

초음파 가진시 압력변동이 열전달 향상에 미치는 영향

양호동[†]·오을권^{*}

Effect of Pressure Variations on Augmentation of Heat Transfer by Ultrasonic Vibrations

Ho-Dong Yang and Yool-Kwon Oh

Key Words: Acoustic Fields(음향장), Acoustic Pressure(음압), Augmentation Ratio of Heat Transfer(열전달 향상비), Ultrasonic vibrations(초음파 진동)

Abstract

This study investigated the effect of pressure variations on augmentation of heat transfer when the ultrasonic waves were applied. The augmentation ratio of heat transfer was experimentally investigated and was compared with the profiles of pressure distributions calculated applying a coupled finite element-boundary element method (coupled FE-BEM). As the ultrasonic intensities increase from 70W to 340W, the velocity of the liquid paraffin is found to increase as well as kinetic energy, This physical behavior known as quasi-Eckart streaming results from acoustic pressure variations in the liquid. Especially, the higher acoustic pressure distribution near two ultrasonic transducers develops more intensive flow (quasi-Eckart streaming), destroying the flow instability. Also, the profile of acoustic pressure variation is consistent with that of augmentation of heat transfer. This mechanism is believed to increase the ratio of hear transfer coefficient.

기호설명

c	: 전파속도 [m/s]	E	: 체적계수 [N/m ²]
h	: 열전달 계수 [W/(m ² ·K)]	T_h	: 히터표면 온도 [°C]
h_0	: 초음파가 가진되지 않는 경우의 열전달 계수 [W/(m ² ·K)]	T_∞	: 선정된 위치의 액상온도 [°C]
Δh	: 열전달 향상비	T_{avg}	: 매질내의 평균온도 [°C]
k_T	: 압축률	X, Y	: 무차원 직교좌표
p	: 압력 [Pa]		
q''	: 열유속 [W/m ²]		

1. 서론

근래에 들어 상변화 물질(phase change material, PCM)의 잠열을 이용한 에너지 저장 기술은 태양 열, 심야전기 등의 사용이 증가함에 따라 각광받는 연구 분야로 활발한 응용이 이루어지고 있다. 우리 일상생활에서 상변화 물질의 활용이 보편화되고 있음을 감안해 볼 때, 보다 적은 에너지와 시간으로 상변이를 촉진할 수 있는 기술의 필요

[†] 조선대학교 대학원

E-mail : hdyang@stmail.chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7010 FAX : (062)232-9218

^{*} 조선대학교 기전공학과

성이 대두되었고, 이 중에서 초음파 진동을 이용한 방법은 발열량이 큰 마이크로 칩의 전 영역에 대한 직접 냉각시 그 효과를 증대시키는 가능성을 가지고 있으며, 이미 컷팅이나 용접, 세척분야에서 그 우수성이 인정되고 있다. 하지만, 상변화 열전달의 경우 열전달 방식에 따른 응고나 용융 과정에 관한 연구가 대부분이고 열전달 방식 중 하나인 자연대류를 촉진하고자 하는 연구는 소수에 지나지 않으며, 더욱이 상변화 열전달 과정 중 용융을 촉진하는 방법은 대부분 대류 열전달 방식에 의존하고 있다. Topp and Eisenkranz¹⁾과 West and Taylor²⁾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),6)}, 상변화 물질의 용융시 초음파 진동을 가진한 경우와 가진하지 않은 경우에 있어서 음향흐름은 대류과정동안 열전달을 촉진시키고, 열 경계층에 영향을 미치며 열유동을 발달시킨다⁵⁾고 하였다. 이러한 열전달 촉진요소중의 하나로 드러난 음향흐름은, 초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에 기인하는 것⁴⁾이라고 알려져 있으며 열전달 촉진과 초음파 진동에 의해 형성된 음압과의 관계를 고찰해 보는 것이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 초음파 진동을 사용하여 단열된 용융 용기를 채운 액상파라핀에 음장을 형성하여, 실험을 통해 구해진 열전달 향상비와 용기 내에 발생하는 압력분포를 수치해석을 통하여 계산하고 압력변동이 열전달 향상에 미치는 영향에 관하여 알아보려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험은 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 지름이 40mm인 볼트 조임 란즈방형 진동자 2개가 부착되어 40±1kHz의 주파수를 방사할 수 있는 가로, 세로, 높이가 각각 13cm×12.5cm×12.5cm인 용융용기를 제작하여 사용하였으며 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 상변화 물질로는 다른 정제된 파라핀에 비하여 가격이 저렴하고, 용융

Table 1. Thermal properties of paraffin

Properties	Unit	Value
Melting Temperature	°C	53.2
Thermal Conductivity	W/m · °C	0.210
Density	kg/m ³	863.03
Specific Heat	kJ/kg · °C	2,873.88
Viscosity	m ² /s	0.00028
Heat of Fusion	kJ/kg	241.60
Thermal Expansion Coefficient	-	0.001

온도가 상온보다 높아서 상변화 영역에서의 상변이가 안정적으로 이루어질 수 있는 용융점이 53.2°C인 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 등열유속 가열조건을 만족하고 열손실을 최대한 방지하도록 석면 및 베이클라이트 스티로폼을 이용하여 절연 및 단열벽을 설치하였다. 또한, 용융과정 동안에 파라핀의 온도를 측정하기 위해 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 0.5mm의 정밀도를 가진 Traverse를 사용하여 K-type의 열전대를 미리 선정된 위치(x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8과 z=0.5, Fig. 2 참조)에 설치하였다.

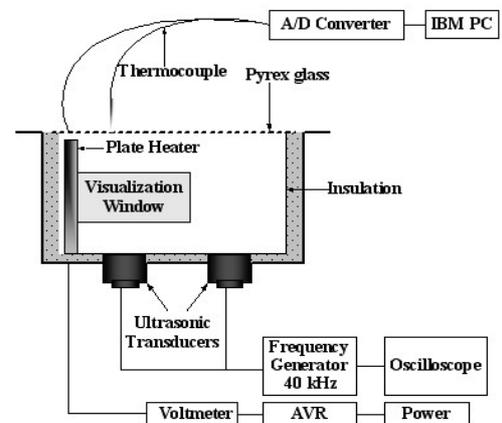


Fig. 1 Schematic diagram for the present experimental set-up.

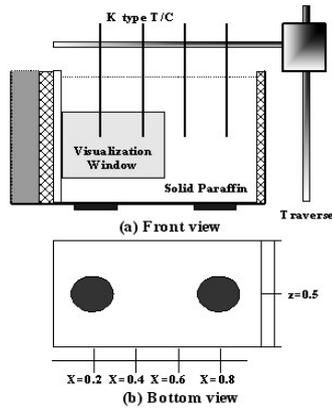


Fig. 2 Schematic diagram of the present test section showing the position of ultrasonic transducers and thermocouples.

2.2 실험방법

초음파 강도의 변화에 따라 용융과정 동안 상 변화 열전달에 미치는 영향을 조사해 보기 위해 전압출력을 70~340W로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한, 열전달계수를 구하기 위하여 동일한 조건하에서 용융을 3회 실시하여 평균온도를 사용하였으며, 열전달에서 측정된 온도 분포는 데이터획득장치에 의해 매 1분마다 PC에 기록되었다. 초음파 진동 가진시 액상영역에서의 가시화를 위해 Fig. 3에서 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, CCD 카메라에 의해 획득된 영상을 이미지보드를 통해 저장하고 이를 상호상관알고리즘을 사용하는 Cactus2000을 이용하여 해석하였다.

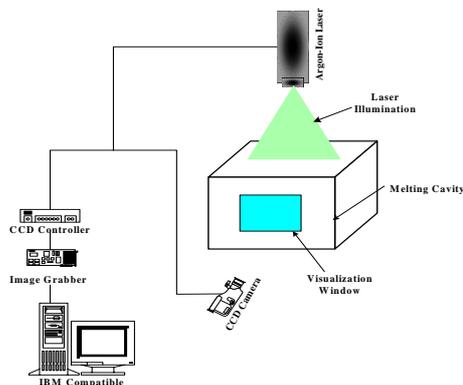


Fig. 3 Experimental set-up for visualization.

2.3 수치해석 방법

액체에서의 음압은 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 구할 수 있으나 본 연구에서와 같이 등열유속 가열조건하에서 용융용기내의 액상파라핀 온도가 135℃ 이상 가열되는 경우에는 하이드로폰으로 측정된 데이터를 신뢰할 수 없는 실험상의 제약이 따른다. 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 매질에서의 음압 분포를 경계요소법을 도입하여 해석하였으며, 구조물-음향의 연성해석에 있어서 구조계는 유한요소법을 음향계는 경계요소법을 적용한 상용코드, SVS(Structural Vibration Simulator)를 사용하였다.

초음파 진동부는 Fig. 4와 같이 진동판 밑면에 부착된 진동자들의 가진에 의해 진동판에 횡진동이 발생하며, 한 진동부 안의 진동자들은 모두 병렬연결로 하나의 발전기에 의해 구동되므로 동일 위상의 진동을 진동판에 가하는 것으로 전제하였다. 진동부는 ANSYSTM의 Brick 20 node type 95를 이용하여 유한요소 모델링한 후, SVS의 Node 정렬 순서에 맞게 재배열하였다. 203개의 element와 1524개의 node로 구성되어 모델링된 그림을 Fig. 5에 나타내었으며, 동그라미를 형성하는 영역이 밑면에 2개의 진동자가 부착되어 있는 부위로서, 185W 진동부에 대한 것이다. 음향 해석을 위해 경계요소법을 이용하여, 요소의 크기는 파장의 1/6 이내로 하였다. 액상 파라핀에서 전파속도 c는 온도에 따라 다르지만 대략 1000m/s 이고, 진동주파수, f는 40kHz이므로 파장 $\lambda (=c/f)$ 는 약 25mm이다. 따라서, 요소 크기의 최대 한계는 약 4.2mm이다.

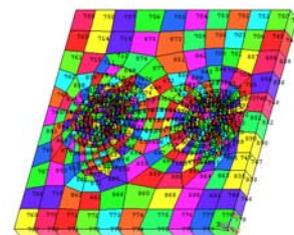


Fig. 4 Schematic diagram of a modeling for the numerical analysis.

2.4 실험결과 계산 방법

일반적으로 국부 열전달 계수 h 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = q'' / (T_h - T_\infty) \tag{1}$$

식 (1)에서, q'' 는 열유속이고, T_h 는 히터표면의 온도를 나타내며 T_∞ 는 선정된 위치에서의 액상파라핀의 온도를 나타내고 있다. 식 (1)을 통해 국부 열전달 계수를 구하고, 식 (2)를 이용하여 열전달 향상율(Δh)을 계산하였다.

$$\Delta h = h / h_0 \tag{2}$$

음파의 전파속도와 매질의 밀도는 온도와 밀접한 관련이 있음을 감안해 볼 때, 가열되고 있는 유체의 정확한 평균온도를 구하기 위해 Hong⁸⁾, Mashiro⁹⁾등이 제시한 다음의 식을 이용하여 액상파라핀의 평균온도를 구하였다.

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

식 (3)을 이용하여 액상파라핀의 대략적인 평균온도를 구한 다음 액상 파라핀의 밀도는 시약 제조회사인 Shinyo Pure Chemical Co.에서 제시한 밀도 변화식 (4)를 이용하였다.

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

밀도와 체적탄성계수, E (혹은 압축계수, k_T)의 관계로부터 매질을 투과하는 음파의 속도를 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{k_T \rho}} \tag{5}$$

결국, 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 본 연구에서는 대략적인 음파의 속도 범위를 $978\text{m/s} < v < 1074\text{m/s}$ 로 결정하여 음압을 계산하였다. Table 2는 1기압과 100기압하에서의 액상 파라핀(n-Octadecane)의 압축계수를 실험적으로 구한것으로 CRC

Table 2. Bulk modulus of elasticity of n-Octadecane

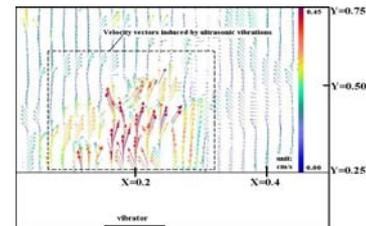
Temperature[°C]	Bulk modulus of elasticity(N/m ²)	
	1 atm	100 atm
60.0	1.06×10^9	1.96×10^9
79.4	9.61×10^8	1.82×10^9
98.9	8.62×10^8	1.72×10^9
115.0	7.81×10^8	1.64×10^9
135.0	6.94×10^8	1.56×10^9

handbook of chemistry and physics¹⁰⁾의 값을 준용한 것이다.

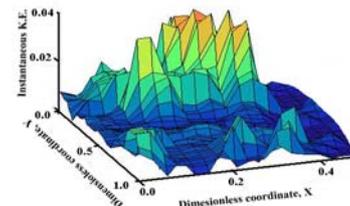
3. 결과 및 고찰

3.1 PIV 측정결과

Figures. 5~7은 6433.13 W/m²의 열유속이 주어졌을 때 초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위해서 초음파 출력강도를 340W, 185W, 70W로 구분하여 적용한 후, PIV 계측을 통해 계산된 음향흐름의 속도분포와 운동에너지 분포결과를 보여주고 있다. Fig. 5(a), 6(a), 7(a)에서 보는 바와 같이, 입자영상추적계 분석결과 초음파 가진시 용기바닥면에서 자유표면으로 향하는 강한 유체흐름, 즉 음향흐름이 형



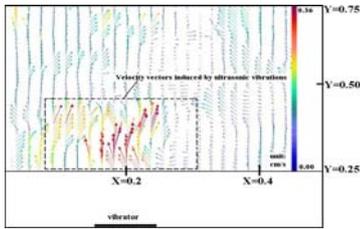
(a) velocity profiles calculated from the PIV



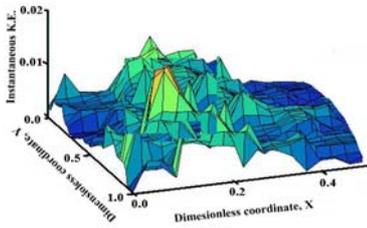
(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

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 340W.

성됨을 보여주고 있으며, 본 연구에서 발생된 음향흐름은 quasi-Eckart Streaming의 한 형태이다. 또한, Fig. 5(b), 6(b), 7(b)에서 보는 바와 같이, 높

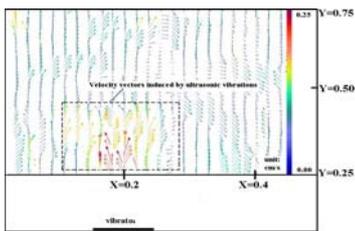


(a) velocity profiles calculated from the PIV

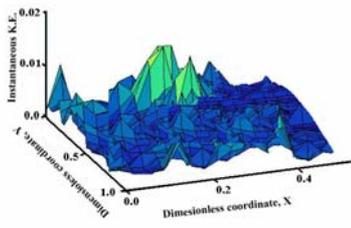


(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

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 185W.



(a) velocity profiles calculated from the PIV



(b) kinetic energy distribution calculated from the PIV

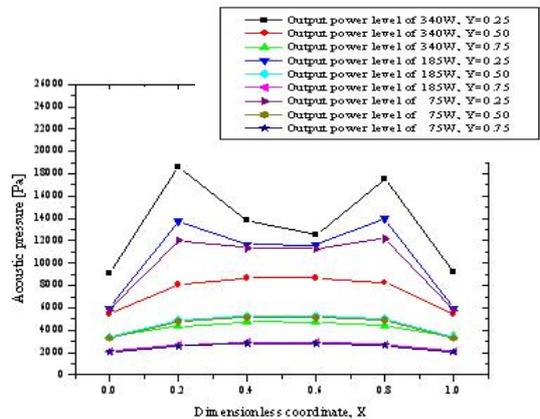
Fig. 7 Two dimensional velocity profiles and kinetic energy distribution induced by ultrasonic wave measured at the visualization window at the output power level of 70W.

은 출력이 주어질수록 운동에너지 분포가 초음파 진동자 부근에서 높게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 높은 출력이 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.

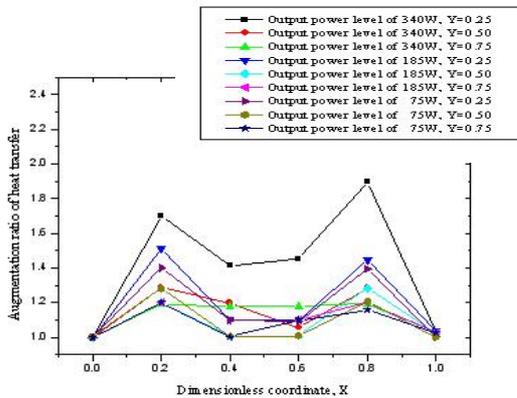
3.2 압력변동과 열전달 향상비 결과

Figure 8은 초음파 출력강도가 70W~340W로 변화했을 때, 수치해석을 통해 계산된 압력변동 결과와 열전달 향상비 결과를 도시한 것이다.

Figure 8 (a)에서 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 있으며, 이는 Fig. 5~7에서 보는 바와 같이 무차원 좌표가 동일한 지점(X=0.2와 Y=0.25)에서 운동에너지 분포가 높게 나타나는 것과 잘 일치하고 있다. 하지만, Y축의 무차원좌표가 0.25이상일 경우에는 압력변화 추이가 큰 편차를 보이지 않고 있는데 이는 압력파동이 전달되는 과정에서 중첩과 간섭이 일어나 거의 압력 평형을 이루게 되는 것이다. Kim et al.¹¹⁾은 밀폐된 곳에 초음파 진동을 가진할 경우 액상 영역내에 진동자 부근에서 거의 sine곡선 형태를 이루며 음압의 고저가 반복적으로 나타나고 있다고 하였다. 그 결과 Eckart streaming이라 불리는 강한 상향의 유동은 운동에너지가 증가와 동시에 발달하기 시작한다.



(a) acoustic pressure variations



(b) augmentation ratio of heat transfer

Fig. 8 Comparison between the acoustic pressure variations and augmentation ratio of heat transfer.

Figure 8 (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. 결국, 매질 내에서의 초음파 진동의 가진으로 인해 발생하는 음압은 열전달의 증가에 영향을 미칠 수 있는 Eckart streaming과 같은 격렬한 유동을 일으켜 열전달을 향상시킨다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파 진동에 의해 발생한 강한 유체의 움직임이 열전달에 영향을 끼치는 중요한 요인을 제시하였다. PIV 측정에 의해 명백히 드러난 음향흐름이라 불리는 유동현상은 대류 열전달 촉진을 설명하기 위한 중요한 물리적 개념인 유체의 속도 및 운동에너지를 증가시키게 한다. 초음파 강도가 증가함에 따라 열전달 계수는 증가하였고, 340W의 초음파 출력강도가 주어졌을 때 가장 큰 약 28%의 열전달 향상결과가 측정되었다. 액상영역에서 갑작스런 압력변동에 의해 음향흐름은 형성되고, 수치해석을 통한 음압의 계산 결과 초음파 출력강도가 각각 340W, 185W, 70W일 때 약 60.3%, 39% 그리고 35%의

압력이 증가하는 결과를 보였다. 초음파 진동자 부근에서의 높은 압력분포는 격렬한 유동(즉, quasi-Eckart streaming)을 발달시키고, 압력변동이 열전달의 증감과 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다. 결국, 이러한 메카니즘은 열전달 향상비가 증가됨을 뒷받침해 주는 것이다.

참고문헌

- (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.
- (6) McCollum, M. D. and Clementina, M. S., 1996, "Modal Analysis of a Structure in a Compressible Fluid Using a Finite Element/Boundary Element Approach," *J. Acoust. Soc. Am.* 99, pp. 1949~1957.
- (7) 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.
- (8) Hong, C. S., 1990, "Studied on Heat Storing and Retrieving Characteristics in a Paraffin-Filled Horizontal Circular Tube," Ph. D. Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea
- (9) Mashiro, 1995, *Heat Transfer, Korean ed.*, Sigma Press, Seoul, Korea, 200-2001.
- (10) Cutler, W. G., McMickle, R. H., Webb, W. and Schiessler, R. W., 1958, *J. Chem. Phys.*, Vol. 29, pp. 727.
- (11) Kim, J. O., Kim, J. H., Choi, J. Y. and Jho, M. J., 1995, "A Study on Improving the Life and Performance of an Ultrasonic Cleaner by Vibration and Acoustic Analyses," *Journal of KSME*, Vol. 19, No. 11, pp. 2939~2953.