공학 연구논문집 제28권 제2호 pp. 297~309, 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 28, No. 2, pp. 297~309, 1997
University of Ulsan.

비등 열전달에서 임계열유속점의 예측에 대한 연구

안강수* · 남궁규완**
*울산전문대학 기계공학과 · **울산대학교 기계공학과

<요 약>

본 연구는, 설정된 모델로부터 푸울 비등시 임계 열유속점의 영향인자들을 계산했고, 임계열유속 및 임계온도를 예측하였다. 설정 모델에서, 증기 기주는 가열면에 고정되어 삼각형 분포로 배열되어 있으며, 열경계층으로의 열전달은 2 차원 정상열전도에 의하여 결정했고, 기액계면에서의 증발율은 분자 운동학이론 결과식을 사용했다. 각각의 액체 접촉각에 대한 임계점에서의 건면적비는 기하학적 및 열적 조건으로부터 추정했고, 임계온도 및 임계열유속은 핵비등영역내의 두점의 실험치를 사용하여 계산했다. 임계점에서의 건면적비는 접촉각이 작을수록 감소하며, 임계열유속 및 임계온도는 접촉각이 작을수록 증가하는 경향을 보였다.

Prediction of Critical Heat Flux Point of Pool Boiling

Ahn, Kangsoo* · Namkoong, Kyuwon**
* Dept. of Mechanical Engineering, Junior College of Ulsan
** Dept. of Mechanical Engineering, University of Ulsan

<Abstract>

In this paper, governing parameters at critical heat flux(CHF) point of pool boiling are calculated, and critical heat flux and temperature are predicted from the model which is valid near the CHF point. In the model, vapor stems are assumed to be distributed with a trianglar grid, and the heat transfer rate into the thermal layer is determined by solving a two dimensional steady state heat conduction equation. The evaporation rate is given by the kinetic theory. The void fractions for the various

contact angles are estimated through the geometric and thermal conditions. And the critical temperature and flux are calculated from the two experimental data set of the nucleate boiling region. The void fraction at the CHF point is strongly affected by the value of contact angle. Lower contact angle gives lower void fraction. But lower contact angle gives higher critical temperature and higher critical heat flux.

1. 서 론

임계열유속점(CHF : Critical Heat Flux)을 포함한 핵비등 열전달은 다른 비등영역에 비하여 가장 높은 열전달 특성을 갖고 있으므로, 산업적 응용을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구들의 대부분은 주로 실험관계식 형태로 주어지며, 비등현상을 기구학적으로 접근하여 얻은 결과들은 비교적 드문 실정이다.

핵비등 기구에 포함되는 열전달 형태는 천이열전도, 기포핵 발생 및 성장에서의 증발, 기포에 영향받지 않는 가열표면에서의 대류열전달 등이 있다.

Bankoff[1]는 CHF점 근처에서 3형태의 열전달을 정량적으로 비교하여, 그 중 증발형태가 가장 지배적이라 발표했다. 실제 높은 열유속 영역에서의 대부분 열전달은 증발에 의하지만, 이러한 증발이 기포 기액계면상 어느 위치에서 일어나는가는 두 가지 관점, 즉, 기포 밑부분 계면에서의 증발과 기포 윗부분에서의 증발이 있다. Moore[2] 등을 포함한 많은 연구들이 증발의 대부분이 기포 밑에서 일어난다고 했고, Costello[3] 등은 CHF점 근처에서의 사진을 관찰하여, 가열면에서 발생한 기포들은 이웃 기포들과 통합하여 가열면상에 증기층을 형성하며, 동일한 열유속에서 고체/액체의 접촉각이 낮을수록 표면의 과열온도가 높아지는 경향이 있다는 결론을 얻었다.

Gaetner[4] 역시 고속 camera를 사용하여 연구한 결과, CHF에 인접한 영역에서는 기포들이 통합하여 가열면상에 큰 기포 덩어리를 형성하며, 그 밑면에는 수많은 작은 증기기주(vapor stems)에 의하여 가열면과 연결되어 있음을 관찰했고, 이를 mushrooms 영역으로 구분했다.

CHF점은, 비등곡선의 정점에 해당하고 핵비등에서 천이비등으로의 변화가 발생하므로, 이에 대하여도 상당한 연구가 이루어졌으며, 이들의 CHF에 대한 접근방법은 두 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째는 가열표면으로부터 상당량의 증기가 액체내로 이동할 때에 적용되는 수력학적 안정성 이론에 근거를 둔 방법이고, 두 번째는 가열표면 근처에서 증기층의 형성으로 인한 액체 유동 저항에 근거를 둔 방법이다. 아직까지는 첫 번째 방법이 많이 사용되고 있으나, 어느 방법이던, 가열면 조건 변화에 의한 영향인자들에 평가 방법은 도입되지 못한 실정이다.

Kutateladze[5]는 이상유동 지배식들로부터 무차원 수들을 추출하여 정리했고, Zuber[6]는 증기유동에 대한 수력학적 해석으로부터 도입한 증기분출의 안정성 이론을 사용하여 관계식들을 얻었다. 평판상의 CHF점에서, 이상의 두 모델들은 거의 같은 형태, 즉

$$q_{CHF} = K_1 \cdot \rho_v \cdot h_{fg} \cdot [\, \sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) / \rho_v^2 \,]^{1/4} \text{ ----------------- } (1)$$

가지나, Zuber의 경우 $K_1=\pi/24$ 이고, Kutateladze는 $K_1=0.16$ 의 값을 실험치들로부터 얻었다. 후에 Lienhard[7] 등에 의하여, 가열면 형태 및 크기, 기하학적 위치 등이 변할 때 상수 K_1을 추정할 수 있는 방법이 제시되었다.

한편, Perkins[8]가 제시한 모델에 의하면, CHF에 근접할수록 기포주기와 직경이 증가하고, 그 결과 가열면상에 기둥(증기 기둥 : vapor column) 또는 증기로 덮힌 지역이 발생, 이들이 서로 통합하여 불연속적인 증기층을 가열면상에 형성한다. CHF점은 이러한 증기층으로 인하여 가열면과 가열면상의 액체가 격리되기 때문에 발생되며, 이 때에는 가열기내에서 발생되거나 전달된 열 energy가 액체내로 완전히 전달될 수 없기 때문에 가열기 자체의 온도를 급격히 상승시킨다고 했다.

이상의 연구들은 가열면의 표면조건들이 핵비등 및 CHF점에 직접적 영향이 있다는 것을 모두 인정하나, 거칠기가 동일한 면에서도 산화도의 차이로 인한 가습성(wettabilities)의 변화로 비등곡선은 상당한 이동을 초래하므로, 표면조건의 영향을 정량화하여 표시하기에는 아직 많은 문제들이 있다.

따라서 본 연구에서는 면의 가습성을 액체와 가열면간의 접촉각으로 표시하여, 핵비등과 천이비등의 경계가 되는 CHF점에 대한 접촉각의 영향을 정량화하려 한다. 이를 위하여 접촉각의 변화를 수용할 수 있는 CHF점 근처에서의 타당성있는 이론적 비등 model 설정이 요구된다. 이러한 이론 model에 열전달 관계식들을 사용하여 계면에서의 열전달 특성을 수치적으로 계산하고, 여기에 기존의 연구 결과들로부터 추정된 가정 및 설정 model의 기하학적 관계식 등을 적용하면 CHF점에서의 영향인자들의 값을 정량적으로 계산할 수 있다. 본 연구의 목적은 이상의 방법을 제시하고 최종적으로는 각 접촉각에 대응하는 CHF점에서의 열유속, 건면적비(α_v : void fraction) 및 온도 등을 추정하는데 있다.

2. 이론적 모델의 설정 및 해석

(1)모델 설정

모델은 핵비등영역에서의 CHF점 근처에 대한 것으로 가열면의 온도는 비교적 높으므로, 기포 덩어리의 형태는 독립기포 보다는 기주 형태(vapor columns or vapor stems)로 변환된 상태이고, 이들은 가열면으로부터 생성/분리 됨이 없이 계속 면에 접착되어 있다. 실제 기주들의 가열면에 인접한 기액계면은, 구의 하반부가 해당 접촉각에서 가열면에 의하여 절단된 형태의 구면(spherical surface)을 유지하고 있다. 그러나 지배적인 열전달은 증기-고체-액체 계면에 인접한 지역에서 기액계면과 가열면에 의하여 구속된 액체층내에서 일어나며, 이 액체층의 형태는 접촉각에 의하여 좌우된다. 따라서 형상의 단순화를 위하여, 기주 밑부분의 기액계면은 <그림 1>와 같이 가열면상에서 접촉각만큼 경사진 원추의 둘레면으로 대치했고, 가열면으로부터 $R_w(1/\sin\Phi-1)\cdot\tan\Phi$ 만큼 떨어진 위치에서 기주는 직경 R_b를 유지하는 원통면으로 해당높이까지 연결된다고 가정했다. <그림 1>에서 R_b는 기주의 직경, L는 기주핵간의 평균거리, R_w는 가열면상 증기접촉면적반경, S는 가열면상 액체 접촉면에서의 $(L/2)-R_w$에 해당하는 길이이다. 이 변수들은 모두 가열면 온도 및 조건에 의존하며, 기주간의 거리 L 은, 기주밀도(site/area)를 N 이라면, 삼각형 분포 모델

로부터, $L=(N \cdot \sin 60)^{-0.5}$ 이다.

한편 Hsu[9] 등에 의하여 $N \sim q^m$ 의 관계가 있으며, 일반적으로 $q \sim \Delta T^n$ 가 성립하므로, L 과 ΔT 는 식 (2)의 관계로 표시할 수 있다.

$$L \sim (\Delta T)^{-m \cdot n/2}, \text{ 또는 } L = A \cdot \Delta T^{-B} \quad (2)$$

이와 같이 가정된 형상은 실제의 계면 면적보다 더 작아지므로 열전달율을 감소시키려는 경향이 있지만, 그에 해당하는 만큼의 경사계면과 가열면 사이의 액체층 두께가 얇아짐으로 인한 열전달 증가영향을 수반함으로 서로 상쇄되어서 실제 계면에서 얻어지는 열유속을 계산할 수 있다. 기주들의 분포에 대한 기본배열은, 4각 및 6각 분포에 자연스럽게 접근할 수 있는, 정3각형 배열을 선택했다. <그림 2>는 가열면상에서의 평균 기주분포를 평면도로 나타낸 것으로, 열전달에 영향을 주는 기하학적 인자들에 대한 관계식들은 다음과 같다.

우선, 증기접촉면적의 둘레길이 P를 L에 대하여 무차원화한 P/L 와 증기접촉면적 A_v를 전가열 면적 A_{tot}에 대하여 무차원화한 건면적비(void fraction), $\alpha_v = A_v/A_{tot}$ 을 이웃 기포끼리 간섭이 일어나기 전, 즉 $R_w \leq L/2$ 대하여 구하면, 식(3),(4)와 같고,

$$\frac{P}{L} = \pi \times \frac{R_w}{L} \quad (3)$$

$$\alpha_v = \frac{\pi}{\sin 60^\circ} \times \left(\frac{R_w}{L}\right)^2 = \frac{(P/L)^2}{\pi \cdot \sin 60^\circ} \quad (4)$$

이웃기포와 간섭이 일어난후, 즉 $R_w > L/2$ 경우에는 다음식과 같다.

$$\frac{P}{L} = \pi \cdot \frac{R_w}{L} \times \left[1 - \frac{6}{\pi} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{L}{2 \cdot R_w}\right)\right] \quad (5)$$

$$\alpha_v = \sqrt{3} \times \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot R_w}{L}\right)^2 - 1} + \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{R_w}{L}\right) \cdot \left(\frac{P}{L}\right)\right] \quad (6)$$

한편, 기주 기본단위 영역내에서 가열면과 액체가 직접접촉하는 면에서의 길이 S는

$$S = \left(\frac{L}{2 \cdot \cos \omega}\right) - R_w$$

와 같이 ω에 의존하므로 3차원 해석이 요구된다. 이를 2차원 해석으로 단순화 시키기 위하여, S를 기본단위 영역내에서, 지배적 열전달이 일어나는 액체접촉면적, $A_{tot}(1-\alpha_v)/6$ 에 대한 평균 길이, S_m으로 표시하면, 식(7)과 같다.

$$S_m = \frac{6}{A_{tot} \cdot (1-\alpha_v)} \cdot \int_0^{\pi/6} \int_{R_w}^{L/2\cos\omega} S(\omega) \cdot r \cdot dr \cdot d\omega$$

$$= \frac{6 \cdot R_w}{(1-\alpha_v) \cdot \sin 60}\left[(0.076 \cdot \frac{L}{R_w}) - (0.1443) - (0.2746 \cdot \frac{R_w}{L}) + (0.5233 \cdot (\frac{R_w}{L})^2)\right] \text{---}(7)$$

결과적으로 $S_m/L = F(\alpha_v, R_w/L)$이며, 또한 α_v도 식(3)-(6)로부터 R_w/L의 함수이므로,

$$\alpha_v = g(\frac{R_w}{L}), \text{또는 } \alpha_v = f(\frac{S_m}{L}) \text{ ---------- } (8)$$

의 관계를 얻을 수 있다.

(2) 열전달 해석

CHF점 근처에서 기주계면은, 기포분리/생성이 없으므로, 가열면에 일정한 형태를 유지한 채로 고정되어 있으며, 가열면 재질의 열전도 계수 k가 매우 큰 경우, 액체 접촉면과 증기 접촉면간의 온도 차이를 무시할 수 있으므로, 정상상태의 해석이 가능하다. 또한 과열액층의 두께는 10^{-5} m 정도로 매우 얇기 때문에, 이 영역 내에서는 점성력이 지배적이며 부력으로 인한 유체유동은 무시할 수 있다. 따라서 대류열전달은 무시할 수 있으며, 액체 접촉면에서의 길이 S 를 평균길이 S_m 으로 대치하여 사용하면, 가열면으로부터 기주계면으로의 열전달은 정상 2차원 열전도문제로 해석이 가능하다. 한편, 가열면으로 부터의 열전달은 기액계면에서의 증발에 소모되며, 이러한 증발기구는 상당한 량의 활발한 분자유동으로 알려져 있으므로, 분자 운동학 이론에 의하여 지배된다. Hsu[9]등에 의하여 유도된, 증발면에서의 열유속 q_e 는,

$$q_e = a \cdot h_{fg} \cdot \left[\frac{M}{2\pi \cdot R_g \cdot T_{sat}}\right]^{1/2} \Delta P \text{ ---------- } (9)$$

이다. 여기서 a는 실험과 이론적 증발율의 비로서, 물의 경우 0.04의 값을 가지며 h_{fg} 는 증발잠열, Rg 는 일반기체상수, T_{sat} 는 포화온도, M 은 분자량, ΔP는 상변화 계면에서 압력차이 이다. 증기-액체 평형상태에서 압력변화에 대한 온도증가는 Clausius-Clapeyron 관계식에 의하여, $\Delta T = \frac{T_{sat}}{h_{fg}} \frac{\Delta P}{\rho_v}$ 이므로, 식(9)에 대입하면 기액면에서의 열전달계수 h_e를 식(10)과 같이 구할수 있다.

$$h_e = a \cdot \rho_v \cdot h_{fg}^2 \cdot \sqrt{\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R_g \cdot T_{sat}^3}} \text{ ---------- } (10)$$

이상의 관계들을 적용하여 접촉각 Φ = 90° 및 Φ < 90° 인 경우에 대하여 액체접촉면에서의 열전달계수 h_w를 다음과 같이 구했다.

(a) Φ = 90° 인 경우

<그림 3.1>은 가열면과 기액계면에 인접한 액체층을 나타내는 2차원 평판에 대한 것으로, x=0축에 대한 회전체가 기주에 해당한다. 이에 대한 2차원 정상열전도 미분식은

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} = 0 \quad \text{------} \quad (11)$$

이고, 식(11)에서

$\theta = \frac{T - T_{sat}}{T_w - T_{sat}}$, $\bar{x} = \frac{x}{S_m}$, $\bar{y} = \frac{y}{S_m}$ 이다. 요구되는 경계조건은,

$$\theta(\bar{x}, 0) = 1$$

$$\theta(\bar{x}, \infty) = 0$$

$$\frac{\partial \theta(\frac{L}{2S_m}, \bar{y})}{\partial r} = 0 \quad \text{------} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta(\frac{R_w}{S_m}, \bar{y})}{\partial r} = \frac{h_e \cdot S_m}{k} \cdot \theta(\frac{R_w}{S_m}, \bar{y})$$

이며, 세 번째 경계조건은 기주들이 L/2위치에서 서로 대칭인 조건이고, 마지막 경계조건은 기액계면에서의 전도열전달이 증발에 의한 열유속과 같다는 것을 의미한다. 식(11)은 변수분리법(10)에 의하여 θ를 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(\lambda_n S_m)}{\lambda_n S_m + \sin(\lambda_n S_m) \cdot \cos(\lambda_n S_m)} \right] e^{-\lambda_n \bar{y}} \cdot \cos\left[\lambda_n (\frac{L}{2} - \bar{x}) \right] \quad \text{-----} \quad (13)$$

여기서

$$\lambda_n S_m \cdot \tan(\lambda_n S_m) = \frac{h_e S_m}{k_e} = B_{i,e} \quad \text{------} \quad (14)$$

이다. 식(13)은 x를 포함하므로, x = R_w - L/2 범위의 액체접촉면에서 평균열전달 계수 h_w를 구하기 위하여,

$$h_w = \frac{-1}{S_m \cdot (T_w - T_{sat})} \int_{R_w}^{L/2} k_l \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{y=0} dx$$

의 관계식에 식(13)을 대입하면

$$h_w = \frac{k_l}{S_m} \cdot \sum_1^{\infty}\left[\frac{2 \cdot \sin^2(\lambda_n S_m)}{\lambda_n S_m + \sin(\lambda_n S_m) \cdot \cos(\lambda_n S_m)}\right] \text{-----------------------} (15)$$

이다. 따라서 $h_w \cdot S_m / k_e = B_{i,w}$ 로 표시하면, Σ 내의 항은, 식(14)에서와 같이, $B_{i,e}$만의 함수이므로 $B_{i,w} = F(B_{i,e})$의 함수관계가 있으며, 그 계산결과를, CHF 근처에서 존재하는 $B_{i,e}$값의 범위, $0.7 < B_{i,e} < 100$ 내에서, 식(16) 과 같은 함수형태로 정리한 결과가 <그림 4>에 도시되어 있다.

$$B_{i,w} = C_2 \cdot (B_{i,e})^{t} \text{---} (16)$$

식(16)은, 각 접촉각에 대한 CHF 점에서의 α_v 를 추정하기 편리한 함수형태로 선택한 것이며, 계산결과와는 표준편차 0.005 의 범위내에서 일치하고 있다.

(b) $\Phi < 90°$의 경우

가열면에 인접하여 예각의 모서리를 갖는 액체층은 <그림 3.2>와 같다. 역시 x=L/2 위치에서 이웃 기포와 대칭이므로 단열조건이 적용되고, 지배식도 앞의 90° 와 동일한 식(11)이다.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{y}^2} = 0 \text{---} (17)$$

이에 해당하는 경계조건들은

$$\theta(\bar{x}, 0) = 1$$

$$\theta(\bar{x}, \infty) = 0$$

$$\frac{\partial \theta(\frac{L}{2S_m}, \bar{y})}{\partial r} = 0 \text{---} (17)$$

$$\frac{\partial \theta(\bar{x}, \bar{y})}{\partial n} = -\frac{h_e S_m}{k_l} \cdot \theta(\bar{x}, \bar{y}) \text{ at } \bar{x} - \bar{y} \cdot \cot\phi = \frac{R_w}{S_m}$$

이며, 마지막 조건은 경사계면에서의 전도열유속과 증발열유속이 같다는 것을 의미하고, h_e는 식(10)이 적용된다. 이와같이 예각을 갖는 2차원 평판에 대한 해석해는 불가능하므로, 유한 차분식에 S.O.R.계산 방법을 적용하여 온도 분포를 얻었다. 수치계산과정에서, 예각 모서리에 접근할수록 가열면과의 온도차이는 크게 발생하여, 고정된 node 크기를 사용하면 계산 오차의 범위가 커지는 경향이 있다. 따라서 본 계산에서는 가열면과 벽면 다음의 node점에서 온도차이의 비, 즉 $(T-T_{sat})/(T_w-T_{sat})$의 값이 0.95이상의 값이 얻어질 때까지 모서리 부근의 영역을 세분화하여 계산했다.

접촉각 Φ가 "0"에 근접할수록, 열전달형태는 과열액층내에의 전도로부터 계면에서의 증발로 변화되며, $\Phi = 0$에서는 액체접촉면에 걸친 열전달 계수 h_w는 증발열전달 계수 h_e와

동일하게된다.

$$h_w = h_e, \text{또는 } B_{i,w} = B_{i,e} \quad \text{(18)}$$

이상의 방법에 의하여 90° 이하의 각 접촉각에 대한 열전달 계수, h_w를 액체접촉의 면적의 평균길이 S_m과 h_c, k_l의 항으로 구할 수 있다. 계산결과는, Φ = 90°의 경우와 같은 방법으로 0.7< $B_{i,e}$<100 범위내에서, 식(16)과 같은 함수형태로 정리하여 <그림 4>에 도시했으며, 계산결과와는 표준편차 0.01 의 범위내에서 일치하고 있다.

<그림 4>에 식(16)에서의 C_2 와 지수 i 의 값도 표시 되었으며, 이에 의하면, 가열표면 전체에 대한 평균 열전달계수 h 에 거의 직접적으로 비례하는 $B_{i,w}$는, 모든 접촉각에서 $B_{i,e}$가 증가, 또는 S_m이 커질수록 증가한다. 또한, 일정한 $B_{i,e}$ 에 대하여 접촉각이 작을수록 $B_{i,w}$ 의 값이 증가하며, 이러한 경향은 과열액층 두께가 작아질수록 열전달은 증가하며, 또한 표면의 가습성이 양호할수록 높은 열전달계수를 가지는 것을 의미한다.

(3) CHF 점에 대한 조건

가열면으로 부터 기포로의 열전달은 과열액층으로 부터 이에 인접한 기액계면으로의 열전달이 지배적이며, 과열액층에 인접한 기액계면의 면적은 근사적으로 가열면상 증기로 덮힌 면적의 둘레길이, P에 비례한다고 할 수 있다. 그러나 P의 증가는 건면적비 α_v의 증가를 초래하므로 전가열면으로 부터의 열유속 q를 감소시키려는 경향이 있다. 이와 같이 q에 직접적으로 영향을 미치는 P와 α_v의 변화를 공통변수, R_w와 기주간의 거리 L 의 비인, R_w/L 을 매개변수로 하여 나타내면 <그림 5>와 같다. <그림 5>에서 R_w/L > 0.5의 영역은 α_v의 증가에 대하여 P/L 가 급격히 감소하므로 CHF 이후의 천이 영역이 분명하지만, R_w/L < 0.5의 영역에서는 α_v의 증가와 동시에 P/L 도 같이 증가하므로, 어느 위치로부터 천이영역이 시작하는지, 또는 어느 R_w/L 의 값이 핵비등과 천이 비등영역의 경계인 CHF 점에 해당하는지는 추정하기 곤란하다. 그러나 핵비등 영역에서는 온도(또는 α_v)의 증가에 따라 q가 증가하고 천이 영역에서는 α_v의 증가에 따라 q가 감소하는 근거로, 다음의 가정, 즉 핵비등영역에서는 R_w/L에 대한 α_v의 증가율이 P/L의 증가율에 비하여 작고, 천이 영역에서는 이와 반대라는 가정을 도입하면,

$$d(\alpha_w) / d(R_w/L) = d(P/L) / d(R_w/L) \quad \text{(18)}$$

의 조건이 CHF점에 적용될 수 있다. 이들 변화율도 <그림 5>에 함께 도시하면, R_w/L = 0.433, α_v = 0.68의 값을 근사적으로 CHF점에 부여할 수 있다. 그러나 이렇게 추정한 값들은 단지 설정된 비등 모델의 형상과 R_w/L 의 관계만을 고려했으며, 접촉각에 따른 열전달계수등의 변화는 전혀 고려하지 않았으므로 기하학적 조건이라 할 수 있다. 따라서 이러한 조건은 실제 CHF점으로의 접근과정에서 어느 환경이 가장 자연스럽게 이루어 질수 있는가를 접촉각에 따라 고려하여야 하겠다. <그림 6>는 접촉각 Φ인 임의의 기주에 대한 것으로, Φ<90°의 경우, 가열면의 온도가 CHF에 접근함에 따라 가열표면으로부터 $R_b \cdot \cos\Phi$ 만큼 떨어진 위치로부터 인근 기주와 접촉이 일어난다. 일단 이웃 기주간의 접촉으로

인한 통합이 이루어지면, 기존 기주 주위에 새로운 기주핵의 발생확률은 매우 낮아지므로 $L/2 = R_b$ 를 유지하고, 이때 $R_w/L = (\sin\Phi)/2$ 의 값을 갖는다. 접촉각 Φ가 매우 낮은 경우에는, 기주간의 접촉이 일어난 이후에도 $R_w/L=0.433$ 의 값을 갖을때까지, 경사기액계면은 그면에 수직하여 가열면 쪽으로 이동하는 과정이 요구된다. 한편 $\Phi=60^\circ$ 근처에서는 기주간의 접촉이 일어난 순간, $R_w/L=0.433$ 의 값을 유지하므로, 경사기액계면의 이동없이 앞에서 언급한 기하학적조건에 만족된다. 그러나 $\Phi>60^\circ$ 에서는 기주접촉 이전에 $R_w/L > 0.433$에 도달하므로 기존 기주 주위에는 아직 또다른 기주핵의 발생 가능지역이 남아있고, 그로 인하여 $\alpha_v > 0.68$ 의 값을 갖게 된다.

따라서 $\Phi = 60^\circ$ 의 경우, 임계점에서의 $\alpha_v = 0.68$, $R_w/L = 0.433$ 의 값을 부여함이 타당하다는 결론을 얻을 수 있다. 이를 근거로, $\Phi = 60^\circ$ 이외에 대한 α_v 설정을 위하여, 모든 접촉각에 적용 가능한 열전달조건,

$$\frac{dq}{d(\Delta T)} = \frac{d[h_w(1-\alpha_v)\cdot\Delta T + h_v\cdot\Delta T\cdot\alpha_v]}{d(\Delta T)} = 0 \quad \text{(19)}$$

를 사용하겠다. 식(19)에서 $h_v \ll h_w$ 이며, 각 항에 $d(\Delta T)/d\alpha_v$를 곱하면,

$$\frac{1}{\Delta T}\cdot\frac{dL}{dS_m}\,\frac{d(\Delta T)}{dL} + \frac{1}{h_w}\cdot\frac{dh_w}{dS_m} = \frac{1}{1-\alpha}\cdot\left(\frac{d\alpha_v}{dS_m}\right) \quad \text{(20)}$$

이다. 윗식에서 S_m 은 액체와 접촉하는 가열면적에 대한 S 의 평균 길이이다. 여기에 식(2), 식(16) 으로부터 구한

$$\frac{d(\Delta T)}{dL} = -\frac{1}{B}\left(\frac{\Delta T}{L}\right) \quad \text{(21)}$$

$$\frac{dh_w}{dS_m} = -\frac{h_w(1-i)}{S_m} \quad \text{(22)}$$

와 식(7)에 $\dfrac{d\alpha_v}{dS_m} \approx \dfrac{\partial\alpha_v}{\partial S_m}$ 의 가정을 적용하여 얻은

$$\frac{1}{1-\alpha_v}\cdot\left(\frac{d\alpha_v}{dS_m}\right) \approx -\frac{1}{S_m} \quad \text{(23)}$$

을 대입하여 정리하면

$$\frac{S_m}{L}\cdot\frac{dL}{dS_m} = B\times i \quad \text{(24)}$$

를 얻는다. 식(24)에서 dL/dS_m 는 접촉각에 관계없이 거의 일정한 값을 갖고, B 도 식(2)

에 의하여 일정하므로 결국 $\frac{S_m}{L} \approx i$ 를 얻을 수 있다. 따라서 임의 접촉각 Φ 에 대한

$(\frac{S_m}{L})_{CHF,\Phi}$ 는

$$(\frac{S_m}{L})_{CHF,\Phi} = (\frac{S_m}{L})_{CHF,60} \cdot [\frac{i_{CHF,\Phi}}{i_{CHF,60}}] \quad (25)$$

로 표시할 수 있으며, i_{CHF} 는 <그림 4>의 수치계산으로 부터 얻은 값들이다.

식(25)의 $(S_m/L)_{CHF,\Phi}$과 식(4)의 α_v 와 R_w/L 의 관계를 식(7)에 대입하면, 각 접촉각에 대한 $(\alpha_v)_{CHF,\Phi}$ 를 구할 수 있다.

3. CHF 점에서의 온도와 열유속 계산

변수들중 건면적비 α_v 와 S_m/L, 또는 R_w/L 는 이미 앞의 방법에 의하여 결정되었으나, CHF 점에서 액체접촉 면적의 열전달계수 h_w 에 직접 영향을 미치는, $(L)_{CHF,\Phi}$ 와 $(S_m)_{CHF,\Phi}$는 아직 미지수로 남아있다. 이들을 추정하기 위하여, 실제의 현상에 근거를 두고 다음의 과정을 고려하였다. 우선 접촉각이 매우 낮은 경우, 각각의 독립기포들은 그 주위의 가열면에 인접한 경사 기액계면이 형성되므로 가열면으로 부터의 열전달은 별다른 열저항 없이 기액계면을 통하여 기포의 성장에 기여하며, 가열면과 경사 기액계면 사이의 액체층도 매우 얇아, 기포 분리직경에 해당하는 영역내에서는, 새로운 기포핵의 발생에 요구되는 충분한 두께의 과열액층 형성이 어렵게 된다. 이러한 독립기포들은 접촉각이 낮을수록 해당하는 분리 직경까지 성장, 분리, 생성되며, 온도 증가에 따라 기주를 형성한다. CHF점에 근접하면, 다른 지역에서 성장한 이웃 기주들은 서로 접촉 통합하며, 이때의 기주간 거리 L은 접촉각이 낮을수록 분리직경 D_d 에 근접한다. 그러나 접촉각이 증가하면, 각각의 독립기포들은 가열면으로부터 비교적 먼거리에 기액계면이 존재하고, 가열면과 기액계면 사이의 액체층도 두꺼워져, 미처 기주 또는 기포가 분리직경까지 성장하기 전에 인접 영역에서 기포핵이 발생된다. 따라서 가열면으로 부터의 열전달은 기존 기포 또는 기주의 성장보다는 새로운 기포핵의 성장에 사용되고, 결과적으로 접촉각 Φ 가 증가할수록, 기주간거리 L은 분리직경보다 작아지는 경향을 갖는다.

따라서 접촉각이 최소인 경우, 기주간의 거리 L은 그 접촉각에 해당하는 분리직경으로 고려할 수 있으나, 접촉각 "0° "에서는 분리직경 역시"0"이므로, 본 논문에서는 공업적으로 사용되는 액체에서 $\Phi > 10^{\circ}$ 인 것을 고려하여, 접촉각 10° 를 최소 접촉각으로 선택했다. 따라서 각 접촉각별로 나타낸 분리직경 관계식(9)을 $\Phi = 10^{\circ}$ 인 경우에 적용하여 $(L)_{CHF,10}$ 를 구하면 식(26)과 같다.

$$(L)_{CHF,10} = 2 \cdot \Phi \cdot 0.0104 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}} \quad (26)$$

단, 윗식은 부력과 표면장력만을 고려한 식으로, ρ, σ, g는 각각 밀도, 표면장력, 중력이다. 이를 근거로 Φ > 10^{o} 에 대한 L을 구하기 위하여 <그림 7>을 고려하겠다. 여기서

$(L)_{CHF} \approx 2(S_m + R_w)_{CHF}$ 이고, $(S_m)_{CHF} = (\delta)_{CHF} / \sin\theta$,

$(R_w)_{CHF} \approx 0.433 \cdot (L)_{CHF}$ 이므로 $(L)_{CHF} \approx \dfrac{(\delta)_{CHF}}{\sin\theta}$ 인 관계를 얻을 수 있다. 여기서 $(\delta)_{CHF}$ 는 기주 밑부분의 과열액층 두께를 나타내는 대표적 길이라 볼수 있고, 이값에 의하여 CHF 가 결정되므로, 각 접촉각에 대하여 거의 변화가 없다고 한다면, 접촉각 10° 이외의 $(L)_{CHF,\Phi}$는 역시 10° 를 기준으로 식(27)과 같이 계산된다.

$$(L)_{CHF,\Phi} = \left(\frac{\sin 10}{\sin\Phi}\right) \cdot (L)_{CHF,10} \quad \text{------------------------------} \quad (27)$$

$(S_m)_{CHF,\Phi}$도 앞에서 구한 α_v 와 식(4)를 식(7)에 대입하여 산출할 수 있다.

한편 CHF 에서의 온도 및 열유속은, 면의 거칠기와 같은 가열면 특성에 따른 변수에도 직접적인 영향을 받으므로 α_v와 접촉각 Φ 만으로 규정하기가 곤란하다. 이들의 계산을 위하여는 핵비등 영역에서 최소 두점에 대한 q 와 ΔT 의 실험치가 요구되며, 이로부터

$$q = C \cdot (\Delta T)^n \text{또는} \quad h = C \cdot (\Delta T)^{(n-1)} = (1-\alpha_v) \cdot h_u \quad \text{------------} \quad (28)$$

의 관계식에서 C 와 n를 결정할 수 있다. 식 (28)에서의 h를 CHF 점에서의 h_{CHF}을 대입하면,

$$(\Delta T)_{CHF} = \sqrt[n-1]{h_{CHF}/C} = \sqrt[n-1]{(1-\alpha_v) \cdot (B_{i,w})_{CHF} \cdot k_l/(C \cdot S_{m,CHF})} \quad \text{-} \quad (29)$$

이므로, 식 (29)로부터 임계점에서의 온도를 예측할 수 있고, 또한 식 (28) 로부터 임계열유속 q_{CHF} 도 계산 된다. 본 연구에서 핵비등 영역에서의 실험치는 Dhir[11] 등의 실험결과를 인용하여 Φ=90^{o} 와 15^{o} 에 대한 C와 n를 계산한 결과, 접촉각에 관계없이 n=3.3 의 값을 얻었으며, 기타 접촉각에 대한 C의 값은, 실험치가 없었으므로, 내삽/외삽법으로 구했다.

이상의 과정으로 계산한 *CHF* 점에서의 영향인자들 값은 <표 1>에 있으며, 그 결과중, 각 접촉각에 대한 건면적비, 열전달계수 등의 변화는 <그림 8>에 도시했다.

<표 1> CHF 점에서 영향변수 및 온도, 열유속 계산 결과

Φ, degree	α_v	Sm/L	$L \cdot 10^4$, meter	Bi,e	Bi,w	h, $W/cm^2 \cdot K$	C	ΔT, °C	q, W/cm^2	식(1)
10	0.470	0.168	5.220	43.413	11.084	4.250	14.03	32.63	138.668	
15	0.525 *0.54	0.149	3.502	24.108	6.302	3.900 *3.394	*14.86	30.66 *33.0	119.574 *112	
30	0.575 *0.67	0.131	1.813	10.992	2.900	3.521	17.35	27.41	96.511	110.7($K_1 = \pi/24$)
45	0.650	0.106	1.282	6.281	1.966	3.441	19.83	25.61	88.124	
60	0.680	0.097	1.047	4.711	1.487	3.172	22.32	23.48	74.479	135.5(K_1=0.16)
75	0.730 *0.76	0.083	0.938	3.602	1.119	2.634	24.80	20.69	54.497	
90	0.768 *0.79	0.073	0.906	3.048	0.982	2.347 *2.160	*29.29	18.87 *20.5	44.288 *57	

※ 표 내에서 * 의 표시는 참고문헌(11)에서 인용한 실험치 값임.

<표 1>에 수록한, 인용 가능한 실험치들은 계산값들과 허용오차 한도 내에서 비교적 잘 일치함을 알수 있으며, 접촉각이 증가할수록 임계점에서의 건면적비는 증가하는 반면, 열전달계수, 열유속, 임계온도 등은 모두 감소하고 있다. 이러한 경향은, 기존의 실험적인 결과와 잘 일치하는 것으로, 접촉각이 증가할수록 기주핵이 될 수 있는 기포 발생율이 높아지며, 이로 인해 가열면은, 비교적 낮은 온도에서도, 증기층에 의하여 액체와 차단되는 영역이, 접촉각이 낮은 경우보다, 더 넓어지기 때문에 발생한다. 이러한 현상은 접촉각이 높아질수록 임계온도는 낮지만 <표 1>에서 S_m/L 은 감소, 즉 액체와 접촉하는 면적의 평균길이가 더욱 짧아짐이 원인이라 하겠다.

4. 결 론

본 연구는 임계열유속(CHF)점에 대한 지배적 인자들을 예측하기 위한 것으로, 우선, 액체와 가열면간의 접촉각이 주어지면, 이로부터 CHF점의 건면적비 등의 기타변수들이 설정된 모델에 따른 기하학적조건 및 열전달 계산 결과로부터 추정될 수 있다. 그러나 CHF점의 온도 및 열유속 추정은, 접촉각 및 건면적비 외에, 면의 거칠기 등의 가열면 특성에도 직접적으로 관계하므로, 이들의 영향이 반영된 실험적 자료가 요구된다. 본 연구에서는 실험적 자료로서 핵비등영역에서의 최소 2점에대한 온도 및 열유속 실험치를 사용하여 계산했고, CHF점에 대한 온도, 열유속결과는 인용된 실험치와 비교적 양호하게 일치하였다.

액체 접촉영역에서의 열전달을 수치계산한 결과, 접촉면적의 평균길이가 증가할수록 열전달계수도 증가하고, 평균길이가 일정한 경우에는 접촉각이 커질수록 열전달계수가 낮아지는 결과를 얻었으며, 이 결과는 접촉각이 작을수록 과열액층이 얇아지므로 열전달저항이 감소된다는 것을 의미한다.

또한 <그림 8>에서와 같이, CHF점에서의 건면적비는 접촉각이 작을수록 작아지는 반면, 열유속 및 온도는 높아지는 경향을 나타내므로, 접촉각이 작은 경우보다 접촉각이 클 때의 기포 발생 확율이 높고, 그로 인하여 보다 낮은 온도에서 임계점에 도달함을 예측할 수 있으며, 이는 기존의 실험결과들과도 잘 일치하고 있다.

참 고 문 헌

1. S.G.Bankoff, "Entrapment of gas in the spreading of a liquid over rough surface", AIche J., 4, pp.24-26(1958)
2. F.D.Moore & R.B.Mesler, "The measurement of rapid surface temperature flucturations during nucleate boiling of water", AIche J., 7(4), pp.620-624(1961)
3. C.P.Costello & W.J.Frea, "A salient non-hydrodynamic effect on pool boiling burnout of small semi-cylinder heater", AIche J., 6th. conf., Boston, Mass.(1963)
4. R.F.Gaertner, "Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface", ASME J. Heat transfer, 87, p.10(1948)
5. S.S.Kutateladze, "On the transition to the film boiling under natural convection", Kotloturbostroenie, 3, p.10(1948)
6. N.Zuber, "Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer", Ph.D.Thesis, UCLA(1959)
7. J.H.Lienhard & V.K.Dhir, "Extended hydrodynamic theory of the peak and minimum pool boiling heat fluxes", NASA Rept., CR-2270(1973)
8. H.C.Perkins, "A void measurement technique for local boiling", Nucl.Sci.Eng., 11(3), pp.304-311(1961)
9. Y.Y.Hsu & R.W.Graham, "Transport processes in boiling and two-phase systems", McGraw-Hill, 1976
10. V.S.Arpaci, "Conduction heat transfer", Addison-Wesley, 1966
11. S.P.Liaw & V.K.Dhir, "Void fraction measurements during saturated pool boiling of water", J. Heat trans., 111, pp.731-738(1989)