

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.3.237

ISSN 1226-4881

경사각이 좁은 틈새를 가지는 환상공간 내부 풀비등 열전달에 미치는 영향

강 명 기*†

* 안동대학교 기계교육과

Effect of Orientation on Pool Boiling Heat Transfer in Annulus with Small Gap

Myeong-Gie Kang*†

* Dept. of Mechanical Engineering Education, Andong Nat'l Univ.

(Received May 28, 2010 ; Revised November 30, 2010 ; Accepted November 30, 2010)

Key Words: Pool Boiling(풀비등), Inclination Angle(경사각), Heat Transfer(열전달), Annulus(환상공간)

초록: 경사각이 대기압하의 포화상태인 물의 풀비등에 미치는 영향을 조사하기 위해 실험을 통한 연구를 수행하였다. 연구를 위하여 5mm의 틈새간격을 가지는 하부유로개폐 상태인 환상공간을 고려하였다. 환상공간의 내부에 설치된 튜브를 가열하였으며 튜브의 직경과 길이는 각각 25.4mm와 500mm이다. 경사각은 수평부터 수직까지 변경하였다. 본 실험의 결과를 틈새간격이 더 큰 환상공간 및 단일튜브에 대한 결과와 서로 비교하였다. 작은 틈새간격을 가지는 환상공간의 경우 경사각이 열전달에 미치는 영향은 그다지 크지 않음을 확인하였다. 그러나 환상공간이 수평상태인 경우 80kW/m²에서 임계열유속이 관찰되었다. 액체 교란의 정도와 기포군집형성이 환상공간 내부 풀비등의 주된 열전달 기구로 이해된다.

Abstract: An experimental study was carried out to investigate the effect of the inclination angle on the nucleate pool boiling of saturated water at atmospheric pressure. We considered an annulus with a gap of 5 mm and a bottom opening. The inner tube of the annulus was heated, and the outer diameter and the length of the tube were 25.4 mm and 500 mm, respectively. The inclination angle was varied from horizontal to vertical. The results were compared to those for an annulus with a larger gap and a single tube. In the small-gap annulus, the effect of the inclination angle on the heat transfer was not significant. However, an early onset of the critical heat flux was observed at 80 kW/m² when the annulus was horizontal. Liquid agitation and bubble coalescence were considered to be the major heat-transfer mechanisms.

- 기호설명 -

C : 실험상수
 D : 가열튜브 외경, m
 h_b : 비등열전달계수, W/m²°C
 I : 공급전류, A
 L : 가열튜브 길이, m
 q'' : 열유속, W/m²
 s : 틈새간격, m
 T_{sat} : 포화온도, °C
 T_W : 튜브표면온도, °C
 V : 공급전압, V

ΔT_{sat} : 튜브표면과열도(= $T_W - T_{sat}$), °C

θ : 경사각, deg 또는 rad

1. 서론

풀비등열전달은 오랜 기간에 걸쳐서 연구되어 왔으며, 최근 들어 신형원전개발에 적용하기 위해 광범위하게 연구되고 있다.^(1,2) 기존에 발표된 연구 결과들을 살펴보면 풀비등 열전달에 큰 영향을 미치는 기하학적 변수 중 두 가지는 제한된 공간과 경사각을 고려하는 것이다.

가열면 경사에 대한 초기 연구 결과는 Stralen과 Sluyter⁽³⁾가 백금선을 수평 및 수직으로 설치하여 비등실험을 수행한 것을 들 수 있다. 결과에

† Corresponding Author, mgkang@andong.ac.kr
 © 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

의하면, 자연대류와 비등영역 모두에 걸쳐 수평 구조가 수직구조보다 효과적으로 열전달을 수행하는 것을 확인하였다. 주된 원인으로 기포군집 형성을 들고 있으며, 상대적으로 군집 형성이 더 많은 수직구조에서 기포 덩어리가 주변의 비등핵을 제한하기 때문에 열전달 경향이 서로 다르게 나타난다고 설명하고 있다.

Githinji 와 Sabersky⁽⁴⁾는 폭이 좁은 평판을 이용한 비등 실험을 수행하였으며, 평판이 상부로 향하는 수평구조부터 시작하여 수직을 거쳐 평판이 하부로 향하는 수평구조까지 경사각을 변경하면서 실험을 수행하였다. 가열 표면이 하부로 향하는 경우 기포군집 형성에 의해 열전달계수가 감소하는 것을 관찰하였으며, 열유속이 증가할수록 이러한 현상이 더욱 더 분명하게 나타남을 확인하였다.

Nishikawa 등⁽⁵⁾은 평판을 이용한 비등 실험을 수행하였는데, 평판의 설치 각도를 수평 상부부터 시작하여 거의 수직에 가까운 각도까지 변경하였다. 결과에 의하면, 경사각이 증가할수록 열전달계수가 증가하는 것을 확인하였으며, 이러한 경향은 저열유속 영역에서 분명하게 관찰되고 있다. 그러나 열유속이 증가하면 경사각의 영향이 사라지는 것을 보고하고 있다. Lienhard⁽⁶⁾가 고열유속 영역에서 경사각의 영향이 사라지는 것을 Moissis-Rerenson 천이를 들어 설명하였다.

Jung 등⁽⁷⁾은 경사진 평판과 R-11을 사용하여 고열유속 영역에서 경사각의 영향이 거의 관찰되지 않는 Nishikawa 등⁽⁵⁾의 연구 결과와 유사한 경향을 발견하였다. 한편, Fujita 등⁽⁸⁾은 서로 마주보는 두 개의 평판을 이용하여 경사각과 두 평판 사이의 틈새간격이 풀비등에 미치는 영향을 살펴보았으며, 경사각과 틈새 간격 사이에 서로 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 틈새 간격을 0.15mm 이하로 제한하면 비등 현상은 경사각의 영향을 받지 않는 것으로 보고하고 있다.

경사각이 튜브형식의 가열시편 표면의 풀비등에 미치는 영향은 Chun 과 Kang⁽²⁾이 표면거칠기와 연계하여 살펴본 것이 있다. Chun 과 Kang⁽²⁾에 의하면, 튜브 형식의 경우 표면거칠기가 가열면 경사에 따른 열전달 경향에 변화를 가져오는 것을 확인하였다. Kang⁽⁹⁾은 튜브 설치경사각이 45°인 경우 수직 및 수평구조 보다 향상된 열전달 특성을 기대할 수 있음을 확인하였다. 다양한

튜브 직경과 경사각에 대한 것은 Kang⁽¹⁰⁾에 의하여 연구된 바 있으며, 이러한 결과들을 정리하여 튜브 직경과 경사각 사이의 관계를 상세하게 규명한 것이 Kang⁽¹¹⁾에 의하여 발표되었다.

최근 들어, Narayan 등⁽¹²⁾은 나노입자가 함유된 유체 내부에서 튜브 경사각이 풀비등에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하고 수평구조인 경우 최대의 열전달 특성을 나타내고 있음을 보고하였다. Parker 와 El-Genk⁽¹³⁾는 다공질표면과 FC-12의 조합을 이용하여 경사각이 핵비등과 임계열유속(CHF, critical heat flux)에 미치는 영향을 살펴보았으며, Sateesh 등⁽¹⁴⁾은 다양한 유체에 대해 튜브 직경 및 표면거칠기와 결합된 경사각에 대한 연구를 수행하고 경사각 변경 시 튜브 원주면에 따라 국소 온도의 차이가 발생함을 보고하였다.

경사각이 임계열유속에 미치는 영향 역시 평판, 튜브, 제한된 공간 등의 여러 가지 기하학적 형상에 대해 연구되어 왔다.⁽¹⁵⁻²⁰⁾ 발표된 연구 결과들에 의하면, 임계열유속은 경사각에 따라 크게 달라진다. 특히, 제한된 공간의 경우 틈새간격이 매우 중요한 변수가 됨을 확인하였다.

기존에 연구된 결과들을 정리하면, 경사각이 풀비등에 미치는 영향은 기하학적 형상과 밀접하게 관련이 있다. Cornwell 과 Houston⁽²¹⁾이 제시한 것과 같이 튜브 표면의 비등은 평판에 대한 결과와는 서로 다르다. Fujita 등⁽⁸⁾이 평판에 대해 이미 확인한 바와 같이 튜브 형식에서도 제한된 공간과 그 틈새간격은 풀비등열전달에 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다. 저자가 아는 한 이러한 형식에 대한 연구는 Kang^(22,23)의 결과 이외에는 아직 없다. Kang⁽²²⁾은 틈새간격이 12.7mm인 환상공간에 대해 45°, 60°, 75°, 90°의 경사각의 영향을 살펴보았으며, Kang⁽²³⁾의 연구는 틈새간격이 15mm인 환상공간에 대해 수평부터 수직까지 경사각을 변화하면서 풀비등에 미치는 영향을 살펴보고 있다. 환상공간이 있는 경우 유로가 제한이 되기 때문에 풀비등 특성은 제한되지 않은 단일 튜브와는 서로 다르다. Kang⁽²³⁾에 의하면, 틈새간격이 15mm인 경우 경사각에 따른 열전달계수의 변화는 매우 크게 나오는 것을 알 수 있는데, 틈새간격 12.7mm인 이전 연구⁽²²⁾와는 약간 상이한 결과가 관찰된다. 따라서 환상공간의 경우 경사각이 풀비등에 미치는 영향은 틈새간격에 크게 의존한다는 것을 짐작할 수 있다. 본 연구에서는

더 좁은 틈새간격을 가지는 환상공간에 대한 연구를 수행함으로써 환상공간에 대한 이전의 연구를 개선함과 아울러 환상공간에서 경사각과 틈새간격이 풀비등에 미치는 영향을 상세하게 규명해 보려고 하며, 그 결과는 풀비등을 수반하는 환상공간 열설계 시 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 과정

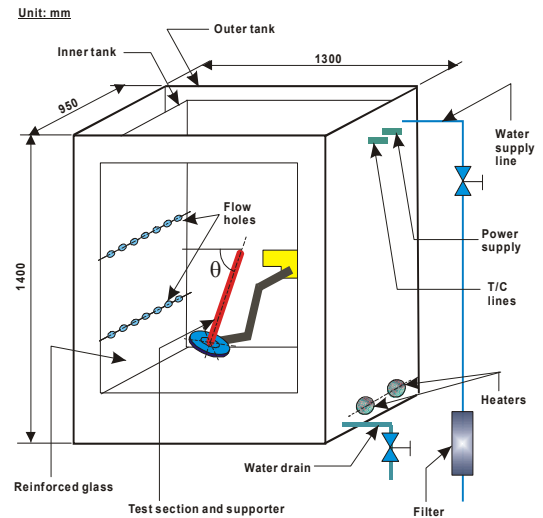
실험을 위하여 사용한 수조, 시편지지대, 그리고 시편의 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험을 위해 가로×세로×높이(내부길이)가 각각 1300×950×1400mm인 대형수조[Fig. 1(a)]를 사용하였다. 균일한 온도 유지를 위하여 2중벽 구조로 구성하였다. 안쪽과 바깥쪽 수조 사이의 공간에 용량이 5kW인 예열용 시편 4개를 설치하였다. 시편 설치와 각도 조절은 별도로 지지대를 만들어 사용하였으며, 시편에 대한 경사각은 수평으로부터 측정된 값을 나타낸다.

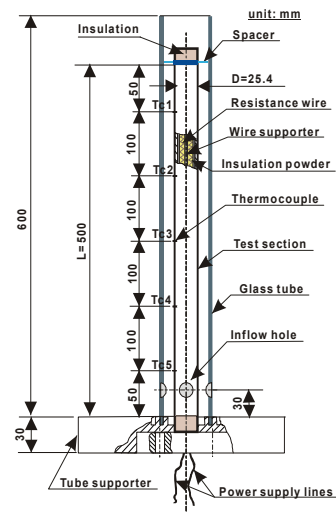
시편에 전달되는 열전달량을 조절/측정하기 위하여 공급되는 전압(V)과 전류(I)가 숫자로서 표시되는 출력 조절장치를 제작하여 사용하였다. 한편, 시편[Fig. 1(b)]은 내부에 전기저항선을 갖는 스테인리스강 튜브($L=500\text{mm}$, $D=25.4\text{mm}$)로 되어 있으며, 표면을 버핑(buffing)가공하여 아주 매끈하게 만들었다. 환상공간을 구현하기 위하여 Fig. 1(b)와 같이 내경 및 길이가 각각 35.4mm와 600mm인 유리관을 사용하였다.

튜브 표면과 수조 내부 물의 온도는 T-형식(지름=1.5mm) 열전대를 사용하여 측정하였다. 튜브 표면의 온도를 측정하기 위하여 5개의 열전대를 가열 표면에 설치하였다. 보다 정밀한 표면 온도 측정을 위하여 열전대 끝 부분을 대략 10mm 정도 튜브 표면에 등 간격으로 접합하였다. 물 온도는 표면에 등 간격으로 열전대를 접합한 튜브를 수조 구석에 수직으로 세워 측정하였다.

실험과정에 대하여 간단하게 살펴보면, 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 일정 높이(1100mm)로 물을 채운 후 예열히터를 이용하여 포화상태(100°C)까지 가열하였다. 포화상태에 도달 후 공기 등을 제거할 목적으로 약 30분 정도 추가적인 가열을 수행한 후 시편의 열유속을 변화시키면서 시편 온도를 측정했다. 보다 정밀한 온도의 산출을 위하여 측정값들에 대한 산술평균을 취하여



(a) water tank



(b) assembled test section

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

그 열유속에 대한 온도로 결정하였다. 하나의 각도에 대한 실험이 끝나면 시편의 각도를 변경하여 실험을 수행하였다.

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

$$q'' = \frac{VI}{\pi DL} = h_b \Delta T_{sat} = h_b (T_W - T_{sat}) \quad (1)$$

여기서, V 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 튜브 표

면 온도와 물의 포화온도를 나타낸다.

측정값에 대해 오차확산법칙(error propagation law)⁽²⁴⁾을 사용하여 불확실도를 분석하였다. 측정된 온도에 대한 불확실도는 $\pm 0.11^{\circ}\text{C}$ 이며, 열유속에 대한 불확실도는 $\pm 0.7\%$ 이다. 비등열전달계수는 $q''/\Delta T_{sat}$ 의 계산을 거쳐 결정되므로 결과에 대해 통계분석 수행 후 오차확산법칙을 적용하여 불확실도를 결정하였으며 $\pm 6\%$ 의 값을 가진다.

3. 결과 및 토론

측정값의 반복 재현성을 입증하기 위하여 경사각이 15° 인 경우에 대해 튜브 표면에서의 모든 온도들을 두 번씩 측정된 후, 첫 번째 측정된 온도와 두 번째 측정된 온도의 비를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 국소 위치에서 측정된 총 60개의 온도

비에 대한 결과는 전 열유속 범위에 걸쳐서 $\pm 0.5\%$ 범위 내에 들어온다. 주어진 열유속에 대해 다섯 개의 국소온도를 산술 평균한 평균 과열도에 대한 결과를 Fig. 2(b)에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 국소 온도와 평균 온도 모두 양호한 반복 재현성을 나타내고 있다.

실험에서 얻어진 열유속, 온도과열도, 그리고 비등열전달계수 사이의 관계는 Fig. 3과 같다. 튜브 설치 경사각의 변화는 열전달에 변화를 초래하며, Fig. 3(a)에 나타낸 것처럼 $q'' \leq 60\text{kW/m}^2$ 의 저열유속 영역에서 경사각의 영향이 상대적으로 분명하게 관찰된다. 경사각의 증가는 열전달계수의 증가를 초래하며, $\theta=45^{\circ}$ 일 때 최대의 값을 가진다. 경사각이 이 값보다 큰 경우 열전달계수는

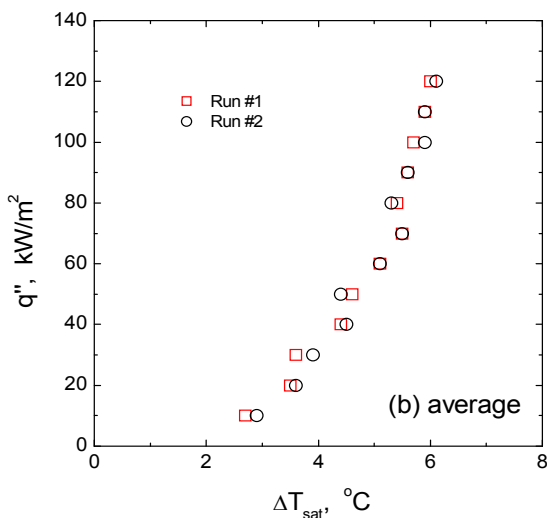
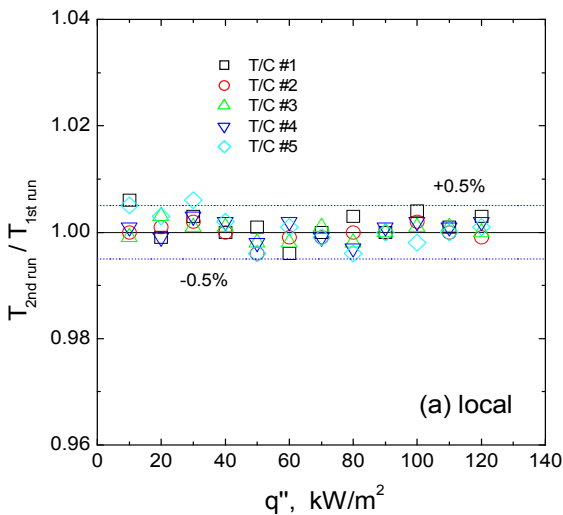


Fig. 2 Data plots to verify reproducibility

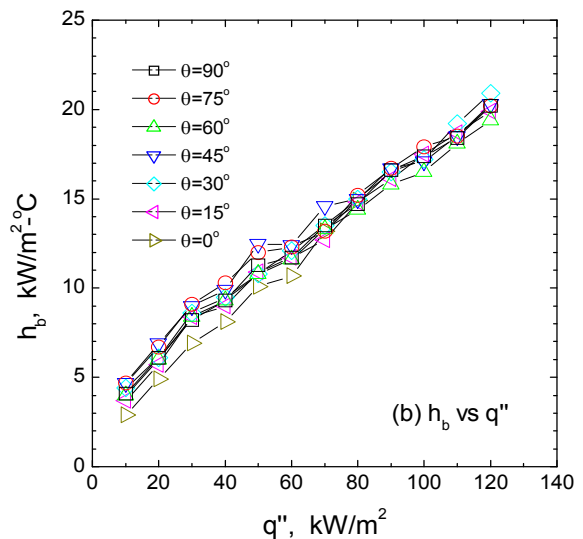
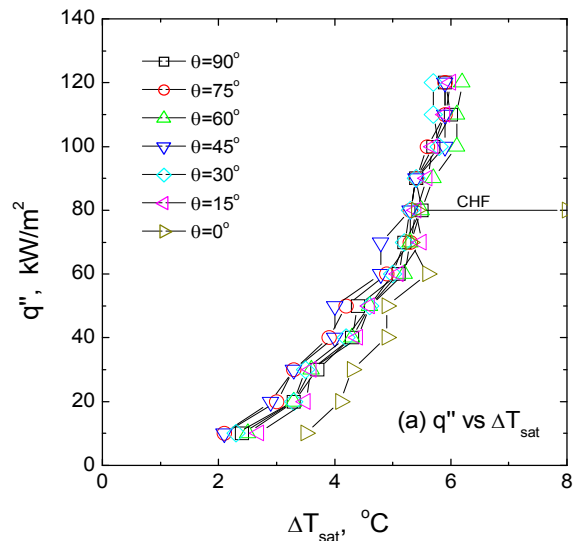


Fig. 3 Curves of experimental data

약간 감소하는 경향을 나타낸다. 그렇지만, 수평 구조($\theta=0^\circ$)를 제외하면 튜브 경사각은 열전달계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타난다.

이러한 경향은 Kang⁽²³⁾이 15mm 틈새간격을 가지는 환상공간에 대해 연구한 결과와는 많은 차이가 나며, 두개의 평판 사이 틈새공간에서 발생하는 풀비등특성⁽⁸⁾과 서로 유사하다. Fig. 3a에서 열유속 값이 70kW/m^2 일 때 경사각을 0° 부터 90° 로 변경하면 $s=15\text{mm}$ 인 환상공간⁽²³⁾에서 ΔT_{sat} 가 31.1%(6.1°C 에서 4.2°C) 감소하는데 비해 $s=5\text{mm}$ 인 경우에는 ΔT_{sat} 가 1.9%(5.3°C 에서 5.2°C)만 감소하고 있어 틈새간격이 작은 경우 경사각이 풀비등열전달에 미치는 영향은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 특히, 틈새간격이 5mm인 본 연구에서는 틈새간격이 15mm인 환상공간⁽²³⁾과 환상공간이 없는 단일튜브인 경우⁽¹¹⁾ 나타나지 않던 임계열유속의 발생이 관찰된다. 튜브가 수평($\theta=0^\circ$)으로 설치된 경우 80kW/m^2 에서 튜브 표면 온도가 급격하게 증가하는 임계열유속이 발생하며, 발생 위치는 중간 지점($Tc\#3$)이다.

수평으로 설치된 튜브의 경우 튜브 표면에서 발생한 기포는 환상공간의 양 쪽 끝단을 통하여 환상공간의 바깥으로 배출된다. 열유속이 증가하면 기포의 양이 증가하면서, 양 끝단으로 제때 배출되지 못한 기포들이 환상공간의 길이 중간 위치의 상부영역에 모여 큰 기포덩어리를 형성한다. 열유속이 증가함에 따라 기포덩어리의 체적이 증가하면서 어느 순간 기포덩어리 밑에 존재하는 얇은 액막이 증발에 의하여 없어지면서 기포 하부의 열전달 표면이 건조해지게 된다. 가열면이 건조해지면 이 부분의 온도가 짧은 시간에 급격하게 상승하게 된다. 열유속이 80kW/m^2 인 경우 이러한 현상이 발생하며, 튜브 원주면을 따라 상부면의 온도가 향상되면서 튜브는 원주면의 상·하부간 온도차에 따라 굽어지게 되어 가열면이 바깥 유리관에 닿게 되는 현상이 발생한다.

열유속에 따른 열전달계수의 변화는 Fig. 4와 같다. 본 실험의 결과를 틈새간격이 15mm인 환상공간⁽²³⁾과 환상공간이 없는 단일튜브인 경우⁽¹¹⁾에 대한 결과와 서로 비교하였다. 환상공간의 경우 가열면으로부터 이탈한 기포는 틈새 공간을 따라 환상공간의 바깥으로 이동하게 되며, 이 때 기포 군집 형성과 강한 액체교란 효과를 유발하게 된다. 경사각이 증가함에 따라 액체교란 효과

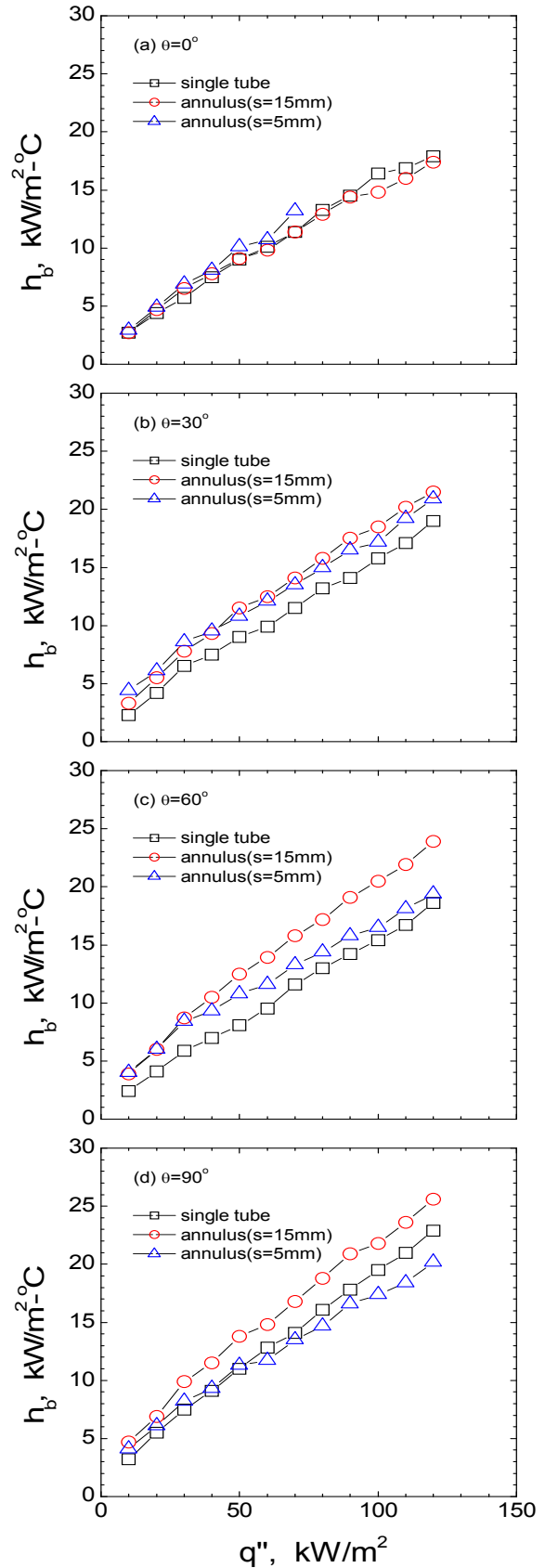


Fig. 4 Curves of h_b versus q'' as θ changes

가 증가하면서 열전달계수가 향상되게 된다. 틈새공간이 좁은 $s=5\text{mm}$ 인 경우, 틈새공간이 큰 $s=15\text{mm}$ 인 경우보다 기포의 이탈이 원활하지 못하므로 기포군집 형성에 따른 열전달계수의 증가가 둔화되는 경향이 나타난다. 환상공간의 경우 기포가 좁은 공간을 따라 이동하기 때문에 경사각이 작은 경우에도 액체교란 효과가 크게 나타남에 비해 환상공간이 없는 단일튜브는 경사각이 어느 정도 증가하면서 액체교란 효과가 분명하게 관찰된다. 따라서 수평구조의 경우에는 $s=5\text{mm}$

인 환상공간이 열전달이 제일 잘 되다가 수직구조로 바뀌면서 열전달이 제일 잘 안 되는 경향을 나타내게 된다.

경사각에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 틈새간격에 따른 열전달계수의 크기를 서로 비교하기 위해 $s=12.7\text{mm}$ 에 대한 결과⁽²²⁾ 및 $s=15\text{mm}$ 에 대한 결과⁽²³⁾를 함께 나타내었다. 비교를 위하여 설정한 40, 80, 120kW/m²의 열유속 모두에서 경사각의 증가는 일반적으로 열전달계수를 증가시키는 경향을 나타낸다. 틈새간격이 큰 $s=15\text{mm}$ 인 환상공간의 경우 경사각 증가에 따라 열전달계수가 큰 폭으로 증가한다. 그렇지만 $s \leq 12.7\text{mm}$ 인 경우 경사각 증가가 열전달계수에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 평가된다. 풀비등열전달에서 환상공간을 고려하는 가장 큰 이유는 기포의 운동에 따른 액체 교란 효과가 강하게 나타나 열전달이 증가하기 때문이다. 틈새간격이 줄어들면 환상공간으로부터의 기포 배출이 원활하지 않게 되면서 좁은 틈새 공간

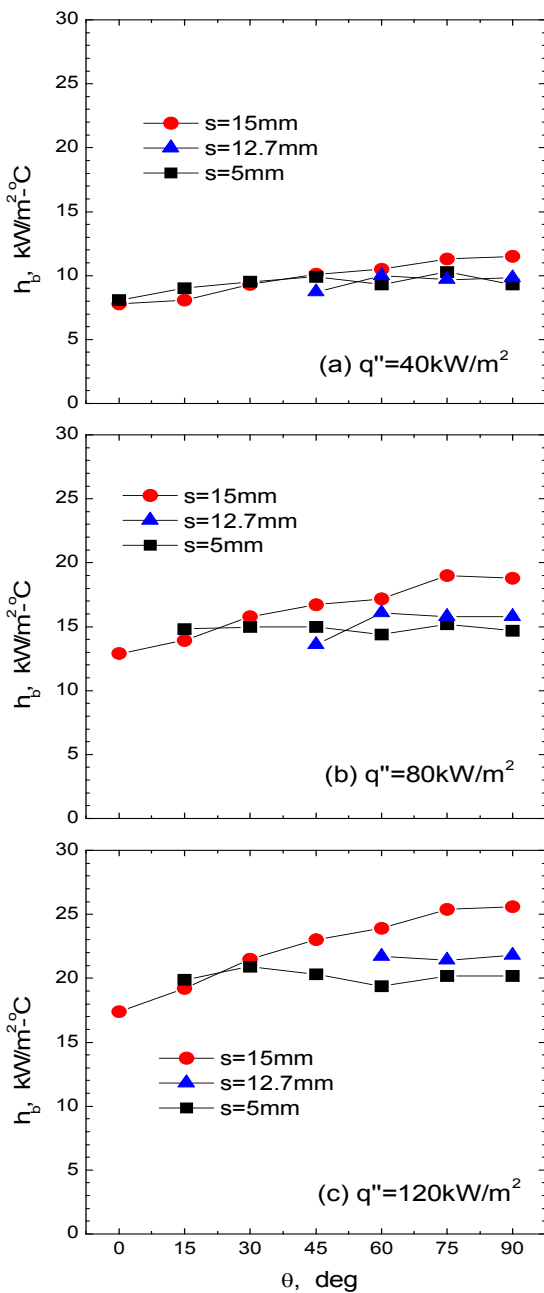


Fig. 5 Changes in heat transfer coefficients as inclination angle increases

Table 1 Experimental data of q'' versus ΔT_{sat}

D mm	θ rad	s mm	q'' kW/m ²	Number of data
25.4	0	5	0-70	7
25.4	0.26	5	0-120	12
25.4	0.52	5	0-120	12
25.4	0.79	5	0-120	12
25.4	1.05	5	0-120	12
25.4	1.31	5	0-120	12
25.4	1.57	5	0-120	12
25.4	0	15	0-120	12
25.4	0.26	15	0-120	12
25.4	0.52	15	0-120	12
25.4	0.79	15	0-120	12
25.4	1.05	15	0-120	12
25.4	1.31	15	0-120	12
25.4	1.57	15	0-120	12
30	0.79	12.7	0-90	9
30	1.05	12.7	0-120	12
30	1.31	12.7	0-120	12
30	1.57	12.7	0-120	12

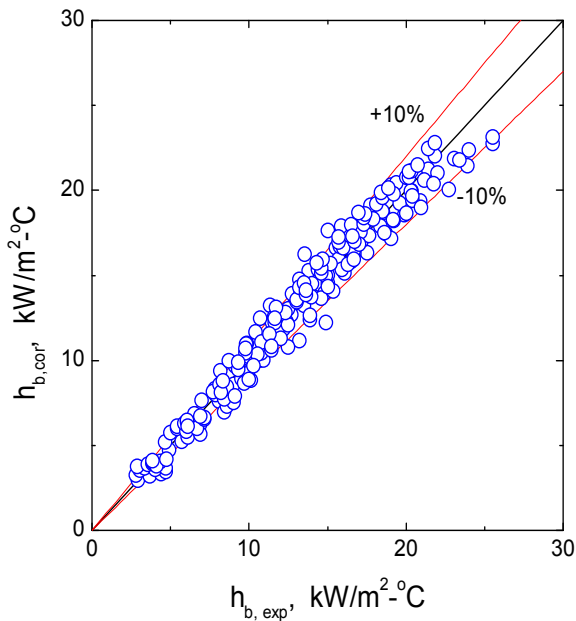


Fig. 6 Comparison of experimental data to calculated heat transfer coefficients

내부에 형성되는 기포덩어리의 크기가 증가하게 되고 이 기포덩어리가 액체 교란에 따른 열전달 상승효과를 상쇄하면서 열전달계수의 증가를 둔화시키는 결과를 초래한다.

기존 연구^(22,23) 및 본 연구를 통하여 열유속 대비 과열도에 대한 모두 209개의 데이터를 다양한 틈새간격과 경사각을 고려하여 선정하였으며, 그 내역은 Table 1과 같다. 경사각이 열전달계수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 간단한 실험식을 제안하였다. 상관식 개발을 위하여 Table 1에 나타난 실험값과 회귀분석(regression) 기법으로 최소자승법을 이용한 통계프로그램을 사용하였으며, 그 결과로 얻어진 식은 다음과 같다.

$$h_b = \left(\frac{1}{-0.25\theta + 1.85} \right) q''^{(0.68e^{-0.07\theta} + 0.1\sqrt{\theta})} s^{0.08} \quad (2)$$

위 식에서 h_b 와 q'' 는 각각 $\text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 와 kW/m^2 의 단위를 가지며, θ 는 rad, s 는 mm의 단위를 가진다. 새롭게 제안된 실험적 상관식은 $s=5 \sim 15\text{mm}$ 범위를 가지는 환상공간에서 유용하며, $D=25.4 \sim 30\text{mm}$, $L=500 \sim 540\text{mm}$, $\theta=0 \sim \pi/2\text{rad}$ 의 범위에서 유용하다. 비록, 상관식의 활용범위가 매우 제한되고, 식 자체가 무차원으로 이루어져 있지 않지만, 틈새간격과 경사각을 한 번에 포함하는 식을 제시함으로써 두 가지의 영향을 한꺼번에 정량적으로 살펴볼 수 있다는 데 큰 의미를 둘 수

있으며, 경사각만을 포함하고 있는 Kang⁽²³⁾의 결과를 개선한 식이다.

실험으로부터 얻어진 열전달계수($h_{b,exp}$)와 새롭게 제안한 상관식인 식 (2)를 이용하여 계산한 결과($h_{b,cor}$)를 Fig. 6에 나타내었다. 약간의 값들을 제외하면, 새롭게 제안한 식은 실험값을 $\pm 10\%$ 범위 이내에서 잘 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 정도의 예측은 풀비등열전달 자체가 가지고 있는 고유한 불확실성⁽²¹⁾을 감안할 때 매우 잘 맞는 것이라고 평가할 수 있다.

3. 결론

하부유로가 개방된 환상공간의 경사각과 틈새간격이 대기압 하에 놓여있는 포화상태인 물의 풀비등에 미치는 영향을 조사하기 위해 $s=5\text{mm}$ 인 환상공간에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 기존의 연구 결과들과 서로 비교하면서 분석하였다. 환상공간의 내부에 설치된 스테인리스강 재질의 매끈한 튜브를 가열하였으며 튜브의 직경과 길이는 각각 25.4mm 와 500mm 이다. 경사각은 수평부터 수직까지 15° 간격으로 변경하였으며, 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 경사각이 증가하면 $s=15\text{mm}$ 인 경우 열전달계수의 변화가 크게 나타남에 비해 $s \leq 12.7\text{mm}$ 인 경우 열전달계수의 변화가 크지 않다.
- (2) $\theta=90^\circ$ 인 경우, 80kW/m^2 에서 임계열유속이 발생되며 그 위치는 튜브 길이 중간지점이다.
- (3) 본 연구와 같이 경사각과 환상공간이 결합된 경우 액체 교란과 기포군집형성이 주된 열전달 기구로 작용한다.
- (4) 경사각과 틈새간격을 포함하는 실험적 상관식을 새롭게 제안하였으며, 새로운 식은 실험값을 $\pm 10\%$ 범위 이내에서 잘 예측하고 있다.

참고문헌

- (1) Shoji, M., 2004, "Studies of Boiling Chaos: a Review," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 1105~1128.
- (2) Chun, M. H. and Kang, M. G., 1998, "Effects of Heat Exchanger Tube Parameters on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 120, pp. 468~476.
- (3) van Stralen, S. J. D. and Sluyter, W. M. 1969,

- "Investigations on the Critical Heat Flux of Pure Liquids and Mixtures under Various Conditions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, pp. 1353~1384.
- (4) Githinji, P. M. and Sabersky, R. H., 1963, "Some Effects of the Orientation of the Heating Surface in Nucleate Boiling" *ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 85, p. 379.
- (5) Nishikawa, K., Fujita, Y., Uchida, S. and Ohta, H., 1984, "Effect of Surface Configuration on Nucleate Boiling Heat Transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 9, pp. 1559~1571.
- (6) Lienhard, J. H., 1985, "On the Two Regimes on Nucleate Boiling," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 107, pp. 262~264.
- (7) Jung, D. S., Venant, J. E. S., and Sousa, A. C. M., 1987, "Effects of Enhanced Surfaces and Surface Orientations on Nucleate and Film Boiling Heat Transfer in R-11," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 12, pp. 2627~2639.
- (8) Fujita, Y., Ohta, H., Uchida, S., and Nishikawa, K., 1988, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Narrow Space between Rectangular Spaces," *Int. J. of Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 2, pp. 229~239.
- (9) Kang, M. G., 2000, "Effect of Tube Inclination on Pool Boiling Heat Transfer," *ASME, J. of Heat Transfer*, Vol. 122, Issue 1, pp. 188~192.
- (10) Kang, M. G., 2003, "Effects of Tube Inclination on Pool Boiling Heat Transfer," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 220, pp. 67~81.
- (11) Kang, M. G., 2008, "Effects of Tube Inclination on Saturated Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 32, No. 1, pp. 116~124.
- (12) Narayan, G. P., Anoop, K. B., Sateesh G. and Das, S. K., 2008, "Effects Surface Orientation on Pool Boiling Heat Transfer on Nanoparticle Suspensions," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 34, pp. 145~160.
- (13) Parker, J. L. and El-Genk M. S., 2006, "Effect of Surface Orientation on Nucleate Boiling of FC-72 on Porous Graphite," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 1159~1175.
- (14) Sateesh, G., Das, S. K. and Balakrishnan, A. R., 2009, "Experimental Studies on the Effect of Tube Inclination on Nucleate Pool Boiling," *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1493~1502.
- (15) Howard, A. H. and Mudawar, I., 1999, "Orientation Effects on Pool Boiling Critical Heat Flux(CHF) and Modeling of CHF for Near-Vertical Surfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1665~1688.
- (16) El-Genk, M. S. and Bostanci H., 2003, "Saturation Boiling of HFE-7100 from a Copper Surface, Simulating a Microelectric Chip," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 1841~1854.
- (17) Kim, Y. H. and Suh, K. Y., 2003, "One-dimensional Critical Heat Flux Concerning Surface Orientation and Gap Size Effects," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 226, pp. 277~292.
- (18) Liu, Z. and Zhang, T., 2004, "Critical Heat Flux during Natural Convection Boiling in Inclined Annular Tubes Submerged in Saturated Liquids," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 169~179.
- (19) Liu, Z., Liao, L., and Zhang, T., 2008, "Critical Heat Flux of Countercurrent Boiling in an Inclined Small Tube with Closed Bottom," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 995~1000.
- (20) Misale, M., Guglielmini, G., and Priarone, A., 2009, "HFE-7100 Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Inclined Narrow Spaces," *Int. J. Refrigeration*, Vol. 32, pp. 235~245.
- (21) Cornwell, K. and Houston, S. D., 1994, "Nucleate Pool Boiling on Horizontal Tubes: a Convection-Based Correlation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, Suppl. 1, pp. 303~309.
- (22) Kang, M. G., 2008, "Effects of the Inclination Angle on Pool Boiling in an Annulus," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 5018~5023.
- (23) Kang, M. G., 2010, "Pool Boiling Heat Transfer on the Tube Surface in an Inclined Annulus," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 3326~3334.
- (24) Coleman, H. W. and Steele, W. G. 1999, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, 2nd Ed., John Wiley&Sons.