

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.5.327

## 튜브 경사각이 포화풀핵비등 열전달에 미치는 영향

강 명 기\*

(2007년 11월 5일 접수, 2008년 2월 21일 심사완료)

### Effects of Tube Inclination on Saturated Nucleate Pool Boiling Heat Transfer

Myeong-Gie Kang

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

#### Abstract

Effects of tube inclination on pool boiling heat transfer have been studied for the saturated water at atmospheric pressure. For the analysis, seven inclination angles varying from the horizontal to the vertical and two tube diameters(25.4 and 30.0 mm) are tested. According to the results, inclination angles result in much change on heat transfer. For the same wall superheat(about 5.3°C) the ratio between two heat fluxes for the 45° inclined and the vertical has the value of more than five when the tube diameter is 25.4mm. As the inclination angle is increasing from the horizontal to the vertical direction heat transfer is gradually increasing because of the increase in liquid agitation. However the detailed tendency depends on the ratio between the tube length and the diameter.

#### 1. 서론

#### 기호설명

$D$	:	가열 튜브 직경
$h_b$	:	열전달 계수
$I$	:	공급전류
$L$	:	가열 튜브 길이
$q''$	:	열유속
$T_{sat}$	:	포화온도
$T_W$	:	튜브 표면 온도
$V$	:	공급전압
$\Delta T_{sat}$	:	과열도(= $T_W - T_{sat}$ )
$\theta$	:	설치각도

능동형시스템(active system)을 채택한 열전달 방법의 경우, 펌프에 의해 유체의 순환이 지속되어야 하므로 전원이 상실되는 경우 열전달을 효과적으로 수행하기 어렵다. 전원이 상실된 경우에도 필요한 만큼의 열 제거를 지속적으로 수행함으로써 고유 안전성을 확보해야 하는 설비(예를 들면, 원자력발전소)의 경우 피동형 설비에 대한 요구 및 연구가 지속되어 오고 있다. 피동형 설비 채택 시 열전달 관점에서 핵심이 되는 부분은 풀비등열전달이 발생하는 설비들<sup>(1~3)</sup>이며, 이들 설비들은 대개의 경우 설치 공간이 극히 제한되어 있으므로, 주어진 공간에서 원하는 기능을 충분히 달성해야 되는 문제점에 봉착하게 된다. 좁은 공간에서 효율적으로 열전달 기능을 수행하기 위해서는 풀비등열전달에 대한 특성을 분명하게 규명하는 것이 선행요건이다.

풀비등열전달에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중 설치각도( $\theta$ )에 대한 부분은 여러 가지 형상에

\* 책임저자, 회원, 안동대학교 기계교육과  
E-mail : mgkang@andong.ac.kr  
TEL : (054)820-5483 FAX : (054)823-1766

대하여 꾸준히 연구되어지고 있는 주제이다. 그 이유로 들 수 있는 것은 이것이 보다 향상된 성능을 가지는 열교환기나 열 제거 계통의 설계와 밀접하게 관계가 있기 때문이며, 동일한 형상인 경우에도 그 설치각도에 따라 다양한 열전달 기구가 영향을 미칠 수 있기 때문이다.<sup>(4)</sup> 가열 면으로 사용되어온 형상으로는 튜브, 평판, 그리고 선(wire)형식이 있으며, 서로 다른 액체와의 조합을 통한 열전달 특성 규명에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.

설치방향에 대한 본격적인 연구는 Jakob<sup>(5)</sup>에 의하여 이루어졌다. Jakob<sup>(5)</sup>은 액체가 물인 경우에 대해 커다란 용기 내부에 설치한 가열시편의 설치방향(수평 또는 수직)을 고려한 실험식을 제안했다. 결과에 의하면, 열유속( $q''$ )이  $11.8\text{kW/m}^2$  보다 작은 경우, 수평구조( $\theta=0^\circ$ )가 수직구조( $\theta=90^\circ$ )보다 열전달이 잘되지만, 열유속이 이 값보다 증가하면 수직구조가 열전달이 더 잘되고 있다. 따라서 열전달에 영향을 미치는 주요 기구가 시편 설치각도와 열유속의 크기 등에 따라서 변할 수 있음을 알 수 있다.

Stralen과 Sluyter<sup>(6)</sup>는 백금선을 수평 및 수직으로 설치하였을 때 대기압 상태인 수조 내부에서의 풀비등열전달을 관찰하였다. 그들에 의하면, 자연대류 영역과 핵비등 영역 모두에 걸쳐서 수평으로 설치한 경우가 수직으로 설치한 경우보다 열전달이 잘되고 있으며, 그 주된 원인은 활성핵(active nucleation site)의 생성을 방해하는 기포 군집 형성에 있는 것으로 해석하고 있다.

가열면이 평면인 경우에 대한 흥미로운 결과는 Githinji와 Sabersky<sup>(7)</sup>의 연구에서 나타나고 있다. 연구를 위하여 사용한 형상은 평판으로서 가는 띠 모양의 것이며, 가열면의 설치각도를 수평상방향( $\theta=0^\circ$ ), 수직( $\theta=90^\circ$ ), 그리고 수평하방향( $\theta=180^\circ$ )으로 변화하면서 풀비등열전달에서 중력이 미치는 영향이 중요함을 보여주었다. 특히, 수평하방향의 경우 기포가 원활하게 배출되지 않아 열유속 증가에 따라 열전달계수가 매우 떨어지는 현상을 나타내고 있다.

평판에 대한 보다 구체적인 연구는 Nishikawa 등<sup>(8)</sup>에 의하여 이루어 졌다. 이들은 물속에 잠긴 수평판을 이용하여 설치각도( $\theta=0^\circ\sim 175^\circ$ )의 영향을 살펴보고 있다. 결과에 의하면, 설치각도의 영향은 저열유속 영역에서 분명하게 나타나고 있

며, 설치 각도의 증가에 따라 열전달계수가 증가하고 있다. 그러나 열유속이 증가하면 설치각도가 열전달계수에 미치는 영향은 없어지는 것으로 보고하고 있다. 이러한 현상에 대한 원인으로 저열유속에서는 기포운동에 의한 주변 액체의 교란(agitation)을, 고열유속 영역에서는 기포군집형성을 제시하고 있다.

한편, Jung 등<sup>(9)</sup>은 가열면이 평판이면서 액체가 R-11인 경우 설치각도가  $0^\circ\sim 180^\circ$  범위내에서 변화할 때 그 영향을 살펴보았는데, Nishikawa 등<sup>(8)</sup>의 결과와 유사한 경향을 제시하고 있다. 수평판에 대한 추가적인 결과는 Fujita 등<sup>(10)</sup>의 문헌에서 살펴볼 수 있다. 이들은 평판 두 개를 서로 마주보게 설치한 후 틈새와 가열면 설치각도의 영향을 복합적으로 살펴보고 있다. Fujita 등<sup>(10)</sup>에 의하면, 설치각도의 영향은 틈새간격과 밀접하게 관계가 있는 것으로 확인할 수 있는데  $\theta=150^\circ$  일 때 틈새 간격이 줄어들면서 열전달계수가 현저하게 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Howard와 Mudawar<sup>(11)</sup>는 설치방향이 평판 표면의 임계열유속(CHF, critical heat flux)에 미치는 영향을 살펴보고 있으며, 최근 들어 El-Genk와 Bostanci<sup>(12)</sup>는 전자칩에 적용하기 위한 연구로서 작은 평판 모양을 가지는 구리 시편의 설치방향이 HFE-7100의 포화 비등에 미치는 영향을 살펴본 것이 있다.

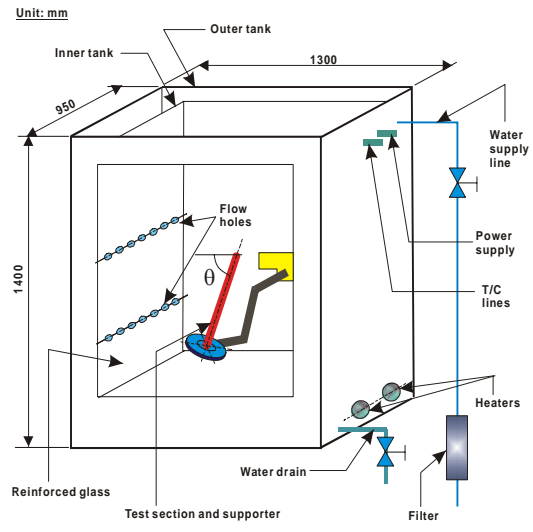
평판에 대한 것은 다수의 연구자들<sup>(7~12)</sup>에 의하여 임계열유속 영역까지 광범위하게 연구되어 오고 있음에 비하여 튜브 구조에 대한 것은 그 중요성에 비해 거의 연구되지 않았다. Chyu와 Mghamis<sup>(13)</sup>는 두 개의 튜브가 서로 접촉하고 있는 시편과 단일 튜브를 수직 및 수평으로 각각 설치하여 그 영향을 살펴보고 있다. 그들에 의하면, 단일 튜브인 경우 수직으로 설치한 것이 수평으로 설치한 것보다 열전달이 다소 잘 되고 있는 것에 비하여 두 개의 튜브를 접촉한 경우(단순 또는 꼬임 접촉)에는 수평구조가 열전달이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Cornwell과 Houston<sup>(14)</sup>에 의하면 선에 대한 결과는 튜브구조에 그대로 적용할 수 없다. 그 주된 이유는 서로 간에 기포가 형성되는 기구와 열전달 방식에 차이가 있기 때문이다. 또한, 평판에 대한 결과 역시 튜브 구조에 그대로 적용할 수 없는데, 이것은 평판과 튜브가 기하학적으로 너

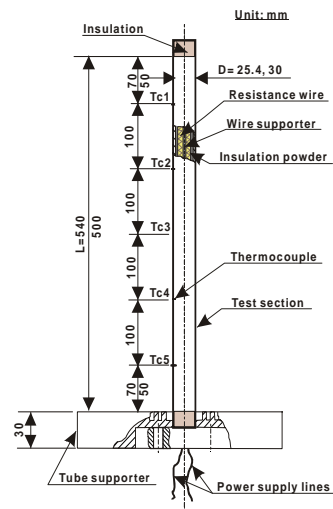
무 차이가 나며, 그에 따라 기포 발생 및 성장 등의 기구가 상당부분 차이가 나기 때문이다. 이러한 이유로 인하여 Chun과 Kang<sup>(1)</sup> 그리고 Kang<sup>(4)</sup>에 의하여 튜브 구조에 대한 연구가 일부 수행되었으며, 그 결과 선이나 평판의 결과와는 상당히 차이가 나는 경향을 튜브구조에 대하여 제시하였다. 따라서 튜브 구조에 대한 것은 선이나 평판의 경우와는 차별화시켜 적용하는 것이 필요하다.

Kang<sup>(4)</sup>은 가열 튜브의 설치각도가 대기압 상태인 물의 포화폴핵비등에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 두 가지 튜브직경 ( $D=12.7, 19.1\text{mm}$ )에 대해 수평부터 수직으로 변하는 다양한 설치각도에 대한 실험 및 분석을 수행하였다. Kang<sup>(4)</sup>에 의하면, 튜브 설치각도는 풀비등열전달에 많은 영향을 미치며, 그 효과는 설치각도가 수평이나 수직에 가까워질수록 크게 나타나고 있음을 확인하였다. 튜브 직경이 12.7, 19.1mm인 경우 열전달이 가장 잘되는 각도는 각각  $15^\circ$ 와  $30^\circ$ 이다. 이러한 경향은 설치각도가 달라지면서 기포군집 형성과 주변 액체의 교란이 열전달에 미치는 영향이 변하기 때문으로 해석하고 있다.

기존의 연구 결과들을 정리하면, 가열면의 설치방향이 비등열전달에 미치는 영향의 정도는 가열면의 형상, 열유속의 크기, 그리고 표면거칠기에 밀접하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 비록, 지난 수십 년 동안 많은 연구가들이 설치방향과 비등열전달량과의 관계를 규명하기 위하여 노력해왔지만 아직까지 서로 상충되는 부분과 분명하게 규명되지 않은 분야가 남아있는 실정이다. 특히, 튜브 구조에 대한 연구 결과가 매우 부족한 것을 알 수 있다. 튜브 구조는 일반적으로 적용되는 열교환기에 가장 광범위하게 사용되는 형상이며, 신형원전에 적용되는 피동형 설비도 대부분 튜브 형상을 가지고 있다. 또한, 열교환기에 적용되는 방향도 수평에서 수직까지 다양하게 채택되고 있다. 따라서 본 연구에서는 Kang<sup>(4)</sup>이 연구한 것과 다른 튜브 직경을 이용하여 설치각도 변화에 따른 풀비등열전달에 대한 추가적인 연구를 수행함으로써 Kang<sup>(4)</sup>의 연구를 확장함은 물론, 설치각도와 풀비등열전달 사이의 관계를 보다 더 상세하게 규명하고자 한다. 이렇게 함으로써 향상된 열교환기 설계를 위한 자료를 축적하는데 기여할 수 있을 것으로 생각한다.



(a) water tank



(b) assembled test section

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

## 2. 실험장치 및 과정

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

실험을 위하여 가로 × 세로 × 높이가 각각 1300×950×1400mm(내부길이)인 대형수조를 사용하였으며, 두께 50mm 정도의 단열재로 단열을 하였다[Fig. 1(a)]. 또한, 균일한 온도 유지를 위하여 2중벽 구조로 구성하였으며, 수조를 서로 구분하는 좌·우 벽면에 구멍을 내어 유체가 유동할

수 있도록 하였다. 이 때, 외부 수조의 유체 유동이 내부 수조에서의 열전달에 미치는 영향을 최소화하도록 구멍 크기(28mm)와 위치(내부수조 바닥면으로부터 300, 800mm 높이)를 배열하였다. 구멍의 개수는 각각의 위치에 7개씩, 한쪽 벽면에 14개씩이다. 시편은 안쪽수조의 내부에 설치하였으며 안쪽 수조와 바깥쪽 수조 사이의 공간에 하나 당 용량이 5kW인 예열용 시편 4개를 왼쪽과 오른쪽 벽면에 각각 2개씩 설치하였다. 수조의 전면은 열전달 현상의 관찰과 사진 촬영을 위해 강화유리를 설치했다.

시편 설치와 각도 조절은 별도로 지지대를 만들어 사용하였다[Fig. 1(a)]. 지지대의 한쪽은 내부 수조의 벽면에 고정되며, 다른 쪽은 시편을 고정시키도록 되어 있다. 이 지지대는 볼트 및 너트로 고정되며, 각도 조절과 시편 교체를 위해 필요시 너트를 자유롭게 풀 수 있도록 되어 있다.

시편에 전달되는 열전달량을 조절/측정하기 위하여 공급되는 전압( $V$ )과 전류( $I$ )가 숫자로서 표시되는 출력 조절장치를 제작하여 사용하였다. 한편, 시편은 내부에 전기저항선을 갖는 스테인리스강 튜브( $L=500, 540\text{mm}$ ,  $D=25.4, 30.0\text{mm}$ )로 되어 있으며, 표면을 버핑(buffing)가공하여 아주 매끈하게 만들었다. 튜브 표면과 수조 내부 물의 온도는 본 연구에서 선택한 온도 범위에 대해 오차가 적다고 알려진 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[Fig. 1(b)]. 수조 내부 물의 온도는 표면에 등 간격으로 열전대를 접합한 튜브를 수조의 구석에 수직으로 세워 고정한 후 측정하였다.

실험과정에 대하여 간단하게 살펴보면, 대기압 상태 하에 있는 수조 내부에 일정 높이(1100mm)로 물을 채운 후 예열히터를 이용하여 포화상태( $100^\circ\text{C}$ )까지 가열하였다. 포화상태에 도달 후 공기 등을 제거할 목적으로 약 30분 정도 추가적인 가열을 수행한 후 시편의 열유속을 변화시키면서 시편 온도를 측정했다. 모든 온도는 표면 온도가 정상상태에 도달하였을 때(3분 정도 소요) 열전대 읽음 값을 데이터 처리 장치(DAS, data acquisition system)를 사용하여 측정하였다. 보다 정밀한 온

도의 산출을 위하여 측정값들에 대한 산술평균을 취하여 그 열유속에 대한 온도로서 결정하였다. 하나의 각도에 대한 실험이 끝나면 시편의 각도를 변경하여 실험을 수행하였으며, 하나의 직경에 대한 실험이 완료된 후 다른 직경에 대한 실험을 수행하였다.

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

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

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 표면 온도와 물의 포화온도를 나타낸다.

측정한 전압 및 전류에 대한 불확실도는 각각 0.5% 이다. 열유속에 대한 불확실도는 시편 치수에 대한 불확실도를 무시하면 전달한 동력의 불확실도와 같아지므로 전압과 전류의 곱으로부터 구할 수 있다. 따라서 열유속은  $\pm 1.0\%$ 의 불확실도를 가진다. 측정된 온도에 대한 불확실도는 열전대 접점의 오차, 접합부 오차, 그리고 계측기 변환오차의 합으로 나타낼 수 있으며, 그 값은  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  이다. 한편, 열전달계수에 대한 불확실도는  $\dot{q}''/\Delta T_{sat}$ 의 계산을 거쳐서 결정되며,  $\pm 10\%$ 의 값을 가지는 것으로 평가된다.

### 3. 결과 및 토론

Fig. 2는 열유속 변화에 따른 과열도의 변화를 튜브 경사각에 따라서 나타낸 것이다. 동일 열유속에 대한 과열도는 튜브 직경 및 경사각에 따라서 다르게 나타난다.  $\dot{q}''=60\text{kW/m}^2$ 인 경우 설치 각도가 수평( $\theta=0^\circ$ )에서 수직( $\theta=90^\circ$ )까지 변화할 때 과열도의 변화는  $D=25.4\text{mm}$ 인 경우 21.7% ( $6^\circ\text{C} \rightarrow 4.7^\circ\text{C}$ ) 감소하고 있음에 비하여,  $D=30\text{mm}$ 인 경우에는 31.8% ( $6.6^\circ\text{C} \rightarrow 4.5^\circ\text{C}$ ) 감소하고 있음을 알 수 있다. 경사각 변화에 따른 열전달 특성 변화를 살펴보면, 25.4mm의 경우에는 경사각이 증가함에 따라 열전달이 감소하다가  $\theta=45^\circ$ 를 지나면서 수직이 될 때까지 열전달이 향상되는 특

성을 보여주고 있다. 튜브 표면의 과열도가 5.3°C 인 경우,  $q''_{\theta=90^\circ}/q''_{\theta=45^\circ}$ 의 비율이 5보다 큰 값을 나타낸다. 튜브 직경이 30mm인 경우에는 경사각이 증가함에 따라 열전달이 점차적으로 향상되는 경향을 나타내고 있다. 그렇지만, 양자의 경우 모두  $\theta=90^\circ$ 가 되는 수직 구조에서 가장 뛰어난 열전달 특성을 보여준다.  $D=30\text{mm}$ 인 경우 경사각이 0°에서 90°로 바뀔 때 따라 과열도와 열유속 사이의 관계는  $q'' \sim \Delta T_{sat}^{4.805}$ 에서  $q'' \sim \Delta T_{sat}^{5.164}$ 로 기울기가 증가하고 있다.  $\theta=0^\circ$ 에서는 튜브상부에 기포군집이 형성되면서 열전달계수가 감소된다.  $\theta$ 가 증가하면 튜브 표면에서 기포이동거리가 길어지며, 액체교란 효과가 강해지면서 열전달계수가 증가한다. 이러한 경향은 발생 기포량이 증가하면서 분명하게 나타난다.<sup>(15)</sup>  $D=25.4\text{mm}$ 인 경우 기포 발생량이  $D=30\text{mm}$ 인 경우보다 작으므로 액체교란에 의한 열전달 향상 효과가 더 늦게 나타나 초기에 열전달이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 추정된다.

경사각에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 세 가지 열유속에 대해 튜브 직경별 열전달계수의 값을 나타내었는데, 경사각이 증가하면서 열전달 특성에 따라 대체적으로 네 가지 영역으로 구분할 수 있다.  $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 에서는 두 직경 모두 열전달계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그 증가 비율은 튜브 직경과 열유속이 증가함에 따라 분명하게 나타난다.  $15^\circ < \theta \leq 45^\circ$  구간에서는 열유속과 직경에 따라서 약간씩 다른 경향을 나타내지만 대체적으로는 열전달계수가 거의 일정한 값을 보이고 있다. 직경이 25.4mm인 경우 열유속이 증가하면서 열전달계수가 약간 감소하는 경향을 나타냄에 비하여 직경이 30mm인 경우에는 열유속 증가에 따라 열전달계수가 소폭 증가하는 경향을 나타낸다.  $45^\circ < \theta \leq 75^\circ$  구간에서는 열전달계수가 증가하는 경향을 나타낸다. 한편,  $75^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 에서는 열전달계수가 급변하는 특성을 나타낸다. 이러한 경향을 살펴볼 때 튜브가 수평과 수직 부근일 때 열전달계수에 큰 변화를 가져올 수 있는 특별한 현상이 강하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

경사각과 열유속이 변화함에 따라 튜브 직경이 30mm인 경우에 대해 튜브 표면에서 발생하는 비

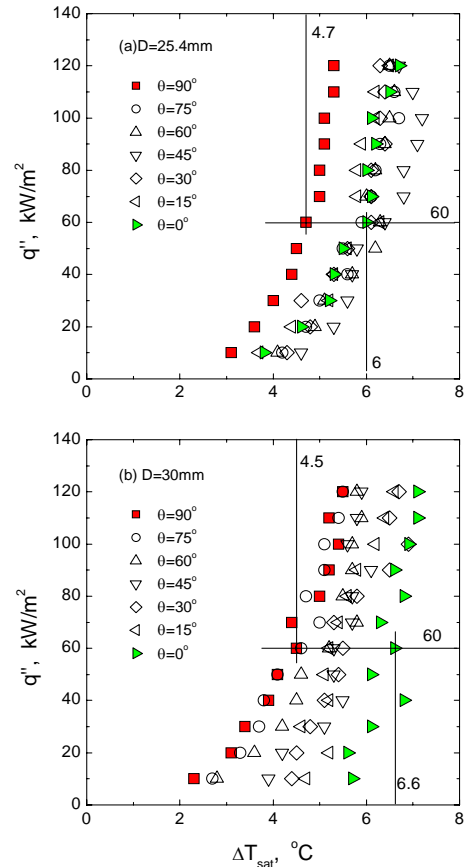


Fig. 2 Curves of  $q''$  versus  $\Delta T_{sat}$

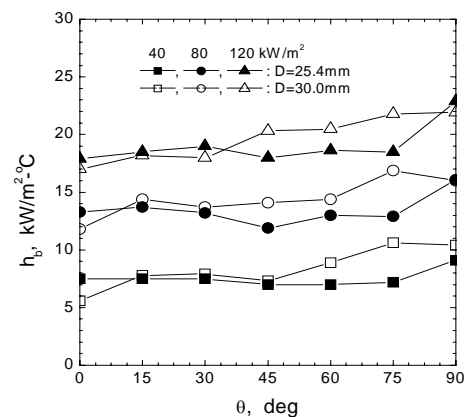


Fig. 3 Curves of  $h_b$  versus

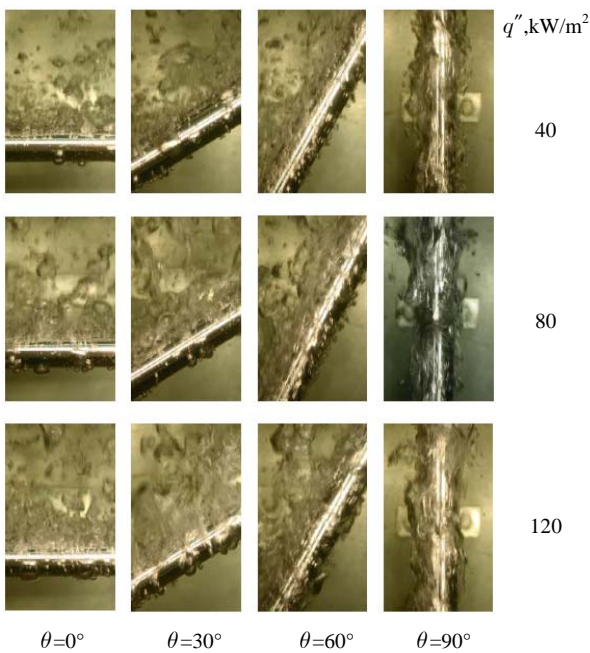
등 현상을 촬영한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

사진은 튜브의 중간 영역인 열전대 #3의 위치를 중심으로 촬영하였다. 경사각이 증가함에 따

라 기포는 커다란 덩어리(slug)를 형성하여 튜브 표면을 따라 상부 영역으로 흘러가고 있음을 알 수 있다. 튜브가 수평인  $\theta=0^\circ$ 인 경우 튜브 하부에서 발생한 기포는 단순히 튜브원주를 따라 성장한 후 튜브의 상부 영역에서 이탈하고 있다. 경사각이 점점 증가하면 하부에서 발생한 기포가 이탈할 때까지 튜브 표면에 머무르는 시간이 점점 증가하면서 주변의 기포들과 결합(coalescence)하고, 그 결과 더욱 더 큰 기포 덩어리로 성장하게 된다. 이 기포 덩어리는 상부 영역으로 이동하면서 주변의 액체를 가열 표면 영역으로 활발하게 이동시켜 액체 교란(liquid agitation)에 의한 열전달 향상 효과를 유발하는 반면, 지나친 기포 덩어리 형성에 따라 주변 액체의 원활한 접근을 차단하여 열전달 감소를 유발하는 특성을 나타내기도 한다. 열유속이 증가하게 되면 기포 운동이 더욱 더 활발해 지는 것을 관찰할 수 있다.

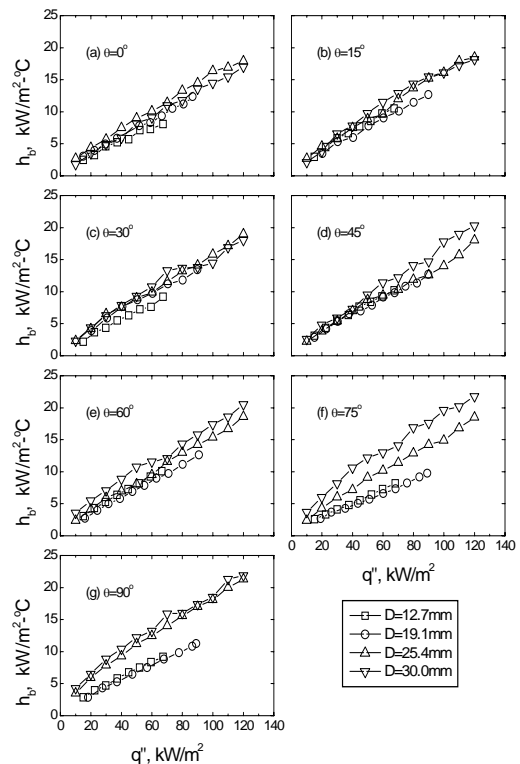
**Table 1** Geometric data of tubes

$D$ , mm	$L$ , mm	$L/D$
12.7	540	42.5
19.1	540	28.3
25.4	500	19.7
30.0	540	18.0



**Fig. 4** Photos of boiling ( $D=30\text{mm}$ )

튜브 직경과 조합된 경사각의 영향을 살펴보기 위하여 열유속 증가에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 비교를 위하여 네 가지 튜브 직경에 대한 결과를 소개하였다. 12.7, 19.1mm에 대한 것은 Kang<sup>(4)</sup>의 연구에서 얻어진 것이다. 직경별 변화를 살펴보면 튜브가 수평으로 설치되어 있는  $\theta=0^\circ$ 인 경우에는 네 가지 경우에 대해 열전달계수의 차이가 거의 없다. 그렇지만 튜브 경사각이 증가함에 따라 결과들 간에 많은 차이를 나타내고 있다. 따라서 튜브 설치 방향이 수직으로 변화하면서 열전달 경향에 영향을 미칠 수 있는 주요한 변수가 작용하고 있음을 알 수 있다. 이 변수들 중의 하나로 제시할 수 있는 것이 가열튜브 직경에 대한 길이의 비율( $=L/D$ )이다. Kang<sup>(3)</sup>에 의하면, 수직으로 설치된 구조에서는 동일한 튜브 직경인 경우라도 이 비율에 따라 열전달 특성이 서로 달라질 수 있음을 알 수 있다. Table 1은 분석에 사용한 튜브들에 대한 기하학적인 수치들을 나타내고 있다. 전반적인 경향은 Kang<sup>(4)</sup>이 제시한 것과 같이  $L/D$ 가 감소하면 수직으로 접근할수록 열전달계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.



**Fig. 5** Curves of  $h_b$  versus  $q''$  as  $\theta$  varies

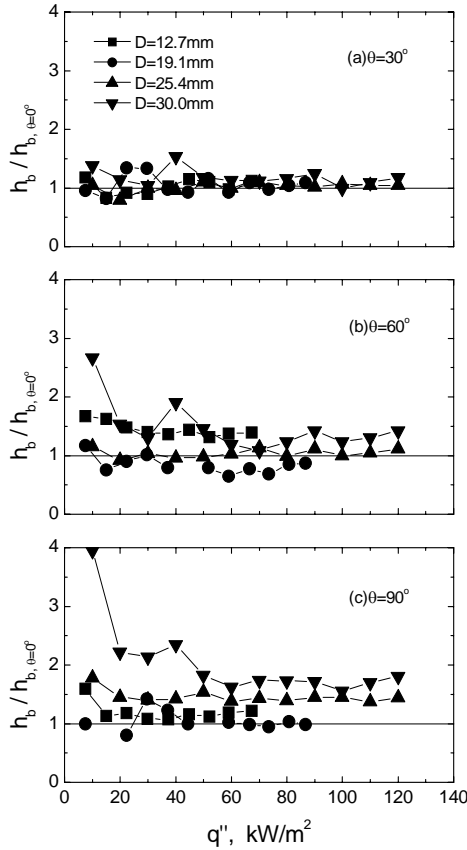


Fig. 6 Local  $h_b$  versus  $q''$  at thermocouple #1

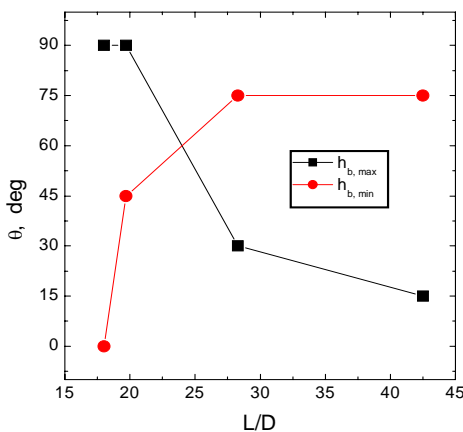


Fig. 7 Relation among  $h_b$ ,  $\theta$ , and  $L/D$

$L/D$ 의 증가는 수평구조에는 열전달계수에 별다른 영향을 나타내지 않음에 비하여 수직구

조에는 많은 변화를 초래하며, 그 영향 정도는 경사각이 증가함에 따라 점차적으로 증가한다. 이러한 경향은 튜브 표면에 형성되는 기포 덩어리의 운동 특성에서 그 원인을 찾아보는 것이 가장 적절할 것이다. Fig. 6은 각도 변화에 따른 국소열전달계수의 변화를 열전대 #1의 위치에 대해 나타낸 것이다. 경사각에 따른 변화를 살펴보기 위하여  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 에서의 국소열전달계수의 크기를 동일 위치의 수평구조에 대한 열전달계수와 나누어서 그 상대적인 값의 변화를 나타내었다. 경사각이  $30^\circ$ 인 경우에는 수평 대비 값의 차이가 거의 없던 것이 수직 구조로 접근할수록 직경에 따른 차이가 많이 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 특히,  $L/D$ 의 값이 제일 작은 30mm 튜브에서 그 비가 제일 크게 나타나며,  $L/D$ 가 증가할수록 수평구조 대비 열전달계수의 비가 1에 근접하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 기포덩어리의 형성에 따른 열전달의 둔화 현상에 의한 것으로 해석할 수 있다.  $L/D$ 의 비가 증가하면 주변액체가 가열 면에 원활하게 접근하는 것을 차단하게 되며, 튜브 상부 영역인 열전대 #1의 위치에서 그 특성이 분명하게 관찰된다.

Kang<sup>(4)</sup>의 연구와 본 연구의 결과를 정리한 것이 Fig. 7에 나와 있다.  $L/D$ 의 값이 감소함에 따라 열전달이 최대가 되는 각도가 수직방향에 근접하고 있음을 알 수 있다. 반면, 열전달이 최소가 되는 각도는  $L/D$ 의 값이 감소함에 따라 수평구조에 근접하는 것을 알 수 있다. 이러한 전반적인 경향은 기포덩어리 형성의 두 측면인 액체교란에 의한 열전달 향상과 주변 액체의 원활한 접근 차단에 따른 열전달 감소의 상대적인 크기에 따라 결정되는 것으로 해석된다.

#### 4. 결론

스테인리스강 튜브의 설치각도가 대기압 상태인 물의 포화플렉비등에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 두 가지 튜브직경( $D=25.4, 30\text{mm}$ )과 7 가지 설치각도( $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ )에 대한 실험 및 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 튜브 설치각도는 풀비등열전달에 많은 영향을 미치며, 그 효과는 설치각도가 수평이나 수직에 가까워질수록 크게 나타나고 있다.

(2) 최대 열전달계수는 두 직경 모두 경사각이 90°인 경우에 나타난다.

(3)  $L/D$ 의 값이 감소함에 따라 열전달이 최대가 되는 각도가 수직방향에 근접한다. 반면, 열전달이 최소가 되는 각도는  $L/D$ 의 값이 감소함에 따라 수평구조에 근접하고 있다.

(4) 튜브 경사각에 따른 열전달계수의 최대값과 최소값은 표면에서의 기포군집 형성과 액체교란의 상대적인 크기에 따라 결정되는 것으로 추정된다.

## 후 기

이 논문은 2007학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Corletti, M. M. and Hochreiter, L. E., 1991, "Advanced Light Water Reactor Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger Test," *Proc. of the 1st JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 381~387.
- (3) Kang, M. G., 1998, "Experimental Investigation of Tube Length Effect on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 25, No. 4-5, pp. 295~304.
- (4) Kang, M. G., 2002, Effects of Tube Inclination Angle on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer, *Trans. KSME B*, Vol. 26, No. 1, pp. 116~124.
- (5) Jakob, M. and Hawkins, G. A., 1957, *Elements of Heat Transfer*, 3rd. ed., Wiley International Edition, pp. 206~210.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) Chyu, M. C. and Mghamis, A. M., 1991, "Nucleate Boiling on Two Cylinders in Line Contact," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 7, pp. 1783~1790.
- (14) 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.
- (15) 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.