

경사진 원형관내에서의 강제대류비등 열전달에 대한 실험적 연구

이 흥 옥, 이 준 식*, 노 승 탁*, 박 군 철**

서울대학교 터보·동력기계연구센터, *서울대학교 기계항공공학부, **서울대학교 원자력공학과

An Experimental Study on the Convective Boiling in Inclined Tubes

Hong-Wook Lee, Joon Sik Lee*, Sung Tack Ro*, Goon-Chul Park**

Turbo and Power Machinery Research Center, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

**Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received January 9, revision received April 4, 2001)

ABSTRACT: An experiment is conducted to investigate the effect of the inclination angle on convective boiling heat transfer of a uniformly heated tube. The test section used is a stainless steel tube with 10.7mm in inner diameter. The heating length is 3m and is heated directly by an AC current. The test fluid is R-113. Experiments are carried out with mass flow rates of 300, 500 and 700 kg/m²s, and heat fluxes varying from 5 to 65 kW/m². The inclination angles of the tube are 0°, 5°, 11° and 25°. The circumferential temperature variation at low quality region and the location of dryout at high quality region are mainly observed. Circumferential anisothermality occurring at low mass flow rate and low quality conditions is gradually reduced with the increase in the inclination angle and finally disappears at the inclination angle of 25°. Critical quality where dryout is initiated is seriously influenced by the inclination angle. Wall temperature after critical quality is also affected by the inclination angle.

Key words: Convective boiling heat transfer(대류비등 열전달), R-113, Inclined tube(경사관), Circumferential anisothermality(원주방향 비등온성), Critical quality(임계건도)

기 호 설 명

D : 관 직경 [m]

Fr_L : 액상의 Froude 수, U_L/\sqrt{gD}

G : 질량유속 [kg/m²s]

g : 중력가속도 [m/s²]

h : 열전달계수 [W/m²K]

i : 엔탈피 [J/kg]

q'' : 열유속 [W/m²]

T : 온도 [°C]

ΔT : 관의 단면에서 윗면과 아랫면의 온도차,
 $T_{wt} - T_{wb}$ [°C]

U : 겉보기속도 [m/s]

x : 건도, 식(1)

z : 관의 축방향 위치 [m]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-7117; fax: +82-2-883-0179

E-mail address: jslee@gong.snu.ac.kr

그리스 문자

θ : 경사각도 [$^{\circ}$]

하첨자

c : 입계
 f : 포화액
 g : 포화기체
 G : 기체
 L : 액체
 w : 벽면
 wb : 관의 아랫면
 wt : 관의 윗면

1. 서 론

관내에서 액상에서 기상으로 상변화가 일어나면서 흐르는 강제대류비등은 단상에 비해 열전달 효과가 크기 때문에 각종 보일러, 열교환기, 핵반응로, 증기발생기, 냉동기, 열펌프 등 많은 분야에 여러 가지 형태로 응용되고 있다. 수평관, 수직관 또는 나선형관 등이 많이 이용되고 있으나, 지열발전소의 수송관, 곡률이 작은 나선형관 또는 핵반응로 내의 과열기와 재열기 등에는 경사진 원형관이 응용되고 있으며, 유동층 보일러 경우 수평관 또는 경사관이 이용되고 있다.⁽¹⁾

Fig. 1은 일정열유속이 가해지는 수평 원형관에서의 유동형태를 보여준다. 수직관에서와 달리 낮은 건도의 드라이아웃(intermittent dryout)이 작동환경에 따라 조건적으로 발생하며, 관벽의 윗면과 아랫면의 온도가 다른 원주방향으로 비등온성(circumferential anisothermality)을 수반하여 관에 치명적인 영향을 줄 수도 있다.⁽²⁾ 이러한 차이

를 가지는 수평관과 수직관의 사이에 존재하는 경사관에 대한 연구는 비교적 적은 편이다.

경사진 원형관에 대한 기존연구를 살펴보면, Styrikovich and Miropolski^(3,4)는 수평관과 경사관에 대한 실험을 통해서 작은 유량, 낮은 건도에서 관의 윗면과 아랫면의 온도에 심각한 차이가 생기는 비등온성에 대해 연구하고 경사가 9.6° 보다 작을 때에만 비등온성이 발생한다고 보고하였으며, Kefer et al.⁽⁵⁾은 경사관에서의 임계열유속(Critical Heat Flux, CHF)에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 경사각도가 증기발생기 관내에서의 드라이아웃과 임계열유속 이후의 영역에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고 임계열유속 이후의 열전달계수에 대한 모델을 제시하였다.

경사관에서의 이상유동에 대한 연구는 열전달 특성에 대한 연구보다 비교적 많이 수행되었다. Mukherjee and Brill⁽⁶⁾의 연구와 Barnea et al.⁽⁷⁾의 연구에서는 경사에 따라 바뀌는 유동양식에 대한 경험식 및 모델을 제시하였다. 이 중에 Barnea et al.의 연구에서는 수평관에서 약간의 경사각도를 가지는 경우에 성층화가 억제되어 성층유동에서 간헐유동 또는 환상류로의 천이에 큰 영향을 미치지만, 수직관에서는 경사각도가 많이 변화하더라도 유동형태에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다. Fukano and Ousaka⁽¹¹⁾는 물과 공기의 환상유동에서의 마찰압력강하, 액막두께 분포의 측정을 통해서 경사각도의 영향을 고찰하여 경사각도가 매우 작은 경우라도 이들에 대한 영향을 무시할 수 없다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 균일 열유속으로 가열되는 관에서 경사각도가 비등열전달에 미치는 영향을 알아보기 위해서 실험적 연구를 수행하였다. 각도에 따른 변화를 알기 위해 수평관에 대해 수행한 결과를 기준으로 경사관에 대한 변화를 보았다. 특히, 건도가 작은 영역에서 발생하는 원관의 윗면

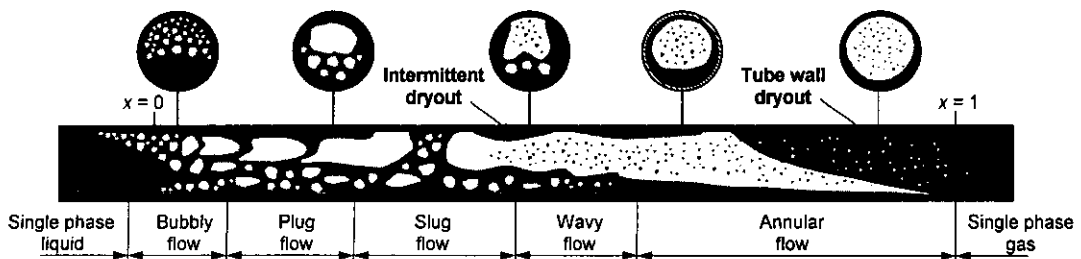


Fig. 1 Flow regimes for the internal convective boiling in a horizontal tube.

과 아랫면의 비등온성과 건도가 큰 경우에 액막이 마름으로써 발생하는 드라이아웃을 중심으로 실험을 하였으며, 과냉비등 영역에 대한 실험도 같이 수행하여 각도 및 유량, 열유속이 대류비등에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 개략적으로 Fig. 2와 같다. 주요 실험장비로는 펌프, 예열기, 시험부, 응축기, 기액기가 있으며, 시험부의 경사를 25° 까지 조절할 수 있도록 제작하였다. 작동유체로는 물성치가 비교적 잘 알려져 있고 물에 비해 잠열이 크게 낮아서 실험에 용이한 R-113을 사용하였다. 시스템 내의 유체는 마그네틱 펌프에 의해 순환되며 유량은 펌프의 제어장치를 통해 조절된다. 펌프에서 나온 액체는 질량유량계를 거쳐 예열기에서 적당한 온도로 가열된 후, 균일한 열유속을 내는 시험부로 공급되어 비등이 일어난다. 그 후 포화 또는 과열된 유체는 판형 열교환기에서 액체상태로 응축되어 기액기로 되돌아간다.

실험에 사용한 시험부의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 시험부는 스테인레스 스틸로 만들어진 매끄러운 직관을 사용하였으며, 유효가열길이는 3 m, 관의 내경 및 두께는 각각 10.7 mm, 1 mm이다. 시험부의 양단에는 구리단자대를 부착해서 교류전원을 가하여 시험부를 가열하였다. 시험부의 벽면온도를 측정하기 위해 20 cm 간격으로 나누어서 각각의 위치에 원주방향으로 위, 아래, 양 옆면에 T형 열전대를 부착시켰으며 얇은 테프론 테이프로 열전대와 벽면 사이를 절연시켰다. 전원공급을 위해 설치한 구리단자대에 정압측정용 구멍을 내어 내부압력을 측정하였으며, 시험부의 양단에 T형 열전대를 관 내부로 삽입시켜 내부 유체온도를 측정하였다. 양단을 테프론 튜브로 이어서 절연 및 시험부의 각도변화를 용이하도록 하였다. 이밖에 시험부와 예열기는 외부로의 열손실을 방지하기 위해 석면테이프, 단열재 등을 사용하여 단열시켰다.

2.2 실험범위 및 자료처리방법

본 실험에서의 실험범위 및 조건을 Table 1에 나타내었다. 경사각도, 질량유속, 열유속을 각각

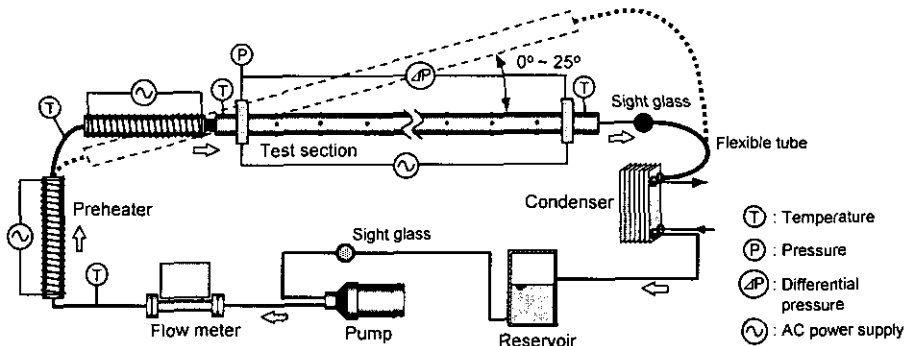


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

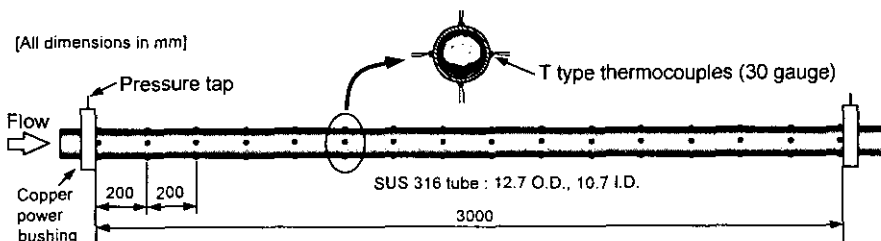


Fig. 3 Test section, showing locations of thermocouples and pressure taps.

Table 1 Experimental conditions

Inclination angle [°]	0 5 11 25
Mass flow rate [kg/m ² s]	300 500 700
Heat flux [kW/m ²]	20~65

변화시키면서 실험을 수행하였으며, 시스템의 압력은 변화시키지 않고 대략 0.2~0.3 MPa 사이에서 유지시켰다.

실험을 통해 측정된 값들로부터 원하는 결과를 얻기 위해 수행한 자료처리방법은 다음과 같다. 우선 비등연구에서 가장 기초적인 자료인 포화온도는 시험부 입구에서 측정된 정압으로부터 이 압력에 해당하는 포화온도를 사용하였다. 시험부 양단에서 압력강화로 인해 생기는 포화온도의 차이는 약 2~4°C로서 그리 크지 않으므로 시험부 내에서 포화된 부분의 압력이 선형적으로 떨어진다고 가정하고 이에 따라 각 위치의 포화온도를 구하였다. 또한 관 내부의 액체온도는 예열부 이전에 측정된 단상의 온도와 예열부 및 시험부에서 가해 준 열량으로부터 에너지 평형을 이용해 구하였으며, 시험부 내에서의 건도는 식(1)과 같이 에너지 평형으로부터 얻은 유체의 엔탈피를 이용하여 구하였다.

$$x = \frac{i - i_f}{i_g - i_f} \quad (1)$$

여기서 i , i_f , i_g 는 각각 유체의 엔탈피, 포화액의 엔탈피, 포화기체의 엔탈피를 나타낸다. 한편 유체의 엔탈피가 포화액의 엔탈피보다 낮은 과냉비등영역에서는 건도가 음수로 표시된다.

열전달계수를 계산하기 위해서는 관의 내벽온도, 유체의 온도, 열유속이 필요하며, 유체온도에 대한 처리방법은 앞에서 설명한 바와 같고, 열유속은 전력계를 이용해 관에 가한 전체 열량을 측정하고 이를 관의 단면적으로 나누어서 구하였다. 관의 내벽온도는 열전대로 외벽온도를 측정 한 후 균일열발생이 있는 1차원 원통형 전도방정식을 이용하여 구하였다. 시험부의 길이방향으로 20 cm 간격으로 관의 윗면, 아랫면, 양 옆면의 외벽온도를 측정했으며, 관길이 방향으로 전체적인 열전달계수의 변화를 알아보기 위해서 단면의 4 부분에서 측정한 온도를 산술평균하여 벽면의 평균온도로 사용하였다.

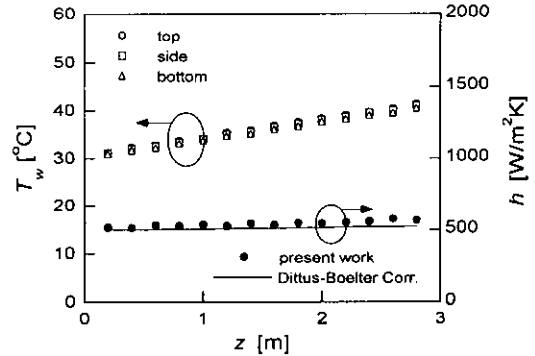


Fig. 4 Circumferential isothermality and heat transfer coefficient in the non-boiling region.

Fig. 4는 실험 데이터의 타당성을 확인하기 위해서 시험부에 낮은 열유속을 가해 얻은 단상영역에서의 실험결과이다. 시험부의 축방향으로 각각 단면에서의 위, 옆, 아래 부분의 벽면온도차는 0.5°C 이내이며 벽면온도가 유동방향으로 선형적으로 증가함을 보여준다. 측정된 열전달계수도 Dittus-Boelter의 상관식⁽⁸⁾에 의해 예측된 값과 비교적 잘 일치하는 것을 보여준다.

비등열전달계수의 측정에서 발생하는 실험오차는 Kline and McClintock⁽⁹⁾이 제시한 95%의 신뢰도를 가지는 단일표본실험법에 의해 구하였다. 불확실성은 시험부 내에서의 포화온도 예측에서 주로 발생하며, 열유속 50 kW/m², 비등열전달계수 4,500 W/m²K의 경우 측정된 비등열전달계수의 불확실성이 약 16%로 나타났다.

3. 결과 및 해석

3.1 과냉비등영역

일정한 열유속이 주어지는 관내로 흐르는 액체의 평균온도가 포화온도에 이르기 전에 벽면 근처에서 벽면에 의해 과열되어 비등이 발생한다. 과냉비등영역에서의 열유속, 유량, 경사각도에 따른 열전달계수를 Fig. 5에 나타내었다. 잘 알려진 바와 같이 건도가 증가해서 포화영역으로 다가감에 따라 핵비등이 활발하게 일어나 열전달계수가 급격하게 증가하며, 유량에 따른 변화는 거의 없으나, 가해 준 열유속이 증가함에 따라 열전달계수가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 한편 유량이

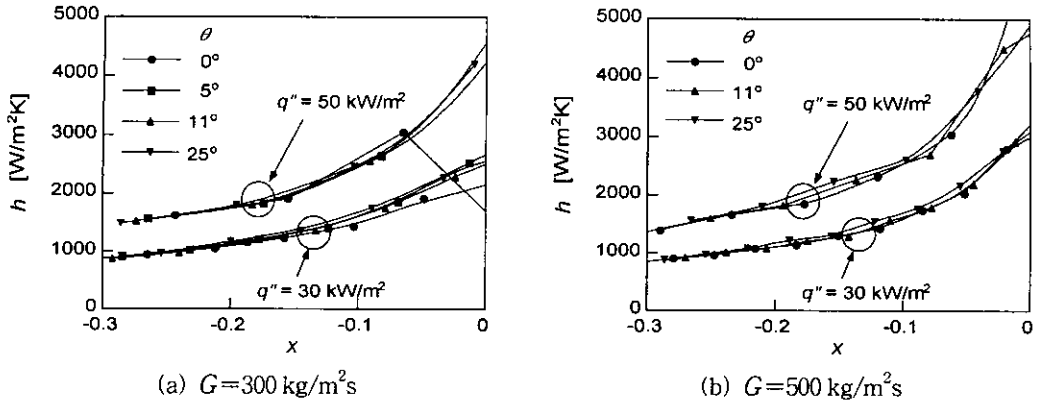


Fig. 5 The heat transfer coefficient in the subcooled boiling region for different inclinations.

300 kg/m²s이고 각도가 0°인 경우를 제외하고는 열전달계수에 대한 경사각도의 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(a)의 $q'' = 50 \text{ kW/m}^2$, $\theta = 0^\circ$ 인 경우, 열전달계수가 급격히 감소하는 것은 유량에 비해 큰 열유속을 가할 때 발생하는 DNB(departure from nucleate boiling)에 의한 것으로 보여진다. 이를 제외한 다른 조건에서는 경사각도에 따른 영향이 없다고 볼 수 있다. 이는 과냉비등을 지배하는 핵비등 자체가 경사각도 즉 중력의 방향에 영향을 받지 않으며, 본 실험 범위에서는 발생한 기포가 성층화물 이루지 않고 기포류나 간헐류 형태로 흐르기 때문이라고 볼 수 있다.

3.2 낮은 건도에서의 원주방향 비등온성

Fig. 6에 낮은 건도의 영역에 대해 관벽의 윗면과 아랫면의 온도차에 대한 분포를 나타내었다. Fig. 6의 (a), (b), (c)는 본 실험의 최소유량인 300 kg/m²s에 대해 열유속에 따라 구분하여 나타내었으며, Fig. 6(d)는 500 kg/m²s 이상의 유량에 대해 모든 실험범위의 열유속과 경사각에 대하여 얻은 결과를 같이 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 유량이 300 kg/m²s인 경우에 가한 열유속과 경사각도에 따라 차이가 있지만 한 단면에서의 윗면과 아랫면의 온도차이가 비교적 크게 나타지만, 500 kg/m²s 이상의 경우 경사각도나 열유속에 관계없이 온도차이가 5°C 이내에 있는 것을 볼 수 있다.

원주방향으로 심각한 비등온성이 발생한 유량

300 kg/m²s인 경우에 대해 살펴보면 다음과 같다. Fig. 6(a)를 보면 20 kW/m²의 비교적 작은 열유속에 대해 경사각도가 0°의 경우와 5°의 경우에는 최고 온도차가 두 경우 모두 약 17°C 정도로 나타났으나, 11°의 경우에는 최고 온도차가 10°C로 줄어들다가 25°의 경우에는 차이가 거의 없어진다. 비등온성이 존재하는 구간을 보면 0°의 경우 과냉영역인 약 $x = -0.1$ 부터 온도차가 나타나지만 5°와 11°에서는 대략 $x = 0$ 에서 시작되며, 온도차가 사라지는 지점은 세 경우 다 대략 $x = 0.25$ 인 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 30 kW/m²의 열유속에서도 앞의 경우와 비슷한 경향을 보이며 온도차가 좀더 커진 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)처럼 45 kW/m²의 경우에는 각도에 따라 큰 차이를 보여주는데 최고 온도차는 경사가 증가함에 따라 각각 90°C, 38°C, 22°C, 5°C로 급격하게 줄어드는 경향을 보여주었다. 특히 비등온성이 존재하는 구간을 보면 경사각도가 0°인 경우에는 열유속이 20 kW/m²일 때와 비슷한 건도에서 시작하지만 $x = 0.6$ 이 되는 구간까지 지속되는 것을 볼 수 있으나, 경사각도가 증가함에 따라 그 범위가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

이에 대한 설명을 위해 Taitel and Dukler⁽¹⁰⁾가 제안하여 널리 쓰이고 있는 수평원관의 이상유동에 대한 유동양식 선도를 본 실험에 해당하는 조건에 대하여 Fig. 7(a)에 나타내었다. 비록 비가열조건에서의 이상유동에 대한 선도이지만 유동형태의 대략적인 경향을 충분히 알 수 있을 것으로 판단된다. 건도가 커짐에 따라 변화하는 유동양식에 대한 궤적이 세 가지 유량 모두 간헐유동

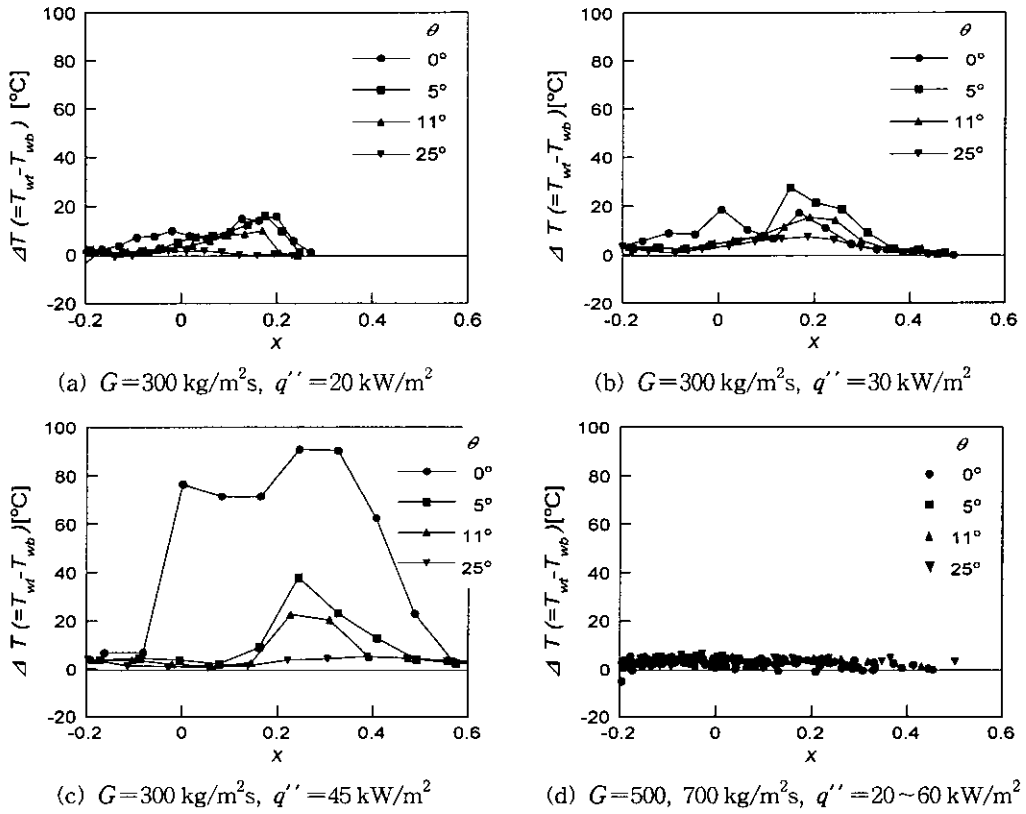


Fig. 6 Circumferential anisothermality at low quality.

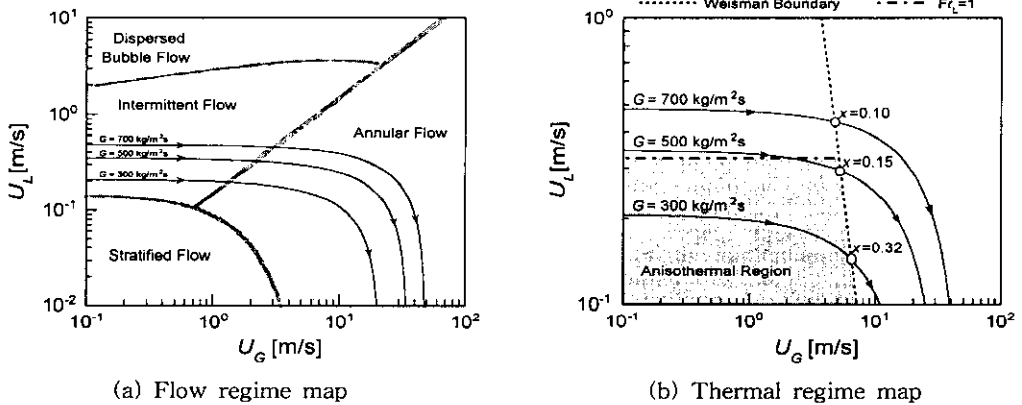


Fig. 7 Flow regime map and thermal regime map for $\theta=0^\circ$.

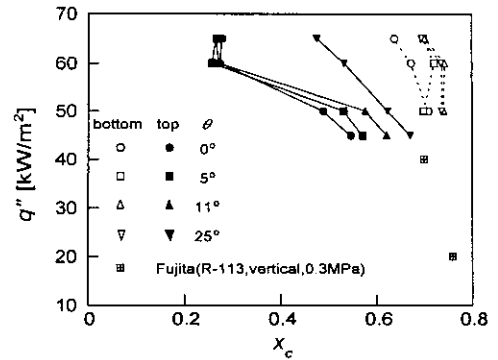
에서 시작되어 환상유동으로 가는 것을 볼 수 있다. 이는 본 실험에서의 비등온성이 유동의 성층화로 인한 결과라고 보기보다는 간헐유동에 의한 결과라고 볼 수 있다. 즉 수평관에서 비등에 의해 발생한 기포들이 모여서 이루는 슬러그유동에

서는 액상의 유체가 윗면에 간헐적으로 접하게 되거나 또는 슬러그가 윗면과 액상 사이의 열전달을 저하시켜, 그 결과 윗면의 온도가 아랫면에 비해 상대적으로 커지는 원주방향의 비등온성이 발생한다고 볼 수 있다.

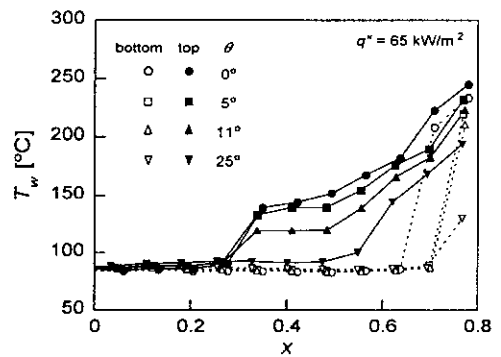
한편 유량이 $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이상인 경우 간헐유동 영역에 포함되었지만 비등온성이 발생하지 않았는데 이에 대한 설명을 위해 Bar-Cohen et al.⁽¹¹⁾이 제시한 등온성과 비등온성의 경계를 본 실험 결과에 적용시켜 보았다. Bar-Cohen et al.은 등온성과 비등온성의 경계를 Weisman 경계와 액상의 Froude 수 (Fr_L)가 1이 되는 곳으로 제시하였고, 본 실험에 적용한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 기포가 벽면에 붙어 정지된 상태로 존재할 수 있는 경계를 액상의 Froude 수가 1이 되는 지점으로 보았는데 이를 기준으로 볼 때 유량이 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때만 비등온영역에 포함되며, $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이상인 경우 그 경계를 넘게 된다. 따라서 $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이상의 유량에서는 벽면에 정지하여 비등온성을 일으키는 기포가 존재할 수 없기 때문이라고 설명할 수 있으며, Bar-Cohen et al.이 제시한 경계가 본 실험에도 잘 맞는다고 볼 수 있다. 또한 유량이 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 인 경우 간헐유동과 환상유동의 경계를 나타내는 Weisman 경계와 캐직이 약 $x=0.32$ 에서 만나는데 이는 앞에서 비등온성이 사라지는 영역이 대략 $x=0.25\sim 0.4$ 이었던 것과 잘 일치한다고 볼 수 있다. 즉, 기상의 속도가 커져 유동의 형태가 환상류로 천이하게 되며 관의 위, 아래로 생긴 액막으로 인해 벽면의 비등온성이 사라지게 되는 것으로 보여진다. 따라서 본 실험에서 발생했던 벽면의 비등온성은 간헐유동영역에서 발생하여 환상류로 천이해 가면서 소멸된다고 볼 수 있다.

3.3 임계건도

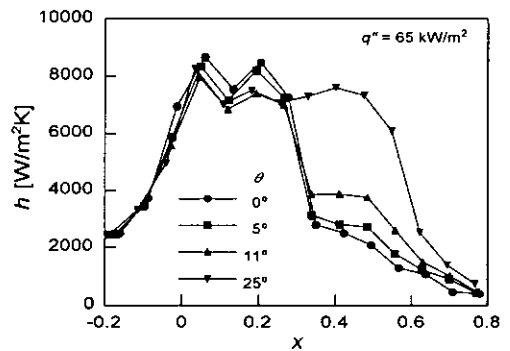
Fig. 8(a)에 유량이 $500 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 인 경우에 대한 각각의 열유속에 따른 임계건도(x_c)를 나타내었다. 벽면에서 급격한 온도 상승이 있는 부분을 임계건도로 보았으며, 윗면과 아랫면의 임계건도가 달랐기 때문에 각각 표시하였다. 아랫면의 경우 임계건도가 $0.65\sim 0.75$ 사이에 있으나 윗면의 경우는 각도와 열유속에 따라 크게 바뀌는 것을 볼 수 있다. 열유속이 $45, 50 \text{ kW/m}^2$ 의 경우에는 경사가 커질수록 윗면에서의 드라이아웃이 늦게 발생하지만 $60, 65 \text{ kW/m}^2$ 의 경우에는 25° 를 제외하고는 같은 지점에서 드라이아웃이 발생했다. 한편 Fujita et al.⁽¹²⁾은 R-113을 사용해 거의 같은 조건에서 수직관에 대해 얻은 실험결과도 함께



(a) Critical quality, x_c



(b) Wall temperature variation



(c) Heat transfer coefficient

Fig. 8 Effect of the inclination angle on critical quality, wall temperature and heat transfer coefficient at $G=500 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

나타내었다. 경사각의 차이가 있으나 같은 경향을 갖는다는 것을 알 수 있다.

임계건도 이후의 벽면온도도 역시 경사각도에 영향을 받는데, Fig. 8(b)에 $G=500 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $q''=65 \text{ kW/m}^2$ 인 경우에 대해 윗면과 아랫면의 온도

변화를 나타내었다. 아랫면은 경사각도에 거의 영향을 받지 않지만, 윗면의 온도의 경우에는 임계건도 이후에도 심각한 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 이것은 경사가 커짐에 따라 수평관에 비해 액막이 윗면 쪽으로 분포하게 되어 열전달성능이 나쁜 기상과 벽면이 직접 접촉하는 부분이 줄어들기 때문이다. 경사각의 증가에 따른 벽면온도의 감소는 곧바로 열전달계수의 증가를 의미하는 것으로 Fig. 8(c)에서 보듯이 임계건도 이후의 열전달계수 또한 경사각이 커질수록 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 균일 열유속 조건에서의 경사각도가 대류비등열전달에 미치는 영향을 알아보기 위해서 실험적 연구를 수행하였다. 0°, 5°, 11°, 25°의 각도에 대해 유량, 열유속을 바꾸어 가며 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 핵비등이 지배적인 과냉비등영역에서는 열전달계수에 미치는 경사각도의 영향이 거의 나타나지 않았다.

(2) 건도가 낮은 영역에서 유속이 작을 때 발생하는 벽면의 비등온성은 경사각도가 커짐에 따라 존재영역과 온도차가 급격히 줄어들며 25°의 경사각도에서는 비등온성이 나타나지 않았다.

(3) 관의 윗면의 임계건도는 경사각도가 커짐에 따라 지연되며, 임계건도 이후에도 경사각도가 커질수록 윗면 온도의 상승폭이 작아져 수평관에 비해 열전달계수는 커지게 된다.

참고문헌

1. Fukano, T. and Ousaka, A., 1988, Air-water two-phase annular flow in near-horizontal tubes, JSME International Journal, Vol. 31, No. 3, pp. 477-485.
2. Bar-Cohen, A., Rude, Z. and Griffith, P., 1987, Thermal and hydrodynamic phenomena in a horizontal, uniformly heated steam generating pipe, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 739-745.
3. Styrikovich, M. A. and Miropolski, Z. L., 1950, Stratification in vapor-water mixture flow at high pressures in the heated horizontal tube, Dokl. Akad. Nauk, SSSR, Vol. LXXXI.
4. Styrikovich, M. A. and Miropolski, Z. L., 1956, Report No. IGRL-T/R4.
5. Kefer, V., Köhler, W. and Kastner, W., 1989, Critical heat flux (CHF) and post-CHF heat transfer in horizontal and inclined evaporator tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 15, No. 3, pp. 385-392.
6. Mukherjee, H. and Brill, J. P., 1985, Empirical equations to predict flow patterns in two-phase inclined flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 11, No. 3, pp. 299-315.
7. Barnea, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1985, Gas-liquid flow in inclined tubes: flow pattern transitions for upward flow, Chem. Engng Sci., Vol. 40, No. 1, pp. 131-136.
8. Incropera, F. P. and DeWitt D. P., 1990, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 495-498.
9. Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3-8.
10. Taitel, Y. and Dukler, A. E., 1976, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, AIChE Journal, Vol. 22, No. 1, pp. 47-55.
11. Bar-Cohen, A., Ruder, Z. and Griffith, P., 1986, Development and validation of boundaries for circumferential isothermality in horizontal boiler tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 12, No. 1, pp. 63-77.
12. Fujita, Y., Yoshida, K. and Lopez, A. M., 1992, Enhancement of flow boiling heat transfer in post dryout region, Proceedings, Second JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kitakyushu, Vol. 3, pp. 289-294.