

접촉각 변화에 따른 핵비등과 천이비등 곡선의 예측

안강수* · 남궁규완**

*울산전문대학 기계과 · **울산대학교 기계공학과

<요 약>

본 연구의 목적은 임계열유속점의 영향인자들을 근거로 하여, 핵비등과 천이비등 곡선을 예측하려 한다. 임계점에서의 인자들과 열전달 문제들의 해는 이미 발표된 논문의 결과들을 인용했다. 열유속과 비등곡선들은 과열온도에 대한 건면적비 관계식과 기주간의 거리에 대한 건면적비 관계식을 사용하여 계산했다. 예측된 열유속과의 비교를 위하여 증류수를 사용한 푸울 비등실험도 수행했으며, 실험조건으로는 면의 접촉각으로 정량화한 가습성을 변화시켰다.

각각의 접촉각에서 예측된 비등곡선들은 그 모양이 일반적인 비등곡선과 일치하며, 다음의 경향을 보이고 있다. 즉 동일한 과열온도의 경우, 핵비등 영역에서는 접촉각이 커질수록 열유속도 증가하나 천이영역에서는 이와 반대되는 경향을 보이고 있다. 예측된 열유속도 핵비등 영역에서는 실험치들과 거의 일치하나, 천이영역에서는 실험치보다 낮은 값을 나타내고 있다.

Prediction of Nucleate and Transition Boiling Curves with Different Contact Angles

Ahn, Kangsoo* · Namkoong, Kyuwon**

* Dept. of Mechanical Engineering, Junior College of Ulsan

** Dept. of Mechanical Engineering, University of Ulsan

<Abstract>

This study aims to predict a boiling curve of the nucleate and transition boiling region on the basis of the parameters affecting the CHF point. The parameters on the

CHF point and the solutions of heat transfer problems are taken from the published paper, ref.(6). The heat flux is calculated and its curve is drawn by the use of the void fraction relation to the superheat and to the distance between vapor stems.

The experiment of water pool boiling was conducted according to the wettability which is qualified by the contact angle, and these data are compared with the predicted heat flux.

The predicted boiling curves for various contact angles are in good agreement with the general curves in shape. And show the trend that higher contact angle gives higher heat flux at same superheat in the nucleate boiling region, but higher angle gives lower heat flux in the transition boiling region. The predicted heat flux is almost the same in comparison to the experimental data in the nucleate region, however, it is low in the transition region.

1. 서 론

비등곡선이 Nukiyawa⁽¹⁾에 의하여 발표된 이후, 지금까지 푸울비등에 대하여 많은 연구가 있어왔으나, 이들의 대부분은 각 비등영역에 대하여 현상학적으로 별도로 다루고 있으며, 각 영역의 상호관계 및 연관성에 대하여는 거의 알려져 있지 않다.

우선, 기포 발생밀도와 빈도에 밀접한 관계가 있는 핵비등영역에서 활성기포 발생밀도, N_a 는 열유속 q 와 지수적함수관계, 즉 $N_a \sim q^m$ 가 있다고 Gaertner⁽²⁾ 등이 발표했고, m 의 값은 1-2 사이의 값을 갖는다고 실험적으로 관찰했다. Bobast⁽³⁾ 등은 열경계층내의 온도분포를 비교적 정밀하게 측정하여, 그 두께는 ΔT^{-6} 에 비례한다고 했고, Iida⁽⁴⁾ 등은 처음으로 가열면에 인접한 위치에서 전기전도 탐사침을 사용하여 건면적비를 측정한 결과 임계열유속점에서 건면적비는 최대 0.9의 값을 얻었다. 이보다 더 정확한 건면적 측정실험은 Liaw⁽⁵⁾ 등이 방사선을 사용하여 수행했으며, Iida 결과보다 더 낮은 건면적비의 값을 얻었다. 이들은 열전달계수를 이론적으로 계산했고, 측정된 건면적비를 대입하여 열유속을 구한 결과, 실험치와 잘 일치했다. 한편 안장수⁽⁶⁾ 등은 Liaw의 4각 분포모델을 3각 분포모델로 변환하여 임계열유속점에서 건면적비 및 기주간 거리 등의 영향인자를 각 접촉각에 대하여 열적 및 기하학적 조건을 적용하여 계산했고, 이로부터 임계점의 열유속 및 온도를 예측했다. 계산된 임계열유속은 접촉각이 비교적 높은 가열면에서 Kutateladze⁽⁷⁾ 나 Zuber⁽⁸⁾의 임계열유속값과 거의 일치했고, 건면적비도 Liaw 등의 실험치와 양호한 일치를 보였다.

임계열유속 이후의 천이비등 영역에서는 불안정한 핵비등과 불안정한 막비등이 교체되어 일어난다는 Berenson⁽⁹⁾의 결과에 근거를 두고 대부분의 연구가 진행되었으나, Sakurai⁽¹⁰⁾ 등이 천이비등곡선의 hysteresis를 발견한 이후, 두 개의 천이곡선이 존재할 수 있다는 것이 거의 확실시 되었다. Bui⁽¹¹⁾ 등은 핵비등 영역과 막비등 영역으로부터 천이비등 영역에 접근할 때 얻어지는 비등곡선은 서로 각각 다른 특징을 갖는다는 것을 발견했다. Liaw⁽¹²⁾ 등은 천이비등에서 hysteresis에 대한 표면 가습성의 영향을 실험적으로 관찰한 결과, 냉각 또는 가열하면서 얻는 천이비등 곡선(즉 핵비등 또는 막비등 영역으로부터 접

근할 때의 천이비등 곡선)의 차이는 가습성이 증가할수록 작아짐을 발견했다. 천이영역이 끝나고 막비등이 시작하는 최소 열유속점은 Berenson⁽¹³⁾이 기액계면의 안정성이론에 근거를 두고 최소 열유속, q_{min} 을 식(1)과 같이 유도했다.

$$q_{min} = 0.09 \cdot \rho_v \cdot h_{fg} \cdot [\sigma \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) / (\rho_l + \rho_v)^2]^{1/4} \quad (1)$$

윗 식에서 ρ_v , ρ_l 은 증기 및 액체의 밀도이고, h_{fg} 는 증발잠열, σ 는 표면장력, g 는 중력가속도이다. 그러나 식(1)은 과열온도를 포함하고있지 않으므로, 최소열유속점의 기준이 되는 값으로 사용될 뿐이다. 한편, 막비등영역에서 열전달계수 관계식은 Bui(14)가 식(2)로 표시했으며,

$$h_v = 0.37 \cdot \left[\frac{k_v^2 \cdot \rho_v \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot h_{fg}}{\mu_v \cdot \Delta T \cdot (\sigma/g)^{1/2} \cdot (\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 k_v 는 증기의 열전도계수, μ_v 는 증기의 점성, ΔT 는 과열온도이다.

본 연구는 핵비등과 천이비등 영역에서의 비등곡선을 기존의 분리된 관점보다는 연관된 관점에 근거를 두고 예측함을 목적하고 있으며, 이 과정에서 필수적인 정보는 비등곡선의 변곡점인 최대 및 최소 열유속점에 대한 것이다. 따라서 최대 열유속점, 즉 임계점에서의 영향인자 및 열전달계수 h_w 는 참고문헌(6)의 결과들을 인용했고, 증기접촉 가열면에서의 열전달계수는 식(2)를 사용했다. 또한 과열온도 ΔT 와 건면적비 α_v (=증기접촉면적/전 가열면적)의 관계식은 기존의 실험들에 의하여 확인된 지수관계식을 사용했고, 여기에 $q = F(\alpha, \Delta T, h_v, h_w)$ 포함된 계수들은 임계점의 조건들과 반복 계산과정에 의하여 결정했다. 이상의 과정으로 구한 변수들을 의 관계식에 대입하면 각 과열도에 대한 열유속을 계산할 수 있다. 계산된 열유속의 타당성 확인을 위하여, 증류수를 사용한 푸울비등 실험도 병행하여 수행되었으며, 수평 가열면의 조건은 액체와 면간의 가습성만을 변화시켜, 접촉각이 90°, 60°, 15° 인 경우에 실험했다.

2. 이론적 배경

본 단원에서 언급할 내용들은, 참고문헌(6)의 임계열유속점에 대하여 얻은 이론결과들을 확장하여, 핵비등영역 및 천이비등영역에 적용하는 과정에 요구되는 관계식들에 대한 것이다. 따라서, 이들 영역에서의 열유속과 과열온도 관계, ($q - \Delta T$)에 영향을 미치는 인자들, 즉 기주간의 거리 및 건면적비의 온도에 따른 변화 등과 이들을 이용하여 비등곡선을 형성하는 방법에 대하여만 언급하겠으며, 문헌(6)에서 유도된 기본 이론식들의 중복 언급은 하지않겠다.

우선 본 연구에서 제시한 모델은 정삼각형 각 꼭지점에 버섯형태 기포의 기주가 있다고 가정한 모델로서 <그림 1>과 같다. 기포덩어리로 증기를 공급하는 기주들의 평균간격을 L , 기주밀도를 $N(\text{site no./area})$ 이라 하면, $L = (N \cdot \sin 60^\circ)^{-0.5}$ 의 관계가 있다.

기주밀도 N 은 열유속 q 와 $N \sim q^m$ 의 관계가 있으며, 일반적으로 $q \sim \Delta T^n$ 가 성립하므로, L 과 ΔT 는 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

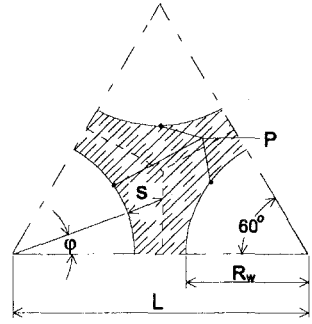


Fig.1 Plane view of vapor stems on a triangular grid.

$$L \sim \Delta T^{-m \cdot n / 2}, \quad \text{or} \quad L = A \cdot \Delta T^{-B} \quad (3)$$

기존의 연구결과에 의하면, 동체 가열면상 물의 푸울비등에서 $m = 1.0 \sim 2.0$ 을 갖는다고 했다. 본 연구는 Gaertner⁽²⁾의 실험치인 $m = 1.5$ 의 값과, 본 실험에서 측정된 $n = 3.27$ 의 값을 대입하여 얻는 $B = 2.42$ 를 사용했다. 또한 <그림. 1>로부터, 건면적비 α_v 를 구하면,

$$\alpha_v = f(R_w / L), \quad \text{or} \quad \alpha_v = g(S_m / L) \quad (4)$$

의 관계를 얻으며, 여기서 R_w 는 가열면에서의 기주반경, S_m 은 60° 구간 내에서 S 의 평균길이, f 와 g 함수의 상세 관계식들은 문헌(6)에 유도되어 있다. 식(3), (4)는 임의 과열온도에서 S_m 을 추정할 수 있는 식들로서, 그 과정은 다음과 같다. 우선 임계점에서 L 과 ΔT 를 대입하여, 식(3)의 상수, A 를 결정한 후, 임의 과열온도에서 계산한 L 과 α_v 를 식(4)에 대입하여 S_m 또는 R_w 를 구한다. 단, α_v 는 본 단원의 후미에서 언급되는 식(8), (9)와 <표 1>에 의하여 결정한다.

한편 가열면에 부분적으로 액체와 증기에 접촉되어 있을 때, q 와 ΔT 의 관계는 식(5)와 같다.

$$q = h \cdot \Delta = (1 - \alpha_v) \cdot h_w \cdot \Delta T_w + \alpha_v \cdot h_v \cdot \Delta T_v \quad (5)$$

위 식에서 h_w , h_v 는 액체 및 증기 접촉면에서의 열전달계수이고, ΔT_w , ΔT_v 는 액체 및 증기 접촉 표면온도이다. 가열면이 열전달계수가 큰 재질인 경우, $\Delta T_w \approx \Delta T_v \approx \Delta T$ 로 표시할 수 있으므로, 식(5)의 전 가열표면에서의 평균 열전달계수 h 는 식(6)과 같다.

$$h = (1 - \alpha_v) \cdot h_w + \alpha_v \cdot h_v \quad (6)$$

식(5), (6)에서 h_v 는 가열면이 증기와 접촉하고 있는 경우이므로, 막비등 열전달 관계식(2)를 사용할 수 있으며, h_w 는 식(7)의 함수관계로부터 계산할 수 있다.

$$h_w = (k_l / S_m) \cdot H (h_e \cdot S_m / k_l) \quad (7)$$

단, 식(7)에서 k_l 은 액체의 열전도계수, h_e 는 기액계면에서 증발로 인한 열전달계수이고 함수 H 는 문헌(6)에 수치계산 프로그램 및 결과가 제시되어 있다. 앞에서 제시한 방법으로 계산한 S_m 을 식(7)에 대입하면, h_w 의 값이 얻어지므로, α_e 만 결정하면, 식(5)로부터 q 와 ΔT 의 관계를 예측할 수 있다. 건면적비 α_v 는 Liaw의 실험에 의하여, 식(8)의 관계가 제시되었으며, 여기서 A_a 와 Ba 는 각 가열면 상태 및 기하학적 조건에 따라 변하는 상수들이다.

$$\alpha_v = A_a \cdot \Delta T^{Ba} \quad (8)$$

본 연구는 과열도에 대한 건면적비의 관계를 실험에 의하여 구하지 않고 이론적인 관계에 의하여 구하므로, 열전달 해석에서 구한 임계열유속점에서의 건면적비와 과열도에 의존해야만 한다. 과열도에 대한 건면적비의 관계를 구하기 위해서 주어진 조건은 다음 두가지이다. 즉, 임계열유속점에서 건면적비와 과열도가 일치하고, 임계열유속점의 과열도에서 열유속이 최대값 이어야 한다는 것이다. 후자의 최대열유속 조건은, α_e 가 열유속 관계식에서 내포함수 형태로 존재하므로, 반복 계산이 요구되며, 그 과정은 다음과 같다.

- ① 적당한 Ba 값을 가정하고, 임계점의 건면적비와 과열도를 이용하여 식(7)에서 A_a 를 구한다.
- ② 임계열유속점 전후의 과열온도에서 건면적비를 구하고, 식(3)과 식(4)를 이용하여 S_m 및 h 를 계산하여 열유속을 구한다.
- ③ 임계점의 온도에서 최대열유속이 얻어지는가를 판단하고, 아니면 다른 Ba 값을 가정한다.
- ④ 위의 ①~③과정을 반복한다.

한편 천이비등영역에서의 건면적비 함수관계는, 대수좌표 비등곡선에서 ΔT 에 대한 q 의 변화경향이 핵비등과는 반대이므로 식(9)의 함수관계를 사용했으며, 여기서도

$$1 - \alpha_v = A_{at} \cdot \Delta T^{-Bat} \quad (9)$$

상수 A_{at} , Bat 의 결정과정은 앞의 경우와 동일하다. 이상의 과정으로부터 구한 식(8), (9)의 상수들을 각 접촉각별로 표시하면 <표 1>과 같다.

이와같은 방법으로 α_v 관계식이 성립되면, 식(6)에 의하여 최종적으로 $q \sim \Delta T$ 의 관계를 예측할 수 있다. 즉, 먼저 임의 온도 ΔT 에 해당하는 L 과 α_v 를 식(3)과 식(8) 또는 식(9)에 의하여 구하고, 그 결과를 식(4)에 대입하면 S_m 을 계산할 수 있다. 다음에는 식(2)와 식(7)에서 각각 계산한 h_v 와 h_w 를 식(6)에 대입하면, ΔT 에 해당하는 q 의 계산가능하며, 이러한 과정을 천이 비등이 끝나는 $\alpha_v = 1$ 이 될 때까지 계속한다.

Table 1 Coefficients of the Eqn.(8) and Eqn.(9)

접촉각(°)	A_a	B_a	A_{at}	B_{at}
10	0.17123×10^{-15}	10.163	0.23699×10^6	3.719
15	0.11592×10^{-10}	7.058	0.29818×10^7	4.501
30	0.61759×10^{-8}	5.353	0.49673×10^8	5.419
45	0.43215×10^{-7}	3.546	0.24004×10^{10}	6.737
60	0.45441×10^{-4}	2.91	0.67524×10^{10}	7.196
75	0.33734×10^{-3}	2.417	0.85283×10^{10}	7.609
90	0.13848×10^{-2}	2.086	0.13189×10^{10}	7.415

3. 실험장치 및 방법

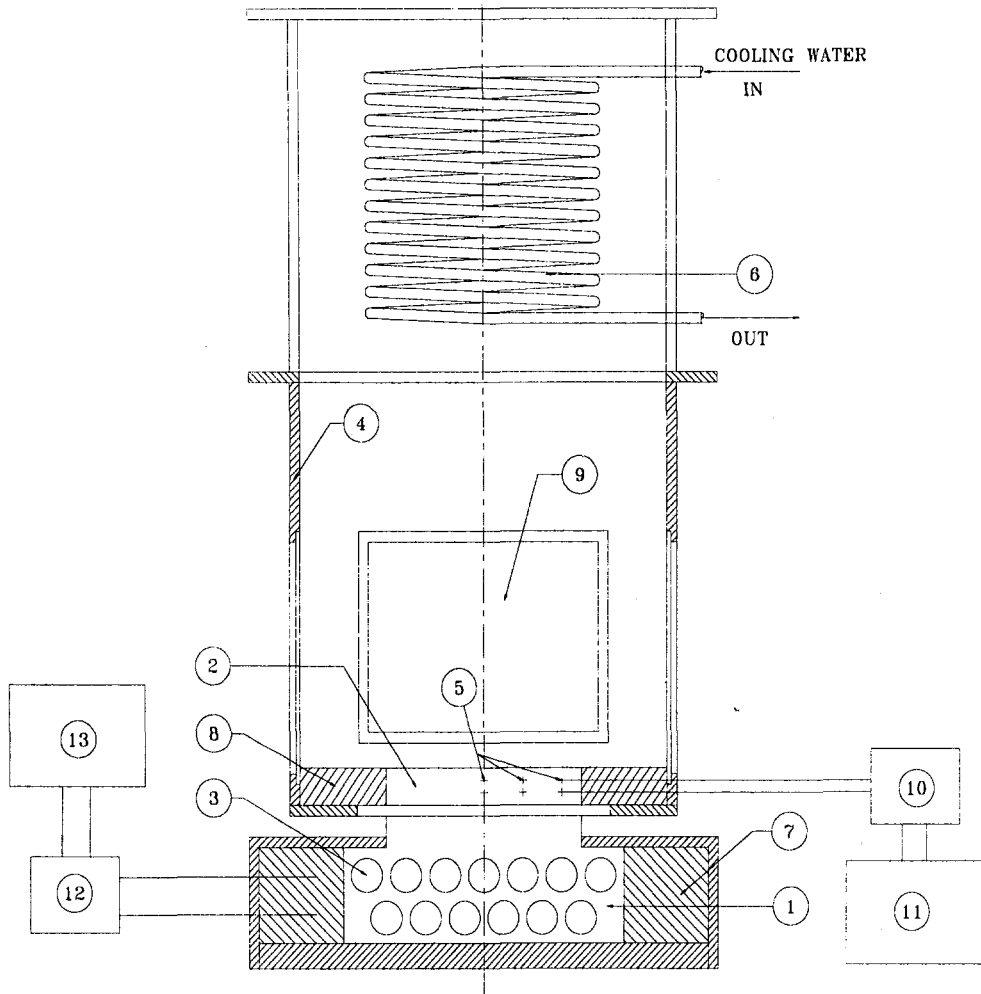
실험장치는 <그림 2>와 같이, 가열요소가 설치된 가열블록, 비등이 발생하는 가열판, 비등액을 담고있는 비등용기, 그리고 공급열량을 제어하고 온도 등을 측정하는 제어측정부부분으로 구성된다.

가열블록의 재질은 구리이며, 크기는 $80 \times 144 \times 45\text{mm}$ 이다. 블록 내에 직경 18mm의 구멍을 뚫어, 그 구멍에 직경 16mm, 길이 76mm, 240V, 0.75kW인 Watlow사의 카트리지 히터 13개를 삽입하였고, 열전달이 비등용기와 접촉하고 있는 위 방향으로만 이루어지도록, 측면벽은 모두 석면으로 단열 시켰다. 블록의 발생 열량은 히터에 공급하는 전압을 조절하여 제어하였으며, 과열로 인한 히터의 소손을 방지하기 위하여 블록 중심에 열전대를 설치, 약 873K 이상의 온도가 감지되면 히터와 연결된 모든 전원이 차단되도록 설계되었다.

가열판은 크기가 $50 \times 1000 \times 38\text{mm}$ 로, 면의 온도를 측정하기 위하여 표면으로부터 1.0, 9.5mm의 깊이에, 측면으로부터 50, 30, 10mm 위치인 곳에 직경 2mm, 깊이 25mm인 구멍 6개를 가공했다. 가열블록과 가열면이 접촉하는 곳에서 열전달 저항을 없애기 위해서 가열판과 가열블록은 일체로 하였고, 1차원 열전달에 근접시키기 위하여 가열판의 모든 측면은 두께 20mm인 Glass-Teflon판을 이용하여 단열 및 방수도 겸하도록 하였다.

비등용기는 크기가 $198 \times 198 \times 200\text{mm}$ 이고 재질은 옆면과 뚜껑이 알루미늄이고 가열판과 접촉하는 밑면의 재질은 Glass-Teflon이다. 또한 용기 측면은 관찰을 위하여 $110 \times 70\text{mm}$ 의 강화유리를 끼운 창을 설치했다. 용기 내부는 발생 증기의 응축을 위해서 내경 10mm 튜브의 응축기와 용기 덮개에 냉각수 통로를 가공했고, 비등액은 증류수를 사용하였다.

히터에 공급되는 전압 조절은 VARIAC을 이용하였으며, 공급전압을 일정하게 유지하기 위해 정전압 조절장치를 사용했다. 온도 측정에 사용된 열전대는 직경 1.5mm의 선재에 glass wool로 피복된 k type이며, 측정부위의 구멍에 삽입이 용이하도록 스테인리스 튜브에 삽입했다. 또한 온도 측정점에서 열전대와와의 접촉을 보장하기 위하여 외부에서 스프링으로 밀어주는 기구를 사용하였다. 측정된 데이터는 data acquisition hardware를 이용하여 PC에 기록하였다.



- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| ① Heating block | ② Heating Plate |
| ③ Cartridge Heaters | ④ Boiling Vessel |
| ⑤ Holes of Thermocouple | ⑥ Cooling Coil |
| ⑦ Insulator | ⑧ Glass-Teflon Plate |
| ⑨ Visible Windows | ⑩ Data Acquisition Hardware |
| ⑪ P.C. | ⑫ VARIAC |
| ⑬ AVR | |

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

실험 중, 면의 산화 또는 오염 등으로 인한 면의 조건 변화를 최소로 줄이기 위하여, 증류수는 사전에 예열 탱크에서 충분히 끓여 수용가스를 제거했고 가열면도 미리 산화시켰다. 표면조도의 영향도 일정하게 하기 위하여 매 실험마다 가열면을 #1500의 사포로 충분히 연마하고 아세톤으로 불순물을 제거하였다. 비등이 일어날 수 있는 초기 공급전압은 45V이지만, 이 상태에서는 용기내 비등액 전체를 포화상태로 유지할 수 없으므로, 비등용기 내에 보조 히터를 삽입하여 비등액을 포화액으로 유지하였다. 약 65V에서는 보조 히터의 도움 없이도 포화상태가 유지될 수 있었다.

핵비등 영역 내에서의 열유속의 변화는 히터의 공급전압을 20V 간격으로 조절하여 행하며, 공급 열량을 일정하게 하여 정상상태가 유지될 수 있도록 장시간(약2시간이상) 일정 전압을 유지한 후 측정하였다. 임계열유속점 가까이(160V 이상)에서 보다 정확한 측정을 위하여 조절전압의 폭을 10~15V로 감소시켰다. 임계열유속점에 도달하였을 지의 여부는 가열면 온도변화를 PC 모니터로부터 관찰하여 측정온도가 갑자기 상승하는 때로 판단하였다. 임계열유속점에 도달 직후 전원을 차단하며, 이 이후의 가열은 히터 블록 자신에 저장되어있는 열량을 이용한다. 전원을 차단한 후부터는 가열면의 온도가 매우 신속히 변화하므로, 천이비등영역에서의 실험치들은 비정상상태에서 얻었으며, 온도측정은 핵비등에서 0.5sec, 천이비등에서는 10msec 간격으로 PC에 기록하였다.

표면 가습성의 효과는 액적과 가열면의 접촉각으로 정량화했으며, 가열면의 접촉각 변화는 Liaw 등⁽¹²⁾이 제시한 가열면 산화피막층 두께변화 방법을 인용했다. 산화과정은 가열면을 공기 중에서 6K/min의 율로 가열하여 일정시간을 해당온도에서 유지한 후, 전원을 차단하고 공기 중에서 냉각하였고, 접촉각은 상온에서 가열면에 포화액적 약 2cc를 낙하시켜 그 측면 형상을 접사 렌즈가 장착된 Nikon 카메라로 촬영하여 측정하였다.

4. 결과 검토

액체와 가열면간의 접촉각이 10° - 90°에서 변화할 때, 예측된 비등곡선은 <그림 3>과 같다.

그림의 핵비등영역에서 과열도에 대한 열유속관계, 즉, $q = C \cdot \Delta T^n$ 에서 n 의 값은 접촉각이 증가함에 따라 3.36에서 2.92의 값을 갖는다.

사실 모델 설정은 실험에 의해 구한 기울기가 3.27의 값을 근거로 계산했으나, 여러 가정이 도입된 과정들을 거쳐 비등곡선이 그려진 것이므로, 이 과정에서 여러 변수들이 원래의 실험치에 의한 기울기에 영향을 주어 변한 것 같다. 그러나 그 평균값은 본래의 실험치와 비슷하다. 전반적인 비등곡선의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 우선, 핵비등 영역에서는 접촉각이 증가할수록 같은 과열도에서 열유속은 증가되었으나, 천이비등 영역에서 접촉각이 증가할수록 열유속이 감소했으며, 접촉각이 증가할수록 임계열유속점과 최소열유속점에서

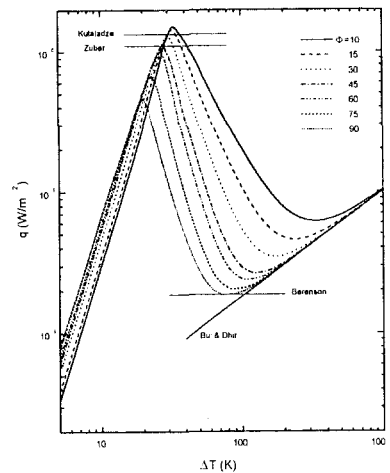


Fig.3 Predicted boiling curves for various contact angles

열유속과 과열도는 감소했다. 이러한 특징은 과거의 연구결과에 의하면 일반적인 푸울 비등 for various contact angles 곡선의 경향을 잘 나타내주고 있다.

최대열유속은 접촉각 10°와 15°에서 Kutateladze⁽⁷⁾의 기준보다 높았고 10°, 15°, 30°에서 Zuber⁽⁸⁾의 기준보다 높았다. 그 원인은 문헌(7), (8) 등의 관계식들이 면의 조건에 대하여는 전혀 고려하지 않고, 단지, 계면의 불안정성만 고려했기 때문이며, 이와 같이 낮은 접촉각에서 더 높은 열유속을 나타내는 현상은, 면의 가습성이 양호(접촉각이 낮은)할수록 임계열유속은 문헌(7), (8)에서 제시한 것보다 더 높아질수 있다는 것을 의미한다. 최소열유속점에서 열유속도 모든 접촉각에서 식(1)의 Berenson⁽¹³⁾ 기준보다 크게 나타났으며, 이 원인 역시 앞의 경우와 유사하기 때문이다.

<그림 4>는 이론적 모델을 이용하여 구한 핵비등 영역 내의 열유속에 대한 건면적비의 관계를 나타낸다. 동일한 건면적비에서 접촉각이 감소할수록 열유속은 크게 나타난다. 그 원인은 기주(기포)의 기하학적 형상에 의해 건면적비가 같더라도 접촉각이 감소할수록 기주(기포)의 직경은 커져, 기액계면의 면적과 기주(기포)의 전체 체적이 증가하는 동시에 가열면과 기액계면에 의하여 제한 받는 가열면 인근의 과열액층 두께가 얇아지기 때문으로 판단된다. 따라서 더 큰 열유속이 발생하고, 건면적비의 증가에 따라 열유속의 증가율도 더욱 커지게 된다.

<그림 5, 6, 7>에 접촉각이 각각 90°, 60°, 15°에서 실험치와 예측된 비등곡선을 비교했다.

그림들에서 실험치들의 표면온도는 식(10)에 의한 외삽법으로 계산했고, 열유속은 핵비등의 경우, 식(11)의 1차원열전도, 천이비등에서는 집중열용량법을 개선한 식(12)로 계산했다.

$$T_w = T_A - \frac{z}{\Delta x} \cdot (T_B - T_A) \tag{10}$$

$$q = k \cdot \frac{(T_B - T_A)}{\Delta x} \tag{11}$$

$$q = k \cdot \left[\frac{(T_B - T_A)}{\Delta x} \right] - \rho \cdot c \cdot z \cdot \left[\frac{T_w - T_w(old)}{\Delta t} \right] \tag{12}$$

윗 식들에서 T_A , T_B 는 가열면으로부터 깊이 1mm, 9.5mm인 지점에서 측정된 온도이고, z 는 1mm, Δx 는 두 열전대간의 거리 8.5mm이며, k 는 가열판의 열전도계수, c 는 가열판의 비열, $T_w(old)$ 는 t 시간 이전에 측정되어 계산된 표면온도, Δt 는 온도 측정 간격이다.

각 그림에서, 예측된 비등곡선과 실험치들의 과열온도에 대한 열유속 변화 경향은 정성적으로 잘 일치하고 있다. 그러나 정량적으로 비교할 때, 핵비등영역에서는 거의 일치하나, 천이비등 영역에서 상당한 차이가 있음을 알 수 있고, 이러한 경향은 접촉각이 증가함에 따라 더 커지게 된다. 핵비등에서 실험치와 잘 맞는 이유는 식(3)의 지수값을 실험치를 근

거로 계산했기 때문이며, 여기서 얻은 계산 결과들을 천이영역에서도 그대로 적용했다. 따라서 천이영역에서 실험치와의 차이는 다음과 같이 분석할 수 있다. 첫번째는, 본 연구에서 제안한 모델은 정상상태 실험에서 얻은 핵비등 영역의 데이터를 근거로 천이비등 영역까지 확장하였고, 실험에서 얻은 천이비등 영역의 실험치는 비정상상태 실험에 의한 것이며, 이론관계식에서 이들의 영향을 반영하지 못했기 때문이다. 두번째는, 천이 구간에서의 hysteresis 영향에 관한 것으로 고려할 수 있다. 본 실험에서, 천이영역내의 실험치들은

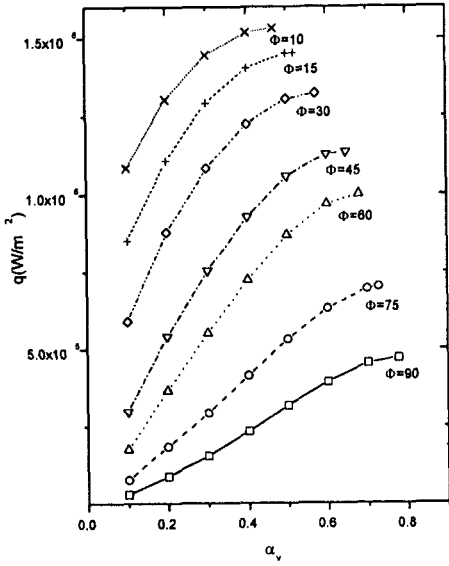


Fig.4 Variation of predicted heat flux with void fraction for various contact angles.

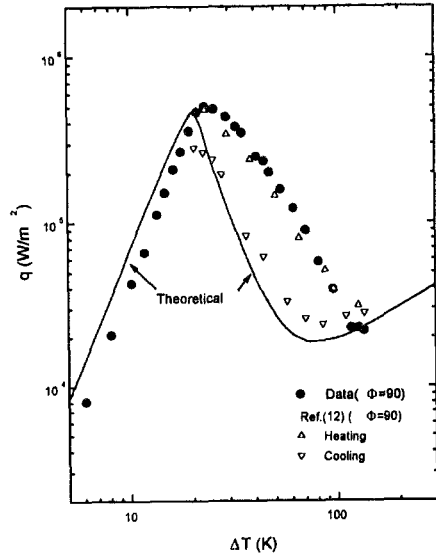


Fig.5 Comparison of predicted boiling curve and data for 90°

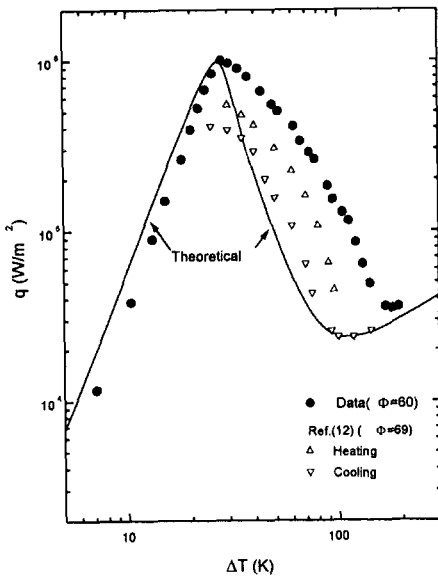


Fig.6 Comparison of predicted boiling curve and data for 60°.

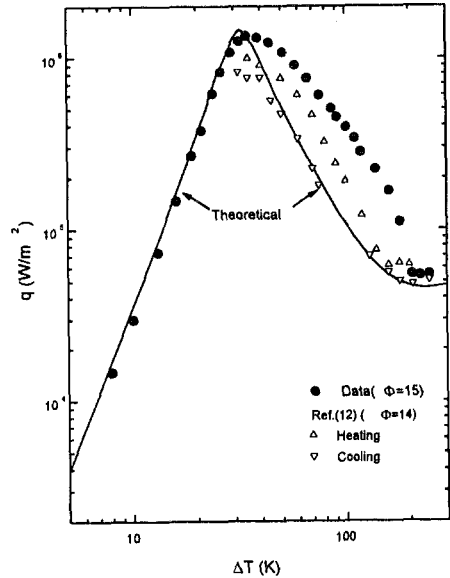


Fig.7 Comparison of predicted boiling curve and data for 15°

임계점을 약간 초과한 과열도까지 가열면을 가열하고 전원을 차단한 상태에서 가열면 과열도 상승에 따른 열유속 관계를 얻은 것이므로, 가열면을 가열시키며 실험한 천이상태의 실험치라 하겠다. 면의 과열도를 제어하며 얻은 기존의 연구결과들에 의하면 천이영역 내에서는 정상상태에서도 히스테르시스(hystersis) 현상이 존재한다고 하였다. 이 hystersis 현상은 가열면의 과열도가 동일한 경우일지라도 실험 환경 또는 조건에 따라 상이한 열유속을 나타내며, 특히 면의 과열도를 상승시키며 측정된 열유속은 면의 과열도를 강하시키며 얻은 열유속에 비하여 동일 과열도에서 훨씬 높은 경향을 나타내고, 또한 최소열유속점의 과열도도 높다. 따라서 천이영역에서 본 연구의 실험치들은 면을 냉각시키기 보다는 가열시키며 얻은 결과들이므로 이론값보다 열유속이 비교적 높게 얻어질수 있다.

또한, 각 그림에는 문헌(12)에서 인용한 천이영역내의 실험치도 같이 표시했다. 문헌(12)의 실험은 수직면에 대한 것으로, 본 수평면에 대한 실험조건이 다르므로, 비교하기에는 적합하지 않으나, 본 연구의 계산값은 냉각과정에서 인용한 실험치와 거의 일치하고 있다. 이것은 천이영역 내의 열전달이 면의 기하학적 배열조건에 대하여 무관하다는 것을 의미하나, 충분한 실험 및 검토가 아직 없는 상태이므로 추후의 과제라 하겠다.

5. 결 론

본 연구는 임계열유속점에서의 건면적비, 기주간의 거리, 온도 및 열유속 등의 인자들을 근거로 핵비등과 천이비등 영역에서의 가열면의 각 가습성에 따라 비등곡선을 예측했고, 이들을 중류수를 사용한 푸울비등 실험결과와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

우선 본 연구에서 제안한 모델에 의한 비등곡선은, 그 모양이 일반적으로 기대할 수 있는 비등곡선의 형태를 가지며, 동일한 과열온도의 경우, 핵비등 영역에서는 접촉각이 클수록 높은 열유속을 나타내는 반면, 천이영역에서는 이와 반대되는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 접촉각이 큰 면(가습성 불량)일수록 더욱 낮은 온도에서 임계열유속에 도달하며, 막비등도 접촉각이 작은 면보다 더 일찍 발생하는 현상을 초래한다. 결국 임계열유속점은 접촉각이 감소할수록 과열온도 및 열유속이 증가하고 최소열유속점은 접촉각이 증가할수록 과열온도 및 열유속이 증가하며, 이러한 경향은 기존의 실험결과들과도 일치하는 것이다. 또한 예측된 비등곡선은 실험치에 의한 비등곡선과 핵비등영역에서는 거의 일치하고 있으나, 천이비등 영역에서는 실험치보다 더 낮은 열유속을 나타냈고, 온도 증가에 따른 열유속 감소 추세도 더욱 급격했다. 그 원인은 실험치가 비정상 상태에서 얻어졌다는 것 외에 기타 표면조건의 변화로 인한 영향인자들을 본 연구에서 모두 반영되지 못했기 때문으로 판단되며, 이러한 문제는 차후 연구에서 해결되어야 하겠다.

참고 문헌

1. Nukiyama, S.. "The Maximum and Minimum Values of the Heat Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure." Trans. JSME, Vol. 37, PP.367, 1934.

2. Gaertner, R. F., "Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on a Horizontal Surface." ASME J. of Heat Transfer, Vol. 87, pp.17-29, 1965.
3. Bobast, R. W. and Colver, C. P., "Temperature Profiles up to Burnout 'Adjacent to a Horizontal heating Surface in Nucleate Pool Boiling of Water." Chem. Eng. Prog Symp. Series, Vol. 64, pp. 26-32, 1968.
4. Iida, Y. and Kobayasi, K., "Distribution of Void Fraction above a Horizontal Heating surface in Pool Boiling." Bull. JSME, Vol. 12, pp.283-290, 1969.
5. Liaw, S. P. and Dhir, V. K., "Framework for a Unified Model for Nucleate and Transition Pool Boiling." ASME, J. Heat Transfer, Vol. 111, pp. 739-746, 1989.
6. 안강수 & 남궁규환, "Prediction of Critical Heat Flux Point of Pool Boiling.", J. Engr. Research(UOU), Vol. 28, No. 2, pp. 297-309, 1997
7. Kutateladze, S. S., "On the Transition to Film Boiling under Natural Convection." Kotloturbostoenie, No. 3, pp. 10, 1948.
8. Zuber, N., "Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer." ph. D. Thesis, University of California, Los Angeles. (also Published as U. S. Atomic Energy Report No. AECU-4439, 1959.
9. Berenson, P. J., "Experiments on Pool Boiling Heat Transfer." Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 5, pp. 985-999, 1962.
10. Sakurai, A. and Shiotsu, M., "Temperature Controlled Pool Boiling Heat Transfer." Proc. 5th Int. Heat transfer Conf. Vol. 4, B3. 1. pp. 81-85, 1974.
11. Bui, T. D. and Dhir, V. K., "Transition Boiling Heat Transfer on a Vertical Surface." ASME J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 756-763, 1985.
12. Liaw, S. P. and Dhir, V. K., "Effect of Surface Wettability on Transition Boiling Heat Transfer from a Vertical Surface." Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, Vol. 4, pp. 2031-2036, 1986.
13. Berenson, P. J., "Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface." J. Heat Transfer 83, pp. 351-358, 1961.
14. Bui, T. D. and Dhir, V. K., "Film Boiling Heat Transfer on an Isothermal Vertical Surface." ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 764-771, 1985.