

단일 원형핀에서의 비등열전달에 관한 연구

서정일*, 임장순**, 이재현*, 박만흥*

A Study on Boiling Heat Transfer from Circular Single Fin

J. I. Seoh, J. S. Yim, J. H. Lee, M. H. Park.

* ABSTRACT *

The heat transfer process with boiling on a fin cannot be treated in a conventional manner of assuming a constant heat transfer coefficient.

This report proposes a simplified method for determining fin performance.

The heat transfer coefficients in boiling region is approximated by n ty power function of superheat.

The results yield the temperature gradient as a function of superheat, fin width, and thermal conductivity of the fin.

Computed results for water boiling on fin compare favorably with those obtained from a small-increment numerical solution.

기 호 설 명

b ; half radius of fin

c ; constant

d ; diameter of fin

h ; heat transfer coefficient

k ; thermal conductivity

k₀ ; thermal conductivity at 100 °C

L ; length of fin

m ; $(\frac{h}{k \cdot b})^{\frac{1}{2}}$

n ; index parameter in eq. (2)

q ; heat flux

T ; temperature

ΔT ; temperature difference (T - T_{sat})

X ; distance from fin tip

θ ; temperature surplus of fin surface

θ' ; dθ/dx

α ; constant

* : 정회원. 한양대 공대

** : 정회원. 인하대 공대

(SUBSCRIPTS)

- l ; tip of fin
- b ; base
- j ; jth section
- sat ; saturation

1. 서 론

열전달장치의 제한된 전열면으로부터 가능한 많은 열량을 자연대류 또는 복사 열전달에 의해 방출시키고자하는 경우에 전열면 표면에 흰을 설치하여 그 표면적을 증가시킴으로써 목적을 달성할 수 있다.

비등열전달을 동반하는 장치에 있어서는 비등구역에서의 열전달계수가 매우 높기 때문에 비등전열면쪽에는 확대전열면 즉 흰을 달지 않는 것이 일반적이다.

그러나 원자로의 연료봉에서의 열방출 등에서와 같이 단위전열면적당 막대한 열량을 방출시켜야 될 경우, 또는 번-아웃(burn-out) 현상의 방지와 같은 경우에는 전열면적의 증대는 비등열전달에 있어서도 중요한 문제로 된다. 즉 비등열전달에서도 흰의 설치는 비등영역의 극대 열유속점을 최대로 이용하고 또한 번-아웃을 방지한다고 하는 관점에서 중요하다.

수년전까지 흰 전열면으로부터의 열전달 연구는 흰 표면에서의 열전달계수가 일정하다고 가정하여 해석한 것이 대부분이다. 이러한 가정은 단상(single phase)인 대류 열전달에서는 합리적인 것으로 되지만 열전달 계수가 과열온도에 따라 크게 변화하는 흰으로부터의 비등열전달에서는 큰 오차의 원인으로 지적된다. 또한 많은 보고문들에서는 흰으로부터의 열전달 계수를 흰의 어느 한 일단으로부터의 거리의 함수로서 취급하고 있다. (1, 2, 3, 4, 5) 그러나 흰으로부터의 비등 열전달 계수는 위치에 따라 변화하는 것보다는 그 위치에서의 과열온

도에 따라 변화하기 때문에 해당위치에서의 온도의 함수로 보아야 한다.

열전달계수가 일정하다고 가정하여 흰으로부터의 열전달문제를 해석적으로 검토한 논문으로는 Harper and Brown(6)의 보고문이 있으며, 열전달계수가 흰의 위치에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하여 해석한 것으로는 Han and Lefkowitz(2)의 보고문이 있다.

열유속이 흰 전열면과 비등액체사이의 온도차에 1/3승에 비례하는 경우를 Cumo, Lopex and Pinchera(7)가 최초로 수치적으로 해석하여 핵비등에 적용할 수 있는 관계식을 제시하였다.

최근의 보고문으로는 Takeyama 등(8, 9)에 의한 연구와 Sonn and Bar-Cohen(10)에 의한 연구결과가 발표되었다. Takeyama 등은수평 4 각흰으로부터 물로의 비등열전달에서 열전달 현상을 이론적인 방법과 실험적인 방법으로 연구를 행하여 대류영역, 핵비등영역, 천이비등, 및 막비등 영역의 4개의 영역을 구분한 경우, 각 영역에서의 열전달 관계식을 제시하였고 특히 혼합비등곡선을 설명하였다. 또한 Sonn and Bar-Cohen은 원통흰으로부터의 비등열전달에서 열유속에 대한 관계식을 구하여 열유속의 값이 최대가 되는 흰의 지름을 수학적으로 구하였다.

흰으로부터 자연대류 열전달계수가 복잡적(nonmonotonically)으로 변화하는 경우 자연대류 열전달관계식을 제시한 Sparrow and Acharya(11)의 논문이 있다.

본 연구에서는 직선 원주 흰으로부터의 비등열전달에 있어서 각 비등구역에서의 열전달계수가 과열온도에 지수 함수적으로 변화할 경우의 열전달문제를 수치적으로 해석하고 실험결과와 비교 검토하여 각 비등영역에서 적용할 수 있는 열전달 관계식을 제시하고 또한 주어진 조건에서의 최적 흰길이, 또는 최적 열유속을 구하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 이론적 연구

2.1 가정의 설정

직선원주 핀으로부터 열전달을 해석하기 위한 기본식을 도입함에 있어 아래와 같은 가정을 둔다.

- (1) 단독 직선원주 핀이다.
- (2) 핀의 지름은 비교적 적으며, 핀내부의 온도구배는 축방향으로만 일어나는 일차적 핀이다.

(3) 핀 끝 (fin tip)에서는 일정한 열전달 계수로 열이 전달되며 특별한 경우 이외에는(열전달계수 h 의 값이 적을 때)이 핀 끝을 통한 열전달량은 무시한다.

(5) 핀기저면 (fin base)의 온도는 일정한 것으로 가정한다.

위와 같은 가정들은 핀의 해석에 있어 가장 일반적으로 취하는 것들이다. 이러한 가정들에 부가하여 핀으로부터의 비등열전달 연구와 일정한 관련을 갖는 아래의 가정들을 추가로 설정한다.

즉,

(6) 핀은 여러가지의 열전달형태로 열을 방출한다.

이때 국소과열온도차와 함수관계를 갖는 것으로 한다. 예를들면 본 연구에서와 같은 비등열전달면으로부터의 풀 (pool) 비등의 경우에도 전열면으로부터의 풀비등실험결과인 비등곡선을 적용한다. 이러한 가정은 참고문헌 (1)에서도 사용되었으며 또한 입증되었다.

(7) 열전달 계수 h 와 과열온도차 θ 와의 관계를 나타내는 비등곡선에서 h 는 각 비등구역에서 $h \propto (\theta)^n$ 에 따라 변화하는 것으로 한다.

양대수 그래프에 그려진 h 와 θ 의 비등곡선에서의 기울기가 지수 n 의 값으로 된다.

(8) 핀은 여러개의 연속적인 작은 구간들로 나뉘어 지는 것으로 한다.

각 작은 구간은 등온전열면 비등곡선에 상응하는 구간의 비등형태로 열량을 방출된다. 즉 각 구간에서 열전달계수는 상응하는 구간의 온도차 θ 및 지수 n 의 함수이다. 또한 핀의 길이방향으로의 온도와 열유속의 연속성 때문에 인접구간이 만나는 부분에서의 온도 및 온도구배는 동일하다.

상기가정을 도입한 핀전열면의 형태를 그림 1에 보여준다.

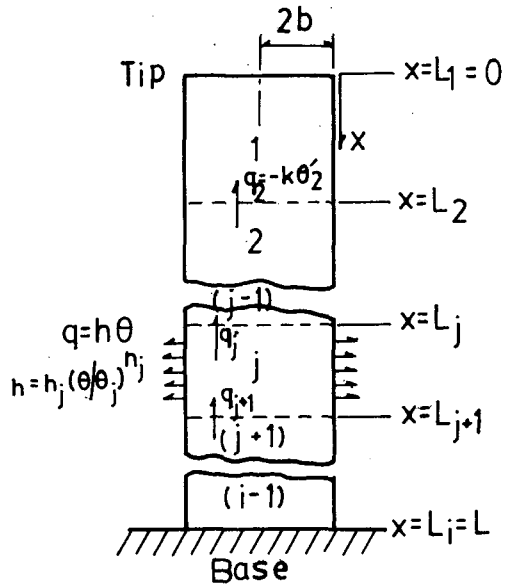


Fig.1 Model for fin

2.2 기본방정식의 유도

핀으로부터의 일차원 열전도에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{h(\theta)}{kb} = 0 \quad (1)$$

여기서 b 는 직선 원주핀 지름의 $1/4$ 이며, x 는 핀끝으로부터의 거리, θ 는 과열온도이다.

핀의 j 번째 구간에서의 열전달 계수 h 는

$$h = h_j \left(\frac{\theta}{\theta_j} \right)^n; \quad j = 1, 2, 3 \dots (2)$$

여기서 h_j 는 j 번째 구간과 $(j+1)$ 번째 구간사이의 과열온도 θ_j 에 대한 열전달계수이다.

경계조건은

$$x = L_j \text{ 에서 } \theta = \theta_j \quad (3)$$

$$x = L_j \text{ 에서 } \theta' = \theta'_j \quad (4)$$

그리고 흰 끝점에서는

$$x = 0 \text{ 에서 } \theta' = \theta'_i = 0 \quad (5)$$

여기서 θ' 는 $d\theta/dx$ 이며 어떤 위치에서의 온도구배를 나타낸다.

식 (1)에 식 (2)를 대입하면

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = m_j^2 \frac{1}{\theta_j^{n_j}} (\theta)^{n_j+1} \quad (6)$$

여기서

$$m_j = \frac{h_j}{kb} \quad \text{이다.}$$

(6)식의 양변에 $2(d\theta/dx)$ 를 곱하면

$$2 \frac{d\theta}{dx} \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{2m_j^2}{\theta_j^{n_j}} \theta^{n_j+1} \frac{d\theta}{dx}$$

윗식을 변형하면

$$\frac{d}{dx} (\theta'^2) = \frac{2}{n_j+2} \frac{m_j^2}{\theta_j^{n_j}} \left(\frac{d\theta^{n_j+2}}{dx} \right) \quad (7)$$

(7)식을 $x=L_j$, $\theta = \theta_j$ 그리고 $\theta' = \theta'_j$ 까지 적분하면

$$\begin{aligned} \theta'^2 - \theta_j'^2 &= \frac{2m_j^2}{n_j+2} \frac{1}{\theta_j^{n_j}} (\theta_j^{n_j+2} - \theta_j^{n_j+2}) \\ &= \frac{2m_j^2\theta_j^2}{n_j+2} \left(\left(\frac{\theta}{\theta_j}\right)^{n_j+2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식을 다시 쓰면

$$\theta'^2 = \left(\frac{2}{n_j+2} m_j^2 \theta_j \left(\left(\frac{\theta}{\theta_j}\right)^{n_j+2} - 1 \right) + \theta_j'^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

위의 식 (9)는 흰의 각 구간에 대하여 아래와 같은 방정식들로 표현할 수 있다.

케를들면 4 번째 구간에 대하여는

$$\theta_4' = \left\{ \frac{2}{n_3+2} (m_3\theta_3)^2 \left[\left(\frac{\theta_4}{\theta_3}\right)^{n_3+2} - 1 \right] + \theta_3'^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_3' = \left\{ \frac{2}{n_2+2} (m_2\theta_2)^2 \left[\left(\frac{\theta_3}{\theta_2}\right)^{n_2+2} - 1 \right] + \theta_2'^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_2' = \left\{ \frac{2}{n_1+2} (m_1\theta_1)^2 \left[\left(\frac{\theta_2}{\theta_1}\right)^{n_1+2} - 1 \right] + 0 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

따라서 흰기저면 온도차 θ_b 와 흰 끝 온도차 θ_1 이 주어지면 흰기저면에서의 온도구배는 쉽게 결정될 수 있다.

주어진 흰기저면 온도 및 흰 끝 온도에 대해 요구되는 흰의 길이 L 는 아래와 같이 결정된다.

즉,

$$L = \int_{\theta_b}^{\theta_1} \frac{d\theta}{\theta'} = \int_{\theta_b}^{\theta_1} \frac{d\theta}{\left\{ \frac{2}{n_j+2} (m_j\theta_j^2) \left[\left(\frac{\theta}{\theta_j}\right)^{n_j+2} - 1 \right] + \theta_j'^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

여러가지의 θ_1 와 θ_b 의 조합의 경우에 θ_b' 및 L_b 를 구하기 위하여 전자계산기를 사용하였다.

단일 흰의 길이와 흰기저면의 온도차 θ_b 가 주어지고 흰기저면의 열유속을 구할때는 주어진 흰의 길이가 식 (10)의 L 과 일치하도록 흰끝의 온도차를 시행착오법으로부터 구하여야 한다.

2.3 수치계산 결과 및 고찰

직선 원주 흰의 지름이 각각 1 cm, 0.6 cm, 0.4 cm 및 0.2 cm인 4 가지 형상을 고려하였으며, 하나의 흰기저면 온도차의 경우에 여러 개의 흰 끝 온도를 선정하고 이에 따른 흰 기저면에서의 온도구배와 흰의 길이를 각각 계산하였다. 계산에 채용된 원주 흰의 열전도율 k 의 값

은 본 연구의 온도구간인 100 ℃ 이상에서 $k = k_0 (1 - \alpha \Delta T)$ 와 같이 직선적으로 변화하는 것으로 가정하여 산정 대입하였다. 이때 k 는 임의온도에서의 열전도율, k_0 는 100 ℃때의 순동 (pure copper)의 열전도율 (379 w/m℃), α 는 상수, ΔT 는 fin 표면의 온도에서 100 ℃를 뺀 값이다. 식 (2)의 지수 n 은 Haley and Westwater (1)가 흰의 비등실험으로부터 발표한 물에 대한 비등곡선인 그림 2로부터 구하였으며 이 값들이 표 1에 제시되었다. 식 (9)의 계산결과인

흰 온도차에 의해 거의 영향을 받지 않는 것을 뜻한다. 그러나 흰 끝 온도차가 30 ℃ 이상되면 곡선은 분리되며, 흰 기저면 온도차의 증가에 따라 흰 기저면 온도구배의 증가율은 급한 경사를 갖는다. 또한 임의의 주어진 흰끝의 온도차에서 흰기저면의 온도차에 대한 흰 길이의 관계를 보여주는 그림 4는 식 (10)으로부터 계산된 결과이며 흰의 길이의 증가율은 완만하게 나타나고 증가추세는 거의 비슷하다. 그러나 흰 끝 온도차가 70 ℃ 이상이 되면 흰 길이의 증가율은 급한 경사를 갖는다.

Table 1 Parameters for Approximation

Temperature range of each segment		Heat transfer Coefficient at jth section h_j	Index Parameter in eq. (2) n_j
Temperature surplus at joint j, θ_j	Temperature surplus at joint $j+1, \theta_{j+1}$		
°C	°C	W/m ² °C	
0.55	1.1	567	0.298
1.1	17	697	1.585
17	28.5	53462	-0.9956
28.5	150	31961	-2.980
150	400	226.6	0

길이에 따르는 흰 기저면의 온도차와 온도구배의 관계를 규명하는 것은 유체를 비등액으로 사용한 흰으로부터의 비등실험에 있어 주어진 흰 길이에서의 최저열유속을 결정할 수 있는 가장 일반적인 해석방법이다. 즉, 식 (9)와 식(10)의 결과인 그림 3과 그림 4로부터 아래와 같은 순서를 진행하여 흰기저면에서의 온도차와 온도구배와의 관계를 알 수 있다.

그림 3은 주어진 흰 끝의 온도차에 있어 흰 기저면의 온도차에 대한 흰길이 방향의 온도구배를 나타낸다. 흰 끝 온도차는 0.6 ℃부터 350 ℃까지의 범위에서 22개를 택하였다. 흰 끝 온도차는 0.6 ℃부터 약 12 ℃까지는 흰 기저면의 온도차가 증가함에 따라 흰기저면의 온도구배는 증가하는 경향이 같으나 그 값이 커지면 증가율은 완만해지면서 동일한 선을 따라간다. 이는 흰기저면의 온도차가 어느 값 이상으로 높아지면 흰

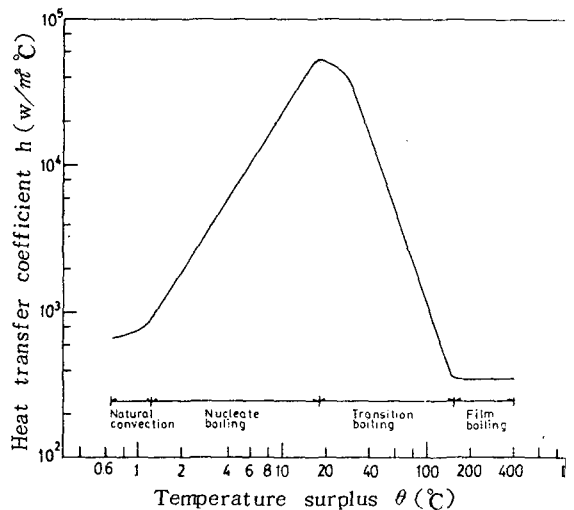


Fig.2 Boiling curve of water

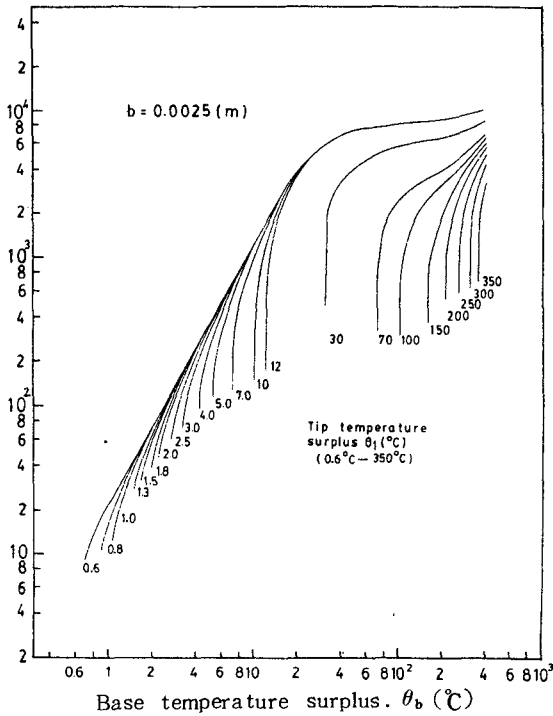


Fig.3 Typical curves for dependence of base temp. surplus with tip temp. surplus as parameter for 10 mm - dia. fin

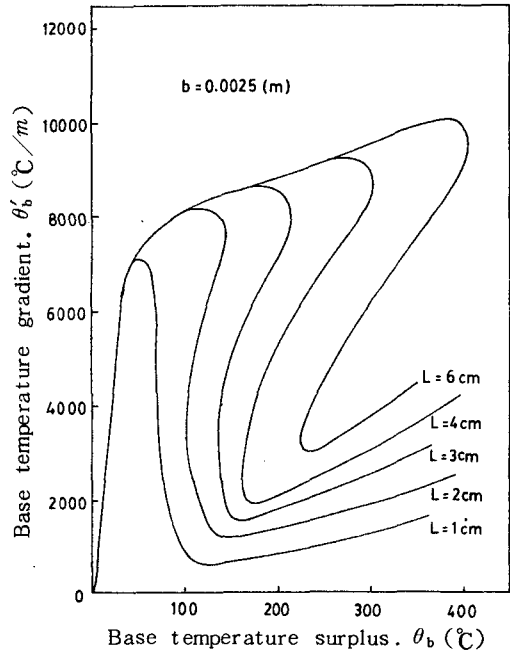


Fig.5 Temperature gradient at base as function of base temperature surplus for various fin length of 10mm-diameter fin

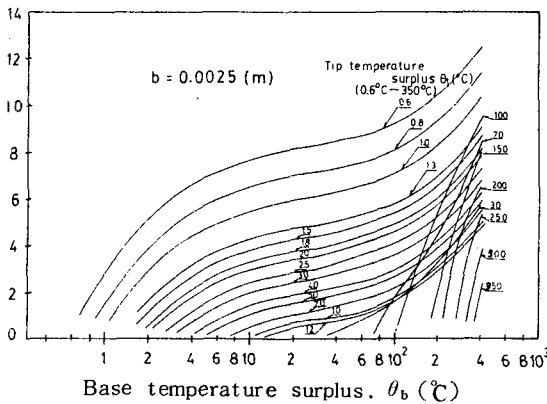


Fig.4 Typical curves of fin length as function of base temperature surplus with tip temperature surplus as parameter for 10mm-diameter fin

(1) 여러값의 θ_1 기저면 온도차의 값은 그림 4로부터 각각의 θ_1 길이에 대하여 구한다.

(2) (1)에서와 동일한 θ_1 끝 온도차를 갖는 곡선에서 위에서 구한 θ_1 기저면 온도차에 대한 θ_1 기저면의 온도구배를 그림 3 으로부터 구한다.

(3) 위에서 구해진 θ_1 기저면의 온도차와 θ_1 기저면의 온도구배 한 쌍은 주어진 길이에 속하는 값이 된다.

이러한 값들을 약 3,000 여개를 구하여 표시하면 그림 5가 된다. 위와같이 구하는 것은 식 (9)와 식 (10) 으로부터 θ_1 을 소개하여 θ_1 기저면에서의 온도구배 θ'_b 를 θ_1 기저면에서의 온도차 θ_b 와 θ_1 의 길이 L의 함수로 구한 것과 동일한 결과가 된다.

그림 5에서 지름이 10 mm인 동봉환의 경우를 대표적으로 생각해 본다.

흰 기저면의 온도차가 증가하는 것은 흰기저면의 비등의 양상을 변화시켜 주는 것을 뜻한다. 즉, 흰 기저면의 온도차가 증가하여 감에 따라 흰기저면에서는 핵비등, 천이비등, 막비등의 순서로 비등영역이 변화된다. 여기서 천이비등 이후는 핵비등에 비하여 열전달면에서 비효율적이다. 흰길이 $L = 1 \text{ cm}$ 의 경우 흰기저면의 온도차가 약 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도에서 곡선의 기울기는 적어진다. 이 온도이상에서는 막비등이 일어나고 천이비등과 핵비등은 흰의 끝 부분으로 이동해 나간다.

본 연구의 온도범위에서는 흰 기저면의 최대 온도차가 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 로서 그 때의 흰기저면의 온도구배는 약 $10,000 \text{ }^\circ\text{C}/m$ 가 최적 흰길이는 6 cm 로 구해진다.

이와같이 그림 5로부터 주어진 흰길이에 대한 최적 열유속을 결정할 수 있으며 같은 방법으로 열방출량이 주어지면 그때의 최적 흰길이를 구할 수 있다.

모든 곡선의 최대 열유속점에서 흰끝 부분의 비등상태는 극렬한 핵비등이 일어나는 것으로 생각할 수 있다. 이때보다도 더 흰 기저면의 온도를 증가시키면 흰 끝에서의 핵비등은 천이비등으로 바뀌게 되어 보다 적은 열량을 방출하게 된다.

그림 5에서 상승하는 곡선을 상승곡선이라 부르고 다시 하강하는 곡선을 하강곡선이라 부르기로 한다. 이 하강곡선은 흰 끝에서의 핵비등이 천이비등으로 바뀌고 동시에 흰의 저면을 포함한 나머지 부분은 막비등으로 덮여 있기 때문이다. 곡선이 하강하여 최저 열유속에 도달한 후 흰에 모든 표면이 막비등의 형태로 된 후에 열유속은 서서히 상승하기 시작한다. 이때의 흰 표면으로부터의 열전달형태는 전면막비등의 형태이다. 막비등에서의 열유속은 흰기저면의 온도차가 증가함에 따라 서서히 직선적으로 변화한다. 이는 막비등에 대한 열전달 계수가 거의 일정하기 때문이다. 위에서 말한 곡선은 비등의

모든 형태가 흰 표면에서 계속하여 일어나는 충분히 발전된 경우이다. 흰의 길이가 짧으면 대한 영향은 그림 5에서 공통적으로 볼 수 있는 바와 같이 곡선의 상승이 끝나는 극대점이 좀더 낮은 흰기저면 온도차에서 일어나는 것을 제외하고는 사실상 곡선의 형태가 변화하지 않고 있다. 또 막비등으로 흰이 둘러싸여있는 아래부분은 흰의 길이가 짧아짐에 따라 즉, 전열면적이 감소함에 따라 낮은 열유속의 값을 갖는다.

3. 실험적 연구

3.1. 실험장치

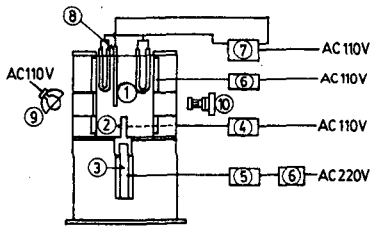
본 연구에서 채용할 실험장치의 개략도 및 각 구성요소는 그림 6에서 보여주며 전체장치의 배열사진은 그림 7에서 보여준다. 그림 6에서 전열봉 부분의 상세한 형태는 그림 8(a) 및 8(b)에서 알 수 있다. 전열봉은 실험조건에 따라 여러개를 제작하였으며 그림 8(a)는 지름이 6 mm 인 경우, 그림 8(b)는 지름이 10 mm 인 경우이다.

지름 6 mm 의 경우 흰의 길이(L)은 각각 $6, 12, 18, 24, 30 \text{ mm}$ 이었으며 제작된 전열봉을 그림 9(a)에서 보여준다. 흰 전열면은 전열봉의 윗부분에 해당된다. 그림 10의 비등용기(boiling pool)는 두께 5 mm 의 강철판을 재료로하여 가로×세로×높이가 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 되도록 제작하였으며 용기내부는 산화를 방지하기 위하여 내열 방수도료로 도장하였다. 용기 양쪽에는 전열면에서 발생하는 기포의 거동을 관찰하고 또한 사진촬영이 가능하도록 지름 80 mm 의 투시용 유리창을 부착하였다. 용기내부는 500 Watt 의 용량을 갖는 코일형 보조 전기히터(그림 10의 ①)를 2개, 용기 벽면에 400 Watt 용량을 갖는 판형 보조 전기히터(그림 10의 ②)를 4개 설치하여 이것을 예열기로 사용하고 비등액을 포화온도까지 예열시켰으며 자동 온도조절기(그림 6의 ⑦)에 의하여 비등액 온도가 항상 포화

온도를 유지하도록 하였다. 흰 가열을 위하여 직경 23 mm인 1000 Watt 용량의 원통형 히터 (그림 10의 ④) 1 개를 가열기로 사용하고 이를 전열봉 하부에 부착시켜 가열기에서부터 전열봉으로 열이 전달되도록 하였다. 또한 가열기에서의 반경방향으로의 열손실을 막기 위하여 원통형 히터 (heater) 주위에는 석면가루 (그림 10의 ⑩)로 절연하였으며 축방향으로만의 흐름을 유도하기 위하여 흰 전열면 하부에서는 테프론 (teflon)으로 만든 패킹 (packing) (그림 10의 ⑧)로 반경방향 열유동을 가능한한 차단시켰다. 흰 전열면은 이 패킹 (packing)의 바로 윗부분에서부터 시작되며 이 부분이 흰 기저면

(fin base)에 해당된다. 실험장치 전체는 유리섬유 (그림 10의 ⑨)로 둘러싸서 열손실을 막았다. 흰 전열면의 표면은 에메리 페이퍼 (emery paper) (No 1200)로 연마한 다음 $cr_2 O_3$ 로 거울연마 (Mirror finishing)하여 아주 매끈하게 가공하였다.

전열면의 표면온도를 측정하기 위하여 지름 0.5 mm의 구멍을 뚫어 C-C ($\phi 0.1 mm$) 열전대를 삽입하였다. 또한 흰기저부에서의 열유속을 계산하기 위하여 그림 8(a)와 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 흰기저부에서 아래쪽으로 축방향을 따라 3 mm 간격으로 세개의 열전대를 흰의 중심부까지 삽입하였다.



- 1. Boiler
- 2. Test surface
- 3. Heating element
- 4. Data logger
- 5. Watt-meter
- 6. Transformer
- 7. Temperature controller
- 8. Temperature sensor
- 9. Light
- 10. Camera

Fig.6 Schematic view of experimental system

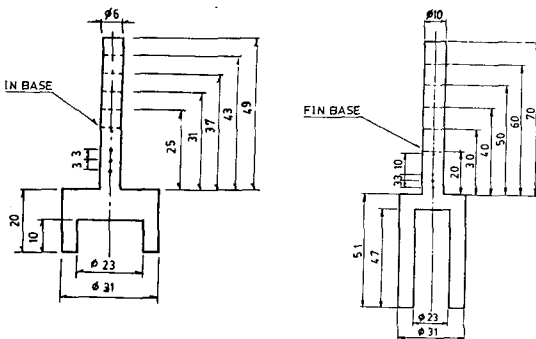


Fig. 8(a) Testing configuration of 6mm-dia. fin

Fig. 8(b) Testing surface configuration of 10mm-dia. fin

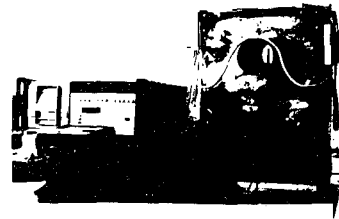


Fig.7 Photograph of experimental system

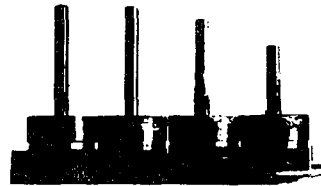
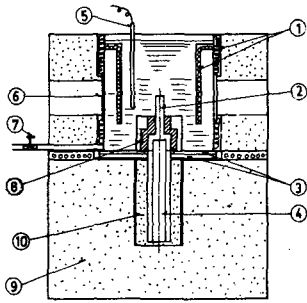


Fig.9(a) Photograph of 6mm-diameter fins



Fig.9(b) Photograph of 10mm-diameter fins



- | | |
|-----------------------|-------------------|
| 1. Preheater | 6. Window |
| 2. Test surface | 7. Drain valve |
| 3. Asbestos plate | 8. Tefron packing |
| 4. Heating element | 9. Glass wool |
| 5. Temperature sensor | 10. Asbestos |

Fig.10 Schematic view of boiling pool

3.2. 실험방법

비등액은 순도 99% 정도의 증류수를 사용하였으며 증류수내에 존재하고 있는 기체를 제거하기 위하여 충분히 끓여서 냉각시킨 다음 비등용기에 넣고 예열기로 가열하였다. 실험은 대기압하에서 실시되었다.

일단 유입된 증류수가 증발함에 따라 수면의 높이가 변화를 일으키므로 이것이 비등현상에 미치는 영향을 최소로 하기 위하여 포화수를 보충하여 상기 영향을 거의 없도록 하였다. 본 실험에서는 예열기로 증류수를 예열하여 비등액의 온도가 50℃가 되면 흰 전열면을 가열시켜 정상상태에 도달하도록 하였다. 흰 전열면 내의 온도분포가 정상상태에 도달하기까지는 가열개시로부터 약 3시간이 소요되었으며 흰 기저부 온도를 변화시킬 경우에는 약 1시간이 소요되었다. 실험자료의 선택은 흰의 각 위치에서의 온도를 1mm간격으로 계속 체크함으로써 정상상태를 확인하면서 행하였다.

하나의 흰 기저부 온도의 경우에 흰 전열면 전체로부터 열방출량을 알기 위하여 다음과 같은 과정을 거친다. 즉,

(1) 흰 기저부의 온도는 비등액에 노출되기 직전위치에서의 흰 전열면 온도로 간주하고 이 위치에서 온도를 측정하였다.

(2) 흰 전열면 전체로부터의 열방출량은 흰 기저부를 통하여 전달되는 열량과 같으므로 가열기와 흰 기저부 위치와의 사이에 축방향으로 3mm간격으로 3개의 위치에서 온도를 측정하고 이로부터 온도구배를 계산하여 알 수 있다.

상기 (1), (2)과정을 여러개의 흰 기저부 온도에 걸쳐 수행하여 흰기저부 온도변화에 따른 흰 전열면 전체로부터의 열방출량의 변화를 알 수 있다.

실제로 채용한 흰 기저부 온도는 100℃ - 170℃사이이며 하나의 전열봉 실험에서 약 10회 정도 변화시킨다. 또한 흰 축방향으로 기저부에서 끝부분(Tip)까지 3mm 간격으로 설치된 열전대로부터 온도를 측정하여 각 실험조건에 따라 흰 전열면의 온도분포를 결정하고 흰에서의 비등현상을 촬영한 사진과 비교하여 흰 전열면의 각 비등구간에서의 온도상태를 기록하였다. 이때 온도측정에 사용한 기기는 데이터로거(Data loggor Fluke 2200 A)이며 각 자료를 기록지에 기록할 수 있게 되어 있다.

3.3. 실험결과 및 고찰

흰 기저부에서 핵비등 상태가 시작되면 흰기저부로부터 약간의 기포가 발생하기 시작한다. 이때 흰 전열면의 나머지 부분은 자연대류 영역이다. 흰 기저부 온도가 증가함에 따라 기포발생이 증가하며 이 기포가 발생하는 구간은 상부로 확장된다. 실험조건중의 하나인 흰 전열면 지름 10mm 길이 50mm일때 흰 기저부 온도증가에 따른 비등영역의 변화과정을 그림 11(a) - 그림 11(f)에 보여준다. 즉, 그림 11(a)와 같이 흰기저부에서 기포가 발생하기 시작하여 이 기포의 크기가 그림 10(b)에서와 같이 커진다. 이어서 기포가 계속적으로 발생되어 그림 11(c)와 같

은 상태가 되고 계속되는 흰 기저부 온도 증가에 따라 그림 11(d) - 그림 11(f)와 같이 점차적으로 핵비등영역이 확장됨을 알 수 있다. 기저부 온도가 더욱 증가하면 흰 기저부에서는 찬이비등 및 막비등이 일어난다. 그러므로 흰 전열면의 길이가 충분히 길 때는 흰 기저부에서부터 상부로 막비등, 찬이비등, 핵비등 자연대류가 나타난다. 열량의 대부분은 핵비등 영역과 찬이비등영역에서 방출된다. 흰 기저부의 온도가 아주 높으면 전체의 전열면이 막비등 영역으로 되어 오히려 방출열량은 줄어든다. 실험에 채용된 9개 전열봉의 경우에 흰 기저부 온도변화에 따른 흰 전열면에서의 온도구배의 변화의 결과를 그림 12에 보여준다. 여기서 종축은 흰 전열면에서 비등액에 전달되는 열량을 알기 위하여 온도구배(θ')로 표시하였고 횡축은 흰 전열면의 최고 표면 온도 즉, 흰 기저부 온도와 비등액 온도와의 온도차 θ 를 취하였다. 여기서 보면 채용된 9가지 흰전열면 모두에서 온도구배 θ'_b 와 θ 는 대략 아래식과 같이 핵비등 구역내에서는 선형적으로 변화한다. 즉,

$$\theta'_b (\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}) = C \times \theta (\text{ }^\circ\text{C})$$

여기서 C는 상수로서 120-160정도이며 적

용되는 θ 는 0 $^\circ\text{C}$ - 70 $^\circ\text{C}$ 사이이다.

엄밀하게는, 흰길이가 증가함에 따라 θ 가 작을때는 온도구배가 거의 동일하지만 θ 가 클 때는 약간씩 온도구배가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 비록 기저부 근처만 핵비등 영역이고 나머지 영역은 자연대류구간 일지라도 같은 기저부 온도에서는 축방향길이가 긴 흰이 열전달 측면에서는 유리하다는 일반적인 예측과 일치하는 것이다.

또한 지름이 6mm인 경우는 지름이 10mm인 경우보다 같은 흰 기저부 온도차 θ_b 에서 더 큰 온도구배를 보여준다.

그림 13은 실험중 측정된 흰 전열면 표면온도 분포중에서 대표적인 몇가지를 보여준다. 여기서 보면 흰기저부에서 온도구배가 크면 역시 흰전열면 아랫부분에서 온도변화가 급격하다. 그러나 흰 끝부분에서의 온도변화는 흰 기저부에서의 온도구배에 무관하게 거의 비슷하다. 그리고 짧은 흰 전열면 길이의 경우의 온도변화가 긴 흰 전열면 길이에 비하여 더욱 급격하다. 또한 이론 해석에서 등온분포의 비등곡선을 이용하여 비등영역의 구간의 온도범위를 결정한 것과 그림 13의 온도분포와 실제로 관측된 비등영역의 온도 범위는 잘 일치 하였다.

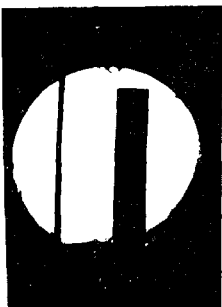


Fig.11(a)
Boiling phenomena on 10mm-dia. fin at $q = 3.16 \times 10^4 \text{ w/m}^2$ and $\theta_b = 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig.11(b)
Boiling phenomena on 10mm-dia. fin at $q = 1.07 \times 10^5 \text{ w/m}^2$ and $\theta_b = 4.3 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig.11(c)
Boiling phenomena on 10mm-dia fin at $q = 2.2 \times 10^5 \text{ w/m}^2$ and $\theta_b = 7.2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig.11(d)
Boiling phenomena on 10mm-dia. fin at $q = 4.62 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ and $\theta_b = 13.3 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig.11(e)
Boiling phenomena on 10mm-dia. fin at $q = 1.34 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ and $\theta_b = 27.8 \text{ }^\circ\text{C}$



Fig.11(f)
Boiling phenomena on 10mm-dia. fin at $q = 3.0 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ and $\theta_b = 52 \text{ }^\circ\text{C}$

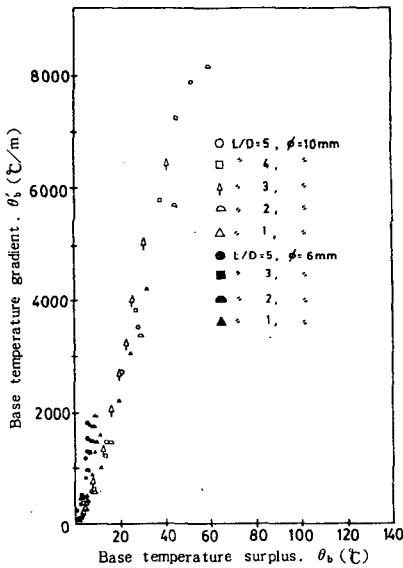


Fig.12 Base temperature surplus versus base temperature gradient for 10mm and 6mm-diameter fin

4. 결과 및 토의

주어진 핀 끝 온도 및 핀기저면 온도에서 핀으로부터의 열유속을 구하는 식(9)와 핀 길이를 구하는 식(10)의 계산결과를 검토하고 최적 핀 길이를 구할 수 있는 그림 5의 신뢰성을 검토하기 위하여 이 이론결과와 실험결과를 비교한다. 본

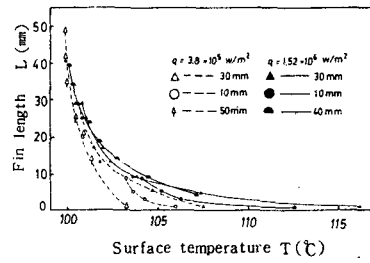


Fig.13 Temperature distribution with fin length of 10mm-diameter fin

논문에서는 핀을 여러 구간으로 차별하는 방법을 사용하여 Hsu (12)의 결과와 같은 형태의 결과를 물을 비등액으로 사용한 경우에 대하여 산출하고 이를 실험결과와 비교 검토하였다. 앞에서 논의된 바와 같이 그림 14에는 지름이 2mm인 핀 ($b = \frac{d}{4} = 0.0005 \text{ m}$), 그림 15에는 지름이 4mm인 핀 ($b = \frac{d}{4} = 0.001 \text{ m}$), 그림 16에는 지름이 6mm인 핀 ($b = \frac{d}{4} = 0.0015 \text{ m}$), 그리고 그림 17에는 지름이 10mm인 핀($b = \frac{d}{4} = 0.0025 \text{ m}$)에 대한 이론결과를 각 핀 길이에 대해 실선으로 표시하였다. 그림 16과 그림 17에는 같은 조건의 실험결과인 그림 12의 값을 표시하였다. 이 결과 핵비등영역에서 이 실험값들은 최대 $\pm 11\%$ 오차 범

위 이내에서 잘 일치하고 있으며 이것은 본 연구의 해석방법이 합리적이라는 것을 보여주고 있다. 본 연구의 실험에 있어서는 가열기의 전기

적 용량관계로 천이비등구역이상의 범위에서는 실험이 시행되지 못하였으며 이 부분에서는 단지 수학적인 해석만 행하였다.

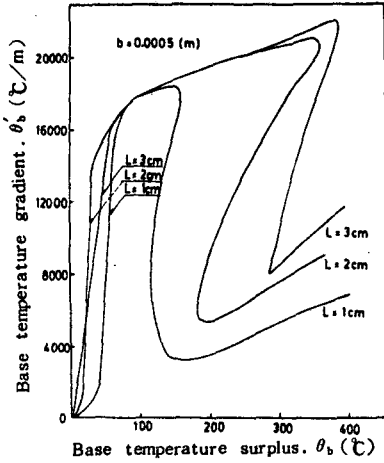


Fig. 14 Temperature gradient at base as function of base temperature surplus for various fin length of 2mm-diameter fin

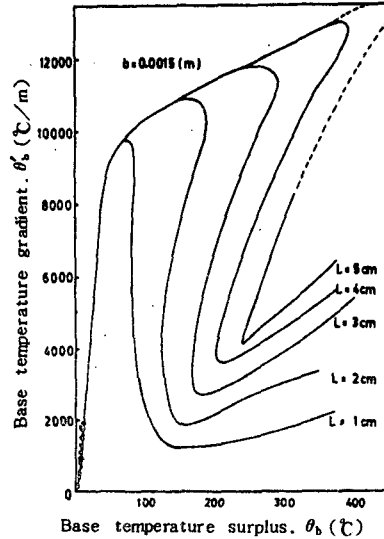


Fig. 16 Temperature gradient at base as function of base temperature surplus for various fin length of 6mm-diameter fin with experimental data

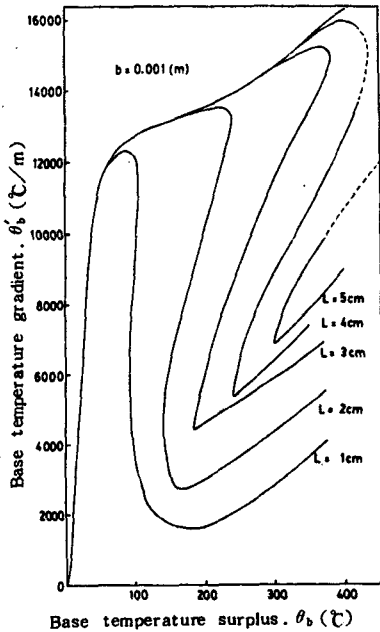


Fig. 15 Temperature gradient at base as function of base temperature surplus for various fin length 4mm-diameter fin

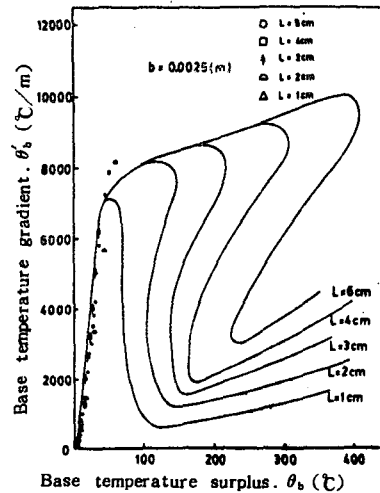


Fig. 17 Temperature gradient at base as function of base temperature surplus for various fin length of 10mm-diameter fin with experimental data

5. 결 론

수직 원통 핀으로부터의 비등열전달이 여러 가지의 비등형태로 일어날 때 열전달 계수는 넓은 범위에 걸쳐 변화한다. 따라서 과거에 가정되어 왔던 핀의 모든 구간에서 열전달 계수가 균일하다고 한 것은 합리적이지 않다. 본 논문에서는 핀으로부터의 물에 대한 비등열전달 해석에 있어 여러가지의 전열 형태로 열이 전달될 때 수학적 해석과 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 핀으로부터의 비등열전달 해석의 한 방법으로 핀을 여러개의 소구간으로 나누고 이들 각구간에서 열전달 계수가 온도차의 n승에 비례하는 것으로 가정하는 방법이 상당히 합리적이다.

(2) 식(9)와 식(10)으로부터 핀 끝의 온도와 핀기저면의 온도가 주어졌을 경우, 최적 핀 길이를 구하는 그림을 (그림 14, 15, 16, 17)그릴 수 있으며 이로부터 주어진 조건하에서 최적 핀 길이 또는 최적 열유속을 구할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단의 1981년도 연구비 지급에 의하여 수행되었으며 당 재단의 지원에 감사를 드린다.

또한 연구를 수행하는데 있어 실험 및 자료 정리에 도움을 주신 인덕공전의 박상규교수, 인하대학원의 김양열씨 등에게 사의를 표한다.

그리고 자료 계산에 도움을 주신 인하대 전자계산소 소장 왕창중교수등 여러분에게 심심한 사의를 표한다.

인 용 문 헌

1. Haley, K.W. and Westwater, J.W. "Boiling heat transfer from single fins" Proc. 3rd Int. Heat Transfer conf. chic - ago, Ill., Aug. 7-12 1966 Vol. 3 AICHE, 1966, pp. 245 - 253
2. Han, L.S., and Lefkowitz, S.G., ASME paper No. 60 - WA - 41(1960)
3. Chen, S., and Zyskowski, G.L., ASME paper No. 63-HT - 12 (1963)
4. Melese, G., J. Nuclear Energy, London, 5 p.285(1957)
5. Gardner, K.A., Discussion in Proceedings of the general discussion on heat transfer, Inst. Mech. Engr., ASME., London, p.214(1951)
6. Harper, D.R., and Brown, W.B., Nat. Advisory Comm. Aeronaut., Rept. 158 (1922)
7. Cumo M., Lopez, s. and Pinchera, G.C., "Numerical Calculation of extended Surface efficiency." Chem. Eng. Progress Sym. Ser. 61 - 59 p.225(1965)
8. T. Takeyama, T. Endo, and k. Ohwada, "Basic study of boiling heat transfer from fin." Trans. JSME, 39-325, p 2835 (1973)
9. M. Ohuchi, and T. Takeyama, "Heat transfer Characteristics of fin with combined boiling." Trans. JSME., 44-377 p . 154 (1978)
10. Sonn, A. and Bar-Cohen, A., "Optimum Cylindrical pin fin" Trans. ASME 103, p . 814 (1981)
11. Sparrow, E.A. and Acharya, S., "A Natural Convection fin with a Solution-determined nonmonotonically Varying heat transfer coefficient." Trans. ASME 103 p . 218 (1981)
12. Hsu, Y.Y. "Analysis of boiling on a fin." NASA Technical note NASA TN D-4797 (1968)