

초음파 진동에 의한 대류 및 비등 열전달 촉진 원리에 관한 연구

김이구* · 김호영† · 강승민* · 강병하** · 이진호***

(2002년 11월 8일 접수, 2003년 2월 14일 심사완료)

Mechanisms of Convective and Boiling Heat Transfer Enhancement via Ultrasonic Vibration

Yi Gu Kim, Ho-Young Kim, Seoungmin Kang, Byung Ha Kang, and Jinho Lee

Key Words : Ultrasound (초음파), Sound pressure (음압), Cavitation (캐비테이션), Pool boiling (풀비등)

Abstract

This work experimentally studies the fundamental mechanisms by which the ultrasonic vibration enhances convection and pool boiling heat transfer. A thin platinum wire is used as both a heat source and a temperature sensor. A high speed video imaging system is employed to observe the behavior of cavitation and thermal bubbles. It is found that when the liquid temperature is below its boiling point, cavitation takes place due to ultrasonic vibration while cavitation disappears when the liquid reaches the boiling point. Moreover, when the gas dissolved in liquid is removed by pre-degassing, the cavitation arises only locally. Depending on the liquid temperature, heat transfer rates in convection, subcooled boiling and saturated boiling regimes are examined. In convection heat transfer regime, fully agitated cavitation is the most efficient heat transfer enhancement mechanism. Subcooled boiling is most enhanced when the local cavitation is induced after degassing. In saturated boiling regime, acoustic pressure is shown to be a dominant heat transfer enhancement mechanism.

기호설명

D : 백금선의 지름 [mm]
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 h_o : 초음파 진동이 없을 때의 열전달계수 [W/m^2K]
 h_u : 초음파 가진 시의 열전달계수 [W/m^2K]
 H : 진동면과 백금선과의 거리 [mm]

I : 전류 [A]
 L : 백금선의 테스트 구간 길이[mm]
 q'' : 열유속 [W/m^2]
 R : 저항 [Ω]
 T_f : 액체 온도 [$^{\circ}C$]
 T_s : 백금열선 표면온도 [$^{\circ}C$]
 V : 전압 [V]
 V_h : 하이드로폰의 초음파 진동 측정 전압 [V]

* 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

† 책임저자, 한국과학기술연구원 열유동제어연구센터
TEL : (02) 958-5673 FAX : (02)958-5689
E-mail address : hoyoung@kist.re.kr

** 국민대학교 기계자동차 공학부

*** 연세대학교 기계공학과

1. 서론

액체가 기체로 상변화하는 비등열전달(boiling heat transfer)의 촉진을 위해 많은 방법들이 연구되어 왔다. 열전달 성능 증대를 위해 계면활성제를 첨가하거나 고체표면을 거칠게 하는 수동적인 방

Table 1 Summary of previously reported results

Authors	Working fluid	Heat transfer	Maximum enhancement ratio
Park & Bergles ⁽¹⁾	R-113	Subcooled & Saturated boiling	10 % *
Fand ⁽²⁾	Water	Convection	33 %
Li & Parker ⁽³⁾	Water	Convection	185 %
Wong & Chon ⁽⁴⁾	Water & metanol	Convection	800 %
Iida & Tsutsui ⁽⁵⁾	Water & etanol	Convection & Saturated boiling	20 %
Bonekamp & Bier ⁽⁶⁾	Mixtures of R23 & R134A	Saturated boiling	90 %

* Increase of burnout heat flux.

법, 혹은 고체표면 근처에서 전기장을 걸어주거나 초음파 진동을 주는 능동적인 방법들이 있다. 이 중에서 본 연구의 대상이 되는 초음파 진동을 이용한 방법은 발열량이 큰 마이크로 칩의 직접냉각(Direct Immersion Cooling)시 그 효과를 증대시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다⁽¹⁾.

초음파 진동으로 인하여 비등 또는 자연대류 열전달이 향상되는 현상은 1960년대부터 보고되어 왔으며, 열전달 촉진률에 대한 실험적 보고가 잇따랐다. 이전 연구자들이 행한 열전달 실험 영역과 열전달계수의 촉진율을 Table 1에 요약하였다. 그러나 거의 대부분의 실험적 연구에서는 열전달 효율의 변화만을 측정하였을 뿐, 초음파 진동이 어떠한 원리 및 메커니즘을 통하여 비등 및 자연대류 열전달을 촉진시키는지에 대한 진지한 논의를 찾아보기 힘든 실정이다. 초음파 진동에 의한 열전달 촉진현상의 실제응용을 위해서는 촉진을 최적화 할 수 있도록 촉진메커니즘에 대한 명확한 이해가 있어야 한다. 이를 고려할 때, 각 실험장치와 조건에 따라 다른 값을 보일 수 밖에 없는 열전달 촉진률의 제시보다는 열전달 촉진이 일어나는 기본적인 메커니즘에 대한 논의가 더욱 중요하다고 할 수 있다.

대체로 초음파 진동에 의해 생기는 캐비테이션 기포와 acoustic streaming 이 열전달을 향상시키는 주요 인자로 인식되어 왔다. 특히 캐비테이션 기포는 열적 기포(thermal bubble)와 마찬가지로 열원 주위에서 microconvection 을 활성화 시켜 열전달을

향상시키는 것으로 추정되어 왔다⁽⁷⁾. 그러나 기존 문헌에서 흔히 발견되는 위와 같은 단순한 설명으로는 본 연구에서 밝혀지듯 여러가지 조건에 따른 다양한 캐비테이션 형상과 열전달 촉진률의 변화를 예상할 수 없다. 또한 아래에서 밝혀지듯 초음파 진동이 캐비테이션 기포를 생성하지 않는 열전달 영역이 존재하며 이 경우에 대한 고려 또한 필요하다.

따라서 본 연구에서는 다양한 조건에서 초음파 진동이 자연대류 및 비등 열전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 액체의 온도, 잔류 기체의 양, 그리고 열원의 온도와 위치를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이러한 실험들을 통하여 초음파 진동이 야기하는 가열원 주위의 유동현상을 초고속 카메라를 통해 관찰하고 이것이 열전달을 향상시키는 원리에 대하여 논의하였다.

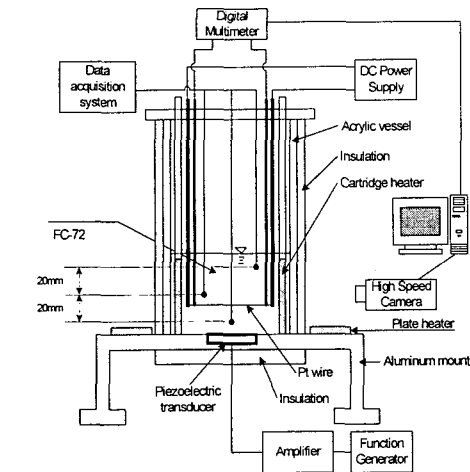
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

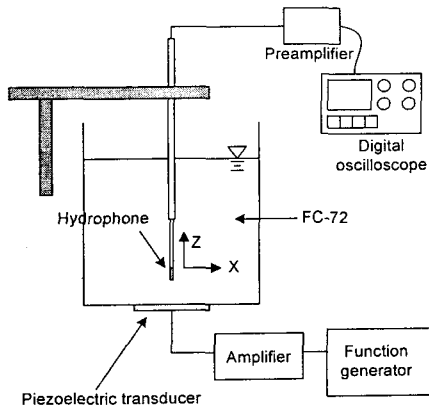
2.1.1 열전달 및 캐비테이션 실험

열전달 및 캐비테이션 실험을 위해 시스템을 Fig. 1 (a) 와 같이 구성하고, 실험액체로는 FC-72 를 사용하였으며 이의 비등온도는 56°C이다. 비등용기 안의 액체에 대한 외부의 열적 영향을 최소화하기 위해 용기를 단열재로 감쌌다. 액체의 온도는 액체내의 카트리지 히터와 용기바닥면에 부착된 알루미늄지지대에 부착된 카트리지 히터로 조절하였다. 압전소자로 만든 초음파 진동자는 비등용기 바깥쪽 아래 면에 부착하였다. 또한 액체의 온도는 용기내의 3 개의 T 타입 열전대를 높이 20 mm 간격으로 설치하였다. 열원은 직경이 0.2 mm 인 백금선을 사용하였고, 이 열선은 액체 속에 잠기어 열원과 온도센서로서의 역할을 동시에 수행한다. 테스트 섹션에서의 백금열선의 길이는 50 mm 이다. 또한, 사선저항법(4 wire method)을 사용하여 백금열선의 온도-저항의 관계에 대한 보정선도를 구하였다⁽⁸⁾. 열원 주위의 기포 운동을 관찰하기 위하여 고속카메라시스템(Redlake PCI 2000S)을 이용하여 초당 1000 프레임의 이미지를 얻었다.

ANSYS 소프트웨어에 의한 유한요소 해석으로 아르키메데스 만들어진 비등용기의 공진주파수가 48 kHz 임을 구했다. 또한 이 공진주파수가 초음파 진동자에 의해 액체 내에서 캐비테이션 기포



(a) The apparatus for heat transfer experiment



(b) The apparatus for sound pressure measurement

Fig. 1 Schematics of the experimental apparatus

(cavitation bubble)가 가장 활성화 되는 주파수임에 예비실험을 통해 확인하였다. 주파수 변화의 비등열전달촉진에 대한 영향을 확인하기 위해 캐비테이션 기포가 생기지 않는 38 kHz 에서 비교실험을 행하였다. 또한 초음파진동자의 입력전압은 40 V, 액체수위는 60 mm 로 고정하였다.

초음파 가진시 잔류기체가 제거되지 않은 상온의 FC-72 액체에서는 비등용기 바닥면으로부터 용기 전체로 캐비테이션이 골고루 활성화되었다. 반면 액체를 충분히 끓여 잔류기체를 제거하고 자연 냉각시킨 후에 초음파 진동을 가하면 비등열선의 윗부분에서 액체의 자유표면까지만 국부적으로 캐비테이션 기포들이 형성됨을 확인하였다. 전자를 전체 활성화 캐비테이션(globally agitated cavitation), 후자를 국부 활성화 캐비테이션(locally agitated

cavitation)으로 명명하고 이러한 캐비테이션 기포들이 어떻게 열전달을 촉진시키는지 고찰하였다. 상변화가 없는 자연대류(natural convection) 열전달과 상변화가 일어나는 과냉비등(subcooled boiling)과 포화비등(saturated boiling) 열전달 영역에서 실험을 수행하였다.

자연대류 실험에서는 핵비등을 일으키지 않을 정도로 낮은 상태를 유지하기 위해 1.5 kW/m²의 열유속을 열선에 공급하였다. 그리고 과냉비등과 포화비등에서의 실험에서는 충분한 핵비등 상태를 이룰 수 있는 열유속인 4.4 kW/m²를 공급하였다. 다만, 포화상태에서는 열유속의 증가에 따른 열전달 증대 경향도 측정하였다.

2.1.2 음압 측정

비등열전달 촉진 메커니즘 중 하나로 추정되는 음압(sound pressure)의 유동장 내에서의 세기를 측정하기 위해 하이드로폰(Specialty Engineering, SPRH-H-1000)을 사용하였고 실험 개략도는 Fig. 1 (b)와 같다. 이 용기 바닥에서부터 10 mm 단위로 수직이동하며, 그리고 각 수직 높이에서 수평 방향으로 10 mm 단위로 이동하면서 음압을 측정하였다. 마지막으로 각 높이에서의 수평방향의 음압값들을 평균하였다.

2.2 실험결과 처리 방법

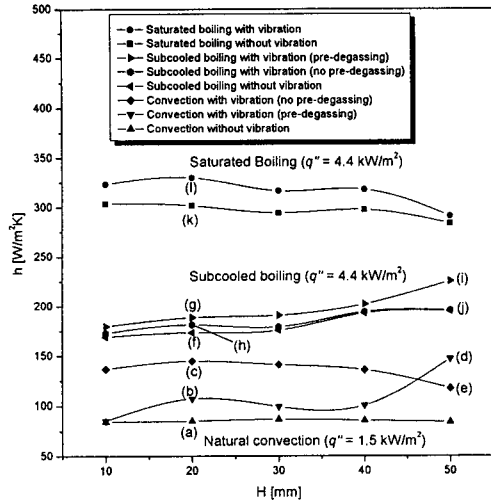
단위면적당 열유속 q'' 는 비등열선에 가해지는 전류 I 와 비등열선 양단에서 측정된 전압차 V 를 통하여 계산된 저항값 $R=V/I$ 를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$q'' = \frac{I^2 R}{\pi D L} \tag{1}$$

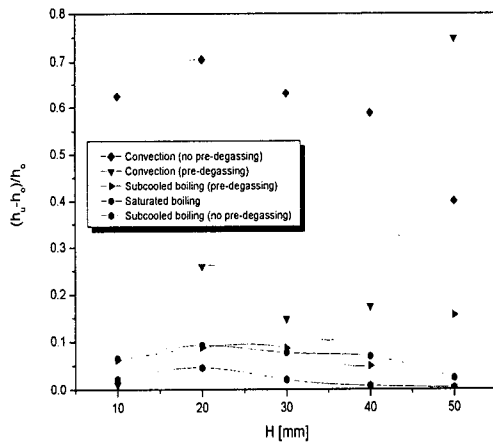
또한, 열전달계수 h 는 아래와 같이 구해진다.

$$h = \frac{q''}{T_s - T_f} \tag{2}$$

대류열전달과 과냉상태 비등에서는 Fig. 1(a)에 표시된 바와 같이 배치된 3 개의 열전대의 평균 온도를 T_f 로 두었고, 포화상태 비등에서는 액체의 끓는점을 T_f 로 두었다. T_s 는 백금열선의 저항(R)과 온도와의 보정선도에서 얻어진 백금열선의 표면온도 값이다.



(a) Heat transfer coefficient vs the distance between the vibrator and the heating wire



(b) Heat transfer enhancement ratio vs the distance between the vibrator and the heating wire

Fig. 2 Variation of heat transfer coefficient and heat transfer enhancement according to the distance between the vibrator and the heating wire

3. 결과 및 토의

3.1 자연 대류 열전달

Fig. 2 (a)는 실험을 수행했던 모든 조건들에 대해 진동자와 가열원의 거리에 따른 열전달계수가 나타나 있다. Fig. 2 (b)는 백금선 열원의 위치 변화

에 따른 초음파 가진시의 열전달계수 증대비를 보여주는데, 대류상태에서의 열전달 증대비가 다른 경우보다 높음을 알 수 있다. Fig. 3은 실험 조건에 따라 열선 주위에 나타나는 유동양상을 대해 고속카메라로 찍은 사진들이다. 또, 사진 속의 벡터들은 10 ms 초 후 기포들의 위치를 표시한 것이다. Fig. 2 중의 (a)~(l)은 Fig. 3에 나타난 기포사진의 실험위치 및 조건을 표시하기 위하여 나타낸 것이며 Table. 2에는 Fig. 3의 각 사진에 대한 조건들을 나열하였다. Fig. 3 (a), (f), (k)는 초음파 진동을 주지 않았을 때의 열선주위 사진이며 이를 제외한 나머지 사진들은 초음파 진동을 주었을 경우 각 조건에서 생성된 열선 주위 기포들의 거동을 보여준다. 이때 기체가 제거된 액체에서와 기체가 제거되지 않은 액체에서의 초음파 가진시에 대류 열전달 증대비는 Fig. 2 (b)에서와 같이, 서로 다른 경향을 보인다.

초음파 진동자와 열선과의 거리가 20 mm (H=20 mm)인 지점을 살펴보면 기체가 제거된 액체에서는 Fig. 3 (b)와 같이 열선 위에 캐비테이션 기포가 형성되고 비등열선의 윗부분에 국부 활성화 캐비테이션 집단이 형성된다. 초음파진동에서의 캐비테이션은 액체에 용해되어 있는 기체나 공동(cavity)이나 미세한 틈(crack)에 액체의 표면장력에 의해서 남아있는 기체가 초음파진동으로 인한 압력변화로 갑자기 기포화되는 현상이다⁽⁹⁾. 하지만 액체를 끊어서 용해되어 있던 기체를 제거하면 초음파 가진시 캐비테이션이 생기지 않지만 실험을 위한 비등열선과 그에 따른 제반장치들이 액체에 잠기게 되면 그것들의 미세한 틈으로 인해 캐비테이션 기포가 발생되어 수면 위까지 형성되는 것이다. 이 열선 위의 캐비테이션과 진동자에 의해 발생한 음압은 열선주위의 액체유동을 활성화시켜 대류열전달을 향상시킨다. 한편, Fig. 3 (c)는 기체가 제거되지 않은 액체에서는 용기 바닥면에서부터 캐비테이션이 형성되어 합쳐지면서 부력에 의해 신속하게 액체 표면으로 올라가는 모습을 보여주고 있다. 이때 생기는 전체 활성화 캐비테이션을 통한 액체의 유동은 국부 활성화 캐비테이션보다 가열면상의 뜨거운 액체와 주위의 차가운 액체와의 혼합을 더 촉진시켜 대류열전달을 크게 증대시킨다.

진동자와 열선과의 거리가 50 mm(H=50 mm)일 때는 국부 활성화 캐비테이션때의 열전달 증대비가 최대에 이르는 H=20 mm와는 다른 경향을 보인다. Fig. 3 (e)와 같이 전체 활성화 캐비테이션 기포들은 바닥면으로부터 생성되어 강하게 좌우로 불규칙하게 진동하며 액체 수면 위로 상승하지만 진동자와

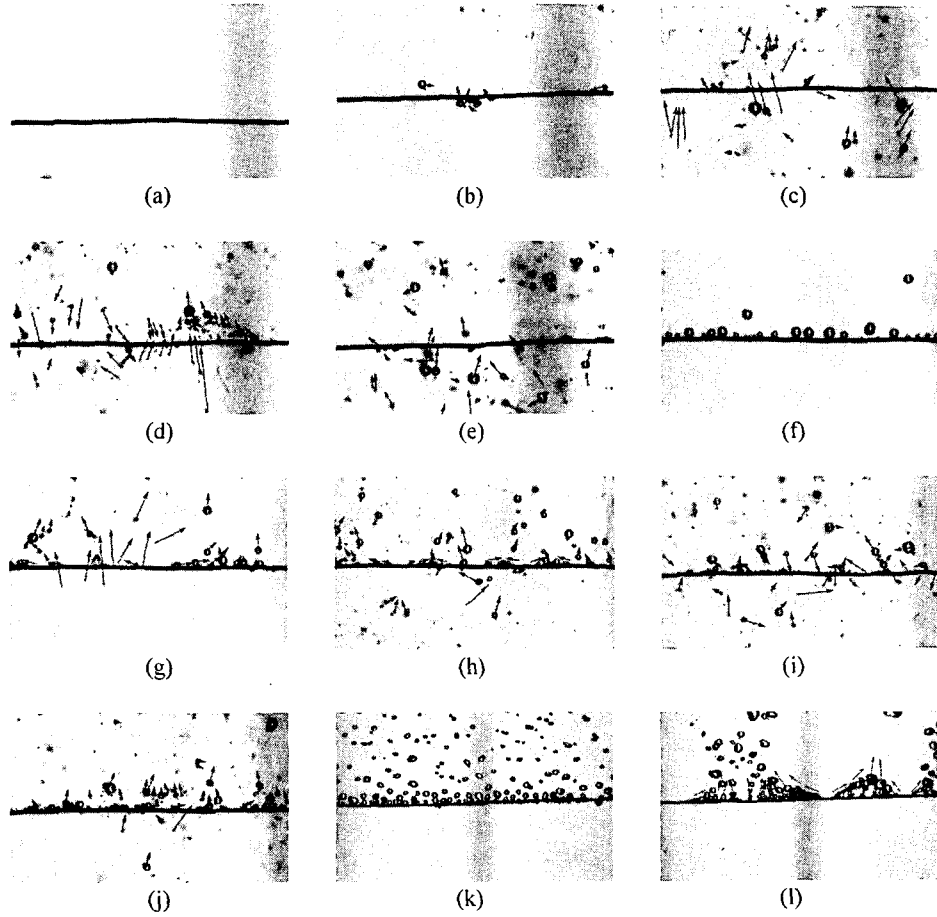


Fig. 3 Bubble images on the heating wire corresponding to the conditions listed in Table 2 (wire diameter = 0.2 mm)

Table 2 Experimental conditions for the images in Fig. 3

Heat transfer regime	Fluid state	H = 20 mm	H = 50 mm
Natural convection ($q'' = 1.5 \text{ kW/m}^2$)	Without vibration	(a)	
	With vibration (pre-degassing)	(b)	(d)
	With vibration (no pre-degassing)	(c)	(e)
Subcooled boiling ($q'' = 4.4 \text{ kW/m}^2$)	Without vibration	(f)	
	With vibration (pre-degassing)	(g)	(i)
	With vibration (no pre-degassing)	(h)	(j)
Saturated boiling ($q'' = 4.4 \text{ kW/m}^2$)	Without vibration	(k)	
	With vibration	(l)	

의 거리가 멀어지면서 그 유동성이 약해져 그 열 전달 증대비가 떨어지는 현상을 관찰할 수 있다. 국부 활성 캐비테이션의 경우는 Fig. 3(d)에서 보여 지듯이 비등열선보다 윗부분에 기포들이 형성되고 수면 근처에서는 진동자로부터의 초음파와 수면으로부터 반사되는 반사파가 서로 만나면서 정상파(standing wave)가 형성되어 H=50 mm 지점에서는 캐비테이션 기포들이 갇혀서 위아래로 진동하게 된다. 이때 열선에서의 열을 액체가 좌우뿐만 아니라 위아래로 진동하면서 신속하게 전달시키고 있는 모습이 Fig. 3(d)에 나타나 있다. 따라서 이 위치에서는 열선과 액체와의 열전달 증대비가 대단히 높아지게 된다. 전체활성 캐비테이션에서는 이 위치에서 많은 기포들이 바닥면으로부터 형성, 합쳐지면서 충분한 부력을 가지고 신속하게 올라가므로 정상파에 갇히는 현상이 없음을 관찰하였다.

3.2 과냉 핵비등 열전달

과냉상태에서의 핵비등열전달은 대류상태에서의 열전달과는 다른 경향을 보인다. Fig. 2(b)에서와 같이 과냉상태에서는 기체를 제거한 액체, 즉 국부 활성 캐비테이션을 형성하는 경우 열전달 증대비가 전체 활성 캐비테이션을 형성할 때의 증대비보다 항상 높았다. 또한, 이미 비등상태에서는 비등열선의 열적 기포(thermal bubble)들이 micro-convection⁽⁷⁾에 의해 열원 표면으로부터 열을 충분히 잘 전달시켜주므로 초음파 진동을 준다 하더라도 열적 기포가 없는 대류상태에서보다는 열전달 증대비가 높지 않다. 여기서 열적 기포는 캐비테이션 기포와 구분된다. 열적기포는 뜨거운 열원 표면으로부터 형성되는 증기로 가득찬 기포이며 또한 비등열선에서만 형성되지만 초음파 진동시 캐비테이션 기포는 음압에 의하여 액체에 용해되어 있는 기체나 장치의 공동(cavity)에서 형성되어 전파되는 것이다. 또한 과냉 핵비등시 3 개의 열전대에서의 유체의 온도차가 약 2 °C로 자연대류나 포화상태시 열전대들의 온도편차보다 다소 컸다.

Fig. 3 (f)는 초음파 진동을 주지 않았을 때의 열선주위의 사진이다(H=20 mm). 많은 열적 기포들이 잠열을 흡수하면서 열원면과의 표면장력을 이길 수 있는 부력을 가질 만큼 커지고 그리고 가열 표면에서 탈출한다. 이 위치에서 잔류 기체가 제거된 액체에서 초음파 진동을 주었을 경우의 이미지는 Fig. 3 (g)에 나타나 있다. 국부 활성 캐비테이션이 열선 윗부분에서부터 액체수면까지 형성되고 열선 아래에는 형성되지 않는다. 한편, 캐비테이션

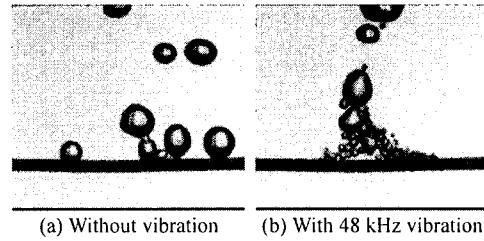


Fig. 4 Bubble motion on heating wire at saturated state (wire diameter = 0.2 mm, $q''=2.7 \text{ kW/m}^2$)

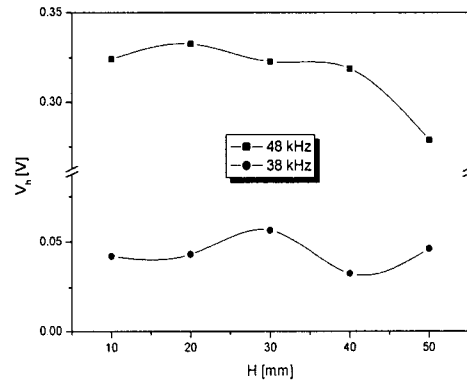


Fig. 5 Mean sound pressure distribution along the distance between the vibrator and heating wire

기포들은 음파의 전달을 방해하여 음압의 세기를 약화시킨다. 하지만 국부 활성 캐비테이션 형성시 비등열선 아래에는 캐비테이션이 없으므로 그만큼 음압이 잘 유지되고 acoustic streaming 이 잘 형성된다. 대류상태에서는 열적 기포 자체가 없으므로 열원주위의 액체 유동이 그 증대 폭을 좌우하지만 이와 같은 핵비등에서는 액체유동보다는 열선 위에서 일어나는 열적기포의 빠른 분리와 재형성이 그 증대폭을 좌우한다. 따라서 기체가 제거되지 않은 Fig. 3 (h)와 같은 전체 활성 캐비테이션이 액체 유동을 보편적으로 향상시켜주지만 음압의 강도가 캐비테이션의 방해 없이 비교적 잘 유지되는 국부 활성 캐비테이션 하에서 열적 기포의 분리가 더욱 촉진되어 열전달 성능이 더 향상된다. 또한, H=50mm 일 때는 대류상태에서와 마찬가지로 역시 기체를 제거한 액체의 수면 아래에서 정상파가 형성되어 Fig. 3 (i)에서와 같이 국부 캐비테이션 기포들이 갇혀 좌우와 더불어 상하방향으로 진동하면서 열전달이 더욱 증대된다.

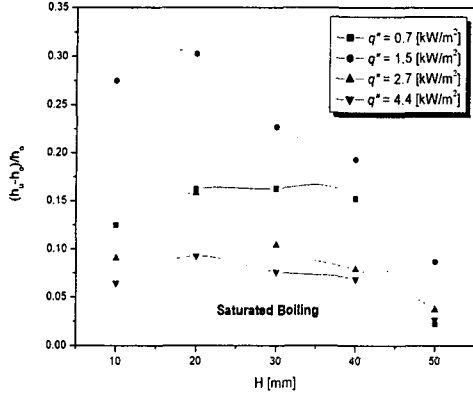


Fig. 6 Saturated boiling heat transfer enhancement ratio vs the distance between the vibrator and the heating wire at saturated state

3.3 포화상태 핵비등 열전달

용기 내 전체 액체의 온도가 비등점에 도달하면 초음파진동을 통해서 어떠한 캐비테이션 기포도 발생하지 않는다. 이는 액체의 온도가 올라감에 따라 그 표면장력(surface tension)은 약해지고 이 약해진 표면장력으로 인해 액체는 접촉하는 실험 장치의 기체가 숨어있던 틈과 공동부분들을 채우게 되기 때문이다. 그와 동시에 포화상태에서는 액체에 용해되어 있는 기체가 비등점이 도달함에 따라 제거되기 때문이다. 따라서, 이 영역에서의 초음파 가진시에 음압과 acoustic streaming 만이 핵비등열전달 증대의 요인이 된다. Fig. 2 (b)에 포화상태에서의 핵비등 열전달에 대한 증대비가 나타나 있다. Fig. 2 (a)과 비교하면 일정한 열유속($q'' = 4.4 \text{ kW/m}^2$)에서 열전달계수는 포화상태일 때가 과냉상태일 때보다 큰 것을 보여준다. 이것은 과냉 핵비등에서는 가열원의 표면온도와 액체의 평균온도의 차를 이용하여 열전달계수를 계산하였고 포화핵비등의 가열원의 표면온도와 액체의 포화온도의 차를 이용하여 계산하였기 때문이다. 즉, 전자는 가열원과 액체와의 온도차가 크고 후자는 그 온도차가 상대적으로 작다. 따라서 포화상태의 열전달계수가 상대적으로 크게 나타나는 것이다. 열원표면에서의 열적 기포들의 거동은 Fig. 3 (k), (l)에 나타나 있다. 자세히 본다면 Fig. 4 (a), (b)에서처럼 초음파 진동을 주었을 때 음압과 acoustic streaming에 의해 열적 기포들의 생성과 분리가 빨라지고 기포들이 분리될 때의 크기도 훨씬 작음을 알 수 있다. 또한 음압과 열전달 증대와의 관계를 살펴보면, Fig. 5에서와 같이 진동자와 열원과의 거리에 따른 음압의 분포가 Fig. 6에서의 포

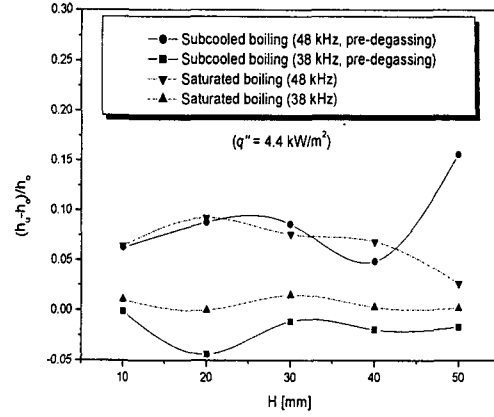


Fig. 7 Heat transfer enhancement ratio vs the distance between the vibrator and the heating wire at different vibration frequencies

화상태 핵비등시 다양한 열유속에서 열전달계수 증대비의 경향과 비슷함을 알 수 있다. 다시 말하면, 열선상의 평균 음압이 감소하면 열전달 증가율 역시 감소하고 평균 음압이 증가하면 열전달 증가율은 커진다. Fig. 6에서는 핵비등 초기 열유속 $q''=0.7 \text{ kW/m}^2$ 일 때보다 보다 큰 열유속 $q''=1.5 \text{ kW/m}^2$ 에서 열전달 증대가 높고, $q''=2.7 \text{ kW/m}^2$ 에서 $q''=4.4 \text{ kW/m}^2$ 로 열유속이 더 증가할 때는 증대비가 감소한다. 이것은 초음파 가진시 열전달이 가장 효과적으로 증대되는 열유속이 있음을 보여준다. 즉, $q''=0.7 \text{ kW/m}^2$ 일 때는 가열원 상에서 초음파를 통해 열전달 증대를 도와줄 열적 기포 자체가 충분치 않아 상대적으로 $q''=2.7 \text{ kW/m}^2$ 일 때보다 열전달 증대가 작았고, $q''=4.4 \text{ kW/m}^2$ 에서는 열적기포의 생성과 분리가 너무 활발하여 $q''=2.7 \text{ kW/m}^2$ 일때보다 효과적으로 초음파 가진으로 인한 기포들의 생성 분리를 촉진시키지 못함을 관찰하였다.

3.4 진동 주파수의 영향

실험장치의 공진주파수인 동시에 캐비테이션이 가장 활성화 되는 48 kHz에서와 캐비테이션이 생기지 않는 38 kHz에서의 열전달을 비교하면 Fig. 7에서 보이듯이 48 kHz 일 때의 열전달 증대의 크기가 더 큼을 알 수 있다. 과냉 및 포화 핵비등에서 38 kHz의 초음파 진동을 주더라도 캐비테이션은 발생하지 않고 Fig. 5에서 보여주듯이 음압의 강도 역시 약하다. 또한 초음파를 주었을 때와 주지 않았을 경우에 비등열선에서 발생하는 열적 기포들의 거동의 차이가 거

Table 3 Summary of experimental observations

	Convection	Subcooled nucleate boiling	Saturated nucleate boiling
Cavitation	Yes	Yes	No
Thermal Bubble	No	Yes	Yes
Enhancement Ratio	Large	Small	Small

의 없었다. 음압이 약하다는 것은 초음파를 통해 유체의 전달되는 압력의 진동폭이 작다는 것을 의미한다. 음압은 캐비테이션 기포형성에 직접적인 영향을 미친다. 또한, 이 음압이 약하므로 가열원 상의 열적기포의 거동이 거의 변하지 않는 것을 관찰하였다. 즉, 음압을 가장 효율적으로 향상시키는 주파수가 열전달을 향상시킬 수 있는 것이다. 따라서, 초음파 가진시의 열전달 향상에 초음파 주파수에 따른 음압의 세기가 큰 역할을 함을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 진동을 주었을 경우 대류상태와 과냉상태의 핵비등과 포화상태의 핵비등에서의 열전달이 증대되는 현상에 대하여 초고속 카메라를 사용하여 실험적으로 고찰하였다. 위의 관찰들을 간단하게 요약하면 Table 3 와 같다. 그리고, 초음파 진동에 의한 열전달 증가 효과 메커니즘은 다음과 같이 정리될 수 있다.

(1) 대류상태에서는 초음파 가진시 비교적 높은 열전달 촉진결과를 가져오며 특히 국부 활성화 캐비테이션보다 전체 활성화 캐비테이션으로 액체의 전체적인 유동강도를 향상시킬 때 열전달이 크게 증가한다. 하지만 국부 활성화 캐비테이션의 경우 정상과가 형성되는 곳, 즉 캐비테이션 기포들이 정상과에 갈려 있는 영역은 열전달이 더욱 증대된다.

(2) 과냉상태 핵비등에서는 대류상태와는 달리 전체 활성화 캐비테이션보다 국부 활성화 캐비테이션

이 열전달 촉진 정도가 크다. 즉 전체 활성화 캐비테이션에 의해 생긴 기포를 통한 유동강도 향상보다는 음압과 acoustic streaming 을 통한 열적 기포의 분리를 촉진시키는 것이 열전달 촉진에 더 큰 영향을 미친다.

(3) 포화상태 핵비등에서는 캐비테이션 현상이 전혀 발생하지 않는다. 이 상태에서의 열전달 촉진은 철저하게 열선상의 기포가 커지기 전에 음압과 acoustic streaming 을 통해서 열적 기포를 분리시키고 쏘아가는 현상에 기인한다. 하지만 열유속이 너무 작거나 과도하게 커지면 열전달 증대 폭이 급격히 줄어든다.

참고문헌

- (1) Park, K. A. and Bergles, A. E., 1998, "Ultrasonic Enhancement of Saturated and Subcooled Pool Boiling," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 664-667
- (2) Fand, R. M., 1965, "The Influence of Acoustic Vibrations on Heat Transfer by Natural Convection from a Horizontal Cylinder to Water," *J. Heat Transfer*, Vol 87, pp. 309-310
- (3) Li, K. W. and Parker, J. D., 1967, "Acoustical Effects on Free Convective Heat Transfer from a Horizontal Wire," *J. Heat Transfer*, Vol. 89, pp. 277-278
- (4) Wong, S. W. and Chon, W. Y., 1969, "Effects of Ultrasonic Vibration on Heat Transfer to Liquids by Natural Convection and by Boiling," *AIChE J.*, Vol. 15, pp. 281-288
- (5) Iida, Y. and Tsutsui, K., 1992, "Effects of Ultrasonic Waves on Natural Convection, Nucleate Boiling and Film Boiling Heat Transfer from a Wire to a Saturated Liquid," *Experimental Thermal Fluid Sci.*, Vol. 5, pp. 108-115
- (6) Bonekamp, S. and Bier, K., 1997, "Influence of Ultrasound on Pool Boiling Heat Transfer to Mixtures of the Refrigerants R23 and R134A," *Int. J. Refrig.*, Vol. 20, No 8, pp. 606-615
- (7) Carey, V. P., 1992, *Liquid-vapor Phase-change Phenomena*, Hemisphere, Washington
- (8) Bently, J. P., 1984, "Temperature Sensor Characteristics and Measurement System Design," *J. Phy. E. Sci. Instrum.*, Vol. 17, pp. 430-439
- (9) Carlin, B., 1960, *Ultrasonics*, McGraw-Hill, New York