기 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Argon-Ion레이저를 이용하여 시험부에 수직으로 가시광을 조사하고, CCD 카메라를 레이저 가시광에 의해 형성된 조사단면과 수직방향으로 설치하여 30fps(frame per second)의 속도로 촬영한 후, 획득된 영상을 이미지보드를 통해 저장하고 이를 상호상관알고리즘을 사용하는 Cactus2000을 이용하여 해석하였다.

2.2 수치해석 방법

본 연구에서는 구조물-음향의 연성해석에 있어서 구조계는 유한요소법을 음향계는 경계요소법

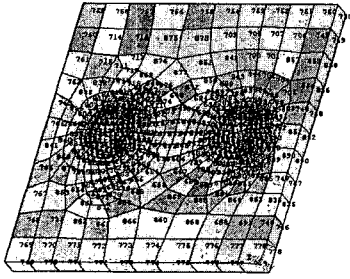
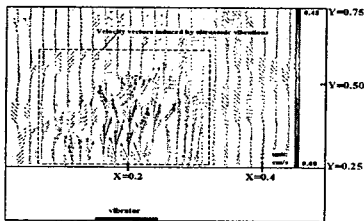


Fig. 3 Schematic diagram of a modeling for the numerical analysis.

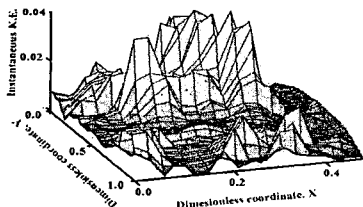
을 적용한 상용코드, SVS(Structural Vibration Simulator)를 사용하였다. 초음파 진동부는 ANSYS™의 Brick 20 node type 95를 이용하여 유한요소 모델링한 후, SVS의 Node 정렬 순서에 맞게 재배열하였다. 203개의 element와 1524개의 node로 구성되어 모델링된 그림을 Fig. 3에 나타내었으며, 동그라미를 형성하는 영역이 밀면에 2개의 진동자가 부착되어 있는 부위로서, 185W 진동부에 대한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PIV 측정결과

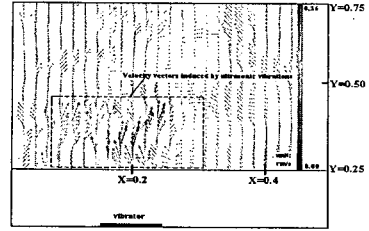


(a) velocity profiles calculated from the PIV

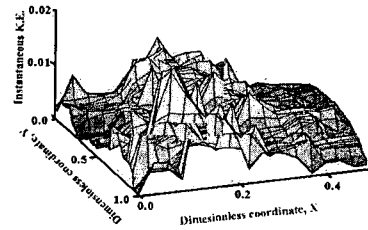


(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

Fig. 4 Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window at the output power level of 340W.

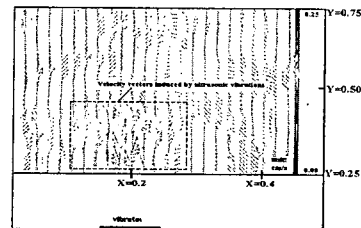


(a) velocity profiles calculated from the PIV

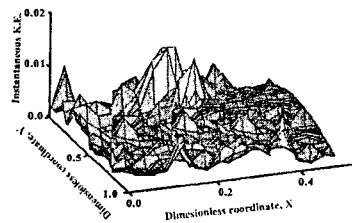


(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

Fig. 5 Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window at the output power level of 185W.



(a) velocity profiles calculated from the PIV



(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

Fig. 6 Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window at the output power level of 70W.

Figures. 4~6은 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위해서 초음파 출력강도를 340W, 185W, 70W로 구분하여 적

용한 후, PIV 계측을 통해 계산된 음향흐름의 속도분포와 운동에너지 분포결과를 보여주고 있다. Fig. 4(a), 5(a), 6(a)에서 보는 바와 같이, 입자영상 추적계 분석결과 초음파 가진시 용기바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 음향흐름이 형성됨을 보여주고 있으며, 본 연구에서 발생된 음향흐름은 quasi-Eckart Streaming의 한 형태이다. 또한, Fig. 4(b), 5(b), 6(b)에서 보는 바와 같이, 높은 출력이 주어질수록 운동에너지 분포가 초음파 진동자 부근에서 높게 나타남을 확인할 수 있다.

3.2 음압과 열전달 촉진결과

Figure 7은 초음파 출력강도가 70W~340W로 변화했을 때, 수치해석을 통해 계산된 압력변동 결과와 열전달 향상비 결과를 도시한 것이다. Figure 7(a)에서 보는 바와 같이, 압력분포는 초음파 진동자가 부착된 지점(즉, $X=0.2$ 와 0.8)에서 높게 나타나는 것을 알 수가 있다. 특히, Y축의 무차원좌표가 0.25일 때, 압력이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 4~6에서 보는 바와 같이 무차원 좌표가 동일한 지점($X=0.2$ 와 $Y=0.25$)에서 운동에너지 분포가 높게 나타나는 것과 잘 일치하고 있다. 하지만, Y축의 무차원좌표가 0.25이상일 경우에는 압력 파동이 전달되는 과정에서 중첩과 간섭이 일어나 거의 압력평형을

이루는 것을 확인할 수 있다.

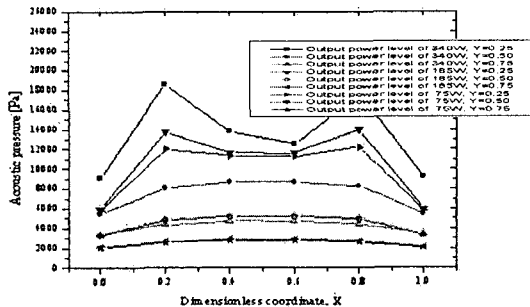
Figure 7(b)는 실험을 통해 구한 국부 열전달 계수를 통해 열전달 향상비 결과를 나타내는 것으로, 초음파 진동자 부근에서 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 압력분포 결과와는 다소 불규칙적이기는 하지만 열전달 계수의 증감추세 역시 압력 변화 추이선과 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 초음파 출력강도가 강할수록 열전달 향상비는 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

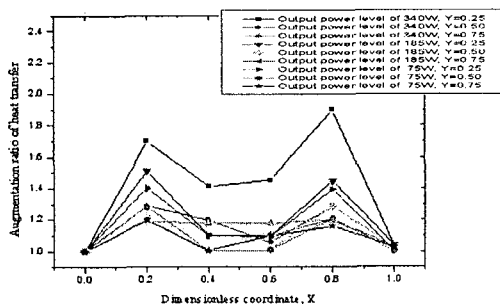
PIV 측정에 의해 확인된 음향흐름은 갑작스런 압력의 변동에 의하여 유체의 속도 및 운동에너지를 증가시킨다. 초음파 강도의 변화에 따라 출력강도가 340W일 때, 열전달 향상비는 약 28%까지 증가하는 것을 확인하였고, 60%의 최대압력 변화율을 나타내었다. 결국, 초음파 진동자 부근에서의 높은 압력분포는 액상파라핀 내에 격렬한 유동을 발달시키고, 형성된 압력변동에 의하여 열전달이 촉진된다고 할 수 있으며, 이러한 메커니즘은 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 뒷받침해 주는 것이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- 1) Topp, M. N. and Eisenklam, P., 1972, "Industrial and Medical Uses of Ultrasonic Atomizers," *Ultrasonics*, pp. 127~132.
- 2) West, F. B. and Taylor, A. T., 1952, "The Effect of Pulsations on Heat Transfer," *Chem. Eng. Progress.*, Vol. 48, No. 1, pp. 208~214.
- 3) Iida, Y., Tsutsui, K., Ishii, R. and Yamada, Y., 1991, "Natural Convection Heat Transfer in a Field of Ultrasonic Waves and Sound Pressure," *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, pp. 794~796.
- 4) Frenkel, V., Gurka, L. and Shavit, U., 2001, "Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming Using Particle Image Velocimetry," *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 153~156.
- 5) Oh, Y. K., Park, S. H. and Cha, K. O., 2001, "An Experimental Study of Accelerating Phase Change Heat Transfer," *KSME International Journal*, Vol. 15, pp. 1882~1891.



(a) acoustic pressure variations



(b) augmentation ratio of heat transfer

Fig. 7 Comparison between the acoustic pressure variations and augmentation ratio of heat transfer.