

## 가열면의 경사각이 푸울 핵비등 열전달에 미치는 영향

유호영 · 안강수 · 남궁규완  
울산대대학원 · 울산전대기계과 · 울산대기계공학과

### The Effect of Inclination of Heated Surface on Nucleate Pool Boiling

Yhu, Hoo-young · Ahn, Kang-su · Namkoong, Kyu-won

#### 〈ABSTRACT〉

This study has been carried out to investigate the effect of surface inclination on pool boiling of water under atmospheric pressure from a copper flat plate whose inclination is varied between 0° and 175° from horizontal plane.

Through this study, several conclusions have been obtained as follows:

(1) Nucleate pool boiling region is divided into the low heat flux region and high heat flux region. The former is influenced by inclination degree of the heated surface and the latter is not influenced by it at all.

(2) The heat flux on the bordering of high and low heat flux region corresponds to transitional heat flux of bubble shape suggested by Moissis and Berenson.<sup>(1)</sup>

(3) The area fraction of heating surface, influenced by the departing bubbles per unit area, and the heat flux of an arbitrarily inclined plane can be predicted from the pool boiling curve of a horizontal plane under the conditions of the same liquid and surface.

---

\* 본 연구는 1987년도 울산대학교 연구비로 수행된 것이므로, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

기	호
$A(\beta)$ : defined in Eq. (17).	$a$ : length, defined in Fig. 1., m.
$B(\beta)$ : defined in Eq. (17).	$c$ : specific heat, J/kg · K.
$D$ : defined in Eq. (9).	$D_d$ : dia. of departing bubble, m.
$F$ : area fraction, influenced by departing bubble.	
$Fo$ : defined in Eq. (9).	$f$ : bubble frequency, s <sup>-1</sup> .
$g$ : acceleration of gravity, m/s <sup>2</sup> .	$h_{fg}$ : latent heat, J/kg.
$k$ : thermal conductivity, W/m · K.	$n$ : bubble population density, m <sup>-2</sup> .
$q$ : heat flux, W/m <sup>2</sup> .	$S$ : defined in Eq. (9).
$T$ : temperature, °C.	$t$ : time, sec.
$x, y$ : coordinate of solid and liquid, defined in Fig. 1.	
$\alpha$ : thermal diffusivity, m <sup>2</sup> /s.	$\beta$ : inclination angle, degree.
$\theta$ : excess temperature, $T - T_{sat}$ .	$\rho$ : density, kg/m <sup>3</sup> .
$\sigma$ : surface tension, N/m.	$\Phi_b$ : heat flux per bubble, W/m <sup>2</sup> .
$\bar{\Phi}_b$ : time average of $\Phi_b$ .	

첨	자
$c$ : liquid-solid contact.	$l$ : liquid.
$n$ : natural convection.	$s$ : solid.
$sa$ : $x=a$ , in solid.	$sat$ : saturation.
$v$ : vapor.	$w$ : wall.

## 1. 서 론

비등현상은 우리 생활에서 오래동안 매우 밀접하게 사용되어 왔으나, 너무 자주 접하는 현상이라 관심없이 소홀하게 취급되어 왔다. 그러나 최근 보일러 내에서의 열효율 증대 및 핵발전소의 안전성등과 관련하여 산업적으로 많은 관심과 연구가 요구되는 실정이다.

특히 핵비등 영역에서의 열전달은 그 효과면에서 볼 때 작은 온도차이로도 높은 열유속을 초래할 수 있으므로 산업적 응용 가치가 높다. 그러나 이 영역에서는 면의 조건, 제질, 주위 분위기 등이 기포발생, 성장, 분리와 서로 복잡한 관계를 갖고 열전달에 지대한 영향을 미치므로, 현재까지 많은 연구가 수행 되었지만, 아직 여러 분야에서 체계적인 연구가 필요하다. 이들 연구 결과 중, 참고문헌(1)의 천이 열유속은 핵비등의 이해에 큰 공헌을 했으며, 이를 시초로 핵비등의 복잡한 기구를 몇가지로 구분하여 연구가 시작되었다.

경사각의 영향에 대한 연구도<sup>(2)~(5)</sup> 다수 수행되었지만, 이들의 실험 범위는 제한되어 있으며 열유속의 변화도 서로 같은 경향을 보이고 있지

않다. 그 중 참고문헌(5)에서, 경사각 변화에 의한 실험치로부터 핵비등 내에 몇가지 비등 기구가 존재한다고 제시했으나, 참고문헌(1)의 천이 열유속과는 연관시키지 않았으며, 또한 경사각에 따른 기포 영향 면적의 변화에 대하여도 언급이 없었다.

따라서 본 연구에서는, 우선 경사각에 따른 열유속 변화 경향을 실험적으로 구하고, 그 경향을 천이 열유속과 관련하여 구명한 후, 이들 결과와 본 연구에서 설정한 기포-액체 교환 모델을 근거로 각 경사각에서의 기포 영향 면적을 계산하고 경사각의 영향을 정량적으로 구명하고자 한다.

## 2. 분리기포에 의한 열유속 관계식

푸울 핵비등시 가열면 상에서의 열전달은, 분리 기포에 의하여 영향받는 지역과 기포에 영향받지 않는 지역으로 구분할 수 있다. 후자의 경우에는 자연대류에 의해 열전달이 일어나며, 비정상 열전도에 의해 열전달이 일어나는 전자의 경우에 비하여 비교적 작은 열유속을 갖는다. 본 단원에서의 해석은 가열면 상에서 기포에 영향을

받는 지역의 열유속에 대한 것이며, 이 결과는 후에 각 경사면에서의 열유속들과 비교하여, 경사각에 따른 기포의 영향 정도를 정량적으로 평가하는데 사용하러 한다.

독립기포와 액체의 교체기구는 기본적으로 Bulk convection 모델(6) 사용했다. 그러나 기존의 모델에서는 가열면의 열용량과 이에 대응하는 가열면 내부에서의 온도 변화를 전혀 고려하지 않았다. 따라서 본 해석에서는 Fig. 1. 과 같은 모델을 설정했다.

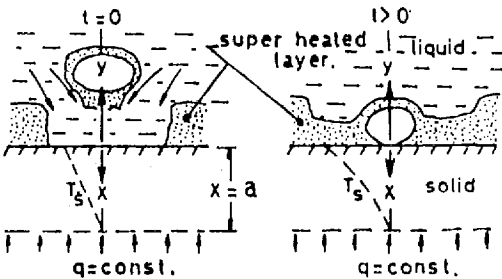


Fig. 1. Heat transfer model.

즉, 가열면 내부의 충분한 깊이,  $x=a$ 에서 시간에 따라 거의 변동없는 열유속  $q$ 가 공급되며, 이로 인하여 기포성장 초기부터 이미 재질내에 온도 구배가 존재하고 있는 복합벽 모델을 사용했다.

해석과정 중 도입된 가정들은 다음과 같다.

(1) 가열면 상의 과열액층은 대류유동을 무시할 정도로 매우 얇으므로, 기포의 잠열은 가열면으로부터 과열액층 내로의 1차원 비정상 열전도에 의하여 전달된다.

(2) 기포 분리시 그 인근의 과열액층도 완전히 제거되므로 상부의 새로운 포화수가 가열면과 접촉, 새로운 과열액층이 성장한다.

(3) 가열면 내부의 온도는  $x=a$  깊이까지 주기적으로 변하며, 초기온도 구배는 선형적이다.

이상의 가정들을 근거로 설정된 지배방정식과

조건들은 다음과 같다.

\*포화액 :

$$\frac{\partial^2 \theta_1(y,t)}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{\partial \theta_1(y,t)}{\partial t}, \quad \theta_1 = T_1 - T_{sat}. \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_1(y, 0) &= 0 \\ \theta_1(\infty, 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

\*가열면 :

$$\frac{\partial^2 \theta_s(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_s} \cdot \frac{\partial \theta_s(x,t)}{\partial t}, \quad \theta_s = T_s - T_{sat}. \quad (3)$$

$$\theta_s(x,0) = \theta_s(0,0) + \left[ \frac{\theta_{sa} - \theta_s(0,0)}{a} \right] \cdot x, \quad (4)$$

$$\left. \frac{k_s \partial \theta_s(x,t)}{\partial x} \right|_{x=a} = q = \text{const.}$$

\*경계면에서 조건 :

$$\theta_1(0, t) = \theta_s(0, t) = \theta_c(t), \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_s(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{k_l}{k_s} \cdot \left. \frac{\partial \theta_1(y,t)}{\partial y} \right|_{y=0}$$

단, 위의 식들에서  $T_{sat}$ ,  $\alpha$  및  $k$ 는 각각 포화 온도, 열확산율, 열전도계수를 나타내며, 첨자 1과 s는 액체와 가열면을 의미한다. 식 (1)-(5)로부터 포화수 및 가열면 내의 온도함수인  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 를 각각 얻을 수 있고, (7) 이로부터 경계면에서의 온도  $\theta_c(t)$ 를 구할 수 있는데, 그 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta_1(y,t) &= (D/(D+1)) \cdot \{\theta_s(0,0) \cdot \text{erfc}(Fo_1) \\ &\quad - s \cdot [\sqrt{\alpha_s/\alpha_1} \cdot y \cdot \text{erfc}(Fo_1) \\ &\quad - 2 \cdot \sqrt{\alpha_s t/\pi} \cdot \exp(-Fo_1^2)]\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_s(x,t) &= \theta_s(0,0) \cdot [1 - (1/(D+1)) \cdot \text{erfc}(Fo_s)] + S \cdot x \\ &\quad - \{[D \cdot S/(D+1)] \cdot [x \cdot \text{erfc}(Fo_s) \\ &\quad - 2 \cdot \sqrt{\alpha_s t/\pi} \cdot \exp(-Fo_s^2)]\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\theta_c(t) = [D/(D+1)] \cdot [\theta_s(0,0) + 2 \cdot S \cdot \sqrt{\alpha_s \cdot t/\pi}] \quad (8)$$

여기서,

$$D = [\rho \cdot c \cdot k] / (\rho \cdot c \cdot k)_1 ]^{1/2}$$

$$S = (\theta_{sa} - \theta_s(0,0)) / a$$

$$Fo_1 = y/2 \cdot \sqrt{\alpha_1 \cdot t}$$

$$Fo_s = x/2 \cdot \sqrt{\alpha_s \cdot t}$$
(9)

이다. 위의 식들에서  $\theta_s(0,0)$ 는 가열 표면에서 기포발생에 요구되는 온도이다. 그러나 본 연구에서는 단지 시간평균 표면온도인  $\theta_w$ 만 실험적으로 측정 가능하므로, 가열면의 온도 변화 주기를  $t_w$ 라 하면,

$$\theta_w = \frac{1}{t_w} \cdot \int_0^{t_w} \theta_c(t) dt, \theta_c(t_w) = \theta_s(0,0) \quad (10)$$

으로 표시할 수 있다. 위 식에 식(8)을 대입하면,  $\theta_s(0,0)$ 와  $\theta_w$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$\theta_s(0,0) = [(3 \cdot D + 3) / (3 \cdot D + 2)] \cdot \theta_w \quad (11)$$

Fig. 2.는 열유속  $q$ 가  $2.9 \times 10^4 W/m^2$ 인 경우 포화수와 가열면 내의 온도분포를 나타낸 것으로, 가열면 내의 초기 선형 온도 구배로부터 급격한 온도 강하후 시간이 경과할수록 서서히 원래의 온도 구배로 복귀함을 보여주고 있다.

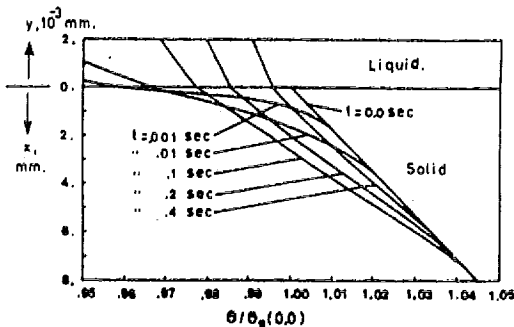


Fig. 2. Temperature profile in solid and Liquid (copper-water,  $\theta_w = 10^\circ C$ ,  $\theta_{sa} = 10.6^\circ C$ )

또한 식(6) 및 (7)로부터 단일 독립기포에 의하여 전달되는 열유속,  $\Phi_b$ 는 다음과 같다.

$$\Phi_b = k_s \cdot \frac{\partial \theta_s(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -k_1 \cdot \frac{\partial \theta_1(y,0)}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

$$= (k_s / (D+1)) \cdot [(\theta_s(0,0) / \sqrt{\pi \cdot \alpha_s \cdot t}) + S] \quad (12)$$

한편 과열액층은 분리기포의 시간당 빈도수,  $f$ 를 갖고 새로운 포화액으로 대체되어 과열되므로, 한개의 분리기포로 인하여 영향받는 면적에서 전달되는 시간평균 열유속,  $\bar{\Phi}_b$ 는

$$\bar{\Phi}_b = f \cdot \int_0^{l/f} \Phi_b \cdot dt$$

로 계산 된다. 위 식에 식(12)와 기존의  $f$  및 분리 기포직경,  $D_d$ 에 대한 관계식(6),

$$f = C_2 \cdot [\sigma \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_v) / \rho_1^2]^{1/4} \cdot D_d^{-1}$$

$$D_d = C_3 \cdot [\sigma / g \cdot (\rho_1 - \rho_v)]^{1/2}$$

$$\cdot [\rho_1 \cdot c_1 \cdot T_{sat} / (\rho_v \cdot h_{fg})]^{5/4}$$

을 대입하면,

$$\bar{\Phi}_b = (D / (D+1)) \cdot [C \cdot (\rho_v \cdot h_{fg} / T_{sat})^{5/8} \cdot (g^3 / \sigma \cdot c_1)^{1/8}]$$

$$\cdot k_1^{1/2} \theta_s(0,0) + k_s S / D \quad (13)$$

을 얻을 수 있으며, 여기서

$$C = 2 \cdot [(C_2 / C_3) / \pi]^{1/2} \cdot ((\rho_1 - \rho_v) / \rho_1)^{3/8}$$

이고  $\rho_v$ 는 증기의 밀도,  $h_{fg}$ 는 액체의 증발잠열,  $g$ 는 중력 가속도,  $\sigma$ 는 액체의 표면장력이다.

식(13)의  $\bar{\Phi}_b$ 는 자연대류 열유속,  $q_n$ 와 함께 가열면 전체의 평균 열유속,  $q$ 에 기여하므로, F를 단위 면적당 분리 기포로 인하여 영향받는 면적율이라 하면,

$$q = (1-F) \cdot q_n + F \cdot \bar{\phi}_b \quad (14)$$

또는

$$F = (q - q_n) / (\bar{\phi}_b - q_n) \quad (14)$$

로 표시할 수 있다.

본 연구에서는 실험적으로  $F=1$ 에서  $q$ 를 측정하여 식 (13)의  $C$ 를 구하고, 이로부터  $\bar{\phi}_b$ 를 계산한 후 식 (14)에 대입하여 각 경사각에 따른  $F$ 의 변화를 정량적으로 고찰하고자 한다.

단,  $q_n$ 은 다음과 같은 기존의 자연대류 관계식<sup>(6)</sup>을 사용했다.

$$\beta < 30; q_n = 0.15 \cdot Ra_L^{1/3} \cdot (k_f/L) \cdot \theta_w$$

$$30 \leq \beta \leq 150; q_n = \left\{ 0.825 + \frac{0.37 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/P_r)^{916/827}]} \right\} \cdot (k_f/L) \cdot \theta_w \quad (15)$$

$$150 < \beta \leq 175; q_n = 0.27 \cdot Ra_L^{1/4} \cdot (k_f/L) \cdot \theta_w$$

### 3. 실험장치 및 방법<sup>(5)</sup>

실험장치는 참고문헌 (5)와 동일하며, 간단히 언급하면 다음과 같다. 즉, 본 장치는 증류수를 실내온도에서 포화온도까지 가열시켜 온도를 일정하게 유지시키는 항온조와, 항온조 내에 설치되어 핵비등을 일으키는 가열면, 그리고 공급 열량을 제어하고 측정하는 제어측정 부분으로 구성된다.

항온조는 내통과 외통의 2중 구조로 제작했으며, 내통의 밑바닥에는 액체 가열용 내통가열기를 설치했고 외통에는 실험액체를 일정온도로 유지시키기 위한 외통가열기를 설치했다.

가열판은 두께 50mm인 동판으로 제작했고 40×100mm 면적의 가열 표면은 #800의 사포로 가공했다. 가열판 내부에는 표면에 수직한 방향의 각 위치에서 온도를 측정하기 위하여 K형 열전대를 표면으로부터, 7, 8.7, 16.7mm 깊이의 단면에, 횡방향으로 중심선 상에 5개씩 20mm 간격으로 설치했다. 가열판 밑에는 저항 8.5Ω/m의 전열선을 내화벽돌 내에 고정시켰으며, 전류를 변압기를 통하여 공급했으므로 가열판의 온도를 임의로 조절할 수 있었다. 이상의 모든 장치들은 가열용기 내에 방수 밀봉되었고, 용기의 한쪽 측

벽에는 경사각 조절을 위한 회전축이 설치되어 항온조 벽에 지지 되어있다.

측정은 우선 항온조 내외통의 물(증류수)을 100℃까지 가열한 후부터 시작되며, 이 때 내외통 가열기의 공급 전원이 차단되는 동시에 가열판 가열기에 전원은 연결된다. 가열판에 공급되는 열유속만으로는 물을 계속 포화 온도로 유지시키기 어려우므로, 부족한 열량은 내통 내의 액체에 설치된 열전대에 의하여 외통가열기가 수시로 자동 공급 시켜준다. 이와같은 방법으로 내통 내의 수온을 계속 포화 온도로 유지할 수 있었다. 내통 가열기는 그 표면에서 발생하는 기포가 가열면에 영향을 미칠 수 있으므로, 측정중에는 가동하지 않았으며 단지 증류수를 상온에서 포화 온도까지 가열시키는데만 사용했다. 가열표면은 매 실험 조건마다 #800사포로 다시 가공한 후 아세톤으로 세척하였다. 표면의 온도변화는 포화 온도로부터 최대 핵비등 열유속 온도에 도달할 때 까지 약 5-1° 간격으로 계속 증가시키며 실험했고, 온도 변경이 끝난후 가열면의 경사각을 변화시켜 다시 같은 과정을 반복했다. 가열면의 경사각은 상향의 0-90°, 하향의 90°-150°까지는 30° 간격으로 실험했고, 하향의 150°-175°까지는 15° 간격으로 실험했다. 가열면 하향의 180°에서는 발생기포가 빠져나가지 못하여 순간적으로 가열면 온도가 급격히 상승하는 현상이 일어나므로, 본 실험에서 제외 했다.

### 4. 결과 정리 및 검토

가열판 내의 열유속은  $x>a$ 에서 1차원 정상 열전도로 가정할 수 있으므로 액체로 전달되는 전면적에 대한 평균 열유속,  $q_n$ 은

$$q = k_s \cdot \Delta \theta_s / \Delta x$$

로 계산했다. 여기서  $\Delta x$  및  $\Delta \theta_s$ 는 실험적으로 측정된 값으로, 가열판 내의 열전대 간의 거리 및 온도 차이이다. 또한 가열면의 표면 과열온도는  $x=7mm$  깊이에서 측정된 시간 평균 과열온도,  $\theta_w$ 를 사용했다.

#### 4.1. 경사각과 열유속

대기압에서 경사각  $\beta$ 를 갖는 가열면의  $q$ 와  $\theta_w$ 의 핵비등 곡선은 Fig. 3.에 나타나 있다. 여기서 경사각  $\beta$ 는 수평면으로부터 시계방향으로 측정된 것이고  $\beta=30^\circ, 60^\circ$ 의 실험치는  $0^\circ$ 와  $90^\circ$  사이에서 유사한 경향을 갖고 존재하므로 그림에서 편의상 제외했으며, 참고로 참고문헌(5)의 실험치도 표시했다.

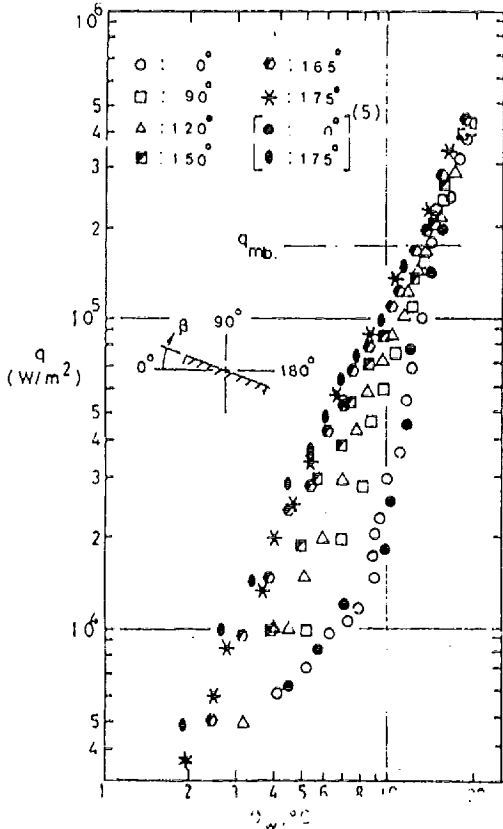


Fig. 3. Relation between  $q$  and  $\theta_w$ (copper-water combination)

Fig. 3.으로부터 푸울 핵비등 영역은 경사각 증가에 따라 열유속이 계속 증가하는 저열유속 영역과, 경사각에 따라 열유속이 변화없는 고열유속 영역으로 구분할 수 있다. 그 경계에서의 열유속을  $q_{mb}$ 로 표시했으며, 본 실험에서  $q_{mb}=1.8 \times 10^5 W/m^2$ 의 값을 얻었다. 이 값은 참고문헌(1)에서 제시한 독립기포가 기포덩이(vapor slugs) 또는 기주(vapor column)로 변화하는 천이지점의 열유속,  $q_{mb}$ 의 관계식,

$$q_{mb} = 11 \rho_v h_{fg} \cdot (\sigma \cdot g / (\rho_1 - \rho_v))^{1/4} \cdot \gamma^{1/2} \quad (16)$$

에 증기 기포의 일반적 접촉각,  $\gamma=60^\circ$ 를 대입한 값과 일치한다. 이러한 현상으로부터, 두 영역간의 기본적 열전달 기구가, 저열유속 영역에서는 독립 기포에 지배받고, 고열유속 영역에서는 기포덩이 또는 기주등에 지배 받는다고 판단할 수 있다. 따라서, 두 영역간의 열전달 기구를 다음과 같이 설명할 수 있다.

즉, 저열유속 영역에서는 온도가 낮으므로 발생 기포들은 독립적으로 존재할 수 있으며, 이들이 과열액층 밑에서 성장하여 면에서 분리될 때, 과열액층을 파괴하므로 열유속은 기포유동조건에 상당히 영향을 받는다. 경사각이 증가되면 분리 기포들은 면에 에각 방향으로 신장되어 과열액층의 파괴 면적을 증가시키므로 열유속이 증가된다. 이러한 경향은 면의 온도 증가로 인하여 자연대류 지역이 없어지고, 면 전체가 독립기포의 영향을 받을 때까지 계속된다. 이 영역에서 과열액층은 액체와 기체의 빈번한 교체로 고열유속 경우보다 매우 얇으므로 이미 언급되어온 microlayer라(8) 할 수 있다.

그러나 면의 온도가 계속 증가하면 가열면의 기포 밀도도 계속 높아져 독립 기포들의 영역들은 서로 간섭하게 되며, 그 결과 표면에 기포덩이와 기주를 형성하게 된다. 이들의 형상은 구형(sphere)의 독립기포들이 통합된 것이므로 Fig. 4.와 같이 그 밑에 항상 갇혀진 과열액층을 포함하는 것이 특징이며, 이러한 과열액층을 macrolayer라(9) 한다.

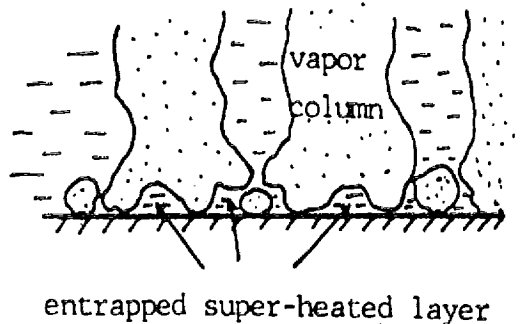


Fig. 4. Vapor column and slugs in high heat flux region.

고열유속 영역은 가열 표면 대부분의 지역에 이러한 기주 등이 존재하는 영역으로, 비록 발생 기주 등의 형상이 면의 경사각에 따라 다양하게 변화하겠지만, 이들은 간혀진 과열층 위에 존재하므로 과열층에 전혀 영향주지 못한다. 따라서 고열유속 영역의 열유속은 경사각의 변화에 무관하며, 단지 과열액층의 두께와 관계되는 표면 과열온도에만 의존하게 된다.

두 영역간의 경계 열유속 점에서는 가열 표면에 자연대류 지역이 남아있지 않고 독립 기포들만이 가열면 전체에 영향을 미치므로 가열면에서 액체로 전달되는 열유속  $q$ 는 독립 기포로 인한 열유속  $\bar{\Phi}_b$ 와 동일하다.

따라서, 저열유속이 끝나는 지점은

$$q = \bar{\Phi}_b = q_{mb}, \quad q_n = 0.$$

이므로, 식(14)에 의하여,  $F=1$ 의 값을 가지며 이 때의 온도 범위는, 본 실험에서,  $\theta_w = \theta_{mb} = 13^\circ - 14^\circ\text{C}$ 의 값을 얻었다. 이 값들을 식(13)에 대입하여,  $C=71.4-76.9$  범위의 값을 얻었으며, 경사각 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 나타냈다. 이 값은 참고문헌(6)에서 물의 수평평판 핵비등에 대하여 제시한  $C=71.4$ 의 값과  $\beta = 0^\circ$ 에서 잘 일치했다.

#### 4.2. 경사각과 분리 기포로 인하여 영향 받는 면적을 관계

앞에서 계산한  $C$ 의 값과 식(13), (14), (15)를 이용하여, 각 경사각에 대한  $F-\theta_w$ 의 관계를 Fig. 5.에 나타내었다.

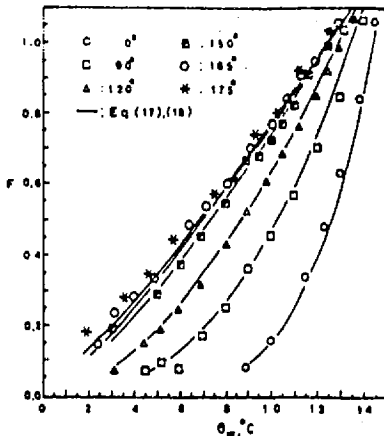


Fig. 5. Relation between  $F$  and  $\theta_w$ .

여기서 우선  $F$ 의 경향을 알아보기 위하여, 단위 면적당 독립 기포의 발생 밀도를  $n$ 이라하고, 이들 기포가 분리될 때  $D_d$ 의  $m$ 배에 해당하는 주위의 과열액층을 파괴한다면,

$$F = n \cdot m^2 \cdot D_d^2 \cdot \pi / 4$$

로 표시할 수 있다.

한편 수평면의 경우, 비등 액체와 가열면의 상태(재질, 거칠기 등)가 고정되면 일반적으로,  $n \sim \theta_w^b$ ,  $m$ 는 일정으로(6) 계산할 수 있으므로 면의 경사각  $\beta$ 를 고려할 경우  $n \sim \theta_w^{b(\beta)}$ ,  $m \sim a(\beta)$ 로 표현할 수 있다.

결과적으로

$$F(\theta_w, \beta) = A(\beta) \cdot \theta_w^{B(\beta)} \tag{17}$$

로 정리할 수 있다. 식(17)에서  $A(\beta)$ 는,  $F$ 의 값이  $q=q_{mb}$ , 표면 과열온도  $\theta_w = \theta_{mb}$ 에서 1의 값을 갖어야 하므로

$$A(\beta) = (\theta_{mb})^{-B(\beta)}$$

인 관계가 성립해야 한다.

본 실험치를 근거로  $A(\beta)$ 와  $B(\beta)$ 의 관계를 구하면, 그 오차 범위가 10%의 오차범위 내에서 식(18)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} B(\beta) &= .59 \cdot \cos^2\beta + 1.94 \cdot \cos\beta + 2.53 \\ A(\beta) &= (13.5 + \cos\beta)^{-B(\beta)} \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

식(18)에서  $B(\beta)$ 는 단지  $\beta$ 만의 함수이므로 수평면에 대한 비율,  $R=B(\beta)/B(0)$ 로 나타내면,

$$R = .1166 \cdot \cos^2\beta + .3834 \cdot \cos\beta - .5$$

이다.

결과적으로, 비등 액체와 가열면의 상태가 일정하다면 수평면의 비등 곡선으로부터 임의의 경사각에 대한  $F$ 의 값을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F(\theta_w, \beta) = \theta_w^{R \cdot B(0)} \cdot (\theta_{mb} - 1 + \cos\beta)^{-R \cdot B(0)}$$

식(20)에서  $\theta_{mb}$ 는 식(16)으로 계산되는  $q=q_{mb}$

에서  $\theta_w = \theta_{mb}$ 의 값이며,  $B(0)$ ,  $R(0)$ 는 수평면의  $B$  및  $R$ 의 값이다.

이상의 관계로부터 일단 수평 가열면의 비등곡선이 얻어지면 식 (19), (20)으로부터 임의의 경사각을 갖는 가열면에 대한  $F$ 를 계산할 수 있으며, 이를 근거로 식 (13), (14)를 이용하여 그 경사각에서의 열유속  $q$ 를 예측할 수 있다.

## 5. 결 론

증류수를 사용한 푸울 핵비등 영역에서 가열면의 경사각을  $0^\circ - 175^\circ$ 로 변화시키며 열유속의 거동을 실험적으로 연구한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

(1) 면의 경사각이 열전달에 미치는 영향에 의하면 핵비등 영역은 다음의 두가지 영역으로 구분된다.

(a) 경사각 증가에 따라 열유속이 증가하는 저열유속 영역 : 기포에 영향받는 면적이 경사각 증가에 따라 증가함.

(b) 경사각 변화에 열유속이 무관한 고열유속 영역 : 기포에 영향받는 면적이 경사각에 무관함.

(2) 고열유속과 저열유속의 경계되는 열유속은 참고문헌(1)의 친이 열유속으로 대체 가능하다.

(3) 물과 임의의 수평 가열면의 비등곡선이 얻어지면, 그 가열면의 임의 경사각에서 기포에 영향받는 면적율을 식 (19), (20)으로 계산할 수 있고, 이를 근거로 각 경사각에서의 열유속도 식 (13), (14)에 의하여 예측할 수 있다.

추후의 과제로는 참고문헌(1)의 친이 열유속이 경사각 외의 기타 가열면 조건 및 형상이 변화했을 때에도 경계열유속으로 사용될 수 있는지가 연구되어야 하며, 또한 식 (19), (20)이 증류수 외의 다른 액체에 대하여도 성립하는지가 확인되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) R. Moïssis and P. J. Berenson, "On the hydrodynamic transition in nucleate boiling", ASME J. of heat transfer, Vol. 85, No. 3, pp. 221-229, 1963.
- (2) M. Jakob und W. Linke, "Der Warmeubergang beim Verdampfen von Flussigkeiten an senkrecht und waagerechten Flächen", Phys. Z., Vol. 36, No. 8, pp. 267-280, 1935.
- (3) P. M. Githinji and R. H. Sabersky, "Some effects of the orientation of the heating surface in nucleate boiling", ASME J. of heat transfer, Vol. 85, No. 4, pp. 379-383, 1963.
- (4) B. D. Marcus and D. Dropkin, "The effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer", Int. J. heat & mass transfer, Vol. 6, pp. 863-866, 1963.
- (5) K. Nishikawa and Y. Fujita "Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer", Int. J. heat and mass transfer, Vol. 27, No. 9, pp. 1559-1571, 1984.
- (6) S. V. Stralen and R. Cole, "Boiling Phenomena", McGRAW-HILL, Vol. 1, 2, 1979.
- (7) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of heat in solid", Oxford, 2nd Ed., 1973.
- (6) F. P. Incropera and D. P. Witt, "Introduction to heat transfer" John Wiley and Sons, 1985.
- (9) A. M. Bhat and R. Pronkosh, "On the mechanism of macrolayer formation in nucleate pool boiling at high heat flux", Int. J. heat and mass transfer, Vol. 26, No. 5, 1983.