

# 환상이중원관에서 R-113의 비등열전달에 관한 연구

김철환<sup>1)</sup>, 김경근<sup>2)</sup>

## A Study on the Boiling Heat Transfer of R-113 in a Concentric Annular Tube

Cheol-Hwan Kim, Kyung-Kun Kim

### Abstract

The two-phase flow is observed in power plants, chemical process plants, and refrigeration systems etc., and it is very important to solve the heat transfer mechanism of a boiler, an atomic reactor, a condenser and various types of evaporators. Recently, the problem of two phase heat transfer is brought up in many regions with development of energy saving technique.

In this study R-113 was selected as working fluid whose properties were programmed by least square method. And experiment was conducted in the region of mass flow  $1.628 \times 10^6 \sim 4.884 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>hr with inlet subcooling 10 ~ 30 °C, sustaining test section inlet pressure to 1.5 kgf/cm<sup>2</sup> abs. From the experiment heat transfer coefficient was calculated by measuring the inner wall temperature with raising heat flux and qualitative and quantitative characteristic of boiling curve was examined by measuring the heated wall temperature at  $z/D_e$ .

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 열유체전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

= 39 and real quality and void fraction were predicted by comparison with existing experimental equation.

## 1. 서론

기액이상류는 일상생활에서 접할 수 있는 흔한 자연현상인 동시에 동력플랜트, 화학플랜트, 냉동공조장치 등 많은 시스템에서 관찰되는 현상인데, 이러한 이상류의 열전달문제는 보일러, 원자로, 각종 증발기 및 응축기에서의 주요한 연구과제이다. 또한 최근에는 에너지 유효이용기술의 발전과 관련하여 많은 분야에서 이상류열전달이 문제가 되고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

일반적인 유동비동계에서 시스템에 유입되는 작동유체는 포화온도 이하의 과냉상태이며, 액은 유로입구의 단상류상태에서 가열되기 시작하여 벽면의 온도가 포화온도 이상이 되는 어느 위치에서 핵비등이 개시된다. 핵비등이 일어날 경우 가열면 근방의 액온은 이미 포화상태에 도달하나 주류의 액온은 대체로 과냉상태를 유지하게 된다.<sup>(3)</sup> 핵비등개시점으로부터 주류의 액온이 포화온도에 도달하기 전까지의 비등과정을 과냉비등(Subcooled Boiling)이라 부르는데, 이러한 과냉비등은 흐름의 상태로부터, 기포가 가열면 근방에 존재하는 영역과 기포가 주류중에 분산하기 시작하여 보이드율(Void Fraction)이 상승하기 시작하는 영역의 두 영역으로 구분할 수 있다. 전자를 과냉비등의 제1영역(고과냉영역), 후자를 제2영역(저과냉영역)이라 부르고, 제2영역의 개시점 즉 보이드율이 상승하는 점을 정미증기발생점(Net Vapor Generation Point)이라 부른다.<sup>(4)</sup>

비등이 개시되면 전열면 표면에 기포가 생성되는데, 과냉비등으로 인하여 발생하는 보이드 즉, 포화온도 이하에서 발생하고 증가하는 증기기포는 공학적으로 아주 중요한 의미를 가지게 된다. 기포가 형성되고 발생 기포가 성장하면 열전달율은 촉진되어, 비등하지 않는 상태에서보다 몇배나 큰 열전달율을 얻을 수 있다. 따라서 유량이 적을 경우에도 벽온을 높이지 않고 효율적이고 콤팩트한 설계가 가능하게 된다. 또한 수냉각 핵반응로에서 보이드율은 핵반응도에 영향을 미치고 흐름에도 영향을 미친다.<sup>(5)</sup>

유동비동계의 전열특성은 유로단면에 기포와 과냉액이 공존하는 복잡한 상태이므로, 유동양식의 변화와 가열열유속의 대소에 대한 관길이에 따라 변화하고,

유로조건 및 가열조건에 의해 미묘한 영향을 받기 때문에 그 특성을 분명하게 밝히기는 어렵다. 이러한 과냉비동류의 열전달특성에 관한 많은 실험적, 이론적 모델들이 발표되어졌으나 대부분의 모델들은 유동상태에 대하여 기본적으로 단순화된 가정을 하고 있어, 흐름이 순차적으로 발달함에 따라 몇가지 서로 다른 유동영역이 존재하는 유로계에서의 일반적인 적용은 어렵다.<sup>(6)</sup> 따라서 이상류열전달의 연구에서는 각종의 유체와 유로계에 대하여 개개의 조건에 대한 데이터를 축적하여, 전열장에 관한 흐름상태 및 전열특성과 유동상태의 관계를 알기 위한 기초적 연구가 요망된다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 계통도는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 액저장탱크, 주순환펌프, 냉매용유량계, 드라이어(Dryer), 예열기(Pre-Heater), 온도조절기(Control Heater), 실험부(Test Section), 기액분리기(Vapor-Liquid Separator), 불용유량계, 응축기, 냉각수 순환펌프, 유량계, 냉각수 수위조절펌프 및 냉각수탱크로 구성되어 있다.

실험부의 전경은 Photo 1에 보이는 바와 같다. 가열관은 내경 7.0 mm, 두께 0.5 mm, 길이 485 mm의 SUS 304의 스테인레스관에 길이 300 mm의 동봉을 산소용접하여 사용하였으며, 가열관의 내부와 외부의 표면은 #6/0의 샌드페이퍼로 다듬질하였다. 가열관의 양단에는 구리단자를 설치하여 가열전원장치로부터의 교류전류가 직접 통전되어 가열된다.

외관은 내경 18 mm, 두께 2 mm, 길이 600 mm의 투명한 파이렉스 유리관으로 실험부의 흐름을 관찰할 수 있도록 되어 있으며, 수력학적 등가직경은 10 mm이다. 실험부 유로의 전길이는 600 mm이고, 가열개시점까지의 입구구간은 200 mm로서 흐름이 충분히 발달되도록 하였다. 실험부 양단의 플랜지는 JIS B 2240의 규정에 따라 허용압력 5 kgf/cm<sup>2</sup>로 설계되었고, 입출구 압력은 각각의 입출구 플랜지에 직경 1 mm의 압력공을 설치하여 각 위치의 절대압력을 정밀압력계로 측정하였다. 또한 실험부의 입출구 플랜지에는 실험냉매의 온도를 측정하기 위하여 직경 1 mm의 시스타입 C-A열전대를 설치하였다. 가열관내벽온도 측정용의 6개의 76  $\mu$ m C-A열전대는 가열관내벽면에 밀착삽입하며, 출력된 기전력은 데이터로거에 의하여 온도로 환산된 후 기록장치에 기록된다.

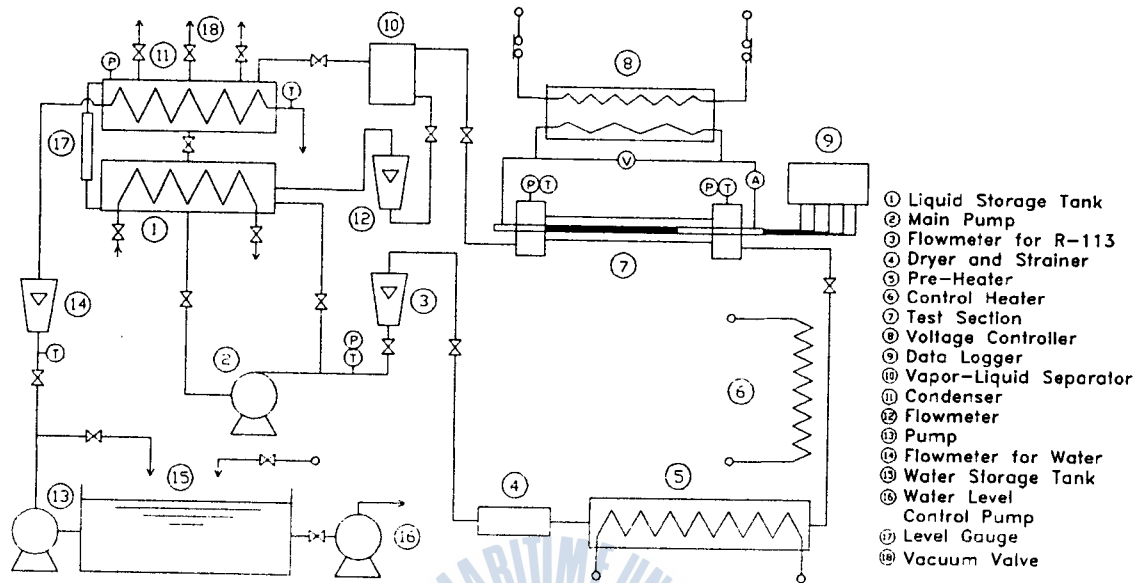


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

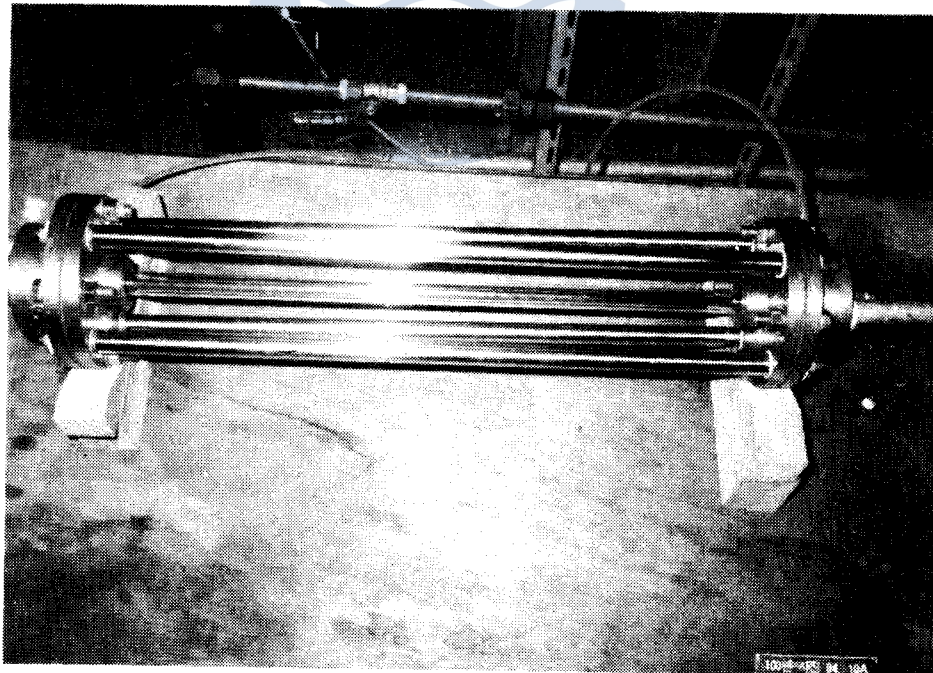


Photo 1 Test Section

## 2.2 실험방법 및 실험범위

실험냉매로 사용하는 R-113은 Fig. 1의 액저장탱크①로부터 주순환펌프②에 흡입된 다음, 바이패스밸브에 의하여 유량과 압력이 조절되어져 유량계③ 입구에서 온도와 압력이 측정되고, 유량계에서 체적유량이 측정된 후 드라이어④에 유입한다. 드라이어의 입출구에는 필터가 설치되어 있고 그 내부에는 실리카겔이 봉입되어 있어, 실험유체의 물성치에 영향을 줄 수 있는 수분 등의 이물질 제거하게 된다. 드라이어를 유출한 냉매는 예열기⑤를 거친 후 온도조절기⑥에 유입된다.

예열기에는 내장된 전기히터가, 온도조절기에는 관외벽면에 전기가열선이 감겨 있어 각각 진압조정기에 결선되어 가열량이 조절되어 진다. 예열기와 온도조절기에 연결된 진압조정기의 진압을 적절히 조절하여 실험조건 소정의 입구과냉도로 유지된 실험냉매는 실험부 입구에서 온도 및 정압이 측정된 후 실험부⑦에 유입한다. 실험부내의 가열관은 가열전원장치⑧에 의하여 실험관 양단에 인가된 교류상태의 저진압대전류에 의하여 가열된다. 가열관에는 C-A 열전대 6개를 테프론홀더에 부착하여 내벽면에 밀착되게 삽입하였다. C-A 열전대의 온도는 데이터로거⑨에 기록된다.

실험부에서 유출한 냉매는 기액분리기⑩에 유입하게 되고, 여기에서 기상의 냉매는 응축기⑪로, 액상의 냉매는 액저장탱크⑫로 환류되게 된다.

본 실험에서 실험유체로는 R-113을 사용하였다. R-113을 실험유체로 사용한 이유는 증발잠열이 적기 때문에 과냉상태로부터 비교적 적은 가열량으로 기액이 상류 상태를 실험할 수 있고, 포화상태의 액과 증기의 밀도비가 고압수증기의 상태와 비슷한 성질을 갖고 있으며, 대기압에서의 포화온도는 약 47 °C 정도로 비교적 취급이 간편하기 때문이다.

R-113의 물성치는 ASAH FRON과 DAI FRON의 냉매물성치와 몇가지 자료<sup>(7),(8)</sup>를 참고하여  $0.5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ abs.} \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ abs.}$  범위에서 최소자승법을 이용하여 수식화하였다.

실험부 입구압력을  $1.5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ abs.}$  ( $T_s = 59.1 \text{ }^\circ\text{C}$ )로 유지하고, 입구과냉도  $\Delta T_{\text{sub}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}, 20 \text{ }^\circ\text{C}, 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 질량유속  $G = 1.628 \times 10^6, 3.256 \times 10^6, 4.884 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ 의 범위에서 각각의 열유속에 대하여 실험을 수행하였다.

가열관 출구로부터 약 10 mm 위치에서 최초의 핵비등이 발생하였다고 보고되었기 때문에<sup>(9)</sup>, 그 위치인 가열개시점으로부터 축방향 거리  $z = 390 \text{ mm}$  ( $z/D_e$

= 39)의 위치에 환봉형의 테프론홀더에 선경 76  $\mu\text{m}$ 의 C-A 열전대 6개를 원주방향 등각도간격으로 설치한 후, 가열관 내면에 밀착 삽입하여 전열면 내부의 온도를 측정함으로써 전열면의 외부온도를 일차원 열전도방정식을 사용하여 계산한다.

다음으로 축방향거리  $z = 10 \text{ mm}$  ( $z/D_e = 1$ )의 위치로부터  $z = 400 \text{ mm}$  ( $z/D_e = 40$ )의 위치까지 20 mm의 간격으로 각 지점에서의 온도분포를 측정하여 전열면 외표면온도를 계산하여 각부의 국소열전달율을 계산한다.

### 제3장 이론해석

어떤 크기의 증기포가 액체중에 존재하며 평형을 유지하고 있을 때, 기포내의 압력  $P_g$ 는 주위의 액의 압력  $P_l$ 보다  $\Delta P$ 만큼 높아서

$$\Delta P = P_g - P_l = 2 \frac{\sigma}{r} \quad (3.1)$$

의 관계가 있다.

위와 같은 상태에서는 기포가 평형을 이루고 있으므로 온도장이 균일하지 않으면 안된다. 따라서 주위의 액의 온도  $T_l$ 은 압력  $P_l$ 의 포화온도  $T_s$ 보다도 과열되어 온도가  $T_g = T_l$ 의 상태에 있을 필요가 있다.

포화곡선상에서 압력과 온도의 사이에는 Clausius-Clapeyron의 식

$$\left( \frac{dp}{dT} \right)_{\text{sat}} = \frac{h_{fg}}{T(v_g - v_l)} \quad (3.2)$$

의 관계가 성립한다. 여기서  $v_g \gg v_l$ 이며, 증기를 이상기체라고 하면

$$v_g = \frac{RT}{P} \quad (3.3)$$

이다. 식(3.3)의 관계를 식(3.2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{dP}{P} = \frac{h_{fg}}{R} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (3.4)$$

액의 과열도  $\Delta T_s = T_g - T_s$ 는 위식을 좌변을  $P_l$ 에서  $P_g$ 까지, 우변을  $T_l$ 에서  $T_g$ 까지 적분함으로써 구할 수가 있는데, 그 결과는 다음과 같으며,

$$\Delta T_s = T_g - T_s = \frac{RT_g T_s}{h_{fg}} \ln \frac{P_g}{P_l} \quad (3.5)$$

식(3.1)을 식(3.5)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta T_s = \frac{RT_g T_s}{h_{fg}} \ln \left( 1 + \frac{2\sigma}{P_{\ell} r} \right) \quad (3.6)$$

일반적으로 표면장력은 매우 적은 값이므로  $2\sigma/P_{\ell}r \ll 1$ 이라 하면 위식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_s = \frac{RT_g T_s}{h_{fg}} \frac{2\sigma}{P_{\ell} r} = \frac{T_s v_g}{h_{fg}} \frac{2\sigma}{r} \quad (3.7)$$

만일 기포가  $r = 0$ 에서부터 생성되어 성장한다고 하면 액과열도  $\Delta T_s \rightarrow \infty$ 가 된다. 따라서 기포는 어느 정도의 크기를 갖고 발생하지 않으면 안되는데, 이는 실제의 비등에서는 어떤 형태의 기포발생의 핵이 존재한다는 것이 된다.

Fig. 2는 Bergles 등의 가정을 모형적으로 나타낸 것인데, 관내의 액단상류를 생각하면 가열열유속은 다음과 같은 관계가 있다.<sup>(1),(2)</sup>

$$q_w = h_c (T_w - T_{\ell b}) = -k_{\ell} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (3.8)$$

여기서 기포와 캐비티의 크기는 흐름장의 점성저층두께보다도 일반적으로 얇다. 따라서 벽면근방의 온도분포는 다음식과 같이 직선적인 관계로 표시된다.

$$T_{\ell} = T_w - \frac{q_w}{k_{\ell}} y \quad (3.9)$$

액혼합평균온도와 유량이 일정하다면 열유속의 증가와 더불어 벽면온도  $T_w$ 와 온도구배가 증가하므로 이 온도분포는 Fig. 2중의 점선군과 같이 변화할 것이다. 그리고 캐비티에 기포가 발생할 수 있는 과열도는 식(3.7)에서  $r$ 을  $y$ 로 대치하면

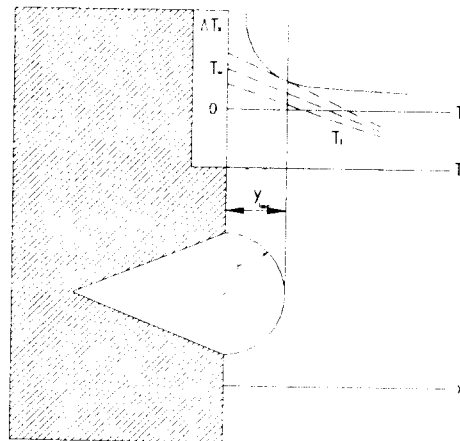


Fig. 2 Incipient Boiling Condition of Forced Convective Flow

$$T_g = T_s + \frac{T_s v_g}{h_{fg}} \frac{2\sigma}{y} \quad (3.10)$$

로 표현된다.

Bergles 등은 간단히, 반경  $r$ 의 반구상의 기포가 더욱 성장하기 위해서는 벽면으로부터의 거리  $y = r$ 에 있어서의 온도가 식(3.7)로 주어지는 온도  $T_g$ 보다 크지 않으면 안된다고 가정하고 있다. 이와 같이 가정하면, 비등은 온도분포의 선이  $T_g$ 곡선에 접할 때 그 거리  $y$ 와 같은 개구반경을 갖는 캐비티에서부터 개시된다는 것이 된다. 이 조건에서부터 佐藤 등과 Rohsenow는 비등개시에 필요한 가열열유속과 과열도의 관계를 다음과 같이 구하고 있다.<sup>(1),(2)</sup>

그림과 같이  $T_g$ 곡선과  $T_\ell$ 선이 접하는 위치를  $y_{inc}$ , 이 때의 가열열유속을  $q_{inc}$ 라고 하면 접점에서는  $T_g = T_\ell$ , 따라서 식(3.9)와 식(3.10)에서 벽면과열도는 다음과 같이 된다.

$$(T_w - T_s)_{inc} = \frac{q_{inc}}{k_\ell} y_{inc} + \frac{T_s v_g}{h_{fg}} \frac{2\sigma}{y_{inc}} \quad (3.11)$$

또한 이 점에서는  $\partial T_g / \partial y = \partial T_\ell / \partial y$ 이므로, 식(3.9)와 식(3.10)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{inc} = \left( \frac{T_s v_g}{h_{fg}} \frac{2\sigma k_\ell}{q_{inc}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

위 식을 식(3.11)에 대입하면 열유속과 벽면과열도의 관계가 아래와 같이 구하여진다.

$$q_{inc} = \frac{k_\ell h_{fg}}{8\sigma T_s v_g} (T_w - T_s)_{inc}^2 \quad (3.13)$$

여기서  $q$ 는 열유속,  $h_{fg}$ 는 증발잠열,  $k_\ell$ 는 열전도율,  $\sigma$ 는 표면장력,  $T$ 는 절대온도 그리고  $v_g$ 는 가스의 비체적을 각각 나타낸다.

## 제4장 실험결과 및 고찰

### 4.1 핵비등열전달

전열관에 과냉상태로 유입한 냉매는 전열관내를 흘러감에 따라 액혼합평균온도가 상승하여 과냉상태하에서 비등이 일어난다. 즉 소정의 질량속도와 입구과냉도 상태로 전열관에 유입하여 열유속을 증가시키면 핵비등이 개시되고 본격적인



핵비등에 의한 열전달이 일어나게 된다.

Fig. 3, Fig. 4는  $z/D_c = 39$ 의 위치에서 질량속도가 각각  $G = 1.628 \times 10^6$   $\text{kg/m}^2\text{hr}$ ,  $4.884 \times 10^6$   $\text{kg/m}^2\text{hr}$ 의 경우에 1번과 2번 열전대에서 측정된 온도분포를 바탕으로 정리된 핵비등곡선을 나타낸다. 이들 그림에서 약간의 측정오차는 있지만 동일한 열유속의 경우 비교적 입구과냉도가 클수록 핵비등곡선은 벽면과 열도가 적은 횡축상의 좌측방향으로 이동하여 과냉도가 클수록 열전달율은 향상됨을 알 수 있고, 질량속도가 커질수록 비등곡선은 벽면과 열도가 적은 횡축상의 좌측으로 움직여서 열전달율은 향상됨을 알 수 있다. 또한 비등이 개시될 때의 과열도는 질량속도가 증가함에 따라 큰 변화를 보이지 않는데, 이는 질량속도가 비등개시과열도에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 것을 나타낸다.

그림중의 실선은 핵비등열전달에 관한 Rohsenow의 식<sup>(10)</sup>으로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C_{p\ell} \Delta T_s}{h_{fg}} = 0.006 \frac{Q_s}{h_{fg} \mu_\ell} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_\ell - \rho_g)} \right]^{0.33} \left[ \frac{C_{p\ell} \mu_\ell}{k_\ell} \right]^{1.7} \quad (4.1)$$

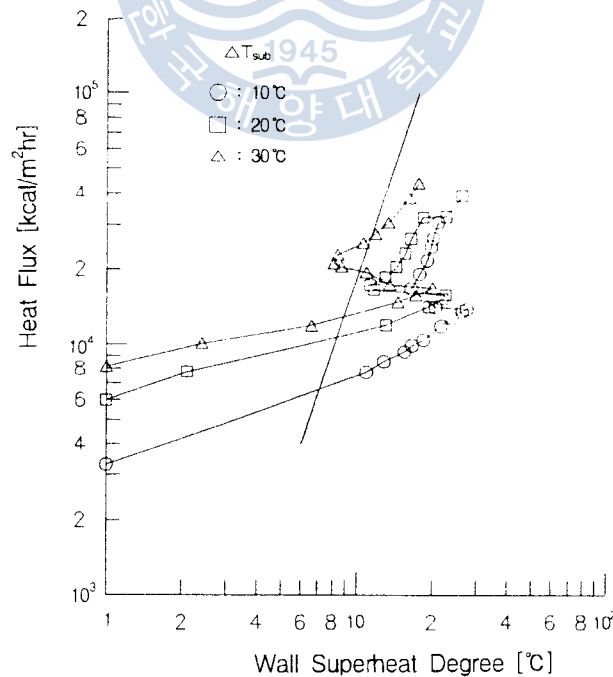


Fig. 3 Boiling Curve at the Condition  
( $G = 1.628 \times 10^6$   $\text{kg/m}^2\text{hr}$ , No. 1 T.C)

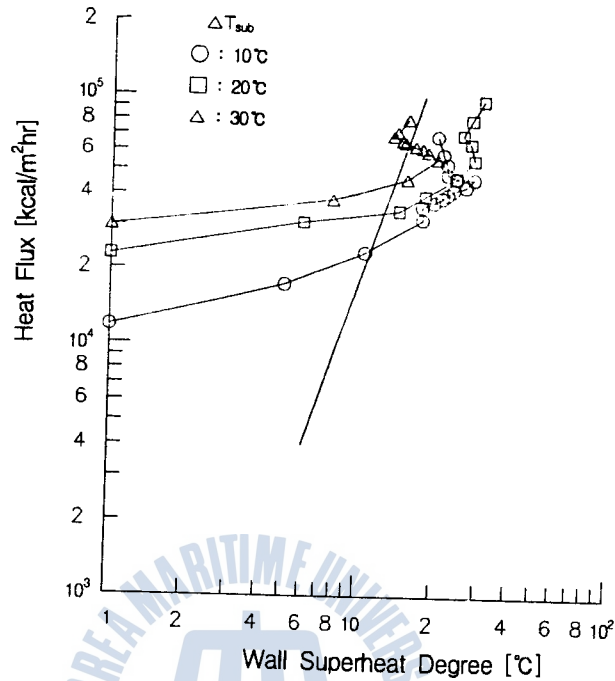


Fig. 4 Boiling Curve at the Condition

(G = 4.884 × 10<sup>6</sup> kg/m<sup>2</sup>hr, No. 2 T.C)

#### 4.2 비등개시조건

핵비등이 개시되면 가열면온도는 급저하하게 되는데, 이 위치를 비등개시점이라 간주하고 이점에서 벽면과열도와 열유속의 관계를 생각한다. 강제유동비등계에 대해서는 비등개시조건에 대한 많은 연구가 수행되었는데, 佐藤, Bergles 그리고 Rohsenow는 가열면상에 유효캐비티가 존재하는 경우의 비등개시조건에 대하여 식(3.40)을 제안하였다. 그러나 그 결과는 전열면상에 여러가지 크기의 유효캐비티가 존재한다고 가정하고 구한 것이다. 그런데 일반적으로 보통의 금속면에는 상당히 넓은 범위의 크기를 갖는 캐비티가 존재한다. 따라서 매끄러운 면이나 벽면근방의 온도구배가 적은 경우에는 이 관계는 적용될 수 없다.

최대유효캐비티의 개구반경이  $r_{\max}$ 이라고 할 경우, 비등개시조건에 대한 다음식이 제안되어 있다.<sup>(1),(2)</sup>

$$q_{\text{inc}} = \frac{k_{\ell}}{r_{\max}} (T_w - T_s)_{\text{inc}} - \frac{2\sigma T_s v_g k_{\ell}}{h_{fg} r_{\max}^2} \quad (4.2)$$

Fig. 5와 Fig. 6에는 앞절에서의 실험결과를 바탕으로 각각의 질량속도와 입구과

냉도에 대하여 2번, 4번, 6번 열전대에서 비등개시위치가  $z/D_e > 10$ 의 영역에서의 데이터에 대하여 이 위치의 벽면과열도를 열유속에 대하여 나타낸 그림이다. 그림중의 점선은 식(3.13)의 관계를 나타내며, 실선은 식(4.2)의 관계를 나타내고, 색칠되지 않은 기호는 핵비등이 개시되는 때의 자료이며, 색칠된 기호는 본격적인 핵비등이 개시되는 때의 자료이다. 그림에서 보는 바와 같이, 본 실험에서의 비등개시점의 벽면과열도는 20 ~ 30 °C 정도로 비교적 높은 편이며, 그 때의 가열면의 최대유효캐비티의 개구반경  $r_{max} = 0.21 \sim 0.33 \mu m$ 의 범위이고, 그 범위는 질량속도와 입구과냉도에 따라 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. 그리고 본격적인 핵비등이 개시될 때까지  $r_{max} = 0.7 \mu m$  범위의 캐비티까지 활성화되며, 질량유속이 높을수록 활성화되는 캐비티의 개구반경의 범위는 줄어드는 것을 알 수 있다.

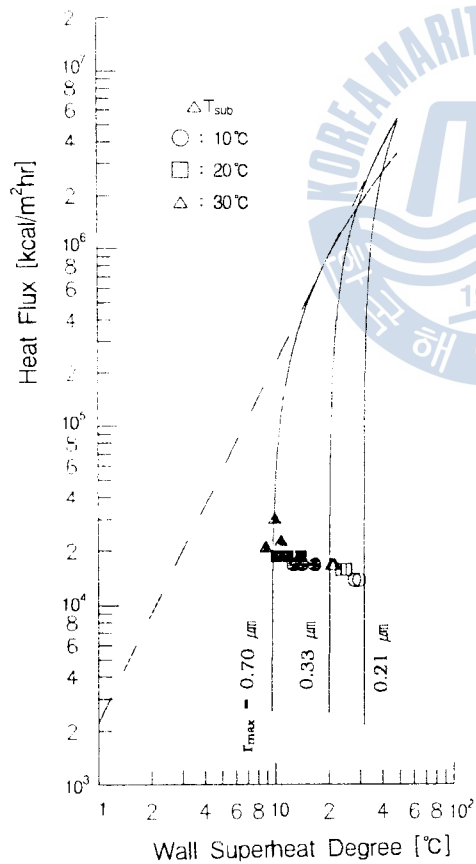


Fig. 5 Starting Condition of Incipient Boiling( $G = 1.628 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ )

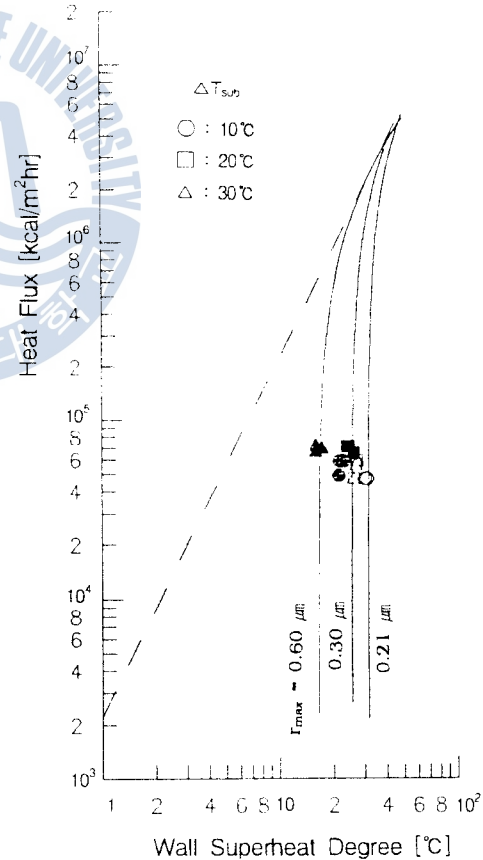


Fig. 6 Starting Condition of Incipient Boiling( $G = 3.256 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ )

### 4.3 열전달율의 실험결과

열전달율은 각각의 열유속과 레이놀즈수 그리고 과냉도에 대하여 가열관내벽면을 따라 20 mm 간격으로 열전대를 이동시키면서 측정된 온도로부터 일차원열전도방정식을 풀므로써 실험관의 외벽온도를 구하여 식(4.3)에서 보는 바와 같이 주어진 열유속에 대하여 측정된 실험부 입출구온도를 이용하여 계산된다. 단 실험부에서 주류의 액온은 관입구에서부터 출구까지 직선적으로 분포한다고 가정하였다.

$$h = \frac{Q_s}{T_{wo} - T_{bulk,sat}} \quad (4.3)$$

모든 실험결과는 이론식과 비교되어져 있는데, 핵비등이 개시되기 이전의 결과에 대해서는 단상난류 실험식인 Dittus-Boelter의 실험식과 Colburn의 실험식을 사용하여 비교하였다.

핵비등개시 후의 열전달율에 관하여는 L. Pujol-A. H. Stenning, V. E. Schrock-L. M. Grossman, R. M. Wright, G. F. Somerville 그리고 R. L. Sani의 열전달실험식에 의한 계산결과와 비교하였다. Fig. 7에 질량속도  $3.256 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>hr, 입구과냉도 10 °C일 경우의 실험결과와 이에 대응하는 각각의 이상류열전달율 계산결과와 비교하고 있는데, 본 실험의 결과는 대체로 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 실험식에 의한 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 8에 실험결과를 보이고 있다. 점선은 Dittus-Boelter의 실험식에 의한 결과를, 실선은 Colburn의 실험식에 의한 결과를 나타내고, 일점쇄선은 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 실험식에 의한 결과를 나타낸다. 대체적인 단상류열전달율의 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 이론식과 잘 부합하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 ■로 표시된 것이 핵비등개시 이후의 실험결과를 나타내는데, 비등이 개시되면 열전달율이 급격히 상승함을 알 수 있다. 그리고 본 실험에서 측정된 이상류의 열전달율은 V. E. Schrock-L. M. Grossman에 의한 결과보다 대체적으로 약 25 % 정도 낮게 나타났다.

### 4.4 벽면온도 측정

측정된 전열관 내벽온도를 일차원열전도 방정식을 풀므로써 관외벽온도를 계산한다.

Fig. 9에는 질량속도  $3.256 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>hr, 과냉도 10 °C인 경우에 본 실험에

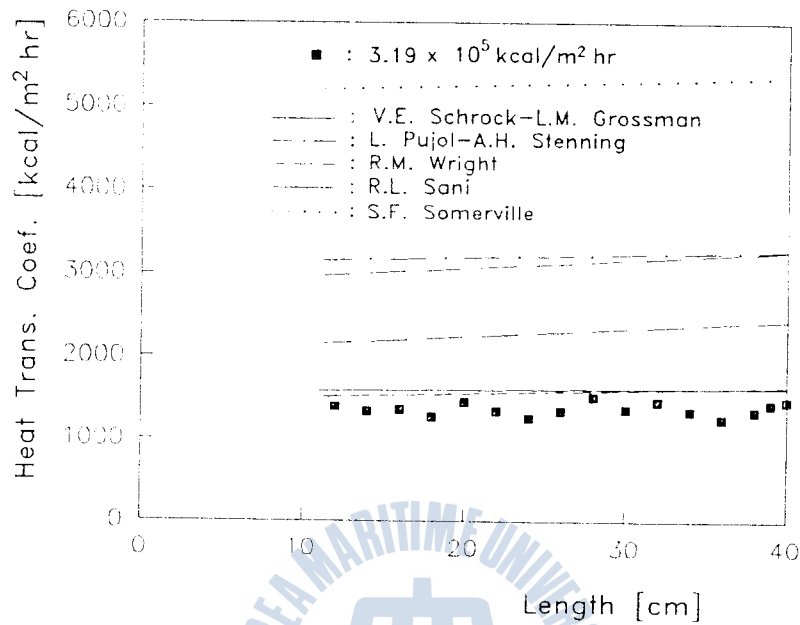


Fig. 7 Comparison of Heat Transfer Coefficient

( $G = 3.256 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ ,  $T_{\text{sub}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , No. 2 T.C)

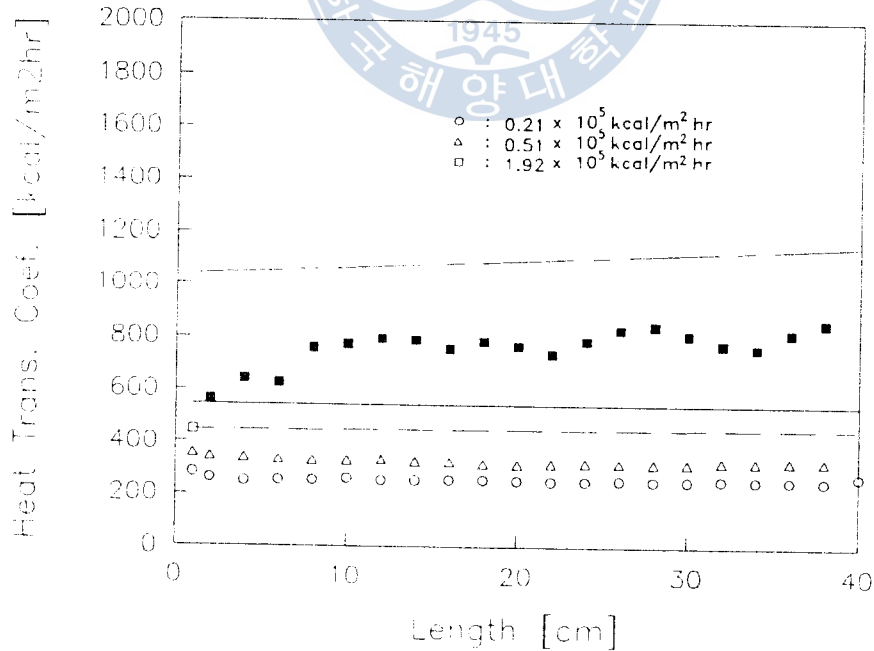


Fig. 8 Heat Transfer Coefficient Distribution along the Length

( $G = 1.628 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ ,  $T_{\text{sub}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , No. 2 T.C)

서 측정된 벽면온도에 대하여 L. Pujol-A. H. Stenning, V. E. Schrock-L. M. Grossman, R. M. Wright, G. F. Somerville 그리고 R. L. Sani의 열전달실험식에 의하여 구한 벽면온도와 비교되어 있다. 측정된 결과는 비등이 개시된 후의 자료이며 대체로 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 식에 의하여 구한 벽면온도와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4.10에는 측정된 벽면온도의 결과를 보이고 있다. 점선은 Dittus-Boelter의 실험식에 의한 결과를 나타내며, 실선은 Colburn의 실험식에 의한 결과를 나타내고, 일점쇄선은 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 실험식에 의한 결과를 나타낸다.

비등이 개시된 이후의 자료에 대해서는 어느 정도의 오차는 있지만 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 실험식에 의하여 구하여진 벽면온도보다 대체적으로 높게 나타나고 있다. 그림중의 ■는 핵비등이 개시된 후의 실험결과를 나타내고 있는데 비등이 개시될 때에는 벽면온도는 급격히 저하함을 알 수 있다.

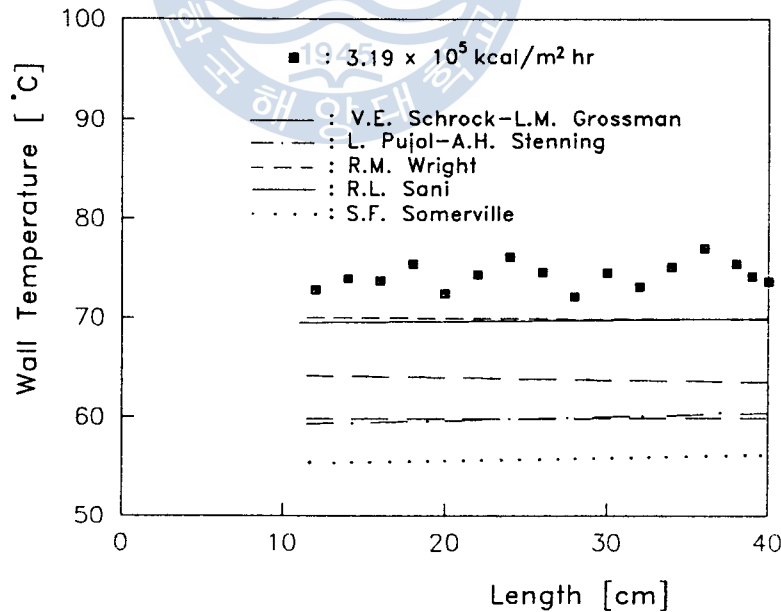


Fig. 9 Comparison of Wall Temperature

( $G = 3.256 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ ,  $T_{\text{sub}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , No. 2 T.C)

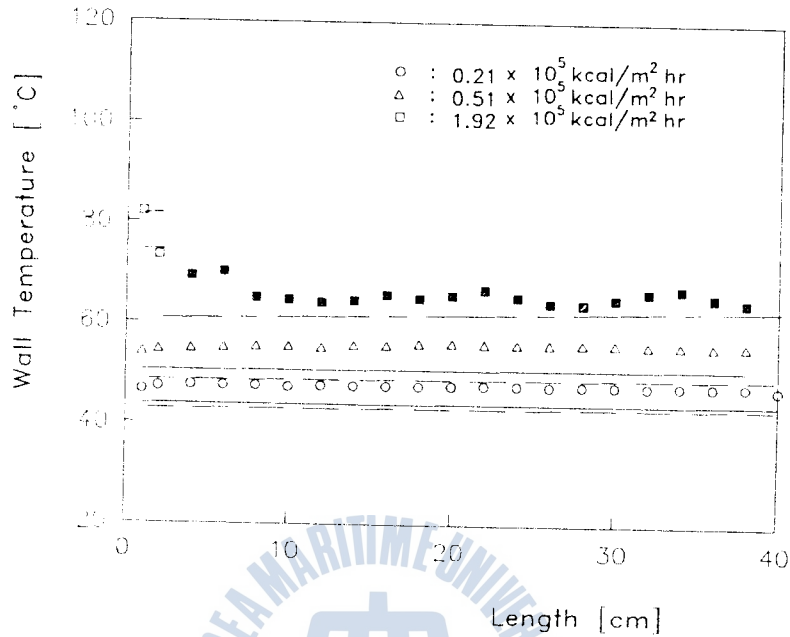


Fig. 10 Wall Temperature Distribution along the Length

( $G = 1.628 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ ,  $T_{\text{sub}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , No. 2 T.C)

제5장 결론

- (1) 액단상류에 의한 강제대류열전달영역에서 국소열전달율은 입구과냉도와 레이놀즈수가 클수록 증가하며, Dittus-Boelter의 식에 의한 결과와 대체로 잘 일치하였다.
- (2) 과냉핵비등영역에서 국소열전달율은 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 실험 식에 의한 결과와 유사한 경향을 갖으며, 입구과냉도와 레이놀즈수가 클수록 커졌다.
- (3) 따라서 비등곡선상에서도 입구과냉도와 레이놀즈수가 증가할수록 열전달이 촉진되어 벽면과열도가 적은 좌측으로 이동하였으며, 입구레이놀즈수는 비등개시 조건에 그다지 커다란 영향을 미치지 않았다.
- (4) 본 실험에 사용된 전열관의 비등개시점에서의 벽면과열도는 20 ~ 30 °C 정도로 비교적 높은 편이었으며, 그 때의 가열면의 최대유효캐비티의 개구반경  $r_{\text{max}} \approx 0.21 \sim 0.33 \mu\text{m}$ 의 범위였고, 질량속도와 입구과냉도에 따라 거의 변화

하지 않았다.

- (5) 핵비동영역의 국소열전달율의 측정결과는 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 식에 의한 계산치보다 약 25 % 낮게 얻어졌다.
- (6) 핵비동영역에서 전열면온도의 측정결과는 V. E. Schrock-L. M. Grossman의 식에 의한 계산치보다 높게 나타났으며, 레이놀즈수가 클수록 좋은 일치를 보였다.

### 참고문헌

- (1) 植田辰洋 ; 氣液二相流(流と熱傳達), 養賢堂(1981)
- (2) 金京根 ; 氣液二相流, 太和出版社(1986)
- (3) 日野龍太郎, 植田辰洋 ; サブクール沸騰流に傳熱および流動特性について(第2報, 流動特性), 日本機械學會論文集(B編), 第50卷, 第460號, pp.2985~2992(1984)
- (4) 植田辰洋 ; 管内流動沸騰および凝縮系の熱傳達に関する研究現況, 日本機械學會論文集(B編), 第48卷, 第425號, pp.3~8(1982)
- (5) J. R. S. Thom, W. M. Walker, T. A. Fallon, G. F. S. Reising ; Boiling in Sub-Cooled Water during Flow up Heat Tubes or Annuli, Proc Instn Vech Engrs 1965-66, Vol.180, Pt.3C, pp.226~246(1965)
- (6) Niels Madsen ; A Void Fraction Correlation for Vertical and Horizontal Bulk-Boiling of Water, 5th Int. Heat Trans. Conf., Vol.4, pp.185~189(1974)
- (7) 坂口晴一郎, 赤津康昭, 小松崎茂樹油 ; 油とフロン113の混合物の熱物性値に関する實驗整理式, 日本冷凍學會誌, 第58卷, 第670號, pp.775~784(1983)
- (8) H. Sato, A. Kamei, Z. Y. Qian, K. Watanabe ; A Practical Procedure for Calculating Thermodynamic Properties of Refrigerants, 1st KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Vol.1, pp.1-18~1-23(1988)
- (9) Thorbjörn Johannesen ; A Theoretical Solution of the Lockhart and Martinelli Flow Model for Calculating Two-Phase Flow Pressure Drop and Hold-up, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.1443~1449(1972)
- (10) W. M. Rohsenow, Cambridge, Mass ; A Method of Correlating Heat-Transfer Data for Surface Boiling of Liquids, Transaction of the ASME, pp.969~976(1952)