

초음파 진동이 임계열유속에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초실험

Preliminary Experiments Aiming to Investigate the Effect of Ultrasonic Vibration on Critical Heat Flux

김대훈, 전용호, 이윤수, 정지환*, 권영철

선문대학교 기계공학과, 충남 아산시 탕정면

*천안외대 환경시스템과, 충남 천안시 안서동

요 약

가열표면에서의 임계열유속을 증대시키는 방법으로서 초음파의 유용성을 확인하기 위한 기초실험을 수행하였다. 냉각수에 가해진 초음파 음장이 임계열유속에 미치는 영향을 확인하기 위하여 평판시편을 각도가 변할 수 있도록 제작하였고, 각도변화 및 과냉도에 따른 영향을 실험으로 측정하였다. 또한, 가시화를 통하여 열전달 성능을 향상시키는 근본적인 메커니즘에 대하여 관찰하였다. 과냉도가 증가함에 따라 초음파에 의한 임계열유속 증가폭이 확대되는 것을 확인하였다. 수직평판의 경우 초음파의 영향이 거의 없으며, 하향평판의 경우 CHF가 큰 증가율을 보였다. 또한 가시화 실험을 통하여 초음파 진동이 열전달을 향상시키는 메커니즘을 확인하였다.

Abstract

Preliminary experiments have been performed in order to examine the usefulness of ultra-sonic vibration in critical heat flux (CHF) augmentation. The test rig was made such that flat surface heated section can be rotated. Ultra-sonic filed is applied to the cooling water bath. The CHF measurements were made with various slanting angle of the heated surface and various subcooling. Pictures of bubble motion on the heated surface were taken as well in order to investigate physical mechanism of CHF augmentation by ultra-sonic sound field. The measurements showed that the CHF augmentation by ultra-sonic field become significant as the water subcooling

increases. No effect of ultra-sonic vibration on CHF was observed when the surface is vertical, while the augmentation of CHF is most significant when the heated surface is downward facing.

1. 서 론

액체가 기체상태로 변화되는 과정에서 대부분의 열은 액체의 상변화에 사용되어 효과적으로 열전달이 일어나게 된다. 이러한 상변화를 통하여 열을 전달하는 과정을 비등열전달(boiling heat transfer)이라 한다. 비등열전달은 발전소뿐만 아니라 난방 및 냉동, 로켓트 모터, 에너지 공급계통 등 높은 열제거가 필요한 산업 분야의 열전달 기기에 적용 및 응용되어 왔으며 현재에도 열전달 촉진기술에 관한 다양한 연구개발이 이루어지고 있다.^[1] 그러나 열전달 기기의 운전과정에서 가열면의 표면온도나 열유속(heat flux)이 급격히 증가하거나 유체의 유동 조건이 갑작스럽게 변화할 때 가열면 부근에서 유체상태가 액상(liquid phase)에서 기상(vapor phase)으로 바뀌면서 가열면과 유체 사이의 비등 열전달계수(boiling heat transfer coefficient)가 급격히 낮아지는 현상이 발생한다. 이는 가열면의 급격한 온도상승을 유발시켜 시스템의 물리적 파괴를 가져오게 되며 이러한 현상을 임계열유속(critical heat flux; CHF)현상이라 한다.^[2] 따라서 시스템을 보호하면서 성능을 극대화시키기 위해서는 CHF 향상이 필수적이라 할 수 있다.

가열표면에서의 열전달 증진을 위해서는 가열면에 생성된 기포를 신속하게 이탈시켜 줌으로써 가열면에 액체가 새로이 접촉하여 비등열전달 비율이 높아져 열전달을 향상시켜야 한다. 열전달 향상 방법으로는 크게 열교환기의 핀 가공이나 확관, 회로 변경 등을 통한 수동적인 열전달 향상 방법과 전기장, 자기장, 진동 등의 외부동력을 이용하는 능동적 열전달 향상방법이 있는데, 수동적 열전달 향상방법은 기계적인 가공의 어려움과 획기적인 열전달 향상을 기대하기 어려우므로, 최근에는 수동적 열전달 향상방법과 더불어 능동적 열전달 향상방법을 적용시키는 복합 열전달 촉진 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 원자로의 핵연료봉과 같이 가열면의 열유속이 조절되는 시스템에서는 CHF 현상이 표면온도의 급격한 상승을 유발하며, 경우에 따라서는 가열면 온도가 용융점에 도달하기도 한다. 한편, TMI 사고이후 중대사고 발생시에도 노심용융물이 원자로 압력용기(RPV) 밖으로 노출되지 않고 RPV(Reactor Pressure Vessel) 안에 격리되도록 하는 IVR(In-Vessel Retention) 개념에 대한 연구가 진행되어 왔다. IVR을 구현하기 위해서는 노심용융물을 충분히 냉각시킬 수 있는 장치의 마련이 필수적이다. 원자로 압력용기를 냉각시키는 방법은 크게 간극냉각과 외벽냉각의 2가지 경우로 현재까지 연구가 진행되어 왔다. 간극냉각의 경우 노심용융물과 RPV사이에 형성되는 1~5mm의 미소 간극을 통하여 이루어지는 냉각성능에 대한 연구로서, 노심용융물의 잔열을 전부 제거할 수 있을 것으로 기대하기는 어렵다. RPV 외벽 냉각의 경우 원자로 공동에 냉각수를 채워서 RPV

외벽을 냉각한다는 개념으로서 IVR 구현을 위한 궁극적 방법으로 받아들여지고 있다. 그러나 외벽냉각의 경우에도 냉각기구의 제한점인 CHF 값이 충분히 크지 못하여 IVR을 구현하는데 불확실성을 가지고 있다. 그러나 열전달 향상 방법을 이용하여 CHF값을 증가시킬 수 있다면, 외벽냉각을 통하여 제거할 수 있는 열에너지의 양이 크게 증가하여 IVR 개념을 충분히 구현할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 외벽냉각의 성능을 크게 증진시키기 위하여 열원 표면에 생성된 기포가 부력에 의하여 분리되는 현상을 촉진시켜 새로운 유체와 접촉할 수 있는 시간과 면적을 증가시킬 수 있는 방법으로서 초음파 사용의 가능성을 확인하는 실험을 수행하였다.

Wong & Chon^[3] 은 초음파 진동이 자연대류와 비등에서 열전달 촉진에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 보고하였다. 비등열전달은 열원과 진동원의 거리에 많은 영향을 받고, 자연대류에서 열전달계수는 크게 증가하지만 온도차이가 증가함에 따라 그 영향이 감소되고, 완전 발달된(Fully developed) 핵비등 영역에서는 아무런 영향을 미치지 않음을 실험적으로 보고하였다. Park & Bergles^[4] 는 초음파 진동이 포화 풀비등(Saturated pool boiling)과 과냉 풀비등(Subcooled pool boiling)영역에서 열전달 촉진에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 초음파 진동자와 열원의 거리가 포화상태에서는 열전달 향상에 영향을 미치지 않고, 또한 완전히 발달된 비등영역에서는 열전달이 오히려 감소한다고 하였다. 그러나 자연대류에서는 Acoustic streaming이 열전달을 향상시키고, 포화상태와 과냉상태에서 임계열유속이 초음파 진동에 의해 증가한다는 것을 실험적으로 증명하였다. Iida & Tsutsui^[5] 는 28kHz의 초음파 진동을 일으키면서 직경이 0.2 mm인 백금선에서 막비등 열전달계수와 CHF 값을 측정하였다. 이 실험은 초음파 진동기의 출력을 다른 실험의 약 1/20 수준인 33.6W에서 수행하면서도 CHF 값이 20% 정도 증가한다고 보고하였으며, 초음파 진동은 핵비등영역에서 열전달에 미치는 영향은 작고 막비등영역과 자연대류 영역에서는 많은 영향을 미친다고 하였다. Nomura^[6] 는 초음파에 의한 열전달계수의 증가는 Acoustic Streaming과 캐비테이션의 영향으로 나눌 수 있다는 결론을 도출하였다. 좁은 표면에서 캐비테이션에 의한 열전달 계수의 증가는 열전도도의 증가로 설명할 수 있으며 이것은 마이크로젯 흐름을 야기 시킨다고 하였다. 또, 초음파의 적용은 전 자연대류영역에 적용가능하며 적은 Re수에서 증가가 크다는 것을 보였다. Ohtake & Koizumi^[7] 는 초음파 출력이 증가함으로써 비등시작점은 감소한다고 밝혔다. 그러나 초음파의 주파수에는 의존하지 않는다고 하고 있다. 초음파의 발생과 비등시작점의 저하로 test bath 압력의 상승이 관찰된다는 것을 실험결과로 보이며, 초음파 출력으로 CHF점은 증가한다고 보고하였다. 이것은 acoustic flow에 의해 가열면에서 합체되는 기포가 파괴되어 CHF가 증가하게 된다고 결론 내렸다. Ohtake 등^[8]은 초음파가 RPV 외벽냉각 증진의 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 이들은 R-113 수조에 잠긴 동판시편의 각도를 변화시켜 CHF 실험을 수행하였다. 이 실험을 통하여 다음과 같은 관계식을 도출하였고 CHF에서의 초음파의 영향이 각도변화에 의존하지 않는다고 발표하였다. 김

등^[9] 은 초음파 진동이 풀 비등 열전달에 미치는 영향에 관하여 실험적으로 연구하였다. 초음파 진동과 비등열선 사이의 열전달을 향상시킬 수 있는 최적의 거리가 있음을 실험을 통해서 발견하였으며, 종래의 실험내용과는 다르게 포화상태에서는 캐비테이션 기포가 발생하지 않음을 보였다. 또한, PIV기법을 통하여 유동가시화 실험을 실시하여 초음파 가진을 하게 되면 액체내의 균일한 유동, 즉 Acoustic streaming이 형성되고, 이를 통하여 비등열선에 생성된 기포의 운동성이 촉진됨으로써 생성 기포가 신속히 분리되어 열전달이 향상되는 것을 확인하였다.

이와 같이 종래의 연구에서는 많은 실험을 통해 비등표면에 초음파를 가하면 비등열전달이 효과적으로 증가함이 보고되었다. 그러나 연구자에 따라 비등열전달이 초음파 진동에 의하여 민감하게 향상되는 영역이 다르며, 비등열전달 촉진 메커니즘에 대해서도 완전히 규명이 이루어지지 않은 상태임을 쉽게 알 수 있다. 또한, 선행 연구자들의 연구결과는 평판 시편의 각도변화를 통해 초음파 진동이 CHF 값에 미치는 영향과 과냉도의 영향을 정량화한 실험은 이제까지 없었다. 본 연구에서는 과냉도와 각도를 변화시켜 초음파 진동을 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 CHF값을 측정하였고, 가시화를 통하여 초음파 가진이 어떤 메커니즘으로 CHF에 영향을 주는지 연구하였다.

2. 실험장치

정상상태 과냉풀비등 조건에서의 CHF 에 초음파가 미치는 영향을 측정하기 위해 Figure 1. 과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 수조, Power supply, test section, Jig, 초음파 진동자 및 발생장치, 데이터 획득장치 등으로 구성 되어있다. 실험장치는 RPV Ex-Vessel 형상을 모의하기 위하여 시편의 각도를 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 수조 바닥에는 수조용량(410mm×360mm×460mm)을 고려하여 0~600W까지 조절가능하며 40kHz의 초음파를 발생시킬 수 있는 진동자를 설치하였다. 여기서 발생한 초음파는 냉각제를 통하여 시편의 표면까지 전달된다. 실험에서는 냉각제로서 증류수를 사용하였으며, 냉각제와 외부의 열적 영향을 최소화하도록 수조는 단열처리 하였고, 수조내부를 정상상태로 유지하기 위하여 3KW 용량의 예비히터와 수조 내부의 500W 용량의 히터에 의해서 온도를 조절하였으며 발생하는 증기는 대기 중으로 방출시켰다. CHF 발생을 감지하기 위해 수조의 정면과 측면에 투명한 강화유리로 제작하고 시편을 관찰하게 하였다. 강화유리를 통해 보여지는 시편의 형상 및 주변 유동은 카메라를 이용하여 가시화하였다.

실험에 사용된 시편의 개략도는 Figure 2.에 나타나 있다. 50mm×100mm의 직사각형 베이크라이트판에 얇은 박판의 구리가 덮혀 있는 형태이다. 시편 총 두께는 1.55mm이고 박판 구리의 두께는 0.04mm 이다. 비등실험을 용이하게 수행하기 위하여 절연체인 베이크라이트판에 전기전도성이 뛰어난 박판구리를 입힌 시료를 채택하였다. 시료의 양단은 2MW/m^2 의 최대 열속이 나오도록 Power supply를 연결하였으며, 전기 접촉저항의 최소

화를 위하여 지그로 압착하여 접촉저항을 최소화하도록 체결하였다. 예비실험 및 이론적 계산을 통하여 초음파의 영향이 가장 크게 발생하는 수위와 시료의 높이를 결정하였으며, 각각 28cm, 11.375cm로 고정시켜 실험을 수행하였다. 또한 각도 조절을 위한 지그를 제작하고, 시편이 초음파에 최대한 노출될 수 있도록 설치하였다.

본 실험에서 측정해야 할 data는 CHF 값을 계산하기 위하여 시료양단의 전압(V), 시료에 공급되는 전류(A), 3곳의 수조온도(°C), 1곳의 대기온도(°C)이다. Agilent 34970A 장치와 HP 34901A 모듈을 사용하여 측정값을 읽은 후 IBM PC 에서 HP Benchlink software를 사용하여 수집, 보관하였다. 경사각을 정확히 가늠하기 위해 Test Section에 각도기를 부착하여 실험 수행시 각도가 일정하게 유지되도록 하였다. Test section 양단의 전압 및 전류값은 데이터수집 장치(DAS)로 직접 읽고 수조내부 온도를 측정하는 3개의 열전대(T-type) 및 주위온도를 측정하는 1개의 열전대(T-type)는 보정 후 실험에 사용하였다. DC 전압은 $\pm 0.0025\%$ 정밀도를 가지고 있고, 전류는 $\pm 0.0037\%$ 의 정밀도를 가지고 있으며 열전대(T-type)는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 정밀도를 가지고 있다. 또한 각도는 $\pm 0.5^{\circ}$ 의 오차를 보인다.

3. 실험방법

시편 각도와 과냉도를 변화시키면서 CHF 값을 측정하였다. 먼저 RPV 형상을 모의하기 위하여 시편의 각도를 0° (horizontal downward-facing), 10° , 20° , 45° , 90° (vertical), 180° (horizontal upward-facing)의 6가지로 변화시켜서 실험을 수행하였다. $0\sim 30^{\circ}$ 에서는 임계열유속의 증가율이 급격하게 변하는 천이각도가 발견된 결과가 있으므로 더 세밀하게 각도를 세분화하여 실험을 수행하였다. 또한, 과냉 상태에서의 초음파의 영향을 알아보기 위하여 포화상태 근처인 95°C 와 과냉도가 커진 80°C , 60°C 의 3가지 경우(과냉 5°C , 과냉 20°C , 과냉 40°C)에서 실험을 수행하였으며 각 과냉 상태마다에서 각도의 영향도 함께 측정하였다.

본 실험의 데이터 처리방법은 다음과 같다. 단위면적당 열속(q)은 시료에 가해지는 전류(I)와 시료양단에서 측정한 전압차(V)를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$q_{CHF} = \frac{I^2 R}{A} = \frac{I^2 R}{wl} = \frac{I V}{wl} \quad (1)$$

실험은 정상 과냉상태 (1기압, 각 과냉온도 조건)에서 수행되며 DC전류를 단계적으로 상승시켜 CHF값을 측정하며, 각 데이터는 0.5초 간격으로 Scan하여 온도의 경우 실험시간 동안 적산하였고, 전압 및 전류값은 CHF 발생시 값을 획득하여 계산하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 과냉도의 영향

Figure. 3은 과냉도와 각도의 변화에 따라 초음파 유무가 임계열유속에 미치는 영향을 보여주고 있다. 초음파 진동이 있는 경우의 CHF 값은 없는 경우에 비하여 과냉 5℃ 에서 6.73%, 과냉 20℃ 에서 7.75%, 과냉 40℃ 에서 8.94% 증가하였다. 이 CHF 값의 증가율은 실험을 통하여 획득한 전체 임계열유속 값에 대하여 평균한 값이다. 과냉도가 클수록 초음파의 효과는 크게 나타났다. 이 현상은 초음파 진동에 의한 캐비테이션 생성과 관계있는 것으로 판단된다. 낮은 온도에서 초음파 가진을 할 경우 수조 밑바닥 표면으로부터 많은 캐비테이션 기포가 생성되는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 온도가 올라갈수록 캐비테이션 기포의 양이 줄어드는 것을 볼 수 있고, 결국 포화온도 부근에서는 캐비테이션 기포가 눈에 띄게 줄어드는 것을 관찰하였다. 또한 포화온도에 근접할수록 즉, 고온이 될수록 물의 비체적이 커짐으로써 초음파 전파시 감쇄가 증가하게 된다. 하향평판의 경우 이전 실험과는 다르게 과냉도가 높을수록 임계열유속이 증가하지 않고 과냉 40℃에서 오히려 임계열유속이 감소하는 현상이 나타났다. 이는 기포가 성장·이탈하는 과정에서 과냉도가 낮은 영역에서는 기포가 성장, 이탈주기가 빨라짐으로써 기포가 정체하지 않고 이탈이 용이하였으나 과냉 40℃에서는 기포의 성장주기에 비해 이탈주기가 길어짐에 따라 기포는 더욱 커지게 되기 때문이다. 그 결과 생성된 기포가 시편 발열면 전체를 덮어 버리는 현상이 나타나 시료가 dryout 되는 것이다. 이런 원인으로 과냉도가 낮은 영역에 비해 CHF 점이 빨리 나타나게 되었다. 이것은 본 실험의 하향평판 전체에서 나타나는 현상이었다. 이러한 현상은 베이크라이트 기판이 발열하는 구리박판 보다 양 옆으로 넓게 제작되어 있는 시료의 특성으로 볼 수 있다.

4.2 각도의 영향

Figure 4. (a)~(f) 는 과냉도 변화에 따른 임계열유속 값의 변화에 대한 초음파의 영향을 가열면의 각도에 따라 보여주고 있다. 초음파를 가진할 때 CHF 증가율은 수직평판인 경우에 최소로 나타났다. 수직 평판인 90°를 기준으로 양쪽(상향, 하향평판) 수평 방향으로 진행할수록 초음파 가진으로 인한 CHF 값의 증가율이 높아지며 수평하향평판의 경우 최대로 나타났다. 이는 기존연구자의 연구결과에서 확인할 수 있으며 유사한 결과를 보이고 있다.^[8] 가열면이 수직일 때 다른 경사각도를 가진 평판에 비해 직접적인 초음파장의 영향이 가장 최소화된 것으로 나타나는 이유는 초음파 파동의 진행방향과 가열면이 평행이 됨으로써 가열면에 대한 초음파의 영향이 최소화되기 때문이다. 상향 및 하향 평판과 같이 시편이 수평이 되면 초음파 음장이 가열면에 수직으로 입사하므로 초음파 진동으로 인한 주변 유체의 난류화 촉진, 기포성장의 방해, 기포의 세밀화, 온도경계층의 확산 등의 효과가 커짐으로써 CHF 값의 증가율이 커지는 것이다.

한편, 시료가 각도의 변화에 따라 파괴되는 CHF점이 초음파를 가진하지 않는 경우와

초음파 가진을 하는 경우에 시료의 파괴되는 위치가 다르게 관찰되었다. 상향 혹은 하향 평판인 경우 초음파 유무에 관계없이 가열면의 중간부분이 파괴되었다. 하향평판으로부터 각도가 커지면 가열면의 양 끝단 쪽으로 파괴지점이 이동하였다. 이때 각도변화에 대한 이동 거리의 변화가 직접적인 관계성을 보이지는 않았다. 또한 초음파가 가진되면 초음파가 없는 경우의 파괴지점의 반대쪽에서 파괴되는 것으로 관찰되었다. 각도가 45° 이상으로 증가하면 파괴위치가 조금씩 달라지긴 하였지만 초음파 유무에 상관없이 동일한 곳이 파괴되었다. 이러한 현상은 기포가 발생, 성장, 이탈할 때 시편의 기울어진 각도에 영향과 사인파로 운동하는 초음파의 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 가열면이 기울어져 있을 때는 기포가 이탈하면서 뭉쳐져 큰 기포(coalesced bubble)를 형성하여 시료의 파괴를 초래한다. 그러나 초음파 가진시에는 초음파를 가하지 않고 실험하는 경우와 다른 곳에서 흡착기포가 생성되었다. 이는 초음파 가진이 기포의 성장 및 이탈에 영향을 미치는 것을 보이는 결과이다. 이러한 관찰 결과를 정량화하기 위해서는 더 많은 실험이 필요한 것으로 판단된다. 열전달면의 경사각도에 따른 임계열유속의 변화를 다른 연구 결과들과 함께 Figure 5에 나타내었다. 0° 와 10° 사이에서는 CHF가 급격히 증가하는 반면, 10° 이상에서는 서서히 증가하는 것으로 나타났다.

4.3 초음파로 인한 열유속의 증가

초음파를 가진 함으로써 CHF값이 증가하는 것은 몇 가지 요인에서 찾아 볼 수 있다. 시료표면에 생성, 성장하는 기포들은 진동시켜줌으로써 잘게 부수는 역할을 하게 되며, 정체됨을 방지하여 CHF 값을 증가시키게 된다. 또한 초음파를 가진할 경우 Acoustic streaming을 통하여 CHF값을 증가시킬 수 있다. 초음파 진동이 가해지지 않는 경우에 생성된 기포는 가열표면에서 이탈한 후 고른 분포를 보이며 부력에 의해 수직 상승한다. 하지만 Figure 6, 7 에 도식화한 것과 같이 초음파를 가진할 경우 동일 열유속에서 기포의 크기가 작아지고, 기포의 운동 방향이 횡으로 쏠리면서 일정한 무리를 지으면서 시료 표면으로부터 분리되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 초음파 가진이 있을 경우 Acoustic streaming에 의하여 초음파 가진을 가하지 않을 경우 보다 기포의 운동성을 증가시켜 열전달을 향상시킨다고 할 수 있다. Figure 8. 은 초음파 가진 시 수조의 온도변화에 따라 수조 밑바닥 표면으로부터 생성되어 부상하는 캐비테이션의 밀도가 변하는 현상을 보여주고 있다. 초음파를 가진할 경우 높은 온도에 비하여 낮은 온도에서 많은 캐비테이션 기포가 생성되는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 RPV 외벽냉각 성능을 높일 수 있도록 물의 과냉도와 가열면의 경사각

도에 따른 CHF 값을 측정하였다. 초음파 가진이 없는 경우와 있는 경우를 대상으로 임계열유속을 측정하여 비교하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수조에 초음파를 가진다면 임계열유속이 증가되었으며, 과냉도가 증가함에 따라 임계열유속 값의 증가폭이 확대되었다. 하향평판을 제외한 모든 경우에서 과냉도가 높을수록 임계열유속 값이 증가함을 보였다. 이는 과냉도 40℃에서는 과냉도가 적은 영역에 비하여 기포 이탈속도가 느려서 기포가 발생이후 이탈하지 못하고 뭉쳐서 시료가열부를 덮어 버리는 흡착기포의 형성에서 기인함을 알 수 있었다.
- (2) 임계열유속은 열전달면의 경사각도가 증가할수록 증가하였다. 경사각도가 0° 에서 10° 로 증가함에 따라 CHF 값도 급격하게 증가하였으나 10° 이상에서는 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 초음파 가진에 의한 CHF 증가는 수평하향평판의 경우 가장 큰 증가율을 보였으며 90°수직평판의 경우는 초음파의 영향이 거의 없었다. 또한, 수직평판을 기준으로 수평 방향으로 기울어짐에 따라 초음파의 영향에 의한 임계열유속의 증가가 두드러졌다. 이는 초음파 파동이 가열면에 입사하는 각도의 영향인 것으로 판단된다.
- (3) 본 실험에서 유동 가시화를 통해 열전달 향상 메커니즘인 캐비테이션 효과, Acoustic streaming, 직접 진동으로 인한 미소기포화 발생 등을 확인할 수 있었다. 이러한 메커니즘은 열원 표면에 생성된 기포를 신속히 분리, 이탈시켜 거대 흡착기포 발생을 억제하며 주변과의 열전달을 향상시키는 효과를 야기시킨다. 따라서 CHF에서의 열유속이 증가된 것이다.

후기

본 연구(관리번호 제 01-051 호)는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

기호설명

A	: area	m ²
I	: current	A
R	: resistance	Ω
V	: voltage	V
l	: length	m
q _{CHF}	: critical heat flux	kW/m ²
w	: width	m

참고문헌

1. A. E. Bergles, "Enhancement of pool boiling", Int. J. Refrig. Vol. 20, pp. 545-551, (1997)
2. S. H. Chang and W. P. Baek, "Critical Heat Flux - Fundamentals and Applications", Chungmoongak Pub. co., Seoul, (1997)
3. S. W. Wong and W. Y. Chon, "Effects of ultrasonic vibration on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling", AIChE J., Vol. 15, pp. 281-288, (1969)
4. K. A. park and A. E. Bergles, "Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 664-667, (1988)
5. Y. Iida and K. Tsutsui, "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, (1992)
6. Nomura et al., "Heat transfer enhancement by ultrasonic vibration", ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference-Proceedings New York, Vol. 4, pp 275-282, 18 refs, (1995)
7. Ohtake and Koizumi, "Study on the depression of incipient boiling temperature and the enhancement of critical heat flux induced by ultrasonic wave on horizontal plate facing upward and downward", ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference-Proceedings San Diego, (1999)
8. Ohtake, Takano and Koizumi, "Study on ex-vessel cooling of RPV", Proceeding of ICONE 8, (2000)
9. Y. G. Kim et al., " Effect of ultrasonic vibration upon pool boiling heat transfer", Proceedings of the SAREK 2002 summer annual conference, Vol. 1, pp 235-240, (2002)

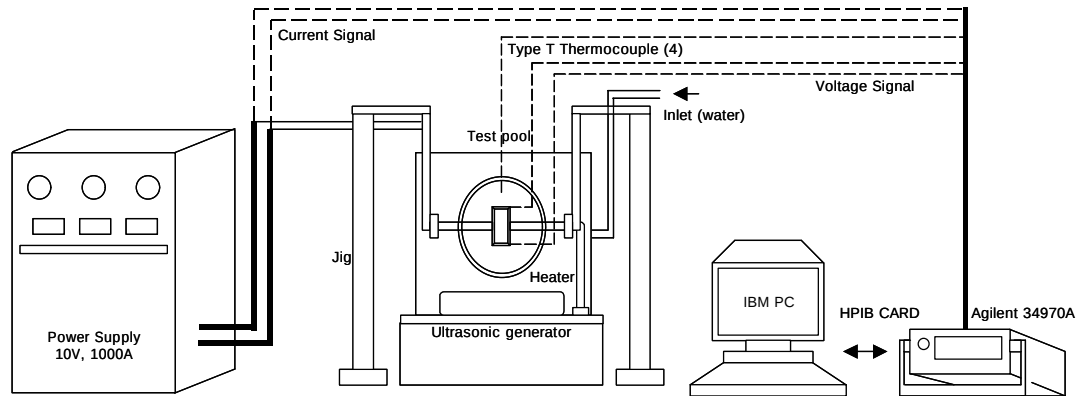


Figure. 1 Schematic Diagram of Pool Boiling Experimental Loop

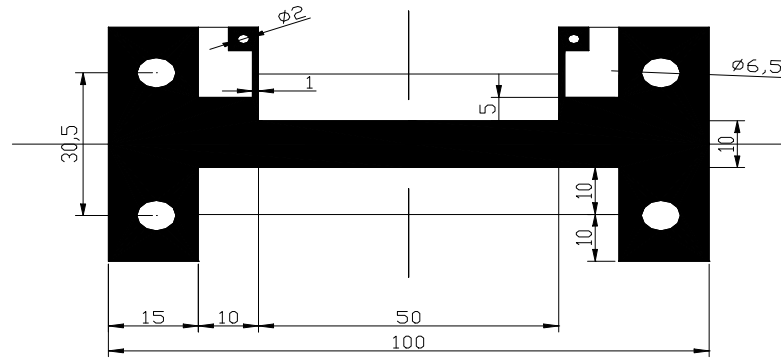


Figure. 2 Schematic Diagram of the Test Section

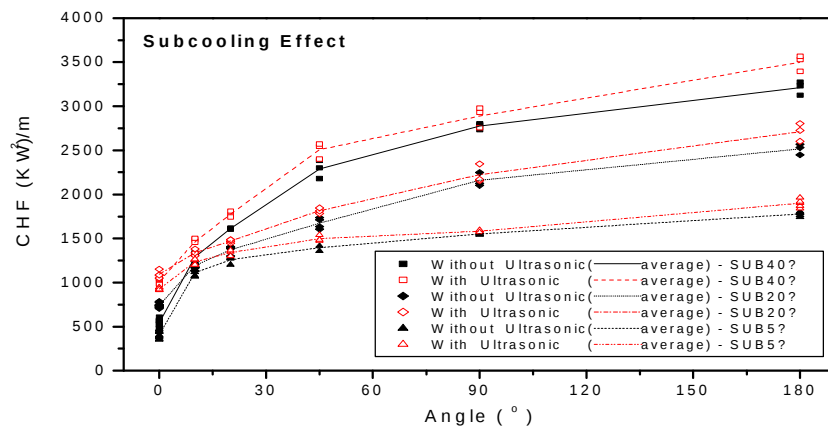
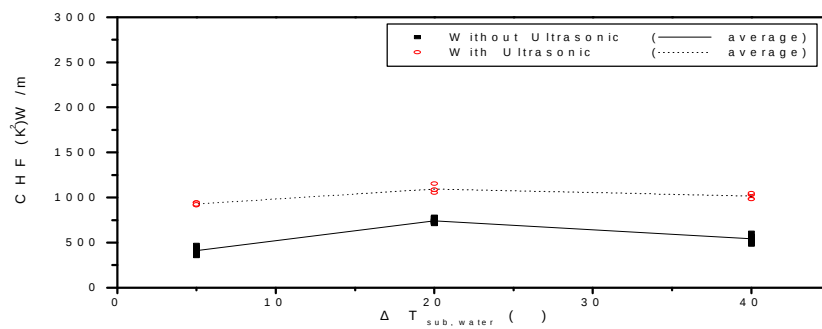
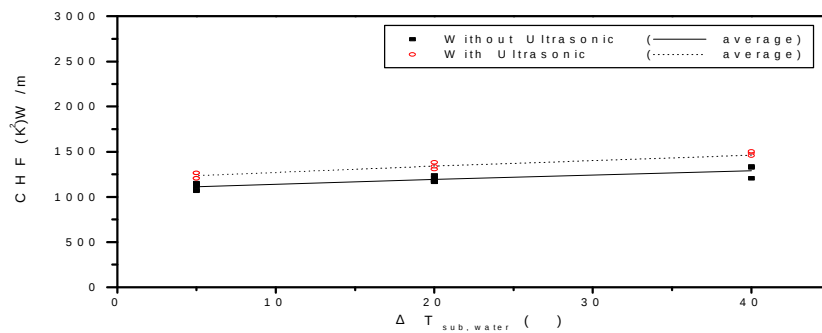


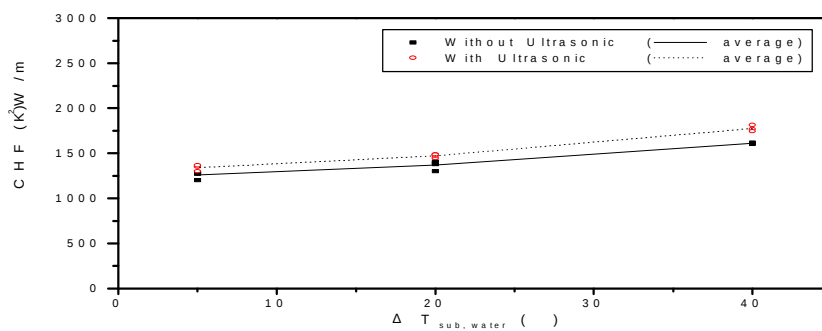
Figure. 3 CHF Behavior with the Liquid Subcooling



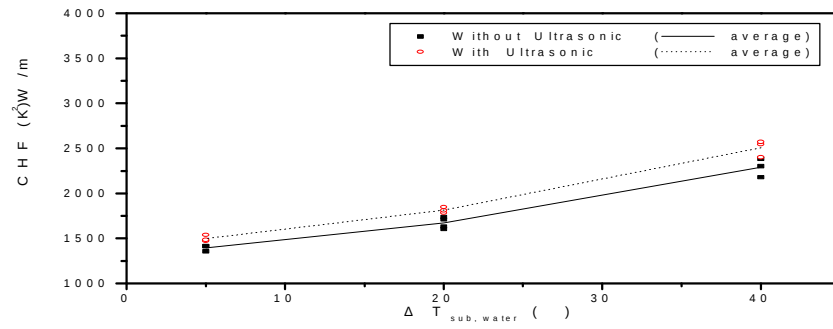
(a) 0° Inclined Plate



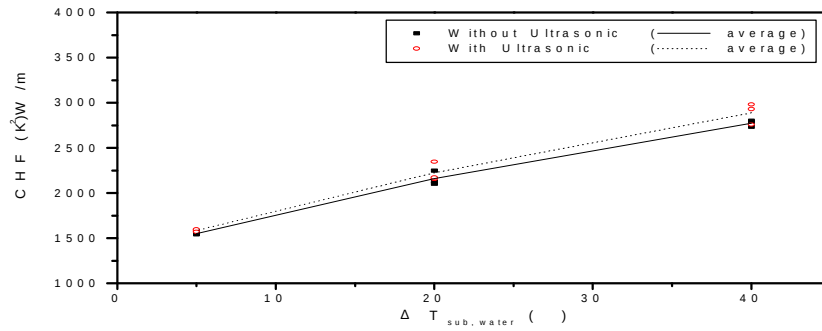
(b) 10° Inclined Plate



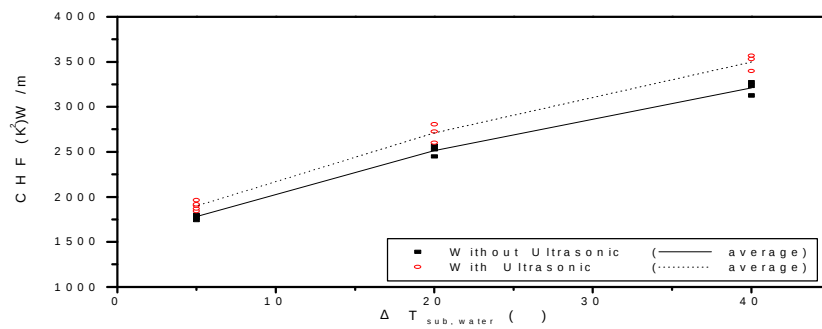
(c) 20° Inclined Plate



(d) 45° Inclined Plate



(e) 90° Inclined Plate



(f) 180° Inclined Plate

Figure. 4 CHF Behavior with Inclination Angle

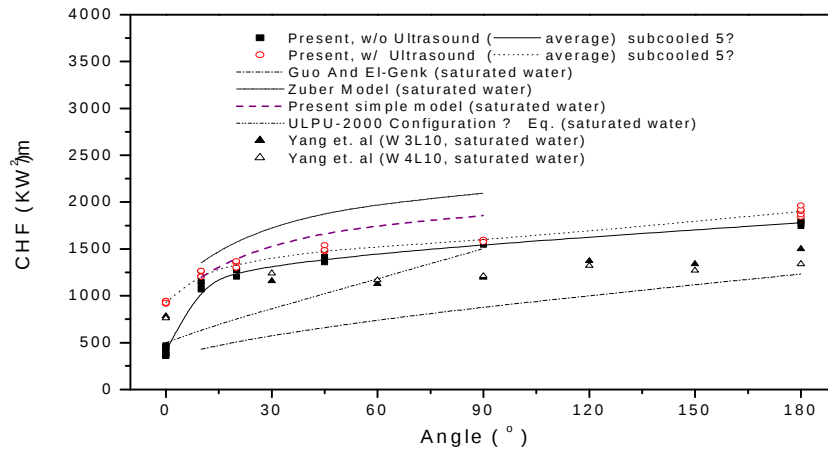


Figure. 5 Overall CHF Behavior in Present Experiment

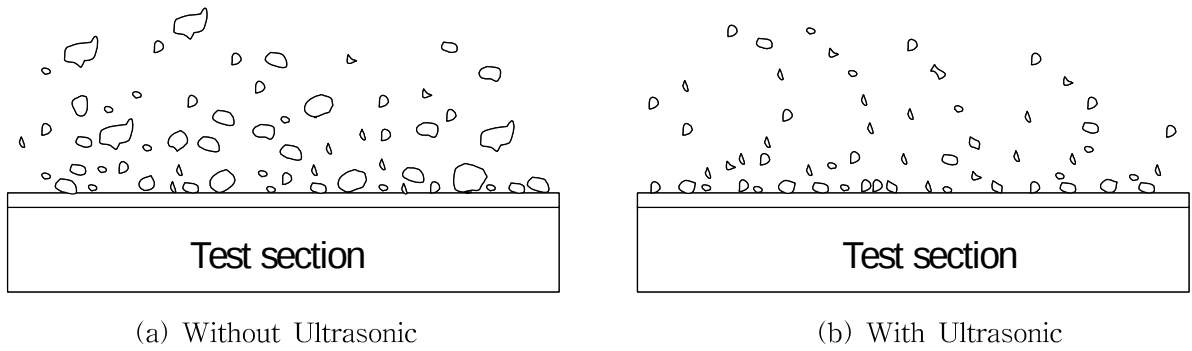


Figure. 6 Bubble formation at Low Heat Flux

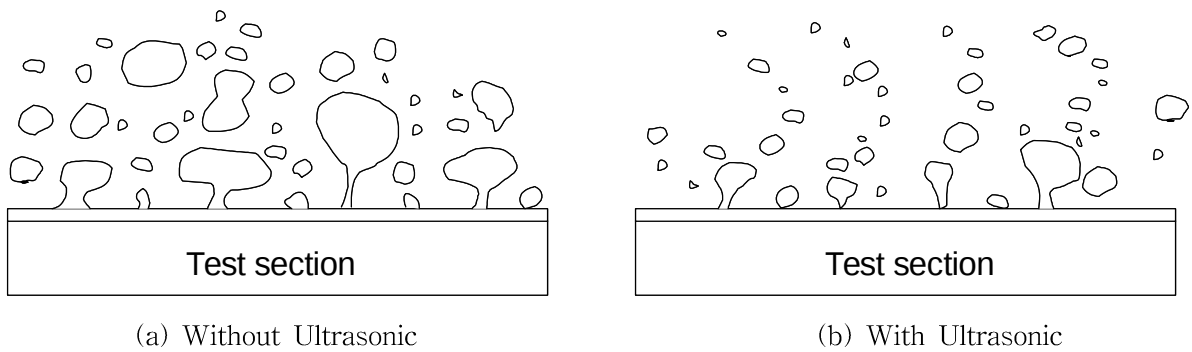
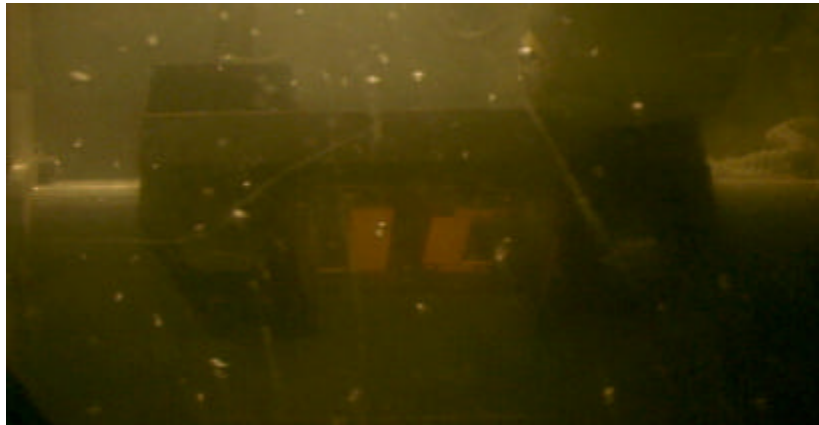


Figure. 7 Bubble formation at High Heat Flux



(a) Subcooled 40°C



(b) Subcooled 20°C



(c) Subcooled 5°C

Figure 8. Cavitation bubble formation at different temperature