

## 초음파 진동이 경사진 평판에서의 CHF에 미치는 영향에 대한 실험연구

정지환 · 김대훈\* · 권영철\*\*

천안외국어대 환경시스템과, \*선문대 대학원, \*\*선문대 기계공학과

E-mail : jhjeong@ccfs.ac.kr

### Experimental Study of the Ultrasonic Vibration Effects on CHF Occurring on Inclined Flat Surfaces

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

Cheonan Col. of Foreign Studies, Department of Environmental System

\*Sunmoon University, Graduate School

\*\*Sunmoon University, Department of Mechanical Engineering

#### 요 약

본 연구는 초음파 진동의 영향을 받는 풀비등 조건에서의 CHF 열전달 촉진현상을 이해하기 위해 수행되었다. 평판에 얇은 구리박판이 덮혀 있는 시료와 증류수를 냉각제로 사용하여 초음파 유무, 경사각도의 변화 및 물의 과냉도 변화에 대하여 평판 가열면에서의 CHF를 측정하였다. 실험장치는 수조, 전원공급장치, 시험부, 초음파 발생장치, 데이터 획득장치 등으로 구성되었다. 실험조건은 3가지 과냉도에 대한 실험과 6가지 시편의 경사각도를 변화시켜 수행되었다. 측정값을 통해 초음파 진동이 CHF를 증진시키며, 그 영향은 경사각의 변화뿐만 아니라 과냉도에 따라서 크기가 달라지는 것을 알 수 있다. 초음파 진동에 의한 CHF 증가율은 과냉도가 커질수록, 그리고 시편의 경사각도가 수직에서 수평방향 방향으로 기울어질수록 증가하였다. 가시화 실험을 통해 CHF 증가의 원인이 음장에서 기포 생성과 이탈의 동적거동과 밀접하게 관련되어 있음을 확인하였다.

**Abstract** — Augmentation of CHF by ultrasonic vibration in water pool is experimentally investigated under pool boiling condition. The experiments are carried out using copper coated plates and distilled water. Measurements of CHF on flat plate heated surface were made with and without ultrasonic wave and with variations in inclined angle of the surface and water subcooling. Experimental apparatus consists of a bath, power supply, test section, ultrasonic generator, and data acquisition system. The measurements show that ultrasonic wave enhances CHF and its extent is dependent upon inclination angle as well as water subcooling. The rate of increase in CHF increases with an increase in water subcooling while it decreases with an increase in inclination angle. Visual observation shows that the cause of CHF augmentation is closely related with the dynamic behavior of bubble generation and departure in acoustic field.

#### 1. 서 론

액상이 기상으로 변하는 상변화 열전달 현상을 비등 열전달이라 한다. 비등열전달은 높은 열제거가 필요한 산업분야의 열전달 기기에 적용되고 있다. 최근 반도체 기술의 급격한 발전으로 핵심적인 전자부품들이 소형화, 고집적화 됨에 따라 고효율 열교환기의 개발이 중요하

게 대두되고 있으며 새로운 냉각기술이 요구되고 있다. 차세대 마이크로프로세스와 전자부품들 중에는 1000 W/cm<sup>2</sup> 이상의 고열유속을 발생하는 것들이 많이 있으나 기존의 냉각방식으로는 쉽게 해결할 수 없는 실정이다. 가열면의 열유속이 임계열유속(CHF)을 초과하게 되면 가열표면에 기체막을 형성시키고 이 막이 열전달과정을 원할히 이루어지지 않게 하여 가열면의 급격한 온도 상승

을 유발시킴으로써 가열면 온도가 과도하게 상승하여 물리적 파괴현상을 초래한다. 특히, 원자력발전소 연료봉에서의 CHF 현상은 표면온도의 급격한 상승을 유발하며, 경우에 따라서는 가열면 온도가 용융점에 도달할 수 있게 된다. 만약 열전달 향상방법을 이용하여 CHF 발생 값을 크게 할 수 있으면, 가열표면의 열적 여유도를 확보하여 고 열유속 기기의 안정성을 충분히 구현할 수 있을 것이다. 그러므로, 시스템의 파괴없이 열전달 성능을 극대화하기 위하여 CHF를 증가시키는 것은 중요하다.

열전달을 촉진시키기 위해 여러 가지 방법들이 적용되고 있으며, 크게 수동적인 방법과 능동적인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적 방법에는 열전달 면적의 신장, 홈 제조, 배관경의 축소 등을 포함하며 능동적인 방법은 전기장 및 자기장, 진동 그리고 초음파 등을 포함하고 있다. 그러나 수동적 방법은 기계적 가공상의 어려움과 획기적인 기술 향상을 기대하기 어려우므로 최근 수동적 방법과 더불어 능동적 방법을 적용시키는 복합 열전달 촉진연구가 활발히 연구되고 있다<sup>11</sup>.

Wong과 Chon<sup>12</sup>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. Park과 Bergles<sup>13</sup>은 포화과 과냉상태에서 임계열유속이 초음파에 의해 증가함을 실험으로 보여주었다. Iida와 Tsutsui<sup>14</sup>는 초음파에 의해 CHF가 약 20% 정도 증가함을, 그리고 그 효과는 핵비등 영역보다는 막비등과 자연대류 영역에서 효과적이라고 보고하였다. Kim 등<sup>15</sup>은 PIV를 이용한 유동가시화로 초음파에 의해 2차유동이 형성되고, 그 결과 기포의 운동성이 촉진된다고 보고하였다. 앞서 언급된 연구나 실험에 사용된 시료들은 대부분 와이어나 작은 관과 같은 수평 실린더 형태였으나, 최근 Ohtake 등<sup>16</sup>은 R-113 수조에 잠긴 등

판시편의 각도를 변화시켜 CHF 실험을 수행하였고, 이 실험을 통하여 CHF에서의 초음파의 영향이 각도변화에 무관하다고 발표하기도 하였다.

선행 실험을 통해 가열면에 초음파를 가하면 열전달 성능이 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 실험은 원자로와 같은 등근 반원통 하부의 경사면에서 발생할 수 있는 CHF 값의 향상에 관심이 있고, 정상상태 과냉 풀비등 조건에서의 초음파가 CHF에 미치는 영향을 이해하고자 과냉도와 경사각도를 변화시켜 가면서 초음파를 가하였을 때와 가하지 않았을 때의 CHF 값을 실험으로 측정 및 가시화 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

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 적절히 모의하기 위하여 평판 시편의 각도를 변화시킬 수 있도록 제작하였다. 초음파 진동이 열전달을 향상시키는 기구로서 acoustic streaming과 cavitation 이 있으며 이들 현상은 15~50 kHz 범위에서 활발히 일어나는 것으로 알려져 있다<sup>17</sup>. 본 실험에서는 40 kHz의 초음파를 발생시킬 수 있는 진동자를 수조에 설치하였다. 작동유체는 증류수를 사용하며, 증류수와 수조외부와의 열손실을 최소화하기 위해 수조는 석면, 유리섬유, 보온

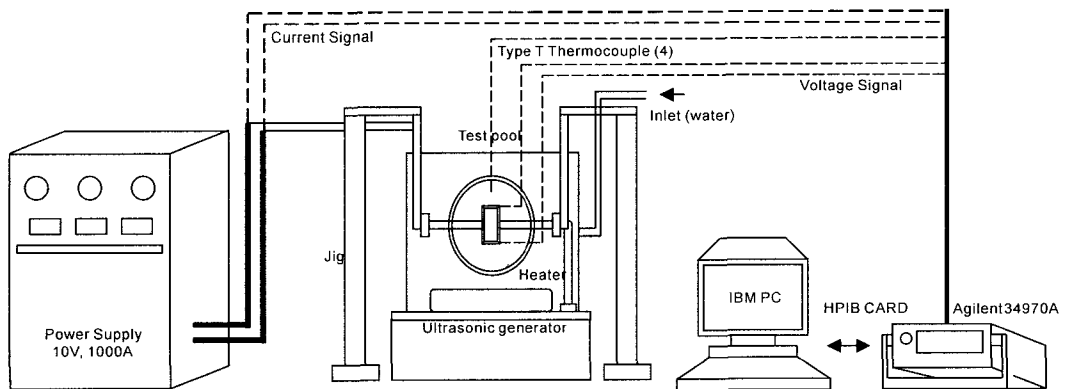


Fig. 1. Schematic diagram of pool boiling experimental apparatus.

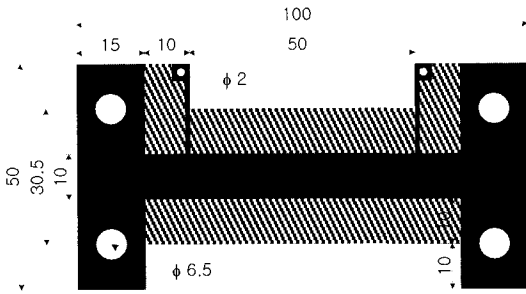


Fig. 2. Schematic diagram of heating surface.

테이프를 사용하여 단열 처리(두께 50 mm) 하였다. 또한 수조내의 벌크 온도를 정상상태로 유지하기 위하여 3 kW와 0.5 kW 용량의 히터를 이용하였다. 주 실험부는 초음파에 의한 CHF 현상을 관찰하면서 데이터를 측정하기 위해 두께 10 mm의 강화유리로 제작하였으며, 증류수의 수위를 일정하게 유지하기 위하여 응축코일을 사용하여 실험 중 발생하는 증기를 응축하여 주 실험부로 재순환시켰다.

실험에 사용된 시편의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 50 mm×100 mm의 베이크라이트 평판에 얇은 구리박판(0.04 mm)이 덮혀 있는 형태이다. 시료의 양단은 최대 10 V, 1000 A의 출력을 낼 수 있는 직류 전원공급기에 연결된다. 실험부는 시편 중앙에 위치한 폭 10 mm, 길이 50 mm의 구리박막 부분이다. 이 부분은 주열가열 방법에 의하여 발열하게 되며 발열량은 시편부 양단에서 발생하는 전위차와 전류를 측정함으로써 계산할 수 있다. 전위차는 50 mm 간격을 두고서 만든 voltage tap에서 측정한다. 이 때, 구리박막의 한쪽은 베이크라이트 기판에 접착되어 있으므로 발열량은 전부 구리박막과 접촉한 물로 전달되는 것으로 가정한다. 초음파는 매질의 밀도가 변하는 경계면에서 투과 혹은 반사가 일어나므로 진동 표면으로부터 경계면까지의 거리는 중요한 의미를 가진다. 본 실험에서는 증류수 수면이 초음파 발전기 표면으로부터 초음파 파장(35 mm)의 8배인 280 mm 위에 있도록 하였고, 시료는 1/4 파장의 정수 배인 113.7 mm에 위치하도록 조정하였다.

CHF 발생시 표면 열유속을 계산하기 위해서 시료의 전압(V, ±0.0025%), 전류(A, ±0.0037%), 3점의 수조 온도, 1점의 외기 온도를 측정하였다. 데이터 측정 및 저장은 HP 34970A 데이터획득 장치와 34901A 모듈을 이용하였다. 경사각을 정확히 얻기 위해 실험부에 정밀 각도기(±0.5°)를 부착하였다. 실험부 양단의 전압 및 전류는 데이터획득장치로 직접 획득하며, 실험에 사용된 4개의 열전대(T-type, ±0.1°C)는 표준온도계와 교정기(CA100, YOKOGAWA)를 이용하여 보정한 후 실험에 사용하였다.

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. 실험에 사용된 증류수는 약 한 시간동안 가열하여 용존 가스를 제거한 뒤 실험의 과냉도까지 천천히 냉각 시켰다. 실험부는 정상상태 과냉 풀비등조건(설정값의 ±0.5% 이내)에서 20분 정도 관찰하고, 시각적으로 어떠한 현상도 나타나지 않으면 CHF 조건에 이르지 못한 것으로 판단하였다. 이 후 다시 전류 값을 증가시켜서 위 과정을 반복하며 구리 박막이 파괴될 때까지 서서히 진행한다. 초음파 가진이 CHF 값의 향상에 미치는 영향을 확인하기 위해 시편의 경사각도와 과냉도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 과냉 풀비등 상태에서의 초음파의 영향을 알아보기 위하여 과냉도 5°C, 20°C, 40°C의 3가지에 대해 실험을 수행하였다. 또한, 각 과냉도마다 RPV 형상을 모의하기 위하여 시편의 각도를 0°, 10°, 20°, 45°, 90°, 180°의 6가지로 변화시키며 CHF 값을 측정하였다. 본 연구에서 0°와 180°는 각각 하향평판과 상향평판을 의미한다. 각 실험에서는 동일 조건 하에서 초음파 진동이 있을 때와 없을 때의 CHF 값을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 가열면 주위에서의 기포유동을 나타내는 사진이다. 이 사진들은 초음파를 가진 하지 않은 상태의 CHF 값보다 약간 작은(약 96%) 열유속 상태에서의 사진이다. Fig. 3(a)와 (b)는 상향평판에서의 기포유동을 나타낸다. 초음파 진동이 없을 경우(a), 가열표면으로부터 다수의 마이크로 기포들이 분출되고 있다. 가열 표면에서는 가열면의 폭(10 mm)를 덮을 만한 크기의 기포가 성장하고 있으며 이 기포는 일정한 주기로 가열면에서 분리되어 제거된다. 열유속이 더욱 증가되면 기포의 이탈속도보다 생성 및 성장속도가 빨라져 기포가 지속적으로 가열면을 덮고 열전달을 방해하게 되어 가열표면이 파손된다. Fig. 3(a)와 동일한 열유속일 때 초음파를 가진할 경우(b) 마이크로 기포의 분출과 주기적인 큰 기포의 주기적 생성과 이탈이 전혀 관찰되지 않았다. 한편, 초음파 가진이 없는 경우(a) 마이크로 기포들은 수직 윗 방향으로 이동하는 반면, 초음파 가진이 있을 경우(b) 가열면을 이탈하는 기포들이 사인 곡선 경로를 따라 움직이는 것이 관찰되었다. 이러한 현상은 3가지 음향 스트리밍 모드 중의 하나인 Rayleigh 흐름<sup>[7][8]</sup>이 기포 거동에 영향을 준 것으로 생각된다.

Fig. 3(c)와 (d)는 수직으로 설치한 가열표면 주위에서

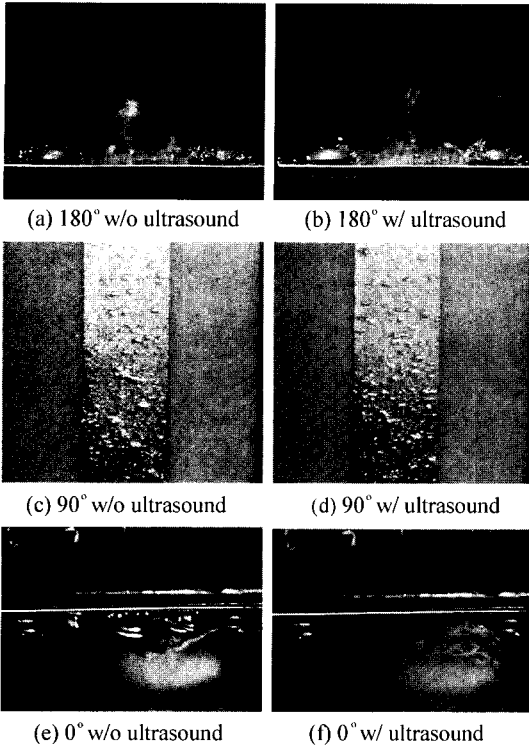


Fig. 3. Bubble movements around heated surfaces with a heat flux of just below CHF (upward:  $q=3100 \text{ kW/m}^2$ ,  $q_{CHF}=3211 \text{ kW/m}^2$ ; vertical:  $q=2650 \text{ kW/m}^2$ ,  $q_{CHF}=2774 \text{ kW/m}^2$ ; downward:  $q=520 \text{ kW/m}^2$ ,  $q_{CHF}=542 \text{ kW/m}^2$ ).

의 기포유동을 나타낸다. 이 경우 초음파 진동의 있고 없음에 따른 기포의 거동의 차이가 관찰되지 않았다. 가열 표면에서 다수의 기포가 생성되어 자라나며, 이 중 충분히 성장한 기포는 부력에 의해 가열표면을 미끄러지듯 윗 방향으로 떠오른다. 초음파 진동의 유무에 따라 기포의 이탈 주기가 변하는 것으로 보였으나 그 차이는 미미하였다. 수직 평판인 경우 초음파 유무에 따른 기포 거동의 차이가 없던 것처럼 초음파 진동이 가해져도 CHF 값의 변화는 아주 작았다.

Fig. 3(e)와 (f)는 하향평판에서의 기포유동을 보여준다. 초음파를 가진 하지 않을 때(e) 열유속을 증가시키면 기포는 계속적으로 성장하고, 바깥쪽 수평방향으로 팽창하여 마침내 부력의 영향으로 가열표면에서 이탈된다. 열유속이 더욱 증가되면, 몇몇 큰 기포들이 동시에 성장하고, 가열면 전체를 덮게 되어 가열면이 파괴된다. Fig. 3(c)와 동일한 열유속에서 초음파를 가진하면(f) 작은 크기의 기포가 빠른 속도로 이탈되는 것이 관찰되기는 하였으나 초음파를 가진하지 않은 상태(e)에서 관찰되었던

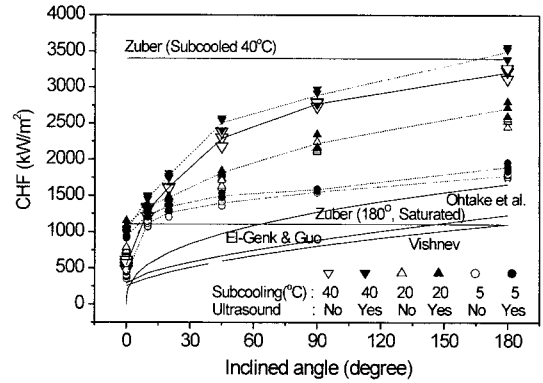


Fig. 4. CHF versus surface orientation.

큰 기포는 형성되지 않았다. 한편, 초음파 가진이 없는 경우 큰 기포 주위에 뚜렷이 구분되는 열경계층이 형성되었으나, 초음파 가진시 열경계층이 교란되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 본 실험에서 측정된 CHF 값과 기존 연구자들이 제안한 관계식의 예측값을 보여주고 있다. 이 그래프는 가열면의 경사각, 물의 과냉도, 그리고 초음파 진동의 유무에 따른 CHF 값의 변화를 보이고 있다. 이 그림에 제시된 기존 연구자들의 관계식은 다음과 같다. Zuber<sup>9)</sup>는 무한 상향평판에서의 유체역학적 불안정 개념으로 다음과 같은 이론적 CHF 값 예측 모델을 유도하였다.

$$q_{CHF} = \frac{\pi}{24} \rho_g h_{fg} [\sigma(\rho_l - \rho_g)g/\rho_g^2]^{1/4}$$

쭈뼌등 조건에서 각도변화에 따른 CHF 상관식은 Vishnev<sup>10)</sup>에 의해서 처음으로 아래 식과 같이 제안되었다.

$$q_{CHF} = q_{CHF,180} \sqrt{(10+\theta)/190}$$

위식을 Fig. 4에 표시할 때에는 Zuber의 모델을  $q_{CHF,180}$  값으로 사용하여 작성하였다. El-Genk and Guo<sup>11)</sup>는 급속냉각(quenching) 방법으로 경사진 하향평판에서의 CHF에 대한 광범위한 실험을 수행하였고, 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$q_{CHF} = C_{CHF,f}(\theta) \rho_g h_{fg} [\sigma(\rho_l - \rho_g)g/\rho_g^2]^{1/4},$$

$$C_{CHF,water}(\theta) = 0.034 + 0.0037\theta^{0.656}.$$

최근, Ohtake 등<sup>6)</sup>은 원자력발전소 압력용기의 냉각 성능예측을 목적으로 R-113을 사용하여 Guo & El-Genk의 모형에 바탕을 둔 아래의 실험식을 제안하였다.

$$q_{CHF} = C_{CHF,R113}(\theta) \rho_g h_{fg} [\sigma(\rho_l - \rho_g)g/\rho_g^2]^{1/4},$$

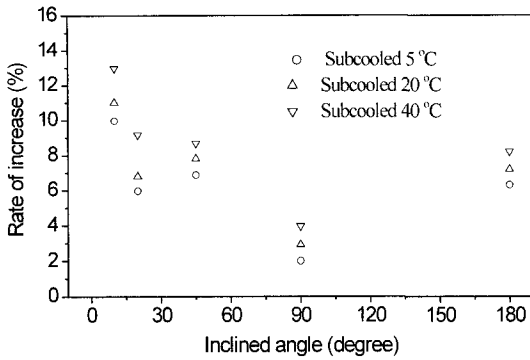


Fig. 5. The rate of increase in CHF versus inclination angle.

$$C_{CHF, R113}(\theta) = 0.0267\theta^{0.384}$$

본 실험에서 측정된 값들은 대부분의 선행연구자들이 제안한 관계식과 유사한 경향을 보이고 있으나 시편의 경사각도가 작은 영역에서는 본 실험의 측정값이 크게 나타났다. 한편, Ohtake 등<sup>[6]</sup>이 제안한 관계식은 본 실험에서 측정된 값과 크기의 차이는 있으나 변화 경향은 매우 유사함을 알 수 있다.

Fig. 5는 다른 각도의 증가율에 비해 월등히 큰 값을 나타내는 0°(하향 평판)에서의 값을 제외한 모든 각도에서의 초음파 가진에 따른 CHF 증가율을 나타낸다. 하향평판인 경우 과냉도가 5°C에서 40°C까지 변화할 때 CHF 증가율은 87%에서 126%까지 변화하였다. CHF 증가율은 과냉도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 초음파 가진 시 냉각재의 과냉도가 증가할수록 CHF 현상에 큰 영향을 미치는 것을 암시한다. 이러한 원인은 음파에 따라 주변 압력이 변화할 때 생성, 붕괴되는 cavitation 기포의 영향이라고 판단된다. cavitation 현상에 의해 시편 주위의 냉각재가 교란되고, 혼합되어 결과적으로 열전달 증진의 효과로 나타나게 된다. cavitation 강도의 증가는 과냉도가 증가할수록 증가하는 것으로 알려져 있고 본 실험에서도 과냉도가 증가할수록 많은 수의 cavitation 기포가 관찰되었다. 물 온도가 증가함에 따라 cavitation 밀도는 줄었으며, 과냉 5°C에서는 cavitation 기포가 거의 관찰되지 않았다.

각도변화에 따른 영향을 보면, 초음파 가진 시 경사각이 0°일 때 최대효과를 나타내며 90° 경사각에서 최소효과를 나타내고 있다. 캐비테이션 발생 밀도는 가열면의 경사각도에 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 이 현상은 음파유발 유동(acoustic streaming)의 변화 때문인 것으로 판단된다. 수직평판은 초음파의 진행방향과 평행한 위치이다. 이러한 배치에서 음파유발 유동은 부력 방

향으로 형성된다. 초음파 진동이 없다 하더라도 가열면 주변에는 밀도차에 의한 자연대류 현상으로 부력 방향으로 국부적인 유동이 형성된다. 따라서 가열면의 경사각도가 수직에 가까울 수록 초음파유발 유동의 영향은 상대적으로 작아지게 되는 것이다. 음파유발 유동이 열전달 향상에 미치는 영향은 가열면과 초음파의 입사각도가 수직에 가까울수록 커지게 된다. 이러한 이유로 가열면이 하향 일 때 CHF 증가율이 최대이고 경사각이 증가할수록 CHF 증가율이 감소하는 것이다. 앞서 언급했듯이 가열면이 하향일 때 CHF 값은 87~126% 증가하였고, 경사각이 90°까지 증가함에 따라 CHF 증가율도 감소한 것으로 나타났다. 한편, 경사각이 0°~10°로 변하는 영역에서 CHF 증가율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 경사각도가 약간 변화한다고 해서 음파유발 유동의 영향이 이처럼 급격히 변했을 것으로 생각되지는 않으며, 본 실험 조건에서 CHF 현상에 영향을 미치는 또 다른 기구가 있음을 의미한다. 이와 같이 급격한 변화를 유발할 수 있는 인자로서 가능성이 가장 큰 것은 기포막의 거동특성이다. 가열면이 하향 수평일 때, 기포가 수평방향으로 확장되어 결국 가열면에서 이탈되기 위해서는 표면장력을 이길 수 있도록 기포의 질량이 충분히 커야 한다. 만약 기포막을 파괴하고 파손된 기포에 진동을 줄 수 있는 외력이 가해지면 기포는 가열면에서 쉽게 이탈 할 수 있을 것이다. 이러한 점을 고려할 때, 초음파 진동은 CHF 향상에 큰 영향을 줄 것으로 생각된다. 그러나 가열면이 경사져 있으면, 발생된 기포는 부력 때문에 가열면을 따라 미끄러져 쉽게 이탈할 수 있을 것이다. 그러므로, 가열면이 기울어져 있으면 CHF 향상에 대한 초음파와 같은 외력의 영향은 감소하게 되는 것이다.

#### 4. 결 론

본 실험에서는 정상상태 과냉 풀비등 조건에서 수조에 가해진 초음파 진동이 CHF에 미치는 영향을 이해하고자, 과냉도와 경사각도를 변화시켜 가면서 초음파를 가하였을 때와 가지지 않았을 때의 CHF 값을 측정하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

(1) 초음파 진동으로 인한 CHF 증진은 기포의 생성과 이탈의 과정에 관련되어 있다. 가시화를 통하여 초음파 유동이 가열표면에 생성되는 기포의 거동에 큰 영향을 주고 있음이 관찰되었다. 초음파 가진 시, 큰 기포 혹은 증기막의 형성이 억제되었다. 이는 캐비테이션 기포와 음향유발 유동이 냉각재의 혼합을 촉진하기 때문인 것으로 생각된다.

(2) 초음파 가진 시 물의 과냉도가 증가할수록 CHF

증가율이 증가하였다. 이것은 과냉도가 증가할수록 냉각재 혼합에 기여하는 캐비테이션 기포 수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 가열면의 기울기가 하향 수평에서 수직으로 변함에 따라 초음파 가진에 의한 CHF 증가율이 감소한다.

## 후 기

이 논문은 2002년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D00453).

## 사용기호

$g$	: 중력가속도
$h_{fg}$	: 기화 엔탈피
$q$	: 열유속
$q_{CHF}$	: 임계열유속(CHF)
$q_{CHF, 180^\circ}$	: 수평 하향 평판의 CHF
$\theta$	: 경사각도(하향 $0^\circ$ , 상향 $180^\circ$ )
$\sigma$	: 표면장력
$\rho_l$	: 포화 액체 밀도
$\rho_g$	: 포화 기체 밀도

## 참고문헌

- Bergles, A.E.: "Enhancement of pool boiling", Int. J. Refrig., 20, 545 (1997).
- Wong, S.W. and Chon, W.Y.: "Effects of ultrasonic vibration on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling", AIChE J., 15, 281 (1969).
- Park, K.A. and Bergles, A.E.: "Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, 31, 664 (1988).
- Iida, Y. and Tsutsui, K.: "Effects of ultrasonic waves on natural convection, nucleate boiling and film boiling heat transfer from a wire to a saturated liquid", Experimental Thermal Fluid Science, 5, 108 (1992).
- Kim, Y.G., Kang, S.M., Kang, B.H. and Kim, H.Y.: "Effect of ultrasonic vibration upon pool boiling heat transfer", Proceedings of the SAREK 2002 summer annual conference (2002).
- Ohtake, H., Takano, K. and Koizumi, Y.: "Study on ex-vessel cooling of RPV (Critical heat flux and enhancement of CHF induced by ultrasonic wave on inclined surfaces)", Proceedings of the 8th International Conf. on Nuclear Engineering, Baltimore, USA (2000).
- Nomura, S., Murakami, K. and Sasaki, Y.: "Streaming induced by ultrasonic vibration in a water vessel", Jpn. J. Applied Physics, 39, 3636 (2000).
- Zarembko, L.K.: "High-intensity ultrasonic fields, ed. L.D. Rozenberg", Plenum Press, New York, 135 (1971).
- Zuber, N.: "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer", AECU-4439 (1959).
- Vishnev, I.P.: "Effect of orienting the hot surface with respect to the gravitational field on the critical nucleate boiling of a liquid", Journal of Engineering Physics, 24, 43 (1974).
- El-Genk, M.S. and Guo, Z.: "Transient boiling from inclined and downward-facing surfaces in a saturated pool", Int. J. Refrigeration, 16, 414 (1993).