

초음파에 의한 평판에서의 임계열유속 증진에 대한 실험적 연구

김대훈*·권영철†·정지환**

Experimental Study on CHF Enhancement of Plate by Ultrasonic

Dae Hun Kim*, Young Chel Kweon† and Ji Hwan Jeong**

Key Words: Ultrasonic(초음파), Heat transfer(열전달), Augmentation(증진), Bubble(기포), CHF(임계열유속), Subcooling condition(과냉조건)

Abstract

Augmentation of CHF by ultrasonic is experimentally studied under subcooling pool boiling condition. Experiment is carried out for downward-facing plate with and without the ultrasonic. The working fluid is distilled water. Experimental apparatus is composed of a bath, power supply, test section, ultrasonic generator, DAQ system. Experiment is performed with the subcooling temperature of 5°C, 20°C, 40°C and the inclined angle of 0°, 10°, 20°, 45°, 90. From the experimental results, it is found that ultrasonic effect enhances CHF of the downward-facing plate. As increasing the degree of subcooling, the rate of CHF increase is enhanced. As increasing the inclined angle, the rate of CHF increase decreases. Also, we can see that the heat transfer mechanism of CHF augmentation is closely connected with the dynamic behavior of bubble generation and departure.

기호설명

Q : 열유속 (kW/m²)
V : 전압 (V)
I : 전류 (A)
 q_{CHF} : 임계열유속 (kW/m²)

1. 서 론

액상이 기상으로 변하는 상변화 열전달 현상을 비등열전달이라 한다. 비등열전달은 발전소뿐만 아니라 난방 및 냉동, 로켓 모터, 에너지 공급

계통 등 높은 열제거가 필요한 산업 분야의 열전달 기기에 적용되고 있다. 최근 반도체 기술의 급격한 발전으로 핵심적인 전자부품들이 소형화, 고집적화 됨에 따라 고효율 열교환기기의 개발이 중요하게 대두되고 있다. 더우기 에너지 절약, 환경보호, 국제적 기술보호주의 등의 어려운 여건이므로 국내 기술로 고 열유속을 가진 소형 전자기기의 냉각시스템 설계 및 해석기술의 개발이 시급하다. 에너지 관련 기기의 소형화 및 마이크로프로세스와 전자부품들의 급격한 발열량의 증가로 시스템의 신호 및 자료처리 시간이 지연되는 문제점을 해결하기 위해서는 높은 열소산률을 달성할 수 있는 새로운 냉각기술이 요구된다.

차세대 마이크로프로세스와 전자부품들 중에는 1000W/cm² 이상의 고 열유속을 가진 요소들이 많이 있다. 이와 같이 고 열유속은 기존의 냉각방식으로 쉽게 해결할 수 없다. 열전달 기기의 운전과정에서 가열면의 열유속이 임계열유속(CHF)을 초과하게 되면 시스템의 물리적 파괴현상이

† 선문대학교 기계공학과

E-mail : yckweon1@email.sunmoon.ac.kr

TEL : (041)530-2396 FAX : (041)530-2986

* 선문대학교 기계공학과

** 천안외대 환경공학과

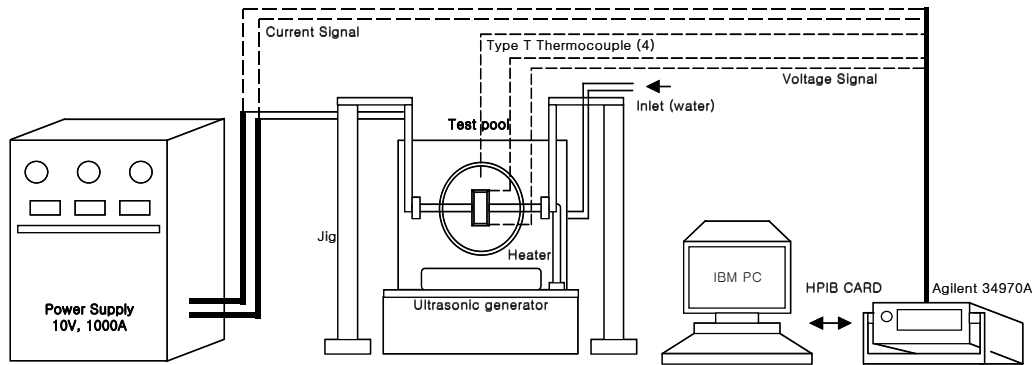


Fig. 1 Schematic diagram of pool boiling experimental apparatus

관찰된다. 이는 전열면의 표면온도가 크게 상승하여 전열면에 형성된 기체막을 통한 열전달과정이 원활히 이루어지지 않기 때문이다. 따라서 시스템을 보호하면서 성능을 극대화시키기 위해서는 CHF 향상이 필수적이다. 원자로의 핵연료봉과 같은 고 열유속 열전달 시스템에서 CHF 현상은 표면온도의 급격한 상승을 유발하며, 경우에 따라서는 가열면 온도가 용융점에 도달하기도 한다. 열전달 향상 방법을 이용하여 CHF의 발생점을 지연시킬 수 있다면, 가열표면의 열적마진을 확보하여 고열유속 기기의 안정성을 충분히 구현할 수 있을 것이다. 일반적으로 핵비등 열전달 촉진은 가열표면에서 생성되는 기포의 이탈과정을 변화시킴으로써 가능하다. 열전달을 촉진시키기 위해 여러 가지 방법들이 적용되고 있으며, 크게 수동적인 방법과 능동적인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적 방법은 기계적인 가공상의 어려움과 획기적인 열전달 향상을 기대하기 어려우므로, 초음파 및 전기장과 같은 외부동력을 이용한 능동적인 방법이 많이 연구되고 있다^[1].

Wong & Chon^[2]은 대류 및 비등에 대한 초음파 효과를 실험적으로 연구하여 초음파의 효과로 열전달계수가 크게 증가하지만 과냉도가 줄어들수록 초음파의 효과가 감소함을, 그리고 핵비등 영역에서는 초음파의 효과가 미미함을 보여주었다. Park & Bergles^[3]는 포화와 과냉상태에서 임계열유속이 초음파에 의해 증가함을 실험으로 보여주었다. Iida & Tsutsui^[4]는 초음파에 의해 CHF가 약 20% 정도 증가함을, 그리고 핵비등 영역보다는 막비등과 자연대류 영역에서 효과적임을 보여주었다. Ohtake & Koizumi^[5]는 실험으로 초음파에 의해 CHF점이 증가한다고 보고하였으며, 이는 초음파에 의해 가열면에서 합체되는

기포들의 활발한 파괴현상으로 설명하였다. Ohtake 등^[6]은 초음파가 둥근 반원통 외벽냉각 증진의 영향에 대해 실험적으로 연구하였다. 이들은 R-113 수조에 잠긴 동판시편의 각도를 변화시켜 CHF 실험을 수행하였으나, 초음파의 영향이 각도변화에 의존하지 않는다고 발표하였다. Kim 등^[7]은 초음파가 풀비등 열전달에 미치는 영향과 PIV를 이용한 유동가시화로 초음파에 의해 이차유동이 형성되고, 그 결과 기포의 운동성이 촉진된다고 보고하였다.

여러 실험을 통해 가열면에 초음파를 가하면 열전달이 증가한다고 보고하고 있지만, 연구자의 실험에 따라 초음파에 의하여 영향을 받는 열전달 영역이 일치하지 않으며, 또한 초음파 효과로 유체유동과 열전달 기구가 변해 기존에 알려진 비등현상과는 다른 여러 현상들이 관찰되고 있어 많은 연구에도 불구하고 초음파 열전달 촉진기구의 이해가 아직 미비한 상태이다.

본 연구는 원자로와 같은 둥근 반원통 하부의 경사면에 대한 CHF 향상에 관심이 있으며, 초음파에 의한 CHF 열전달 촉진 현상을 이해하고자 과냉도와 경사각도를 변화시켜 가면서 초음파를 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 CHF를 실험으로 측정하였다.

2. 실험장치

정상상태 과냉 풀비등 조건에서의 초음파가 CHF에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 수조, 전원공급장치, 시험부, 초음파발생장치, 데이터획득장치 등으로 구성되었다. 실험장치는 원자로의 외벽 반원 원통하부(RPV Ex-Vessel)의 형상을

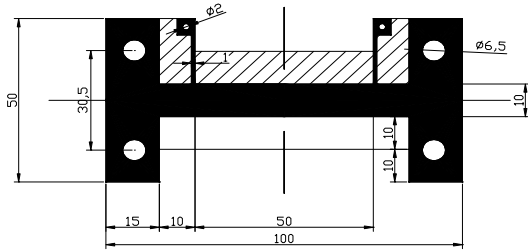


Fig. 2 Schematic diagram of heating surface

적절히 모의하기 위하여 시편의 각도를 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 수조에는 40kHz의 초음파를 발생시킬 수 있는 진동자를 설치하였다. 작동 유체는 증류수를 사용하였으며, 증류수와 수조의 부와의 열손실을 최소화하도록 수조는 단열 처리(두께 50mm) 하였다. 또한 수조내의 벌크온도를 정상상태로 유지하기 위하여 3kW와 0.5kW 용량의 히터를 이용하였다. 주 실험부는 초음파에 의한 CHF 현상을 관찰하면서 데이터를 측정하기 위해 강화유리(10mm)로 제작하였으며, 증류수의 수위를 일정하게 유지하기 위하여 응축코일을 사용하여 실험 중 발생하는 증기를 응축하여 주 실험부로 재순환시켰다.

실험에 사용된 시편의 개략도는 Fig. 2에 나타나 있으며, 50mm×100mm의 평판에 얇은 구리박판(0.04mm)으로 덮혀 있다. 시료의 양단에 걸리는 최대 열유속은 2MW/m²이며 전기 접촉저항을 최소화하기 위하여 지그로 압착 체결하였다. 지그는 시편의 각도를 1°단위로 조절 가능하도록 제작되었다. 예비실험 및 계산으로 초음파의 영향이 가장 크게 발생하는 수위(28cm)와 시료의 높이(11.37cm)를 결정하여 실험을 수행하였다.

CHF를 계산하기 위해서 시료의 전압(V, ±0.0025%), 전류(A, ±0.0037%), 3점의 수조온도, 1점의 외기온도를 측정하였다. 데이터 측정 및 저장은 HP 34970A와 34901A을 이용하였다. 경사각을 정확히 얻기 위해 시험부에 정밀 각도기(±0.5°)를 부착하였다. 시험부 양단의 전압 및 전류는 데이터 획득장치로 직접 획득하며, 실험에 사용된 4개의 열전대(T-type, ±0.1°C)는 표준온도계와 교정기(CA100, YOKOGAWA)를 이용하여 보정한 후 실험에 사용하였다. 실험 데이터는 측정값들이 정상상태조건(설정값의 ±0.5% 이내)으

로 유지된 후 10분 후에 측정하였다.

3. 실험방법

초음파에 의한 CHF의 변동을 확인하기 위해 시편의 경사각도와 과냉도를 변화시키면서 전류와 전압을 측정하였다. 먼저 RPV 형상을 모의하기 위하여 시편의 각도를 0°, 10°, 20°, 45°, 90°의 5가지로 또한 과냉 풀비등 상태에서의 초음파의 영향을 알아보기 위하여 과냉도 5°C, 20°C, 40°C의 3가지에 대해 실험을 수행하였으며 각 과냉도마다 경사각도의 영향도 함께 관찰하였다.

시편의 열유속(q)을 구하기 위해서는 시료를 흐르는 전류(I)와 시료 양단에서 측정된 전압차(V)를 측정하여야 한다. 시편을 전기적으로 가열하는 경우 열유속은 시편 단면에서 거의 균일하다. 시편에 가해지는 전기적 가열량은,

$$Q = V \cdot I \quad (1)$$

으로 주어지며, 이 때 시편의 열유속은 다음의 식으로 계산되어 진다.

$$q_{CHF} = \frac{Q}{wl} \quad (2)$$

여기서, w 은 시편의 폭과 길이를 나타낸다. 실험은 정상상태 과냉 풀비등 조건에서 수행되며 DC 전류를 단계적으로 서서히 상승시켜 가면서 CHF를 측정하였다.

실험은 주 실험부의 내부, 시편, 지지부, 초음파발생부 등을 증류수로 먼저 세정하고 건조시킨 후에 수행하였다. 또한 초음파에 의한 시료와 시편 가열면으로부터 생성되는 불순물에 의한 영향을 제거하기 위해 매 실험마다 증류수를 새로 교환하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 시편의 경사각도변화에 따라 과냉도가 5°C, 20°C, 40°C로 주어질 때 CHF에 대한 초음파의 영향을 나타낸 그림이다. CHF에 대한 초음파의 영향은 과냉도가 낮은 경우보다 높은 경우에 더욱 우수하게 나타나고 있다. 이는 작동

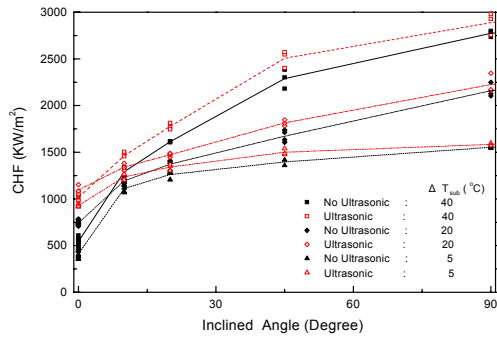


Fig. 3 CHF Variations on surface orientation

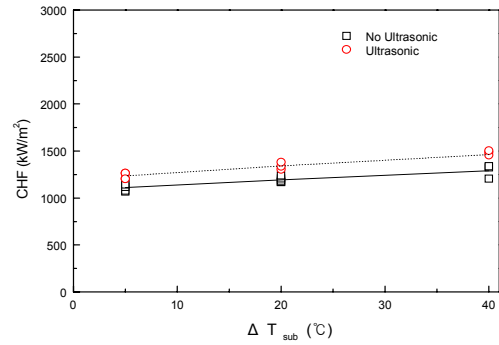


Fig. 5 CHF Variations on degree of subcooling (10° Inclined surface)

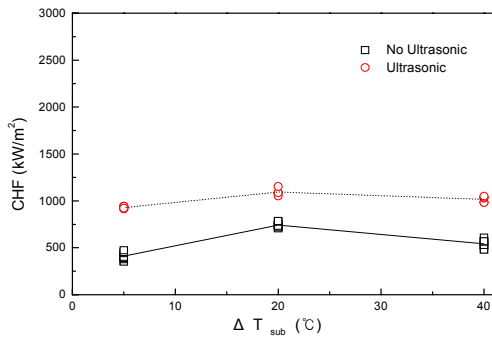


Fig. 4 CHF Variations on degree of subcooling (0° Inclined surface)

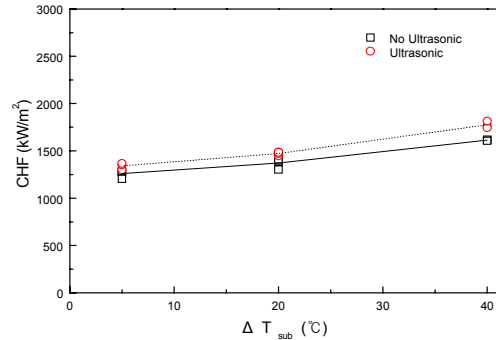


Fig. 6 CHF Variations on degree of subcooling (20° Inclined surface)

유체가 물인 경우에 초음파의 효과가 포화 조건 보다는 과냉 조건에서 효과적임을 보여주는 것이다. 이 현상은 기포의 동적 거동에 미치는 초음파의 특성에 기인한 것으로 판단되며 가시화로부터 다음을 확인할 수 있었다. 동일 열유속 및 동일 초음파를 시편에 가하는 경우에 과냉도 40°C에서는 수조 내에 많은 기포들의 움직임을 관찰되었다. 그러나 과냉도가 낮아질수록 기포의 양이 점차 줄어들었으며, 과냉도 5°C에서는 기포를 거의 관찰할 수 없었다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼, 시편의 경사각도가 증가할수록 CHF는 증가한다. 그러나 시편의 경사각도가 0°인 하향평판의 경우에 과냉도 40°C에서 오히려 CHF가 다소 감소하는 현상이 나타났다. 이는 기포의 성장과 이탈의 동적거동으로 이해할 수 있다. 기포의 성장 및 이탈은 과냉도가 높은 영역보다 과냉도가 낮은 영역에서 더욱

활발하다. 저 과냉도 영역에 초음파를 가하게 되면 기포의 동적거동은 초음파에 의해 더욱 촉진되어 열전달이 향상되는 것이다. 그러나 과냉도가 높아지게 되면(과냉도 40°C) 시편표면의 열경계층 내에서 생성된 기포들이 주위 차가운 유체 온도로 기포의 성장이 억제되게 된다. 그리고 시편의 구조상 가열면이 하향이므로 시편에 생성된 기포들은 쉽게 이탈하지 못하고 서로 뭉치게 된다. 즉, 시편으로부터 기포의 생성 및 이탈능력이 활발하지 못해 초음파를 가하더라도 기포에 미칠 수 있는 동적거동 효과가 충분히 나타나기 어렵다. 즉, 열전달효과가 감소하여 그 결과 CHF가 낮아짐을 가시화로 확인할 수 있었다.

Figs. 4-8은 초음파를 가했을 때와 가하지 않았을 때의 과냉도 변화에 따른 CHF의 변화를 시편의 경사각도(0°, 10°, 20°, 45°, 90°)로 분류하여 나타낸 그림이다. 시편의 경사각도가 0°의 경우

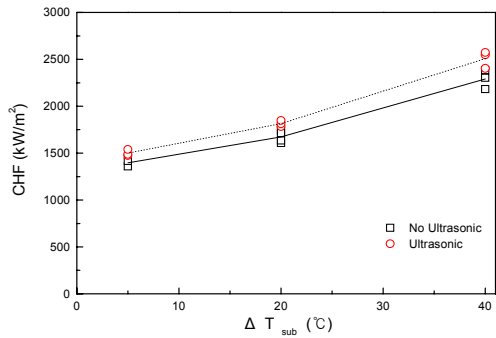


Fig. 7 CHF Variations on degree of subcooling (45° Inclined surface)

(Fig. 4), 초음파에 의한 CHF 증가율(=초음파를 가했을 때 CHF/초음파를 가하지 않았을 때 CHF)은 과냉 5°C, 20°C, 40°C에서 각각 126.1%, 47.5%, 87.5%이었다. 그리고 10°의 경우에 각각 11.1%, 12.4%, 14.9% (Fig. 5)를, 20°의 경우에 각각 6.4%, 7.3%, 10.1% (Fig. 6)를, 45°의 경우에 각각 7.4%, 8.5%, 9.5% (Fig. 7)를, 90°의 경우에 각각 2.1%, 3.0%, 4.1% (Fig. 8)를 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 것처럼, 초음파에 의한 CHF 증가율은 시편의 경사각도가 90°인 수직 평판에서 가장 낮게 그리고 0°인 하향 평판에서 가장 크게 나타났다. 이는 가열면이 수직(90°)일 때 경사각도 0°인 시편에 비해 CHF 증가율이 매우 낮은 것은 초음파의 진동진폭과 시편의 가열면이 서로 수직이 되어 시편에 미치는 초음파의 최대 강도 영역이 시편의 전 표면에 미치지 않고 한 단면에 작용을 하였기 때문이며, 경사각도 0°인 경우는 초음파의 진동진폭과 시편의 가열면이 서로 수평이 되어 초음파의 최대 강도 영역이 시편의 전 표면에 미치기 때문이다. 시편이 경사진 경우에 초음파로 인한 CHF 증가율은 점차 증가하며 수평 하향(0°)의 경우에 그 효과는 최대이었다. 수평 하향평판은 초음파가 수평 가열면에 수직으로 입사하므로 시편은 최대 진폭을 가진 초음파의 영향을 받게 된다. 이 효과는 시편의 주변유체 교란, 기포의 생성 및 이탈기구 변화, 온도경계층의 파괴 등을 유발하여 가열면에서의 열전달을 향상시키게 된다.

한편, 본 연구로부터 CHF의 급격한 증가는 수평 하향평판의 0° 부근에서 발생함을 알 수 있다. 수평 하향평판에서 생성되는 기포들은 가열면 아

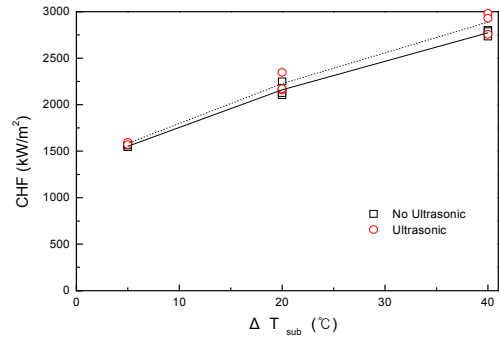


Fig. 8 CHF Variations on degree of subcooling (90° Inclined surface)

래에서 서로 뭉치면서 성장을 하게 된다. 초음파를 가하지 않은 경우에 이들 기포는 점차 성장을 하게 되며 기포의 부력이 증가하여 표면장력을 초과할 때까지 가열면을 이탈하지 않게 된다. 이 열전달 과정은 시편아래에 기포들의 이탈과정이 원활하지 않아 열전달 능력이 저하되어 낮은 CHF를 제공하게 된다. 그러나 초음파를 가하게 되면 시편아래에 정체되어 있던 기포들의 이탈과정이 초음파의 진동효과로 열전달과정이 촉진되어 CHF는 크게 증가한다. 시편이 경사지게 되면 가열면에서 생성되어 이탈하는 기포의 이탈거동은 시편의 기하학적 형상에 의해 쉽게 가열면을 미끄러져 이탈할 수 있게 된다. 즉, 부력의 방향과 표면장력의 방향이 0°의 경우와는 다르기 때문이다. 본 실험의 결과로 초음파가 기포의 성장 및 이탈과정에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 열전달면의 경사각도에 따른 CHF 변화를 다른 연구 결과들과 비교한 그림으로, 본

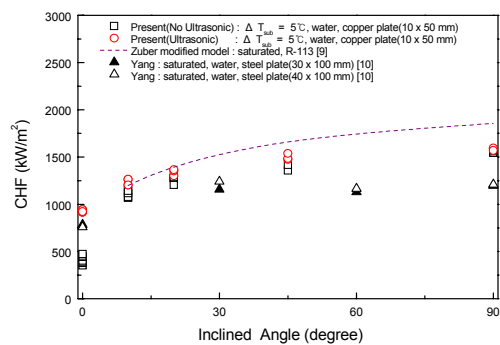


Fig. 9 Comparisons of CHF on surface orientation

실험변수로는 과냉도 5°C, 증류수, 구리평판시편 (50 x 10mm, 두께 0.04mm)을, Zuber 모델은 포화상태, R-113, 평판을, Yang은 포화상태, 증류수, 스틸평판시편(30 x 100mm, 40 x 100mm, 두께 0.87mm)을 사용한 결과이다. 본 실험결과는 Yang의 결과와 유사한 경향을 보여준다. 그러나 측정된 CHF는 Yang의 경우가 낮게 나타나고 있다. 이는 스틸시편이 구리시편의 열저항이 높아 상대적으로 낮은 열유속에서 CHF가 발생하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파를 이용하여 하향구조를 가진 가열면의 열전달 능력을 향상시키기 위해 과냉도와 시편의 경사각도에 따른 CHF를 실험으로 구하고자 하였다. 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

초음파를 가한 경우에 과냉도에 따른 CHF 증가율은 과냉도가 높을수록 더욱 효과적이었다. 동일한 열유속과 초음파를 시편에 가하는 경우에 과냉도가 40°C에서 5°C로 낮아질수록 수조 내에 거동하는 기포들의 양이 크게 줄어들어, 그 결과로 기포의 동적거동에 의한 강제대류 열전달 효과가 감소함을 알 수 있었다. 또한 시편의 경사각도 변화에 따른 CHF 증가율은 경사각도가 증가할수록 감소하였다. 이는 초음파의 최대 진폭 영역과 시편의 기하학적 형상과 관계하는 것으로 수평 하향평판은 초음파진동의 최대진폭 영역과 시편의 가열면이 서로 수평이 되어 최대 강도를 가진 초음파가 시편의 전 표면에 미치기 때문이다. 이 효과는 시편 주변 유체의 교란, 기포의 생성 및 이탈기구 변화, 온도경계층의 파괴 등을 유발하여 가열면에서의 열전달을 향상시키게 되는 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 선문대학교 공조기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

- (1) A. E. Bergles, 1997, "Enhancement of pool boiling, Int. J. Refrig.," Vol. 20, No. 545.
- (2) S. W. Wong and W. Y. Chon, 1969, "Effects of ultrasonic vibration on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling," AICHE J., Vol. 15, No. 281.
- (3) K. A. Park and A. E. Bergles, 1988, "Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, No. 664.
- (4) Y. Iida and K. Tsutsui, 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, No. 108.
- (5) S. Nomura and M. Nakagawa, 1995, "Heat transfer enhancement by ultrasonic vibration," ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Vol. 4, No. 275.
- (6) H. Ohtake and Y. Koizumi, 1999, "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, AJTE 99-6362.
- (7) H. Ohtake, K. Takano and Y. Koizumi, 2000, "Study on ex-vessel cooling of RPV," Proceeding of ICONE, ICONE-8536.
- (8) Y. G. Kim, S. M. Kang, B. H. Kang and H. Y. Kim, 2002, "Effect of ultrasonic vibration upon pool boiling heat transfer," Proceedings of the SAREK 2002 summer annual conference, No. 1, pp. 235.
- (9) N. Zuber, M. Tribus and J. W. Westwater, 1963, "The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids," Proceeding of the 2nd International Heat Transfer Conference, Denver.
- (10) S. H. Yang, 1999, "Experimental study of pool boiling CHF on small plate," Ph. D. Thesis, KAIST, Korea.