

환상 공간 내부의 풀핵비등 열전달

Nucleate Pool Boiling Heat Transfer in Annuli

강 명 기

안동대학교
경북 안동시 송천동 388

요 약

환상공간이 대기압 상태의 풀핵비등열전달에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다. 실험 동안 틈새간격과 하부에서의 유동 제한이 주요 변수로서 취급되었으며, 환상 공간에 대한 결과를 외부 제한 조건이 없는 단일 튜브에 대한 결과와 서로 비교하였다. 결과에 의하면, 환상 형상을 채택하게 되면 열전달에 많은 향상을 가져오는 것으로 확인되었으며, 그 효과는 하부로의 유체유입이 차단된 조건에서 더 분명하게 나타나고 있는 것이 관찰되었다. 만일 열유속이 계속 증가하게 되면, 열전달계수에 대한 이러한 효과는 모두 사라지고 단일튜브에 대한 결과에 접근하게 된다.

Abstract

Effects of annuli on the nucleate pool boiling heat transfer at atmospheric pressure have been obtained experimentally. Through the tests, gap sizes and bottom confinement have been investigated as major factors and the whole results are compared with the results for a single tube without confinement. According to the results, the annular condition gives much increase in heat transfer coefficient. Its effect is observed much greater for the case of bottom closed conditions. Once heat flux is increased much, all these effects on heat transfer coefficient gets disappeared and the results approach the case of a single tube without confinement.

1. 서 론

비등 열전달에 영향을 미치는 여러 가지 변수 중 오랜 기간에 걸쳐서 연구되어오고 있는 것이 환상(annular) 공간 조건에서 튜브간 틈새가 비등열전달에 미치는 영향을 살펴보는 것이다. 이러한 것에 대한 연구가 지속되어 오고 있는 이유 중 한가지로 들 수 있는 것은 환상공간에서의 열전달 현상이 매우 복잡하며, 동일한 형상에 대해서도 유동 조건

에 따라 열전달 증가하기도 하고 감소할 수도 있기 때문이다.

유체가 강제순환 조건을 갖는 유동비등(flow boiling)에 대한 연구[1-3]는 비교적 많이 진행되어 온데 반해 유체가 정적인 상태로 있는 풀비등(pool boiling)에 대한 연구는 상대적으로 거의 진행되어 오지 않은 상태이다. 시편과 주변 형상이 갖는 틈새가 비등열전달에 미치는 영향을 살펴보는 것은 시편의 형상이 평판인 경우[4,5]와 튜브인 경우[6,7]의 두 가지로 크게 분류할 수 있다.

Fujita등[4]은 평판을 서로 마주보게 설치한 후 두 평판 중 하나를 가열하면서 다른 쪽 평판과의 틈새를 조정하면서 그 영향을 살펴보고 있다. Fujita등[4]은 틈새의 영향과 함께 서로 마주보는 평판의 양쪽측면이나 하부면에 대한 유동을 차단함으로써 적절한 유체 공급이 방해받는 조건하에서의 실험도 수행했으며, 두 개의 평판이 경사진 경우에 대한 실험도 함께 수행하였다. 시편의 주변을 막아 유체의 흐름을 차단하는 것은 일반적으로 열전달을 향상하는 효과가 있으나, 이러한 현상은 틈새 간격과 관계가 있는 것으로 관찰되고 있다. 틈새 간격을 계속 줄이게 되면 열전달계수가 증가하다가 틈새가 어느 간격 이하로 줄어들면 오히려 열전달계수가 감소하는 현상을 보이고 있음을 보고하고 있다. 그러나, Bonjour 과 Lallemand[5]는 낮은 열유속에서는 틈새 간격이 작은 경우가 높은 열전달계수를 가지던 것이 열유속이 증가하면서 열전달계수가 작아지는 결과를 초래하는 것을 보고하고 있다.

한편, Yao 와 Chang[6]은 직경이 25.4 mm 인 튜브를 수직으로 설치한 후 하부로의 유동이 차단된 환상 형상에 대한 실험을 하였으며, Hung 과 Yao[7]는 동일한 직경의 튜브를 수평으로 설치하고 그 주위를 수정유리관으로 둘러싸서 실험을 수행하였다. 두 가지 경우 모두 틈새의 감소는 어느 값까지는 열전달의 증가를 가져오지만 이것이 특정값을 지나면 오히려 열전달계수가 작아지는 것을 관찰했으며, 열유속이 증가하면 이러한 경향이 보다 뚜렷하게 관찰되고 있음을 확인하였다.

환상 공간의 외부 튜브가 가열면이 되는 경우는 Monde 등[8]과 Monde 와 Mitsutake[9]가 정해진 환상 공간의 사이로 유체를 통하게 하면서 외부튜브를 가열하고 이것이 임계 열유속(critical heat flux)에 이르는 과정까지를 살펴본 것이 있다.

이상에서 살펴본 것과 같이 환상공간에 대한 연구에서 가장 관심의 대상이 되는 것은 기하학적 형상, 환상공간의 틈새, 그리고 유동 조건임을 알 수 있으며, 이러한 것들의 조합과 열유속의 크기에 따라서 열전달계수가 증가하거나 감소하고 있음을 알 수 있다.

풀비등에 대해 기존에 발표된 결과들은 시편의 길이가 작은(평판의 경우 30 mm 와 120 mm 이며, 튜브의 경우 101.6mm) 경우에 대한 것이다. 따라서, 이러한 결과들은 최근 들어 실용적인 측면에서 관심의 대상이 되고 있는 신형원전[10,11]과 같이 가열부 길이가 매우 긴 경우(AP600의 경우 5.5 m 정도이며 한국형차세대원전의 경우 1.8 m 정도)에 대해서는 적용하기 어렵다. 또한, Chun 과 Kang[10]에 의하여 언급된 것과 같이 열교환기의 크기는 계통 전체의 설계에 매우 큰 영향을 미치며, 이것의 크기는 경제적, 공간적인 문제로 많은 제약을 받으므로 열전달면적을 줄이면서 동일한 효과를 낼 수 있는 열교환기를 설계하는 것은 매우 유용한 일이라고 할 수 있는데, 기존에 발표된 여러 가지 자료를 살펴보면 환상 형태의 열교환 튜브가 좋은 대안을 제시할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구는 (1) 환상 공간이 비교적 긴 경우에 대하여 앞에서 언급한 틈새와 유동이 열전달계수에 미치는 영향을 살펴보고, (2) 환상공간 형태를 갖는 열교환기를 선택

하는 경우 비등열전달계수(h_b)의 향상과 그 한계를 규명함으로써 향후 설계 관점에서 향상된 열전달 성능을 갖는 열교환기를 설계하기 위한 자료를 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 과정

실험을 위한 수조와 시편에 대한 개략도는 Fig. 1 과 같다. 실험장치는 수조, 열교환 시편, 물 및 전력공급 및 조절설비, 그리고 표면과 물 온도를 측정하고 분석하는 설비로서 구성되어 있다. 수조는 부식을 방지하기 위해 스테인레스강으로 제작했으며, $600 \times 600 \times 800$ mm (가로×세로×높이) 의 내부 공간을 가진다. 수조의 전면에는 사진촬영과 비등 현상 관찰을 위하여 강화유리를 설치하였다. 유리가 붙어있는 면을 제외한 옆면, 밑면, 그리고 윗면은 단열을 위하여 이중벽 구조로 만들고 그 사이 공간 (30mm)에 단열재를 채워 넣었다. 열교환용 시편은 스테인레스강 재질의 매끈한 튜브(직경×길이=25.4×570 mm)를 사용 하였으며, 니크롬선으로 구성된 전기 저항체를 내부에 장착하고 전기적인 절연을 한 후 사용하였다. 시편의 하부는 시편 고정과 유리관 고정대와의 연결을 위하여 플랜지를 사용하였다.

튜브 표면의 온도를 측정하기 위하여 5 개의 지름이 1.5 mm 인 T-형식 열전대를 가열 표면에 설치하였다. 보다 정밀한 표면 온도 측정을 위하여 열전대 끝 부분을 대략 10 mm 정도 수직으로 굽힌 후 표면에 등간격(시편하부로부터, 85, 180, 285, 385, 485 mm 되는 위치)으로 접합하였다. 수조 내부 물의 온도는 수조 내부 바닥면부터 높이에 따라 등 간격(100mm)으로 설치한 7 개의 T-형식 열전대로서 측정하였다.

환상을 구성하기 위하여 두께가 2.3 mm 이고 길이가 600 mm 인 강화 유리관을 사용 하였다. 서로 다른 튜브틈새(ϵ)를 구현하기 위하여 내경(D_i)이 각각 33.2, 55.4 mm 의 두 개의 유리관을 채택하였다. 원활한 유로의 확보를 위하여 유리관의 한쪽 끝면으로부터 40 mm 되는 위치에 직경이 각각 10, 15 mm 인 구멍을 유리관 원주를 따라 등 각도

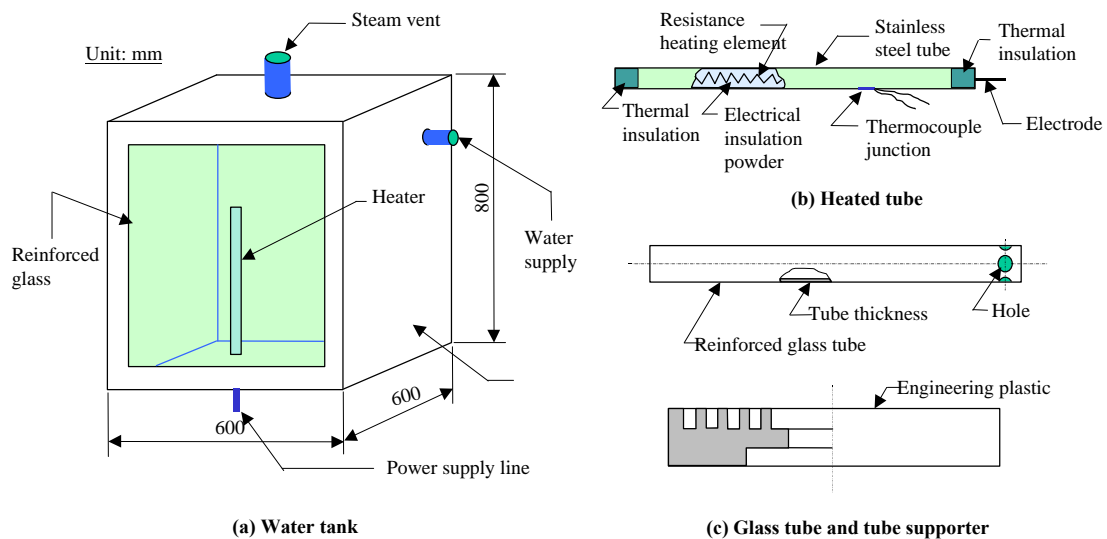


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus

(60°)로 6 개씩을 뚫었다. 그리고 이 유리관을 고정하기 위한 설비로서 공학플라스틱 (engineering plastic) 재질로 된 받침대를 따로 제작하였으며, 유리관과 받침대에 대한 간단한 그림이 Fig. 1(c) 에 나와 있다.

환상 공간 내부에서의 비등열전달 현상을 살펴보기 위하여 제일 먼저 유리관이 없는 경우 (unconfined)에 대한 실험을 수행하였다. 환상에 대한 실험은 (1) 유리관의 아래쪽으로 유로가 확보되는 경우(bottom open)와 (2) 아래쪽으로 유로가 확보되지 않는 경우(bottom closed)에 대한 실험을 각각의 유리관에 대하여 수행하였다. 유리관의 아래로 유체가 들어가는 경우는 유리관에 구멍이 뚫린 부분이 아래로 향하도록 하였으며, 아래 부분이 막힌 경우에 대한 실험시는 유리관의 뚫린 부분이 상부에 위치하도록 하고, 아래 받침대 부분은 누수가 생기지 않도록 실리콘으로 완전히 밀봉하였다. 한편, 유리관의 튜브가 일정한 틈새를 계속 유지하면서 유리관이 흔들리는 것을 방지하기 위하여 유리관의 상부와 튜브 사이에 가는 실리콘 봉을 끼워 고정하였다. 이 때 실리콘 봉은 유체의 출입에 방해가 되지 않도록 최대한 작으면서 소기의 목적을 얻을 수 있도록 하였다. 한편, 시편에 공급하는 전력(q)을 측정하기 위하여 전력 공급 및 조절 설비를 사용하였으며, 공급 전압(E)과 전류(I)를 디지털 값으로 읽을 수 있고, 이 값들을 임의로 조절할 수 있도록 제작하였다.

보다 정확성을 기하기 위하여 실험에 대한 오차를 검토하였다. 공급 전력 측정을 위하여 사용한 전압계와 전류계의 오차 범위가 각각 $\pm 0.5\%$ 이므로 각각의 읽음값으로부터 전력을 구하면 $\pm 1.0\%$ 의 오차 범위를 가진다. 또한, 온도는 열전대 오차, 계기 및 측정오차, 열전대 접합에 따른 오차를 합하여 최대 $\pm 0.5\%$ 오차범위를 가지며, 비등점(100°C)에서 보정하여 사용하였다.

실험과정에 대하여 간단하게 살펴보면, 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 일정 높이 (750 mm)로 물을 채운 후 용량이 각각 5 kW 인 3 개의 예열히터(pre-heater)를 이용하여 포화상태(100°C)까지 가열하였다. 포화상태에 도달 후 공기 등을 제거할 목적으로 약 30 분 정도 추가적인 가열을 수행한 후 예열히터의 전원을 차단하고 시편의 열유속(q'')을 변화시키면서 시편의 온도를 측정하였다. 모든 온도는 표면 온도가 정상상태에 도달하였을 때 (3 분 정도 소요) 열전대에 대한 값을 데이터 처리 장치(DAS, data acquisition system)를 사용하여 측정하였다. 보다 정밀한 온도의 산출을 위하여 측정값들에 대한 산술평균을 취하여 그 열유속에 대한 온도로서 결정하였다. 하나의 시편에 대한 실험이 끝나면 시편을 교환하여 동일한 과정을 거쳐서 실험을 수행하였으며, 이러한 전 실험 과정은 실험값 재현성을 확인하기 위하여 적어도 2~3 회 반복 실험을 수행하였다.

전기적으로 가열한 튜브 표면에서의 열유속은 공급전력을 열전달면적(A)으로 나눈 것이며, 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$q'' = \frac{EI}{\pi DL} = h_b(T_W - T_{sat}) = h_b \Delta T \quad (1)$$

여기서, E 와 I 는 각각 공급한 전압(V 단위)과 전류(A 단위)이며, D 와 L 은 각각 튜브 외경과 길이를 나타낸다. 그리고, T_W 와 T_{sat} 는 각각 가열 표면 온도와 물의 포화온도를 나타낸다.

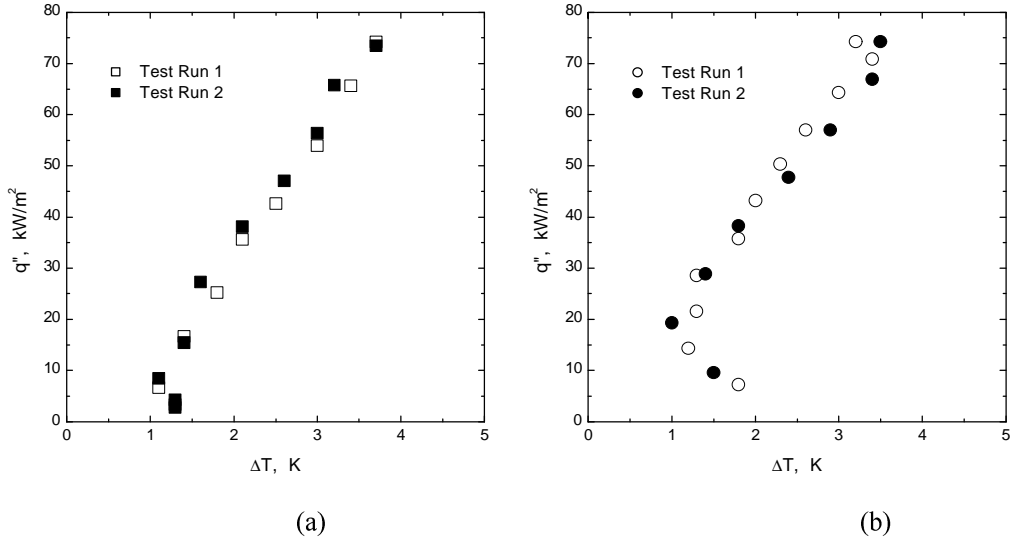


Fig. 2 Heat flux versus tube wall superheat curves to verify reproducibility of the experimental data: (a) Bottom closed ($\epsilon = 15 \text{ mm}$) and q'' decrease; (b) Bottom closed ($\epsilon = 3.9 \text{ mm}$) and q'' increase

3. 결과 및 고찰

실험값의 재현성(reproducibility)을 확인하기 위하여 유리관의 하부측 유동이 차단된 (bottom closed) 경우에 대하여 1 주일 이상의 기간을 두고 동일한 조건의 실험을 반복하였다. Fig. 2 에는 환상 공간의 틈새가 각각 3.9, 15 mm 인 두 가지 경우에 대한 실험값이 나와 있다. 상호 비교를 위한 실험값을 살펴보면 전반적인 경향은 물론 각각의 실험값들이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 실험에 대한 재현성은 신뢰할 수 있다고 하겠다.

외부에 환상공간이 없는(unconfined) 단일 튜브에 대한 결과가 Fig. 3 에 나와 있다. 그림에는 열유속이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 값을 각각 나타내고 있다. 두 가지 경우 거의 유사한 값을 가지는데, 열유속이 증가하게 되면 열유속이 감소하는 경우가 열전달이 약간 잘되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 그 차이는 거의 무시할 정도이며, 이력현상(hysteresis)은 따로 고려하지 않아도 될 것으로 생각한다. 열유속 대 튜브 표면과열도의 그래프를 살펴보면 과열도가 증가하게 되면 어느 순간 급격하게 열유속이 증가하는 위치가 나타나며, 여기서부터 본격적인 핵비등(nucleate boiling)이 시작한다.

외부가 유리관으로 둘러싸여 환상공간을 갖는 경우에 대한 결과는 유로 확보 관점에서 두 가지로 분류하였다. 첫째는, 유리관 하부로의 유로가 확보되는 경우이며 두 가지 틈새 간격에 대한 결과가 Fig. 4 와 Fig. 5 에 각각 나타나 있다. 둘째는, 유리관의 하부가 완전히 막혀 하부로의 유로가 완전히 차단된 경우로서 유체는 상부로 들어가고 또한, 이곳을 통하여 밖으로 나오게 되는 경우이다. 이것에 대한 결과는 Fig. 6 과 Fig. 7 에 각각 나와 있으며, 두 가지 경우는 서로 다른 틈새에 대한 결과를 나타내고 있다.

유리관 하부로의 유로가 확보되는 Fig. 4 와 Fig. 5 에 대하여 살펴보면, 전반적인 경향은 Fig. 3에서 살펴본 단일튜브에 대한 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 표면을

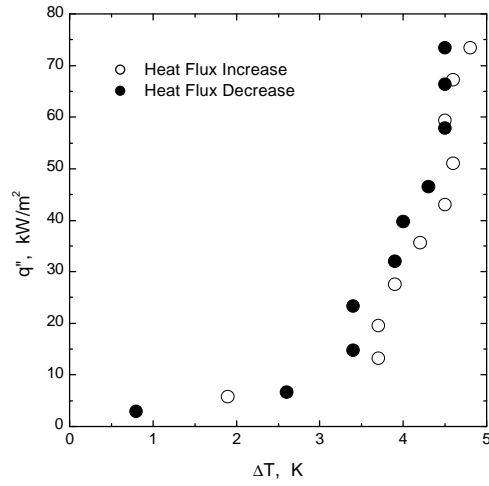


Fig. 3 Heat flux versus tube wall superheat for the single tube

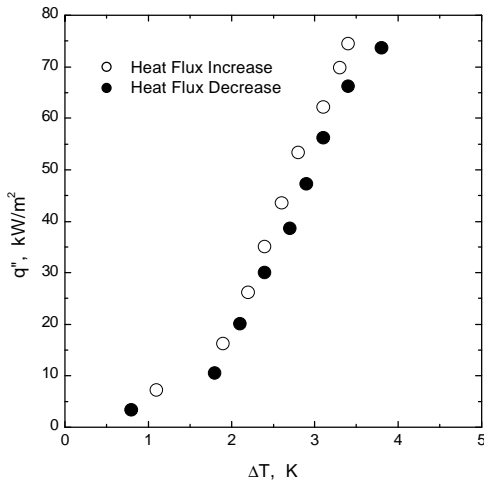


Fig. 4 Heat flux versus tube wall superheat (bottom open, $\epsilon=15\text{mm}$)

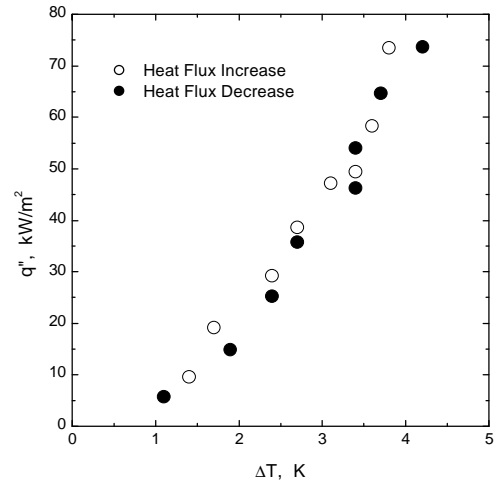


Fig. 5 Heat flux versus tube wall superheat (bottom open, $\epsilon=3.9\text{mm}$)

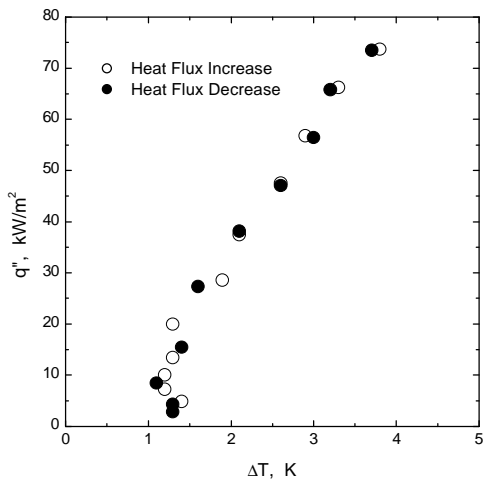


Fig. 6 Heat flux versus tube wall superheat (bottom closed, $\epsilon=15\text{mm}$)

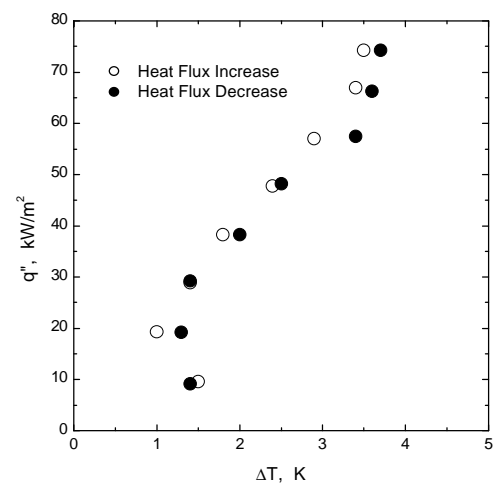


Fig. 7 Heat flux versus tube wall superheat (bottom closed, $\epsilon=3.9\text{mm}$)

통하여 전달되는 열유속은 매우 큰 차이가있음을 알 수 있다. 틈새 간격이 15 mm 인 경우와 단일 튜브의 경우를 비교하여 보면 이러한 특성이 매우 분명하게 관찰되고 있다. ΔT 가 3.5 K 의 값을 가질 때 단일 튜브에 대한 열유속값은 15 kW/m^2 의 값을 가지는데 비하여, 환상공간을 가지는 경우 75 kW/m^2 정도의 값을 가져 대략 5 배 정도의 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 열유속이 낮은 경우에 보다 현저하게 나타나고 있으며, 열유속이 증가할수록 양자간에 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향이 나타나고 있는 것은 주변액체의 유동과 튜브 표면에서의 기포덩어리 형성이라고 하는 두 가지 측면에서 분석을 해 볼 수 있겠다. 환상공간을 가지게 되면, 기포가 튜브 표면을 이탈하여 운동하는 영역이 매우 줄어들게 되므로 기포 밀도가 낮은 초기에 이러한 기포들이 주변 액체와 활발하게 뒤섞이면서 열전달을 촉진하는 현상을 나타낸다. 열유속이 증가하게되면 보다 많은 기포가 발생하면서 기포밀도가 증가하게된다. 그러나 이러한 기포들은 오로지 유리관의 상부를 통해서만 밖으로 빠져나갈 수 있으므로 기포간 간격이 서로 줄어들게 되어 기포 다발이 형성되면서 주변의 액체가 튜브 표면으로 접근하는 것을 방해하게 된다. 따라서, 열유속이 증가할수록 열전달계수가 작아지는 현상이 발생하게 된다. 유로가 훨씬 제한을 받는 틈새가 좁은 경우에 대한 결과인 Fig. 5는 이러한 경향을 훨씬 더 분명하게 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 4 와 Fig. 5를 서로 비교하여 보면 열유속이 낮은 경우 양자간의 열전달 특성이 거의 차이가 없음에 비하여 열유속이 증가하게 되면 틈새가 좁은 Fig. 5 의 경우가 열전달량이 훨씬 줄어들고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 평판을 사용한 실험인 Bonjour 과 Lallemant[5]의 결과에서도 살펴볼 수 있다.

유리관 하부로의 유동이 차단되는 경우는 하부로의 유로가 확보되는 경우에 비하여 훨씬 더 복잡하면서 활발한 기포 운동을 기대할 수 있다. 특히, 이 경우는 유리관의 상부로 기포가 빠져나가는 동시에 유체가 들어와야 하므로 기포와 액체가 적절하게 비껴가지 못하는 경우에는 유동의 연속성이 보장되지 못하면서 기포가 갑자기 폭주하는 것과 같은 현상을 관찰해 볼 수 있다. 유리관의 하부가 막힌 경우는 열유속이 아주 낮은 경우에도 매우 활발한 기포의 유동을 관찰할 수 있으며, 이것은 Fig. 6과 Fig. 7에서 관찰할 수 있는 것과 같이 열전달량의 향상을 가져오게 된다. $\epsilon=3.9 \text{ mm}$ 이고 $\Delta T=2 \text{ K}$ 인 경우에 대한 결과를 서로 비교하여 보면, 하부가 열려있는 경우 $q''=15 \text{ kW/m}^2$ 인데 비하여 하부가 막힌 경우에는 $q''=40 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 가진다. 따라서, 양자간에는 대략 2.7 배 정도의 차이가 남을 알 수 있다. 열전달에 대한 이러한 모든 차이는 열유속이 낮은 경우에 대해 유효하며, 열유속이 계속 증가하여 대략 $70\sim 80 \text{ kW/m}^2$ 의 값을 갖게되면 하부유동과 튜브간 틈새의 크기에 무관하게 거의 동일한 열전달계수를 갖게되는 것을 알 수 있다. 하부가 막힌 경우에 대한 결과는 Yao 와 Chang[6]의 결과와 전반적인 경향면에서는 서로 비슷하다. 그러나 Yao 와 Chang[6] 의 결과는 열유속이 낮은 경우 ϵ 의 감소가 열전달량의 뚜렷한 증가를 가져오는 것을 보여주는데 비하여 본 연구에서 얻은 결과는 ϵ 의 감소가 열전달량의 증가에는 거의 기여하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 하나의 이유로서 설명할 수 있는 것은 양자간 가열면 길이의 차이로 해석할 수 있겠다. 가열 길이가 짧은 Yao 와 Chang[6]의 경우 기포의 양이 충분히 많아지기 전에 상부로 전부 빠져나가 버리므로 위에서 설명한 것과 같은 기포에 의한 열전달 방해 현상이 거의 관찰되지

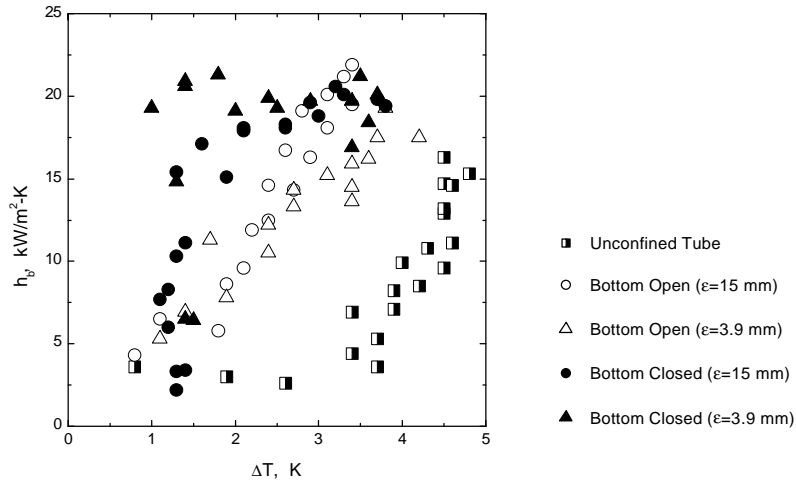


Fig. 8 Heat transfer coefficient versus tube wall superheat for various tube conditions

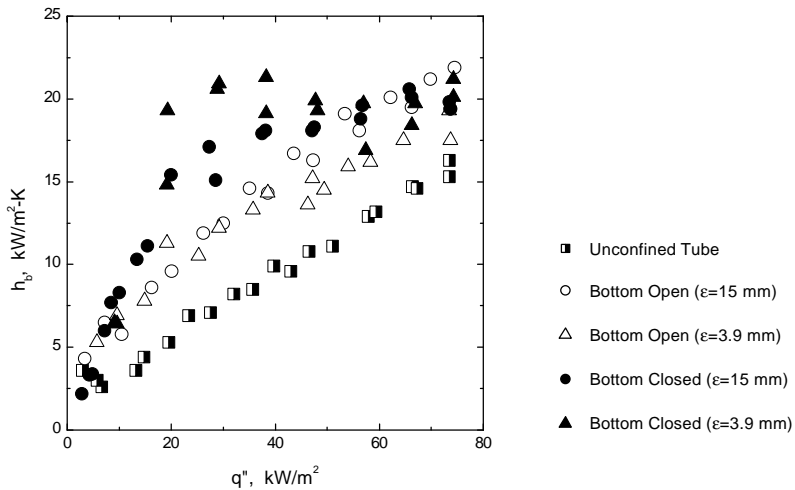


Fig. 9 Heat transfer coefficient versus heat flux for various tube conditions

않을 것으로 생각된다. 또 다른 이유 중의 하나로 고려되는 것은 틈새 간격이 보다 좁은 경우에 대한 효과를 들 수 있겠다. 틈새 간격이 훨씬 좁아지면 유동 특성에도 많은 변화가 초래될 수 있으므로, 전반적인 경향에도 약간의 변화를 초래할 수 있을 것으로 생각한다. 어느 정도의 틈새에서 그 영향이 없어지는지를 분명하게 규명해 볼 필요가 있으므로 보다 다양한 틈새에 대한 실험이 향후 과제로서 좀 더 연구되어져야 할 것으로 생각한다. 열유속이 높아지면 간격에 의한 영향이 감소하는 것은 공통적으로 관찰되는 현상이며, 이러한 것은 하부가 막힌 평판에 대한 실험인 Fujita등[4]의 결과에서도 살펴볼 수 있다.

유리관의 하부가 막힌 경우, 열유속을 점차 증가하게 되면 ΔT 가 일시적으로 줄어들면서 열전달계수가 빠르게 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 가열길이가 짧은 Yao 와 Chang[6]의 연구에서는 관찰되지 않은 특성이다. 이러한 현상은 초기의 활발한 유체 유동에 의한 것으로 생각해 볼 수 있겠다. 하부면으로의 유체 유입이 원활하지 않으므로 하부면의 액체는 쉽게 가열되어 기포가 발생할 수 있는 조건을 빠르게 형성하게 된다. 따라서 기포가 갑자기 폭발적으로 발생하는 현상을 살펴볼 수 있다. 이렇게 발

생한 기포는 급격하게 상부면으로 빠져나가고 새로운 액체가 상부에서 하부로 밀려들어 오게 된다. 따라서, 가열면 주변에 아주 급격한 유동이 형성되며, 이것이 초기 열전달계수 급증의 원인으로 작용하는 것으로 생각된다.

튜브 표면에서의 비등열전달계수와 과열도 사이의 관계는 Fig. 8에 비등열전달계수와 열유속 사이의 관계는 Fig. 9에 나와있다. 그림에 나와 있는 실험값들은 열유속이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 결과를 서로 합친 것이다. 두 그래프를 살펴보면 ΔT 와 q'' 가 낮은 경우 환상공간을 두는 것은 h_b 의 뚜렷한 증가를 기대할 수 있음을 알 수 있으며, 그 효과는 하부가 막힌 경우에 보다 분명하게 관찰되고 있다.

1. 결론

스테인레스강 재질의 가열 튜브와 유리관으로 된 환상공간을 이용한 대기압 상태 포화플렉비등 실험으로부터 얻어진 몇 가지 중요한 결론은 다음과 같다.

(1) 환상공간을 두는 것은 낮은 열유속 영역에서의 열전달 향상에 매우 큰 효과가 있다.

(2) 환상공간의 하부를 막게되면 하부를 개방하는 경우에 비해 열전달계수가 증가하게 되며, 그 효과는 열유속이 낮을 때 분명하게 관찰된다.

(3) 열유속이 증가하면 틈새와 하부유동의 영향은 없어지면서 구속이 없는 단일튜브에 대한 결과에 근접하게 된다.

후 기

본 연구는 안동대학교 기성희의 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Gungor K. E. and Winterton H. S., 1986, "A General Correlation for Flow Boiling in Tubes and Annuli," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29, No. 3, pp. 351-358.
2. Liu Z. and Winterton R. H. S., 1991, "A General Correlation for Saturated and Subcooled Flow Boiling in Tubes and Annuli, Based on a Nucleate Pool Boiling Equation," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, No. 11, pp. 2759-2766.

3. Sun G. and Hewitt G. F., 1996, "Experimental Studies on Heat Transfer in Annular Flow," *Proceedings of the 2nd European Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference*, pp. 1345-1351.
4. Fujita Y., Ohta H. Uchida S., and Nishikawa K., 1988, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Narrow Space between Rectangular Spaces," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 229-239.
5. Bonjour J. and Lallemand M., 1998, "Flow Patterns during Boiling in a Narrow space between Two Vertical Surfaces," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 24, pp. 947-960.
6. Yao S. C. and Chang Y., 1983, "Pool Boiling Heat Transfer in a Confined Space," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, No. 6, pp. 841-848.
7. Hung Y. H. and Yao S. C., 1985, "Pool Boiling Heat Transfer in Narrow Horizontal Annular Cavities," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 656-662.
8. Monde M., Mitsutake Y., and Hayasi M., 1999, "Critical Heat Flux during Natural Circulation Boiling on Uniformly Heated Outer Tube in Vertical Annular Tubes Submerged in Saturated Liquid (Change in Critical Heat Flux Characteristics due to Heated equivalent Diameter)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3189-3194.
9. Monde M. and Mitsutake Y., 2000, "Critical Heat Flux during Natural Circulation Boiling on Saturated Liquid in Annulus with Uniformly Heated Outer Tube," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 74-79.
10. Chun M. H. and Kang M. G., 1998, "Effects of Heat Exchanger Tube Parameters on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 468-476.
11. 강명기, 2000, 튜브 직경이 풀핵비등 열전달에 미치는 영향, 대한기계학회 논문집 B 권, 제 24 권 제 7 호, pp. 930-937.