

음향흐름에 의한 음압과 열전달 촉진과의 관계

양 호 동, 오 율 권^{†*}

조선대학교 정밀기계공학과, *조선대학교 기전공학과

The Relation of Enhancement Heat Transfer to Acoustic Pressure by Acoustic Streaming.

Ho-Dong Yang, Yool-Kwon Oh^{†*}

Department of Precision Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

*Department of Mechatronics Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

ABSTRACT: The objectives in the present study are to investigate that the enhancement heat transfer was experimentally measured and was compared with the acoustic pressure obtained by numerical analysis. From the results of the present study, a strong fluid motion initiated by ultrasonic vibrations can affect heat and mass transfer. This phenomenon, called acoustic streaming, clearly observed by PIV measurement leads to increase in velocity of a fluid which is a crucial physical concept to explain the enhancement heat transfer. The heat transfer coefficient is increased with increase in the ultrasonic intensities. The largest enhancement heat transfer (about 26%) is measured at the ultrasonic intensity of 300W. Acoustic streaming results from sudden acoustic pressure variations in the liquid. The results of numerical analysis reveal that acoustic pressure is increased by 59.5% at the ultrasonic intensity of 300W. The higher acoustic pressure near four ultrasonic transducers develops more intensive flow destroying the flow instability. Also, the profiles of acoustic pressure variation are consistent with those of enhancement heat transfer.

Key words: Acoustic Pressure(음압), Acoustic Streaming(음향흐름), Enhancement Ratio of Heat Transfer(열전달 향상비), Coupled FE-BEM(결합형 유한요소-경계요소법), Ultrasonic Intensity(초음파 강도)

기 호 설 명

Z : Z축 무차원 좌표

- h : 열전달계수 [W/m²K]
- Δh : 열전달 향상비
- T : 온도 [°C]
- q'' : 열유속 [w/m²]
- X : X축 무차원 좌표
- Y : Y축 무차원 좌표

하첨자

- o : 초음파가 가진되지 않은 경우
- h : 히터표면
- ∞ : 선정된 위치

1. 서 론

[†] Corresponding author

Tel.: +82-62-230-7014; fax: +82-62-230-6596

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

지금까지의 열전달 해석에 관한 논의는 열전달 방식에 대한 수치적해석이나 실험적 해석에 집중

되어 있다. 특히, 상변화 열전달의 경우에는 열전달 방식에 따른 응고나 용융과정에 관한 연구가 주를 이루고 있는 반면, 열전달 방식 중의 하나인 자연대류를 촉진하고자 하는 연구는 소수에 지나지 않는다. 더욱이 상변화 열전달 과정 중 용융을 촉진하는 방법은 대부분 대류 열전달 방식에 의존하고 있는데, 지금까지 소개된 다양한 열전달 촉진 방법 중 일상 생활에서 상변화 물질의 활용이 보편화되고 있음을 감안해 볼 때 유동장 내에 음장을 형성하는 방법은 적은 에너지와 시간으로 상변이를 촉진하는데 효과적임이 보고된 바 있다⁽¹⁾. 음장에 의한 입자의 맥동운동은 고체면 가까이에서 정상류인 음향흐름(acoustic streaming)을 유발시키는데, 이는 Schliting⁽²⁾에 의해 처음으로 수학적으로 해석되었고, Fand 등⁽³⁾은 음장에 의한 국소 열전달율을 측정된 결과 수평으로 음장이 가해질 때, 원통의 상부와 하부에서 열전달이 크게 증가하고 양 측면에서 오히려 감소하는 것을 발견한 바 있으며, 유동 가시화를 통해 상부에서 맥동하는 와류 운동이 발생하는 것을 관측함으로써, 열전달이 증가한 원인을 설명하였다. 이후, Oh 등⁽¹⁾은 초음파 진동을 열전달 프로세스에 가하여 열전달 증진원인을 규명한 결과, 초음파 진동의 가진에 의해 진동자 부근에서 강한 유체의 흐름인 음향흐름(acoustic streaming)이 형성되고 이로 인해 열유동 현상이 발달됨을 규명하여 열전달 촉진 원인을 제시한 바 있다. 이러한 유동장의 가시화를 통해 열전달 촉진요소로 규명된 음향흐름은 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에 기인하는 것⁽⁴⁾으로 보고된 바 있다.

따라서, 음향흐름에 의한 음압과 열전달 촉진과의 관계를 고찰해 볼 필요가 있다고 사료되며, 이를 위해 본 연구에서는 Kim 등⁽⁵⁾이 물의 비등 열전달 촉진을 위해서 제안한 초음파 진동을 사용하여 상변화 과정 중 발생하는 유동장에 음장을 형성시켜 실험을 통해 구해진 열전달계수를 이용해 열전달 향상비 결과를 알아보고, 매질내에 형성되는 음압을 수치해석 방법을 이용하여 확인해 본 후, 음압과 열전달 촉진과의 관계를 규명해 보고자 한다.

Table 1 Physical properties of n-Octadecane

Properties	Value
Melting Temperature	53.2°C
Boiling Temperature	300°C
Thermal Conductivity	0.210W/m · K
Density	863.03kg/m ³
Specific Heat	10.56kJ/kg · K
Viscosity	0.00028m ² /s
Heat of Fusion	241.60kJ/kg
Thermal Expansion Coefficient	0.001

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 상변화 물질로서 용융점이 53.2°C인 파라핀(n-octadecane)을 사용하였으며, 그 물성치는 제조사(Shinyo Pure Chemical Co.)에서 제시한 값을 준용하여 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 실험장치의 개략도로서, 그 구성은 가로, 세로, 높이가 각각 15cm, 15cm, 12cm 인 용융용기와 발열을 위한 장치, 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 장치 그리고 액상 파라핀에서 발생하는 물리적 거동을 관찰할 수 있는 가시화부로 나눌 수 있다.

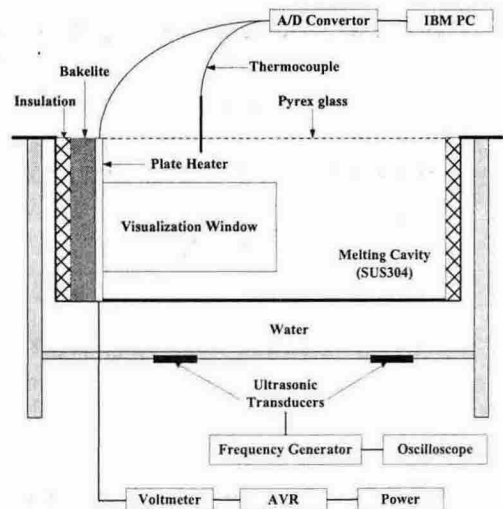


Fig. 1 Experimental apparatus.

본 연구에서는 가열방식으로 등열유속 가열조건(constant heat flux condition)을 택하여 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 열유속이 용기 내의 파라핀으로만 향하게 하기 위해 히터의 뒷 부분은 석면 및 베이클라이트로 절연시켰고, 용융용기의 벽면을 통한 공기중으로의 열손실을 방지하기 위하여 용기 외부에 석면판과 스티로폼 그리고 베이클라이트 순으로 단열벽을 설치하였으며, 용기의 상부는 Pyrex glass를 이용하여 단열이 되도록 하였다.

용융용기 바닥에는 지름이 40mm인 진동자 4개가 부착되어 주파수 발생장치로부터 공급되는 $40 \pm 1 \text{ kHz}$ 의 주파수를 방사할 수 있도록 하였고, 발생한 주파수는 오실로스코프를 통해 모니터링하였다. 주파수 발생기의 특성상 발전주파수의 영역은 40kHz로 고정되었지만, 초음파 진동 강도의 영향이 상변화 열전달에 미치는 영향을 조사해 보기 위하여 초음파에 공급되는 출력강도를 50~300W로 변화시켜가며 용융을 실시하였다.

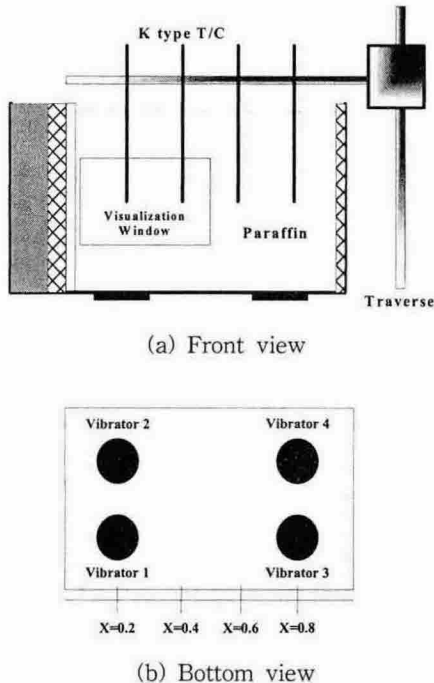


Fig. 2 Schematic diagram of the test section.

또한, 용융과정 동안에 파라핀의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 0.1mm의 정밀도를 가진 Traverse를 사용하여 열전대의 위치를 정확하게 제어할 수 있도록 하여 K-type의 열전대를 미리 선정한 위치($x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 과 $Z=0.5$, Fig. 2(b)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. 3에서 보는 바와 같이 Argon-Ion 레이저를 이용하여 시험부에 수직으로 가시광을 조사하고, CCD 카메라를 레이저 가시광에 의해 형성된 조사단면과 수직방향으로 설치하여 30fps의 속도로 촬영한 후, CCD 카메라에 의해 획득된 영상을 이미지보드를 통해 저장하고 이를 상호상관알고리즘을 사용하는 Cactus2000을 이용하여 해석하였다.

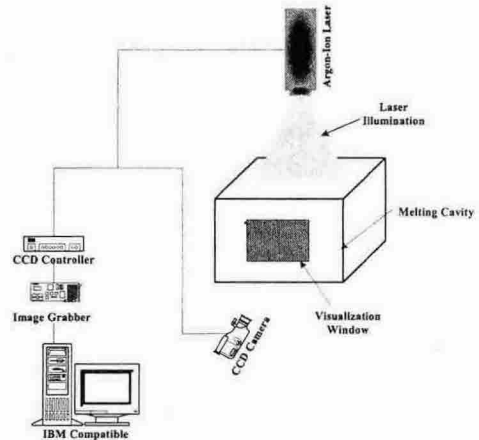


Fig. 3 Experimental apparatus for visualization.

2.2 실험결과 계산 방법

일반적으로 국부열전달계수 h 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, q'' 은 열유속이고, T_h 와 T_∞ 는 각각 히터표면의 온도와 선정된 위치에서 측정된 액상파라핀의 온도를 나타내고 있다. 따라서, 식 (1)을 이용하여 측정된 실험결과를 토대로 국부열전달계수를 구하고, 다음의 식 (2)를 이용하여 열전달항상수(Δh)을 계산하였다.

$$\Delta h_{avg} = \frac{h_{with\ ultrasonic\ vibration}}{h_{without\ ultrasonic\ vibration}} = \frac{h}{h_0} \quad (2)$$

3. 수치해석

일반적으로 액상내의 음압은 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 구할 수 있다. 그러나, 본 연구에서와 같이 용융용기 내에 있는 파라핀의 온도가 140°C 이상 가열되는 경우, 하이드로폰으로 측정된 데이터를 신뢰하기 힘들다는 실험상의 제약이 따랐다. 따라서, 하이드로폰을 이용하여 액상파라핀내의 음압을 측정하는 방법 대신에 수치해석을 통해 음압의 분포를 알아보고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 Jarmg⁽⁶⁾이 보고한 바 있는 결합형 유한요소-경계요소법을 적용하여 초음파진동에 의해 파생되는 각종 물리량을 유한요소법을 이용하여 계산한 뒤 매질에서의 음압 분포를 경계요소법을 도입하여 해석하였고, 구조물-음향의 연성해석에 있어서 구조계는 유한요소법을 음향계는 경계요소법을 적용한 상용코드, SVS (Structural Vibration Simulator)를 사용하였다.

수치해석에 있어서 초음파 진동부는 진동판 밑면에 부착된 진동자들의 가진에 의해 진동판에 횡진동이 발생하고, 이러한 진동판의 진동해석을 위해서 유한요소법을 이용하였으며, 한 진동부안의 진동자들은 모두 병렬연결로 하나의 발전기에 의해 구동되므로 동일 위상의 진동을 진동판에 가하는 것으로 전제하였다. Fig. 4는 초음파진동자가 부착된 진동판을 ANSYSTM의 Brick 20 node type 95를 이용하여 모델링한 후, mesh과정을 거쳐 생성된 유한요소 모델을 보여주고 있으며, SVS의 Node 정렬 순서에 맞게 재배열하여 경계요소를 결합시켜 해석을 수행하게 된다. Fig. 4에서, 동그라미를 형성하는 영역이 진동판 밑면에 4개의 초음파 진동자가 부착되어 있는 것을 의미하며, 진동판은 대략 273개의 요소(element)와 1996개의 절점(node)으로 구성되어 있다.

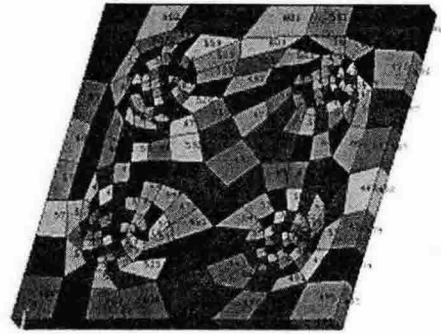


Fig. 4 Finite-element model of vibrating plate.

음향해석을 위해 경계요소법을 이용하여, 요소의 크기는 파장의 1/5 이내로 하였다. 액상 파라핀에서 전파속도 c 는 온도에 따라 다르지만 대략 1000m/s이고, 진동주파수, f 는 40kHz이므로 파장 $\lambda(=c/f)$ 는 약 25mm이다. 따라서, 요소 크기의 최대 한계는 약 5mm이다. 실제 해석을 위한 모델링에서는 이보다 훨씬 작은 요소(최대 3.5mm)를 사용하였으므로, 주파수의 진동을 해석하는데 필요한 기본조건을 충분히 만족한 상태에서 해석이 이루어졌다.

매질에 가해진 압력분포를 구하기 위해 경계요소법을 이용할 경우, 매질을 투과하는 음파의 전파속도와 매질의 밀도가 중요한 변수로 작용된다. 또한, 음파의 전파속도와 매질의 밀도는 온도와 밀접한 관련이 있기 때문에 온도의 영향을 반드시 고려해야하나 가열되고 있는 유체의 정확한 평균온도를 구한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 국부 열전달계수 등 각종 물리량을 측정하고자 할 경우 가열된 유체의 평균온도를 구하기 위해 일반적으로 다음의 식이 이용된다.

$$T_{avg} = \frac{1}{2} (T_h + T_\infty) \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 액상파라핀의 대략적인 평균온도가 구해지면 시약 제조회사에서 제시한 다음의 밀도 변화식을 이용하여 액상파라핀의 밀도를 구한다.

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

Table 2 Bulk modulus of n-Octadecane

Temperature [°C]	Bulk modulus of elasticity (N/m ²)	
	1 atm	1000 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

식(4)에서 구해진 밀도와 Table 2에 제시된 체적 탄성계수 E (혹은 압축계수, k_T)를 이용하여 다음의 식을 통해 매질을 투과하는 음파의 속도를 구할 수 있다.

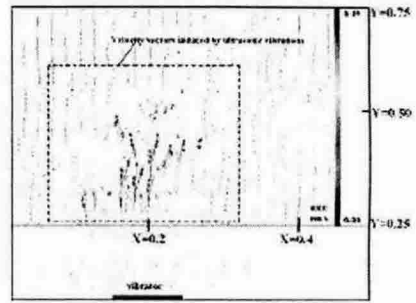
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_T \rho}} \quad (5)$$

4. 실험결과 및 고찰

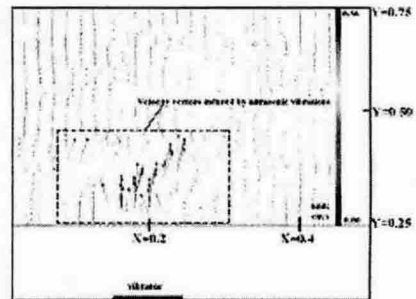
4.1 PIV 측정결과

일반적으로 매질내에서 음파에 의해 발생하는 음향흐름은 크게 두 종류로 구분될 수 있다. 하나는, 관이나 수로에서 Standing wave로 인해 acoustic boundary layer 외부에 생기는 Rayleigh streaming이고, 다른 하나는 자유롭게 불규칙하게 음파 영역에서 생기는 Eckart streaming으로써 Quartz wind로 잘 알려져 있다.

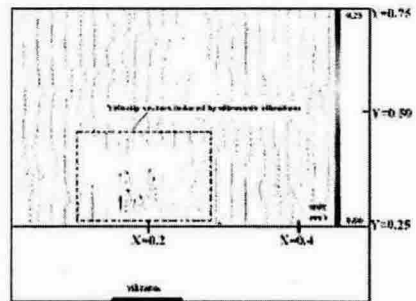
Fig. 5는 6433.13 W/m²의 열유속이 주어졌을 때 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위해서 초음파 출력강도를 300W, 175W, 50W로 구분하여 적용한 후, PIV 장치를 이용하여 음향흐름의 속도분포 결과를 가시화 한 결과이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, PIV를 이용한 분석결과, 초음파 가진시 용기 바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체의 흐름, 즉 음향흐름이 형성됨을 보여주고 있다. 또한, 높은 출력이 주어질수록 속도분포가 초음파 진동자 부근에서 높게 나타남을 확인할 수 있는데, 이는 고출력의 초음파 진동이 가해질수록 매질내에서 유체의 속도를 증가시키고, 이로 인해 고출력의 초음파 진동이 파동의 진폭에 영향을 끼쳐 초음파 강도를 강화시키는 것으로 판단된다.



(a) Case I - 300W



(b) Case II - 175W



(c) Case III - 50W

Fig. 5 Velocity profiles measured by PIV.

4.2 음압측정 및 열전달 촉진결과

Fig. 6은 초음파 출력강도가 50W~300W로 변하였을 때, 수치해석을 통해 계산된 압력변동 결과를 도시한 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 압력분포는 초음파 진동자가 부착된 지점(즉, X=0.2와 0.8)에서 높게 나타나는 것을 알 수가 있다. 특히, Y축의 무차원좌표가 0.25일 때, 압력이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있지만, Y축의 무차원좌표가 0.25이상일 경우에는 압력

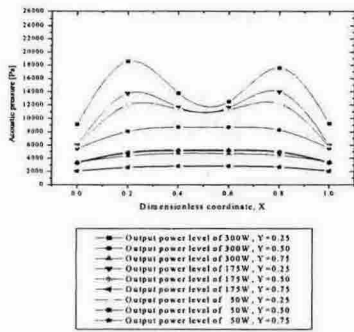


Fig. 6 Profiles of acoustic pressure.

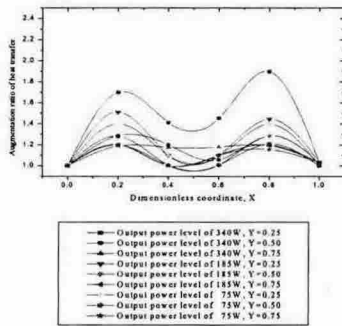


Fig. 7 Profiles of Enhancement ratio of heat transfer.

파동이 전달되는 과정에서 증점과 간섭이 일어나 거의 압력 평형을 이루는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 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 향상율 결과 역시 음압 변화 추이 선과 비슷한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 초음파 출력강도가 강할수록 열전달 향상비는 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 열전달을 촉진시키기 위한 방법으로 초음파 진동을 사용하여 음향흐름의 형성에 의한 음압과 열전달 촉진과의 관계를 고찰해 보았으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 입자영상추적계(PIV)를 통해 확인된 음향 흐름, 즉 *quasi-Eckart Streaming*의 속도분포 측정결과, 초음파 출력강도가 높을수록 초음파 진동자 부근에서 상향의 강한 음향흐름이 발생함을 확인하였다.

2) 수치해석을 통해 계산된 액상과라핀내에 발생하는 음압은 초음파 진동자 부근에서 높게 나타났으며, 초음파 출력강도가 높을수록 음압변동압력변화 추이가 심하게 나타남을 확인하였다.

3) 열전달 계수 측정을 통해 구한 열전달 향상율은 초음파 진동자 부근에서 높게 나타났으며, 초음파 출력강도가 높을수록 열전달 향상율 결과가 높게 나타났다.

4) 결국, 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 음압은 열전달 향상에 영향을 미치며 열전달을 촉진시키는 요인이라 사료된다.

참고문헌

- Oh, Y. K., Park, S. H., and Cha, K. O., 2001, An Experimental Study of Accelerating Phase Change Heat Transfer, *KSME Int. J.*, Vol. 15, pp. 1882-1891.
- Schlichting, H., 1968, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York.
- Fand, R. M., Roods, J., Cheng, P., and Kaye, J., 1962, The Local Heat Transfer Coefficient Around a Heated Horizontal Cylinder in an Intense Sound Field, *Trans. ASME*, pp. 245-256.
- Frenkel, V., Gurka, R., Liberzon, A., and Shavit, U., 2001, Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming using Particle Image Velocimetry, *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 153-156.
- Kim, Y. G., Kim, H. Y., and Kang, B. H., 2002, Fundamental Mechanism of Boiling Heat Transfer Enhancement via Ultrasonic Vibration, *Proc., of the KAMES 2002 Joint Symposium*, pp. 1522-1528.
- Jarng, S. S., 1997, Sonar Transducer Analysis Using a Coupled FE-BE Method, *Proc. of the 12 Korea Automatic Control Conf.*, Vol. 12, pp. 1750-1753.