

## 초음파 진동이 비등열전달 과정에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

나기대<sup>†</sup> · 오윤권\* · 양호동\*\*

조선대학교 기계설계공학과, \*조선대학교 기전공학과, \*\*조선대학교 정밀기계공학과  
(2005년 10월 23일 접수, 2006년 1월 25일 채택)

### Experimental Study on Effect of Boiling Heat Transfer by Ultrasonic Vibration

Gee-Dae Na<sup>†</sup>, Yool-Kwon Oh\* and Ho-Dong Yang\*\*

Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University

\*Department of Mechatronics Engineering, Chosun University

\*\*Department of Precision Mechanical Engineering, Chosun University

(Received 23 October 2005, Accepted 25 January 2006)

#### 요 약

본 연구에서는 비등열전달 과정동안, 초음파 진동이 열전달 과정에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 조사해 보았다. 실험은 등온가열조건하에서, 40 kHz의 초음파 진동을 가진 경우와 가진하지 않은 경우로 나누어 비등과정동안의 온도분포를 측정하였고, 대류상태와 과냉상태 그리고 포화상태에서의 열전달계수를 측정하여 열전달 향상율을 비교하여 보았다. 또한, 하이드로폰을 이용하여 초음파 가진시 매질내에 발생하는 음압분포를 측정하고 열전달 향상율과 비교하여 보았다. 실험결과, 비등열전달 과정에 초음파 진동을 가진 경우, 가진하지 않은 경우와 비교하였을 때 열전달계수가 높게 나타나는 것을 확인하였으며, 특히 대류상태에서 열전달계수가 급격하게 증가하였다. 또한, 초음파 진동의 가진으로 인해 형성되는 음압은 진동자가 부착된 지점에서 주위보다 상대적으로 높게 형성되는 것을 실험적으로 확인하였으며, 초음파 진동으로 인해 형성된 높은 음압이 열전달 향상율에 영향을 미치는 원인의 하나로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 결국, 초음파 진동에 의해 매질내에 발생하는 음압은 열전달 향상과 밀접한 관련이 있다고 사료된다.

**주요어** : 비등열전달, 열전달 향상율, 열전달계수, 음압, 초음파 진동

**Abstract** — This study experimentally investigates effect of boiling heat transfer when ultrasonic vibration was applied. Under the wall temperature condition, temperature distribution in a cavity was measured during the boiling process and heat transfer coefficient of convection, sub-cooled boiling and saturated boiling states were measured with and without ultrasonic vibration, respectively. Also, the profiles of the pressure distribution in acoustic field measured by a hydrophone were compared with the augmentation ratios of heat transfer calculated by local heat transfer coefficient. Result of this study, heat transfer coefficient and augmentation ratio of heat transfer is higher with ultrasonic waves than without one. Especially, augmentation ratio of heat transfer is more increased the convection state than sub-cooled boiling and saturated boiling states. Acoustic pressure is relatively higher near ultrasonic transducer than other points where is no installed it and affects the augmentation ratio of heat transfer.

**Key words** : Boiling heat transfer, Augmentation ratio of heat transfer, Heat transfer coefficient, Acoustic pressure, Ultrasonic vibration

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University  
Tel: 062-230-7174  
E-mail: gdna@chosun.ac.kr

## 1. 서 론

열전달 촉진기술은 1950년대 증반 고효율의 발전 및 프로세스용 열교환기에 대한 수요의 증가, 상업적인 원자력 발전의 출현 그리고 항공 우주 시스템 등의 요구에 대응해서 개발되기 시작하여 1970년대 석유 파동 이후 열 회수와 대체 에너지 시스템을 비롯한 다양한 분야에서 급속한 발전이 이루어져 왔다. 특히, 액체가 기체로 상변화하는 비등열전달(boiling heat transfer)의 경우, 열전달 성능 증대를 위해 원자력발전소, 냉난방, 전자부품냉각, 열교환기, 흡수식 냉각장치 등의 산업분야에서 많은 연구가 이루어지고 있으며, 열전달 촉진을 위한 방법들로는 열전달 표면의 증가나 촉진제 첨가와 같은 수동적인 방법(passive technique)과 전기장, 자기장, 표면진동 그리고 초음파와 같은 외부의 힘에 의한 능동적인 방법(active technique)으로 나눌 수 있다<sup>[1]</sup>. 이 중에서 능동적인 열전달 촉진기술의 하나로 제시되고 있는 초음파 진동을 이용한 열전달 촉진기술은 이미 용접, 세척분야 그리고 의료분야에서 그 우수성이 인정되고 있고, 최근에 들어 Oh *et al.*<sup>[2][3]</sup>은 상변화 물질의 열전달 촉진을 위한 효과적인 대안으로 제시된 바 있으며, Park and Bergles<sup>[4]</sup>는 초음파 진동을 이용한 방법은 발열량이 큰 마이크로 칩의 집적냉각에서 그 효과를 증대시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다고 보고한 바 있다<sup>[5]</sup>. 이렇듯, 초음파 진동으로 인한 열전달 향상에 관한 연구는 유동력에 대한 관심이 고조되면서 그에 대한 원리를 공학적인 측면에서 접근하고자 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그러나, 초음파 진동을 이용한 열전달 촉진에 관한 대부분의 실험적 보고는 열전달 효율의 향상 결과만을 제시한 것이 대부분이고, 초음파 진동을 통해 제안된 열전달 증대 요인들은 실험적 근거가 희박한 추론에 의한 것이다.

따라서, 본 연구에서는 Kim *et al.*<sup>[6]</sup>에 의해 제안된 바 있는 초음파 진동을 비등열전달 과정에 적용하여, 초음파 진동에 의한 열전달 증진 효과를 실험적으로 검증하기 위한 기초연구로써 냉각수로 많이 사용되는 물속에 음장을 형성하고 초음파 진동이 열전달에 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 한다. 이를 위해, 40 kHz의 초음파 진동을 가진 경우와 가진하지 않은 경우(자연대류)로 나누어 비등용기에 채워져 있는 증류수를 가열하기 시작하여 비등점에 도달할 때까지의 온도분포를 측정해 보고, 대류상태, 과냉상태, 포화상태에서의 열전달 계수를 측정하여 열전달 향상율을 확인하여 보았다. 또한, Oh *et al.*<sup>[2][3]</sup>과 Hilgert<sup>[6]</sup>가 보고한 바 있는 음향흐름(acoustic streaming)은 초음파 가진 시 매질내에 형성되어 열전달을 촉진시키는 요소이며, 이러한 음향흐름은

초음파 진동이 매질을 통과할 때 발생하는 음압에 기인하는 것<sup>[7]</sup>으로 알려져 있다. 따라서, 초음파 진동을 가진하였을 경우 매질내에 발생하는 음압을 하이드로폰을 이용하여 실험적으로 측정해보고 열전달 향상율과 비교하여 초음파 진동에 의해 형성된 음압이 열전달 촉진에 영향을 미치는지 알아보하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 실험물질로 증류수(pure water)를 사용하여, 초음파 진동자(IBL 4532D, INFITRON Inc, Resonance frequency :  $40 \pm 1$  kHz)가 부착된 비등용기 내에서 가열되고 있는 증류수의 온도측정을 통한 열전달 특성 실험과 증류수 속에 초음파 진동이 가진된 경우 유동장 내에 발생하는 음압을 측정하는 실험으로 나누어 수행하였으며, 실험에 사용된 증류수의 물성치는 CRC Handbook of Chemistry and Physics<sup>[8][9]</sup>의 값을 준용하여 Table 1에 나타내었다.

### 2-1. 실험장치

Fig. 1과 2는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 보여주는 것으로, 가로, 세로, 높이가 각각 15 cm, 15 cm, 20 cm인 비등용기(SUS304)와 함께 발열을 위한 가열장치, 초음파 진동을 발생시킬 수 있는 장치 그리고 온도분포를 측정하기 위한 장치(Fig. 1 참조) 및 음압을 측정하기 위한 장치(Fig. 2 참조)로 나눌 수 있다.

먼저, 실험에 사용된 L자형 가열히터는 발열부와 비발열부로 나누어 제작하였고, 용기 바닥면에서만 가열이 이루어지도록 하여 발생된 열유속이 비등용기 내에서 자유수면으로만 향하도록 하였다. 용기 내에 음장을 형성

Table 1. Physical properties of pure water.

Properties	Conditions	Value
Melting Temperature	1 atm	0°C
Boiling Temperature	1 atm	100°C
Critical Temperature	1 atm	373.99°C
Vapor Pressure	25°C	3.292 kPa
	45°C	9.863 kPa
	75°C	39.275 kPa
Density	1 atm/4°C	999.97 kg/m <sup>3</sup>
	1 atm/25°C	996.96 kg/m <sup>3</sup>
	1 atm/45°C	990.16 kg/m <sup>3</sup>
	1 atm/75°C	974.82 kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat Capacity	1 atm/100°C	4.216 KJ/kg · K
Thermal Conductivity	1 atm/100°C	0.6791 W/m · K
Viscosity	1 atm/100°C	$0.2818 \times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s
Surface Tension	1 atm/100°C	$5.891 \times 10^{-2}$ N/m

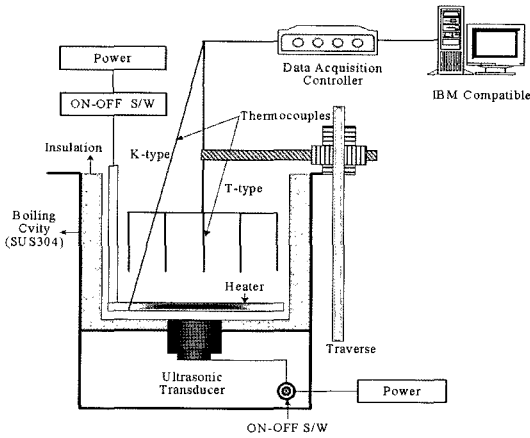


Fig. 1. Experimental apparatus for measurement of temperature distributions.

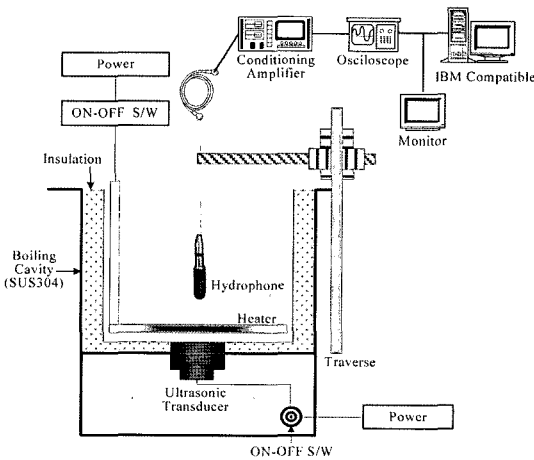


Fig. 2. Experimental apparatus for measurement of acoustic pressure.

하기 위해, 용기 바닥면 중앙에 직경이 30 mm인 초음파 진동자 1개를 설치하고 주파수 발생장치를 비등용기와 일체형으로 제작하여 ON-OFF 스위치를 이용해 40 ± 1 kHz의 일정한 주파수(Sound wave)를 50 W의 전력으로 초음파 진동자에 공급하도록 하였다.

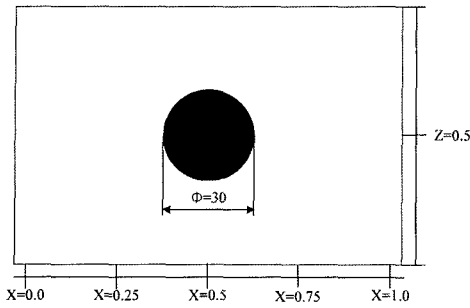
온도분포 측정을 위한 실험장치는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 가열과정 동안 비등용기 내의 증류수의 온도를 측정하기 위한 T-type의 열전대와, 가열히터의 발열부에서 발생하는 온도를 측정하기 위한 K-type의 열전대를 사용하였다. 가열과정 동안 증류수와 히터 발열부의 정확한 온도를 획득하기 위해, 사용된 모든 열전대는 온도 측정부분을 제외하고 절연테이프와 스테인리스튜브를 이용하여 열전도 현상을 최소화시킬 수 있도록 절

연처리를 하였으며, 열전대를 통해 측정된 온도는 데이터 획득장치(data acquisition controller)에 의해 매 5초마다 PC에 저장되었다.

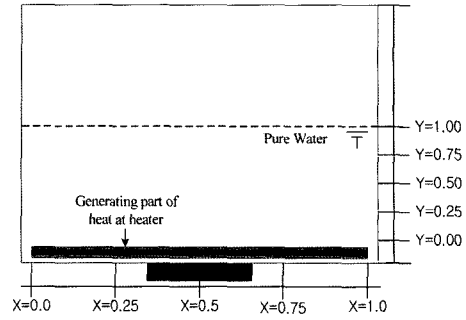
음압을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 온도분포 측정실험과 동일한 조건하에서 가열되고 있는 비등용기 내에, 일반적으로 압력을 측정할 때 사용하는 하이드로폰을 이용하여, 초음파 진동에 의해 형성되는 음압을 측정하였다. 하이드로폰으로부터 측정된 값은 증폭기(amplifier)를 통해 오실로스코프에서 모니터링 되면서 전압값으로 저장되고 이를 압력값으로 환산하여 PC에 저장되도록 하였다. 또한, 온도측정 실험과 압력측정 실험에서 열전대와 하이드로폰의 위치를 정확하게 제어하기 위해 0.1 mm의 정밀도를 가진 Traverse를 이용하였고, 실험이 진행되는 동안 비등용기의 벽면을 통한 외부로의 열손실 및 저항을 최소화하기 위해 용기 외부에 베이클라이트와 압축 스티로폼을 이용하여 단열벽을 설치하였고, 용기의 상부는 개방시켜 두었다.

2-2. 실험방법

실험은 비등용기 내에 증류수를 120 mm 높이까지 채워 넣고(약 2,700 cc), 채워진 물의 전체 영역의 온도와 가열히터 그리고 비등용기의 온도가 실내온도와 평형을 이룰 수 있도록 약 하루정도 실온(25°C)에 놓아두었다가 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 열전달 프로세스를 구성하기 위해, 가열조건으로 가열면의 온도를 가열하는 동안 일정하게 유지하는 방식의 등온가열조건(constant wall temperature condition)을 채택하였고, 가열히터는 비등용기의 크기를 고려하여 1,500 W/m<sup>2</sup>의 열유속으로 물을 비등점까지 가열하도록 하였다. 가열과정 동안, 가열히터 표면의 온도를 측정하기 위해 K-type의 열전대를 고온에 견딜 수 있는 특수실을 사용하여 가열히터 표면에 부착시켰고, 비등용기 내의 증류수 온도를 측정하기 위해 Traverse에 5개의 T-type 열전대를 고정시켜 미리 설정한 위치(X=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0과 Z=0.5, Fig. 3(a) 참조)에 설치하였으며, 용기 바닥면에서 자유수면까지의 거리를 Y축의 무차원 좌표(Y=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0(Fig. 3(b) 참조))로 설정하여 Traverse를 Y축으로 이동시키면서 각 지점의 온도를 측정하였다. 또한, 초음파 진동이 가진되는 경우 비등용기내의 액상영역에 발생하는 음압분포를 알아보기 위해 온도측정 실험과 동일한 위치 조건에서 Traverse를 이용하여 음압을 측정하였다. 온도 데이터를 위해 실험 전에 모든 열전대들은 온도보정을 실시하였고, 정확한 압력측정을 위해 예비실험을 실시하여 표준대기압 상태에서의 측정 조건을 선정하였다. 그리고, 모든 실험은 동일 조건 하에서 3회에 걸친 반복실험을 통해 얻어진 온도 및



(a) Bottom view



(b) Front view

Fig. 3. Schematic diagram of the test section.

압력 테이터의 평균 테이터를 결과 값으로 사용하였다.

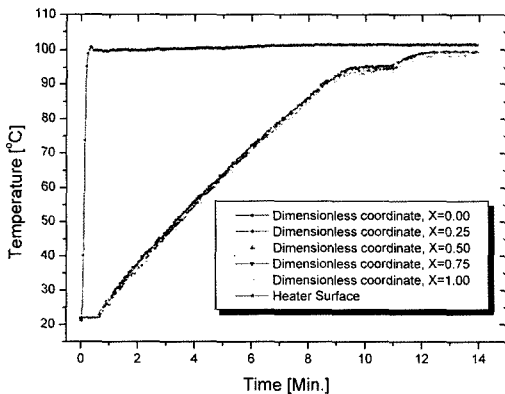
2-3. 실험결과 계산

본 연구에서 측정된 온도분포 결과를 토대로 국부 열전달 계수는 다음의 식(1)로서 구할 수 있다.

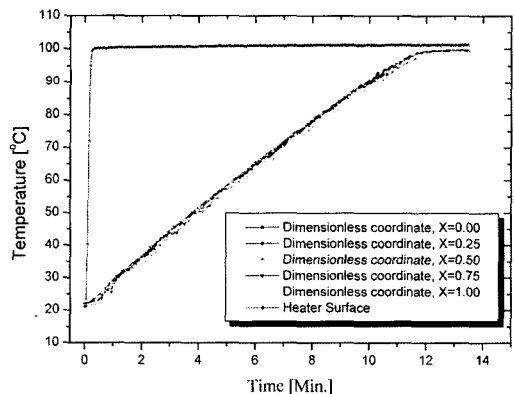
$$h = \frac{q''}{T_h - T_\infty} \quad (1)$$

식(1)에서,  $q''$ 은 열유속이고,  $T_h$ 와  $T_\infty$ 는 각각 가열히터 표면의 온도와 미리 선정된 위치에서 측정된 증류수의 온도를 나타내고 있다. 식(1)을 통해 초음파 진동이 가진 경우의 국부 열전달 계수( $h$ )를 구하고 초음파 진동이 가진되지 않은 경우의 국부 열전달 계수( $h_0$ )를 구한 다음, 식(2)를 이용하여 열전달 향상율( $\Delta h$ )을 구할 수 있다.

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



(a) without ultrasonic vibration



(b) with ultrasonic vibration

Fig. 4. Variations of heater & pure water temperature during the boiling in case of dimensionless coordinate,  $Y=0.0$ .

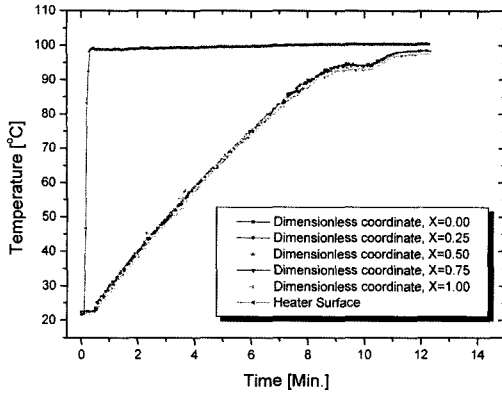
3. 실험결과 및 고찰

3-1. 온도분포 측정 결과

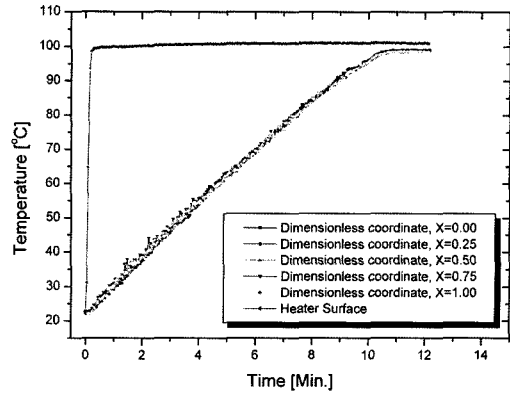
본 연구에서는 초음파 진동을 가진 경우와 가진하지 않은 경우에 있어서, 비등용기 내의 증류수를 가열하기 시작한 이후비등점에 도달할 때 까지 어떠한 온도 변화를 나타내는지 조사하여 보았다.

Fig. 4~8은 등온가열조건하에서, 증류수와 가열히터 표면의 온도가 가열이 시작된 이후부터 비등점에 도달할 때까지의 시간에 따라 어떻게 변하고 있는지를 Y축의 무차원 좌표에 따라 각각 나타낸 것이다. 우선, Fig. 4~8에서 나타난 바와 같이 히터표면의 온도는 가열이 시작된 이후 급격하게 상승하여 약 100°C 부근에서 일정한 온도를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실험조건에서 가열조건으로 제시하였던 등온가열조건이 성립되고 있는 것을 확인할 수 있다.

다음으로, 증류수를 가열하기 시작하여 비등점에 도달

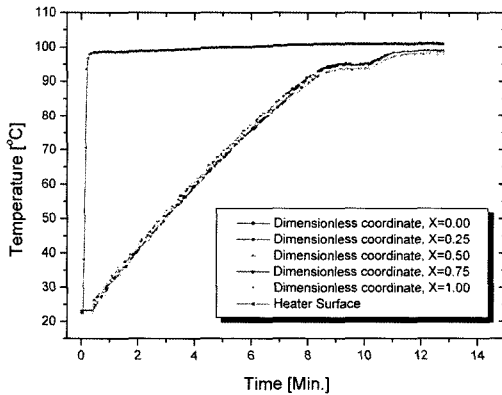


(a) without ultrasonic vibration

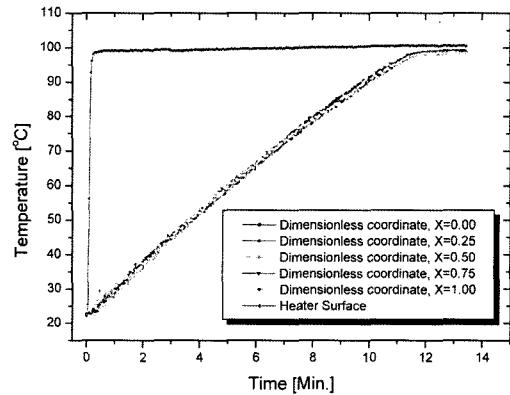


(b) with ultrasonic vibration

Fig. 5. Variations of heater & pure water temperature during the boiling in case of dimensionless coordinate,  $Y=0.25$ .



(a) without ultrasonic vibration

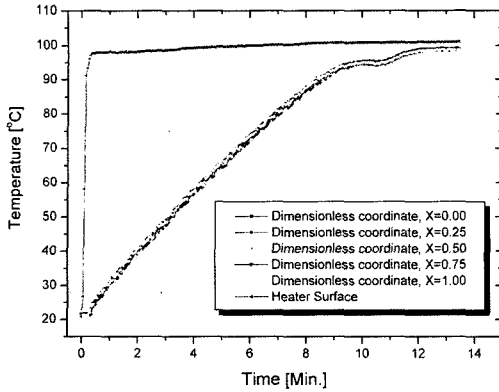


(b) with ultrasonic vibration

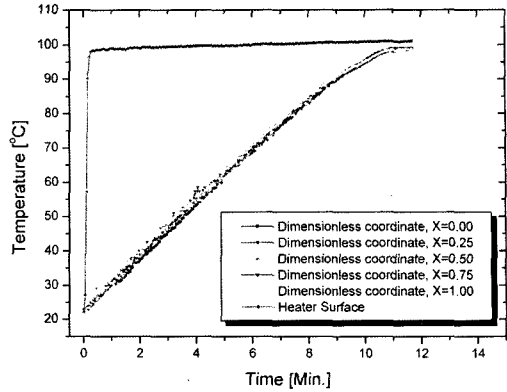
Fig. 6. Variations of heater & pure water temperature during the boiling in case of dimensionless coordinate,  $Y=0.50$ .

할 때까지의 온도분포를 확인해 보면, Fig. 4(a)~8(a)의 그래프는 초음파 진동을 가진하지 않았을 경우의 온도 분포 결과를 보여주는 것으로, 초음파 진동이 가진되지 않은 경우에 있어서 증류수의 온도는 가열시간에 따라 일정하게 상승하지만, 비등점에 도달하기 전인 약 90~95°C 사이에서 일정시간 등온상태를 유지하였고, 다시 가열되기 시작하여 비등점에 이르러 일정온도를 유지하면서 가열히터의 표면온도(약 100°C)에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, Fig. 4(b)~8(b)는 초음파 진동을 가진한 경우의 온도분포 결과를 보여주는 것으로, 초음파 진동이 가진되지 않은 경우와 마찬가지로 증류수의 온도는 가열시간에 따라 일정하게 상승하지만 약 90°C에 도달한 이후, 초음파 진동이 가진되지 않은 경우와

는 다르게 등온상태가 이루어지지 않고 지속적으로 가열되어 비등점에 이르게 되는 것을 확인할 수 있었다. 여기서, 가열이 시작된 초기에 있어 초음파 진동을 가진하지 않은 경우 증류수의 온도는 Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 가열이 시작된 이후 약 1분 이내에 있어서는 온도상승이 관측되지 않고 있으나, 초음파 진동을 가진한 Fig. 4(b)의 경우에 있어서는 가열을 시작함과 동시에 온도가 상승되는 것을 관측할 수 있다. 이것은 초음파 가진으로 인해 가열초기에 온도측정 지점 대부분의 영역에서 급격한 열전달이 이루어지고 있다는 것을 의미하며, 이러한 현상은 Oh *et al.*<sup>[21]</sup>에 의해 보고된 바 있는 음향흐름(acoustic streaming)이라 불리는 강한 방향의 흐름이 초음파 진동자 부근에서 형성되기 때문이

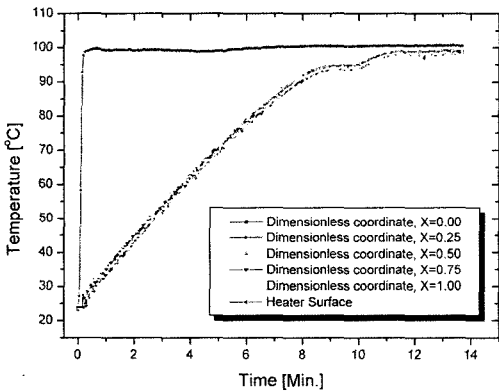


(a) without ultrasonic vibration

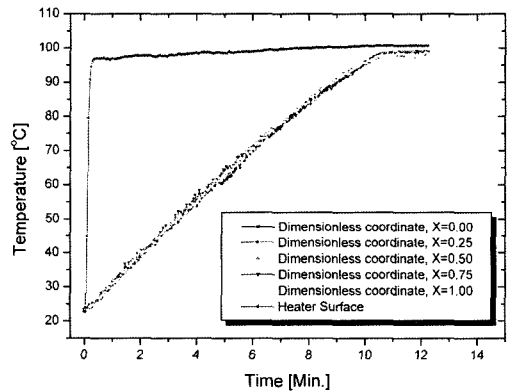


(b) with ultrasonic vibration

Fig. 7. Variations of heater & pure water temperature during the boiling in case of dimensionless coordinate,  $Y=0.75$ .



(a) without ultrasonic vibration



(b) with ultrasonic vibration

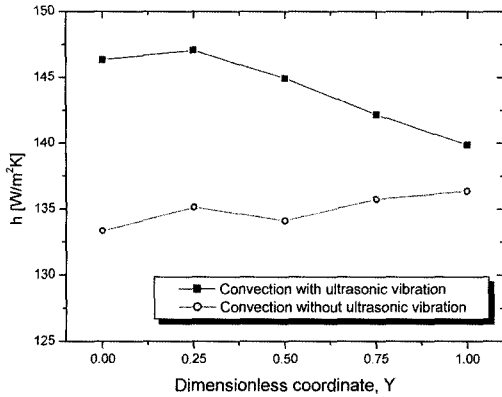
Fig. 8. Variations of heater & pure water temperature during the boiling in case of dimensionless coordinate,  $Y=1.0$ .

라고 판단된다. 특히, 초음파 진동자와 가장 가까운 지점( $Y=0.0$ )에서는 강한 음향흐름이 형성되어 온도분포 차이가 크게 나타나지만, 자유수면( $Y=1.0$ )에 도달해서는 음향흐름의 형성이 미약하기 때문에 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다. 아울러, 가열초기 이후 초음파 진동을 가진하였을 때의 온도상승률이 가진하지 않았을 때보다 다소 낮게 나타나는 이유는 가열초기 급격하게 온도상승을 유도했던 초음파 진동이 가열중반 이후 용기내의 증류수 전 영역에 걸쳐 열적 흐름을 발달시켜 고온 온도분포를 유도하였기 때문으로 보인다. 하지만, 다소 낮은 온도상승률 결과가 나타났음에도 불구하고 결과적으로 가열이 시작된 이후 비등점에 도달하는 시간, 즉 히터표면의 온도인 약  $100^{\circ}\text{C}$ 와 거의 온도평형이 이루어지

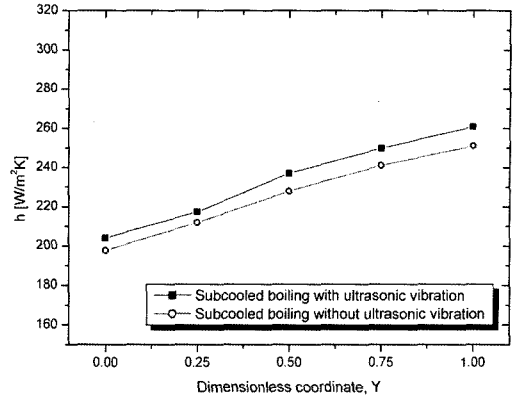
는 시간을 각각의  $Y$ 축 무차원 좌표 변화에 따른 측정 결과를 토대로 비교해 보았을 때, 초음파 진동이 가진 되지 않은 경우보다 가진된 경우가 비등점에 도달하는 시간이 약 1분 정도 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3-2. 열전달계수 및 열전달 향상비 결과

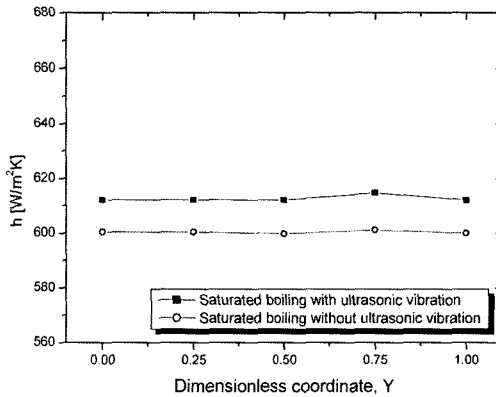
본 연구에서 열전달계수의 측정은 식(1)을 이용하였으며, Fig. 9는 증류수의 가열과정 동안 형성되는 대류상태, 과냉상태 그리고 포화상태에서 초음파 진동을 가진 한 경우와 가진하지 않은 경우로 나누어 초음파 진동자가 부착된  $X$ 축의 무차원 좌표가 0.5인 지점을 기준으로  $Y$ 축의 무차원좌표 변화에 따른 열전달계수 측정 결과를 그래프로 나타낸 것이다.



(a) Convection state



(b) Sub-cooled boiling state



(c) Saturated boiling state

Fig. 9. Variations of local heat transfer during the boiling process at dimensionless coordinate, X=0.5.

Fig. 9(a)는 가열이 시작된 초기에 대류상태에서의 열전달계수 측정결과를 보여주고 있는 것으로, 초음파 진동을 가진 하였을 경우에는 진동자와 가장 가까운 지점(즉, Y=0.0)에서 열전달계수 측정 결과가 높게 나타났으며, 자유수면(즉, Y=1.0)으로 향할수록 열전달계수는 상대적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 앞 절의 온도분포 측정결과에서 언급하였듯이, 가열초기 대류상태에 있어 초음파 진동자 부근에서 형성되는 강한 음향흐름으로 인해 급격한 온도상승이 이루어져 열전달계수 측정 결과가 큰 차이를 보이고 있으며, 자유수면으로 향할수록 열전달계수가 감소하고 있는 것으로 판단된다. 반면에, 초음파 진동을 가진하지 않은 경우에 있어서는 부력에 의한 유동현상이 발생하면서 Y축의 무차원좌표의 변화에 따라 열전달계수 측정 결과가 그다지 큰 편차를 보이지 않고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9(b)는 대류상태에서 포화상태로 전환되기 직전

인 과냉상태에서의 열전달계수 측정 결과를 보여주고 있는 것으로, 초음파 진동을 가진한 경우의 열전달계수가 가진되지 않은 경우의 열전달계수보다 높게 나타나고 있는 것을 볼 수 있지만, 대류상태에서의 측정 결과와는 다르게 측정지점이 진동자와 가장 가까운 지점에서부터 자유수면으로 이동하는 과정에서 각각의 열전달계수는 큰 편차를 나타내지 않고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9(c)는 포화상태에 이르렀을 때의 열전달계수를 보여주고 있는 것으로, 포화상태에 있어서는 초음파 진동을 가진하였을 경우의 열전달계수가 가진하지 않은 경우보다 높게 형성되고 있으나, 두 경우 모두 열전달계수의 증가는 일어나지 않고 각각의 Y축 무차원 위치에서 거의 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 식(2)를 이용하여 대류상태와 과냉상태 그리고 포화상태에서의 열전달 항상율을 각각 계산하여 나타낸 그래프이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 대류상태에

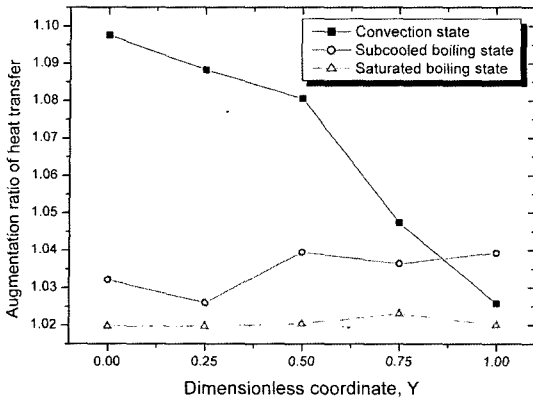


Fig. 10. Results of augmentation ratio of heat transfer during the boiling process.

서의 열전달 향상율은 과냉상태와 포화상태에서의 열전달 향상율과 비교하였을 때, 초음파 진동이 가진되면 초음파 진동자와 가장 가까운  $Y=0.0$ 인 지점에서 상대적으로 높게 나타나고 자유수면인  $Y=1.0$ 에 가까워질수록 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 포화상태에서의 열전달 향상율은  $Y$ 축의 무차원 위치의 변화에 따라 약간의 차이는 있지만 비슷한 열전달 향상율 결과를 나타내고 있고, 자유수면으로 향할수록 과냉상태에서의 열전달 향상율이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이는 앞 절의 온도분포 측정결과와 비교하였을 때, 증류수를 가열하는 과정에서 초음파의 가진으로 인해 형성되는 대류상태에서의 갑작스런 열전달계수 증가와 과냉상태에서의 지속적인 열전달계수의 증가로 인해 초음파 진동이 가진되지 않은 경우에 확인되었던 일정시간 동안의 등온상태(Fig. 4(a)-8(a) 참조)가 초음파 진동을 가진하였을 경우(Fig. 4(b)-8(b) 참조)에서는 형성되지 않고 보다 더 빠른 시간내에 가열되어 비등점에 도달하였다고 사료된다. 다시 말해서, 초음파 진동은 대류상태에서의 급격한 열전달 촉진으로 인해 과냉상태로 접어들기 전에 열전달을 활성화시켜 초음파 진동을 가진하지 않은 경우에 형성되는 일정시간 동안의 등온상태 과정을 거의 생략하고 비등점에 도달할 수 있도록 하였다. 이러한 실험결과는, Kim *et al.*<sup>[5]</sup>이 실험액체로 FC-72를 사용하여 비등열전달 과정에서 케비테이션 현상의 관측을 통해 초음파 진동이 대류상태에서 포화상태로 전환되기 전 음압과 acoustic streaming으로 인해 열적 기포의 분리를 촉진시켜 열전달을 촉진시킨다고 언급한 결과와도 잘 일치하고 있다.

### 3-3. 음압분포 측정 결과

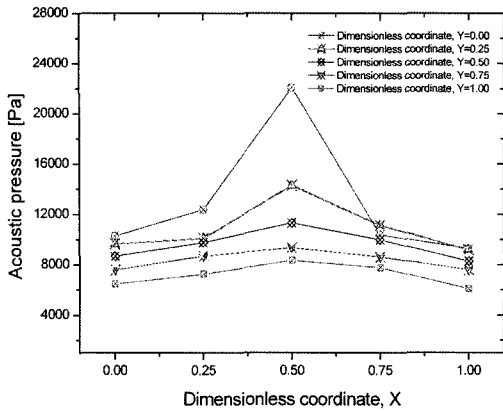
Fig. 11은 대류상태와 과냉상태 그리고 포화상태에 있

어서 비등용기 내 증류수의 음압분포를 하이드로폰을 이용하여 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 여기서, 하이드로폰을 이용하여 측정된 결과는 하이드로폰의 제조사에서 제시한 측정범위 내에서의 오차범위와 초음파 진동을 가진하였을 때 초음파가 매질인 증류수에 투과되는 동안 발생하는 소음 및 주변장치의 미세 진동과 정확한 음압측정에 영향을 미치는 요인을 고려하여 약  $\pm 5\%$ 의 정확도를 두고 측정결과를 분석하였다.

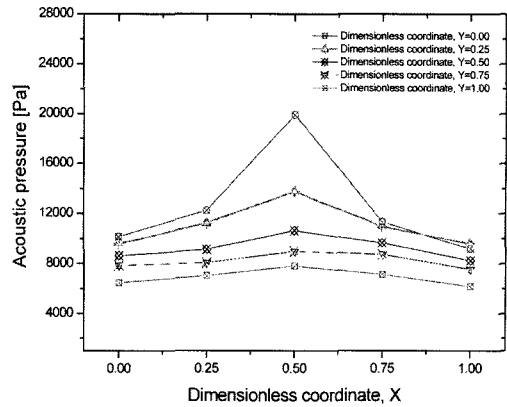
Fig. 11(a)는 대류상태에서 음압분포를 측정된 결과로서, 초음파 진동자가 부착된 지점으로부터 가장 가까운 지점인 무차원좌표  $X=0.5$ 와  $Y=0.0$ 인 지점에서 비교적 높은 음압이 형성되고, 무차원좌표  $X$ 와  $Y$ 가 초음파 진동자로부터 멀어질수록 압력은 급격한 차이를 나타내며 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히,  $Y$ 축의 무차원좌표가 0.5 이상으로 자유수면에 가까워질수록 음압분포는 큰 편차를 보이지 않고 비슷하게 유지되는 결과를 볼 수 있다. 이러한 음압분포는 Fig. 11(b)의 과냉상태와 Fig. 11(c)의 포화상태에서도 유사한 pattern으로 측정 결과가 나타나고 있다. 하지만, 과냉상태의 경우 초음파 진동자가 부착된 지점에서 가장 가까운 지점인  $X=0.5$ 와  $Y=0.0$ 에서의 음압은 대류상태에서의 측정결과와 보다는 다소 측정결과가 낮게 나타났고, 포화상태의 경우에는 대류상태와 과냉상태에서의 측정결과보다 더 낮은 음압이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 대류상태에서의 음압은 진동자와 가까운 지점과 진동자로부터 멀어지는 지점에서의 측정결과치 편차가 다소 심한 차이를 두고 발생하는 것을 측정결과로부터 확인할 수 있으나, 포화상태에서의 음압측정 결과는  $Y$ 축의 무차원좌표가 0.0과 0.25인 지점에서의 경우, 대류상태에서의 측정결과와는 상대적으로 큰 편차를 보이지 않고 있으며,  $Y$ 축의 무차원좌표가 0.5 이상인 지점에서 측정된 음압결과는 평균적으로 대류상태보다는 상승되어 나타나는 것을 알 수 있다.

이는 앞 절의 열전달계수 측정 및 열전달 향상율 결과와 비교해 보았을 때 초음파 진동을 증류수의 비등과정 동안에 적용시켰을 경우, 대류상태와 과냉상태, 포화상태에서 전반적으로 열전달계수의 증가와 열전달이 향상됨을 확인하였고, 음압측정 결과에서도 각각의 상태에서 초음파 진동으로 인해 진동자 부근에서 주위보다 상대적으로 높은 음압이 형성되는 결과를 확인할 수 있었다. 세부적으로, 초음파 진동의 가진으로 인해 대류상태에서 급격하게 열전달계수를 증가시켰고 이로 인해 두드러지게 열전달 향상이 이루어지는 것을 확인하였는데, 대류상태에서의 음압측정 결과에 비추어 볼 때 초음파 진동의 가진시 발생하는 높은 음압이 대류상태에서 열전달을 촉진시키는데 큰 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 또한, 과냉상태와 포화상태에서의 열전달계수와 열전달 향

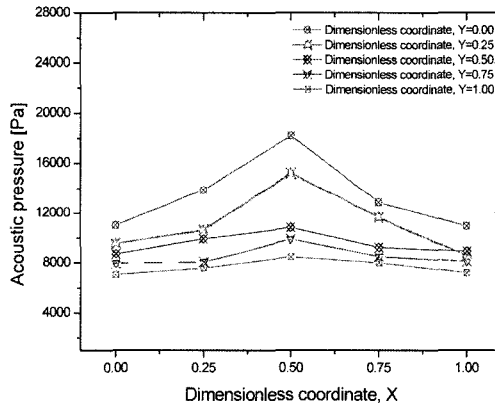




(a) Convection state



(b) Sub-cooled boiling state



(c) Saturated boiling state

Fig. 11. Results of measured acoustic pressure during the boiling process.

상용 결과를 음압측정 결과와 비교해 볼 때, 과냉상태의 경우, 진동자 부근에서의 열전달계수 증가는 대류상태와 같은 급격한 변화는 일어나지 않지만 일정하게 열전달 향상이 이루어지고 음압측정 결과에서도 비교적 진동자가 부착된 지점에서 높은 압력이 형성되고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 포화상태의 경우에 있어서는 초음파 진동을 가진하였을 경우가 가진하지 않은 경우보다 열전달 향상이 이루어지는 것은 확인하였지만, 초음파 진동자 부근에서의 위치변화에 거의 영향을 받지 않고 전 영역에서 일정한 열전달 향상 결과가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 음압측정 결과도 마찬가지로 대류상태나 과냉상태와는 다르게 완만한 음압이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 결국, 비등열전달 과정에서 초음파 진동을 이용하였을 경우 초음파 진동의 가진으로 인해 매질 내에 발생하는 음압은 열전달을 촉진시키고 열전달 향

상과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 40 kHz의 초음파 진동을 비등열전달 과정에 가하여, 가열과정 동안의 온도 측정을 통해 열전달계수를 구하고, 하이드로폰을 이용하여 초음파 가진시 발생하는 음압을 측정하여 열전달 향상과 어떠한 관련이 있는지 실험적으로 조사해 측정결과를 비교·분석하여 보았다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파 진동을 가진하지 않은 경우, 증류수의 온도는 가열시간에 따라 일정하게 상승한 후 대류상태에서 포화상태로 전환되기 전 일정시간 등온상태를 유지하였고 다시 가열되기 시작하여 비등점에 이르러 가열히터

의 표면온도인 100°C에 근접하게 된다. 반면에, 초음파 진동을 가진한 경우에는 가진하지 않은 경우와는 달리 등온상태가 이루어지지 않고 지속적으로 가열되어 비등점에 도달하게 되며, 가열시간 또한 약 1분 정도 단축되는 것을 확인할 수 있었다.

2) 증류수의 비등열전달 과정에 초음파 진동을 가진한 경우에는 가진하지 않은 경우보다 상대적으로 열전달계수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 특히 대류상태에서 급격한 열전달계수 증가로 인해 열전달 향상율이 높게 나타났다. 이는 초음파 가진으로 인해 대류상태에서의 급격한 열전달 향상결과 및 과냉상태에서 열전달 향상이 온도분포 결과에서 나타난 대류상태에서 포화상태로의 전환 시 등온상태가 존재하지 않게 되는 것을 규명해 줄 수 있는 요인으로 작용하였다고 사료된다.

3) 초음파 진동을 가진하였을 경우, 진동자가 부착된 지점에서 가까울수록 높은 음압이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 상태에 있어서 음압분포가 거의 유사한 pattern을 띠고 있음을 알 수 있다. 특히, 대류상태에서의 음압분포가 과냉상태와 포화상태의 경우에 비해 상대적으로 진동자 부근에서 높게 형성되고 있었고, 이는 대류상태에서의 열전달계수의 급격한 증가와 각 상태에서의 열전달 향상율 결과에 비추어 볼 때, 초음파 진동 가진시 발생하는 높은 음압의 형성은 열전달계수를 증대시키고 열전달을 향상시킨다고 할 수 있다.

4) 결국, 초음파 진동의 가진으로 인해 형성되는 음압은 비등열전달 과정에 있어서 열전달을 촉진시키고 열전달 향상율과 밀접한 관련이 있으며, 특히 대류상태에서 열전달 향상에 기여하는 측면이 높다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참고문헌

1. Senftleben, H. "Die einwirkung eektrischer und magnetischer felder auf des wärmeleitvermögen von gasen", Physik Z., 1981, 32, 550.
2. Oh, Y.K.; Park, S.H. "Acoustic Enhancement of Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer", J. of Energy Eng., 2002, 11(3), 262-269.
3. Oh, Y.K.; Park, S.H.; Cho, Y.I. "A Study of the effect of ultrasonic vibrations on phase-change heat transfer", Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2002, 45, 4631-4641.
4. Park, K.A.; Bergles, A.E. "Ultrasonic Enhancement of Saturated and Subcooled Pool Boiling", Int. J. of Heat Mass Transfer, 1998, 31, 664-667.
5. Kim, Y.G.; Kim, H.Y.; Kang, B.H. "Fundamental Mechanism of Boiling Heat Transfer Enhancement via Ultrasonic Vibration", Proceedings of KAMES 2002 Joint Symposium, 2002, 1522-1528.
6. Hilgert, J. "Ultrasonic Cleaning Primer", BANSON technical report, USA, 1998, 2-6.
7. Frenkel, V.; Gurka, R.; Liberzon, A.; Shavit, U. "Preliminary Investigations of Ultrasonic induced Acoustic Streaming using Particle Image Velocimetry", Ultrasonics, 2001, 39, 153-156.
8. Sengers, J.V.; Watson, J.T.R. J. Phys, Chem., Ref. Data, 1986, 115, 1291.
9. Harr, L.; Gallaghern, J.S.; Kell, G.S. NBS/NRC Steam Tables, Hemisphere Publishing Corp., 1984.