

---

 ◎研究論文
 

---

## 表面거칠기의 변화에 따른 핵沸騰熱傳達の 特性에 관한 研究

金 春 植\* · 鄭 大 仁\*\* · 裴 鍾 旭\*

 Study on the Characteristics of Nucleate Boiling Heat Transfer with  
 Changing of Surface Roughness

Chun-Sik Kim, Dae-In Jung, Jong-Ook Bae

## Abstract

In nucleate boiling, bubbles are created by the expansion of entrapped gas or vapor at small cavities in the surface of heat transfer. Namely, surface roughness is the important factor of heat transfer. This paper deals with the characteristics of boiling curve according to surface roughness. Freon-113 is used as the experimental fluid.

The results are as follows;

1. In the case of the same as " $q=C\Delta T^n$ ", the lower numerical index " $n$ ", the larger heat transfer coefficient and the lower wall superheat " $\Delta T$ " is obtained for the rougher surface.

2. In the working of every kind of heat transfer surface with boiling, improvement of capabilities of heat transfer can be devised by adding suitable roughness on the heat transfer surface.

3. When the metal nets of moderate mesh number are established, the capabilities of heat transfer can be improved in evaporation of liquid in vessels.

But in the case that the succession of bubbles is checked by using the nets which are too tight, the generation of bubbles union decreases critical heat flux.

記 號 說 明		$i''$ : enthalpy of gas	kcal/kg
$C_{pl}$ : iso-pressure specific heat of liquid	kcal/kg $^{\circ}$ C	$k_b$ : thermal conductivity of brass	kcal/mh $^{\circ}$ C
$g$ : accelation of gravity	m/h $^2$	$k_g$ : thermal conductivity of glasswool	kcal/mh $^{\circ}$ C
$g_o$ : accelation of atmospheric gravity	m/h $^2$	$k_i$ : thermal conductivity of iron	kcal/mh $^{\circ}$ C
$i'$ : enthalpy of liquid	kcal/kg	$k_l$ : thermal conductivity of liquid	kcal/mh $^{\circ}$ C

---

 \* 正會員, 韓國海洋大學

\*\* 正會員, 東元工專大

$L$ : latent heat, ( $=i''-i'$ )	kcal/kg
$P_c$ : critical pressure	kg/cm <sup>2</sup> ab
$P_g$ : pressure of gas	kg/cm <sup>2</sup> ab
$P_l$ : pressure of liquid	kg/cm <sup>2</sup> ab
$Pr$ : prandtl number, dimensionless	
$P_s$ : saturation pressure	kg/cm <sup>2</sup> ab
$q$ : heat flux	kcal/m <sup>2</sup> h
$q_c$ : critical heat flux	kcal/m <sup>2</sup> h
$R_c$ : radius of active cavity	m
$T_b$ : brass temperature	°C
$T_c$ : critical temperature	°C
$T_g$ : temperature of gas	°C
$T_l$ : temperature of liquid	°C
$T_{sp}$ : soliding temperature	°C
$T_w$ : wall temperature of brass	°C
$\Delta T$ : wall superheat, ( $=T_s-T_w$ )	°C
$u$ : velocity of fluid	m/sec
$v_c$ : critical specific volume	m <sup>3</sup> /kg
$v'$ : specific volume of liquid	m <sup>3</sup> /kg
$v''$ : specific volume of gas	m <sup>3</sup> /kg
$W_m$ : molecular weight	gr/mol
$\mu_g$ : viscosity of gas	kg/mh
$\mu_l$ : viscosity of liquid	kg/mh
$\rho_g$ : density of gas	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_l$ : density of liquid	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$ : surface tension	kg/m

## I. 序 論

傳熱面上的 核沸騰現象은 보일러튜브, 原子爐의 爐心冶却器, 各種 熱交換器 및 化學프란트의 蒸發部 등과 같은 많은 工學分野에 應用된다. 또한 最近에는 에너지節約과 더불어 比較的 熱負荷가 적은 傳熱面의 경우에도 傳熱性能의 改善이라는 觀點에서 核沸騰의 促進에 관한 研究<sup>1)</sup>가 行하여지고 있다.

核沸騰의 發生機構는 傳熱面上에 無數히 存在하는 微小한 凹部內의 流體가 過熱되어 氣泡發生의 核으로 作用함으로써 傳熱面 近傍의 過熱液層內에서 氣泡가 成長됨이 알려져 있다. 核沸騰의 發生에 관한 理論的 研究는 Y. H. Hsu<sup>2)</sup>, A. E. Bergles<sup>3)</sup>, E. J. Davis<sup>4)</sup>, W. M. Rohsenow<sup>5)</sup>, 및 P. Griffith<sup>6)</sup> 등에 使하여 이루어진 바

있다.

熱流束이 큰 強制對流沸騰系 環狀流領域에서의 核沸騰 諸般現象에 關해서는 J. C. Chen<sup>7)</sup>, 및 金<sup>8)</sup> 등의 研究가 있다.

亞冷却沸騰領域에서의 核沸騰 發生程度가 매우 重要하며 이에 關하여는 P. Saha<sup>9)</sup> 등에 의한 研究가 있다. 또한 스테인레스系 燒結金屬面의 核沸騰熱傳達에 關하여는 崔<sup>10)</sup>의 研究가 있다.

Nagayama<sup>11)</sup>는 傳熱面에서 一般的으로 核沸騰을 促進하기 위하여 人工的인 凹部를 形成시켜 현저하게 核沸騰 熱傳達率을 改善시키는 研究結果를 얻고 있다.

本 論文에서는 相變化時的 蒸發潛熱을 利用한 傳達方法인 沸騰熱傳達에 있어서 表面의 거칠기의 變化에 따른 沸騰曲線의 特性에 關하여 實驗的 研究結果를 얻었다. 또한 히이터 파이프에서는 核沸騰部에 動作流體를 供給하기 위하여 金屬網을 設置하게 되는데, 本 研究에서는 水平의 傳熱面上에 32메쉬 및 16메쉬의 黃銅網을 設置하여 이로 인한 傳熱特性의 變化에 關하여도 研究를 行하였다.

## 2. 核沸騰의 發生

### (2.2) 流動流에 있어서 核沸騰의 開始條件

傳熱面上을 液相이 흐르면서 氣泡가 發生하는 경우나 減壓에 依하여 液相中에서 氣泡가 發生하는 경우는 많이 經驗하게 된다.

Fig.1과 같이 흐름 中에 놓여진 氣體球를 생각하면, 氣體球의 表面에 作用하는 表面張力에 依하여 氣體球內의 壓力은 周圍의 흐름의 壓力보다  $\Delta P(=P_g-P_l)$ 만큼 높게 되며 힘의 平衡

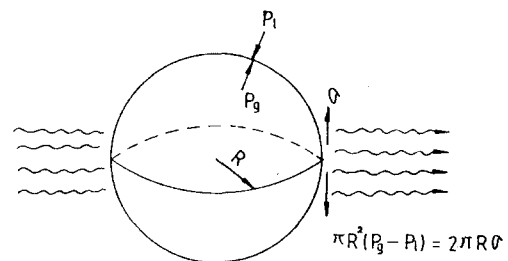


Fig.1. Balance of force about bubble in flow

으로부터 다음 式의 成立한다.<sup>12)</sup>

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \dots\dots\dots(1)$$

또 液相에서 氣相으로의 相이 變化할 경우 氣液境界線上에는 Gibbs의 自由에너지 不變으로부터 求한 Clausius-Clapeyron의 式<sup>13)</sup>이 成立한다. 이 式에서 氣相의 比體積이 液相의 比體積보다 훨씬 크기 때문에 다음 式이 된다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{TV''}{L} \dots\dots\dots(2)$$

$\Delta T = T_g - T_s$ 에서  $T_g$ 는 氣泡內의 平均溫度를 나타내지만 氣泡頂部의 溫度를 氣相의 代表溫度로 採하였다.

流動狀態의 傳熱面上에는 數  $\mu$ 程度의 無數한 凹部가 存在하며 여기에서 Fig. 2와 같은 模型을 생각한다. 凹部에서 發生하는 氣泡은 半球體로 생각하며, 또한 氣泡의 半徑은 層流底層의 두께

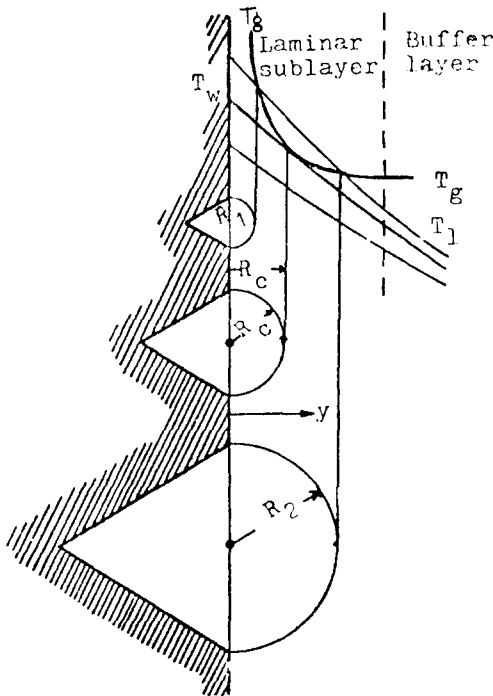


Fig. 2. Initiation of nucleate boiling in convected flow

보다 작은 크기이며, 氣泡 發生 前에는 熱은 傳導에 依하여 層流底層 內를 移動한다고 假定한다.

여기에서 層流底層 內의 溫度分布를 直線化시키면 熱傳導 方程式은 다음과 같다.

$$q = -k_l(\partial T_l / \partial y)_{wall} = k_l(T_w - T_l) / y \dots\dots(3)$$

또한 Fig에서 半徑 R인 凹部로부터 加熱에 依하여 氣泡을 發生하기 爲한 溫度差( $T_g - T_s$ )를 나타내며,  $T_g$ 를 定性的으로 表示하기 爲해서 氣泡半徑 R을 傳熱面으로부터의 거리 y로 置換하여 表示하였다.

(3) 式에서 加熱量 q를 增加시켜가면 傳熱面 近傍의 溫度勾配는 增大된다. 熱流束의 增加에 따른 流體의 溫度變化를 Fig. 2에 表示하였다. 熱流束이 적을 경우는 核沸騰이 發生하지 않고 傳導에만 依하여 熱이 移動되나 차츰 增加되면 어느 순간부터 最初로 核沸騰이 開始된다. 이때 最初로 核沸騰이 發生되는 凹部徑  $R_c$ 는 Fig. 2에서와 같이 氣泡溫度曲線  $T_g$ 와 傳熱面 近傍의 流體 內의 溫度分布  $T_l$ 의 接點에 該當된다. 즉 核沸騰이 開始되는 순간에는

$$T_g = T_l \dots\dots\dots(4)$$

$$\partial T_g / \partial y = \partial T_l / \partial y \dots\dots\dots(5)$$

가 成立된다.

(2.2) 核沸騰 開始의 理論解析

以上の 假定과 條件에서 다음과 같은 結果 式들이 얻어진다. (1)式과 (2)式에서

$$\Delta T = T_g - T_s = \frac{2\sigma v'' T_s}{LR} \dots\dots\dots(6)$$

$R = y$ 이므로

$$\frac{\partial T_g}{\partial y} = \frac{2\sigma v'' T_s}{Ly^2} \dots\dots\dots(7)$$

(3)式에서

$$T_w = T_l + \frac{yq}{k_l} \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial y} = -\frac{q}{k_l} \dots\dots\dots(9)$$

(7)式과 (9)式을 (5)式에 代入하면

$$\frac{2\sigma v'' T_s}{Ly} = \frac{yq}{k_l} \dots\dots\dots(10)$$

(6)式과 (8)式에서

$$T_w - T_s = T_l - T_g + \frac{yq}{k_l} + \frac{2\sigma v'' T_s}{LR} \dots\dots(11)$$

(4)式과 (10)式을 (11)式에 代入하면

$$T_w - T_s = \frac{2yq}{k_l} \dots\dots\dots(12)$$

(10)式에서  $y$ 대신  $R_c$ ,  $q$ 대신  $q_c$ 를 代入하면 다음 式들이 求해진다.

$$R_c = \sqrt{\frac{2\sigma v'' k_i T_s}{L q_c}} \dots \dots \dots (13)$$

$$q_c = \frac{k_i L}{8\sigma v'' T_s} (T_w - T_s)^2 \dots \dots \dots (14)$$

(13)式은 氣泡半徑  $R_c$ 와 核沸騰이 開始할 때의 熱流束  $q_c$ 와의 關係를 나타내고 (14)式은  $q_c$ 와 傳熱面の 過熱度( $T_w - T_s$ )와의 關係를 表示한다.

(2.3) 푸울沸騰과 限界熱流束

本實驗과 같이 實驗流體가 停滯되어 있는 푸울沸騰에 있어서의 核沸騰現象도 根本的으로는 傳熱面上的의 凹部에서 氣泡가 生成되고 成長한다고 알려져 있다.

傳熱面 近傍에는 飽和溫度 以上の 過熱液이 存在하며 凹部에서 成長한 氣泡는 浮力, 重力 및 表面張力과의 힘의 平衡에 使하여 傳熱面の 離脫이 可能하다. 傳熱面을 離脫한 氣泡는

伴流를 隨伴하여 上昇하며 이때 氣泡와 함께 過熱液도 伴流로서 上昇하여 熱의 移動을 促進한다.

基本的으로는 流動 또는 停止의 경우에 核沸騰의 發生은 凹部에서 비롯됨으로 兩者間에는 定性的인 差가 없으므로 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$q = C \Delta T^n \dots \dots \dots (15)$$

上式에서  $\Delta T$ 는 傳熱面的의 過熱度로써  $\Delta T = T_w - T_s$ 이다. 表面의 거칠기의 變化에 따른 沸騰 特性의 變化는 結局 傳熱面 氣泡의 發生點數의 差라고 생각된다.<sup>13)</sup>

本 實驗의 領域은 核沸騰領域이며 그 限界熱流束을 求해 보면 다음과 같다.

1) Rohsenow-Grrffith<sup>15)</sup>

$$\begin{aligned} q_c &= 43.6 \cdot L \cdot Pv \cdot \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho q} \right)^{0.6} \\ &= 43.6 \times 35.1 \times 7.36 \times \left( \frac{1.51 \times 10^3 - 7.36}{7.36} \right)^{0.6} \\ &= 2.739 \times 10^5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}_r) \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

2) Kutatelaze<sup>16)</sup>

$$\begin{aligned} q_c &= 0.16 \cdot L \rho_g \cdot \left\{ \frac{\sigma \cdot g \cdot g_o \cdot (\rho_l - \rho_g)}{Pv^2} \right\}^{1/4} \\ &= 0.16 \times 35.1 \times 7.36 \times \\ &\quad \left\{ \frac{0.00166 \times (1.271 \times 10^8) \times (1510 - 7.36)}{7.36^2} \right\}^{1/4} \\ &= 2.159 \times 10^5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}_r) \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

3) Zuber<sup>17)</sup>

$$\begin{aligned} q_c &= (0.120 \sim 0.157) \cdot L \cdot \rho_g \cdot \left\{ \frac{\sigma \cdot g \cdot g_o \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho^2 q} \right\} \\ &= (0.120 \sim 0.157) \times 35.1 \times 7.36 \\ &\quad \times \left\{ \frac{0.00166 \times (1.271 \times 10^8)^2 \times (1510 - 7.36)}{7.36^2} \right\}^{1/4} \\ &= 1.619 \times 10^5 \sim 2.118 \times 10^5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}_r) \\ &\quad \dots \dots \dots (18) \end{aligned}$$

4) Chang<sup>18)</sup>

$$\begin{aligned} q_c &= 0.145 \cdot L \cdot \rho_g \cdot \left\{ \frac{\sigma g^2 \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho g^2} \right\}^{1/4} \cdot \frac{\rho_l + \rho_g}{\rho g} \\ &= 0.143 \times 35.1 \times 7.36 \\ &\quad \times \left\{ \frac{0.00166 \times (1.271 \times 10^8)^2 \times (1510 - 7.36)}{7.36^2} \right\}^{1/4} \\ &\quad \times \frac{1510 + 7.36}{1510} \\ &= 1.966 \times 10^5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}_r) \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

따라서 R-113을 實驗流體로 하였을 때 限界熱流束의 범위는  $1.619 \times 10^5 \sim 2.739 \times 10^5 \text{ Kcal/m}^2\text{h}_r$ 가 된다.

3. 實驗裝置

實驗裝置의 全體 配置圖는 Fig. 3 및 Fig. 4에서 보는 바와 같다.

實驗裝置는 實驗部, 電氣加熱部 및 溫度測定部로 나누어진다.

(3.1) 實驗部

實驗用 傳熱面은 機械加工性이 좋은 黃銅을 擇하였다. 黃銅棒은 直徑 100mm, 길이 100mm이며, 加熱을 하기 위해서 히이터가 挿入되는 黃銅棒의 下部는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 黃銅棒은 市販用이며 化學分析한 결과는 Table. 1

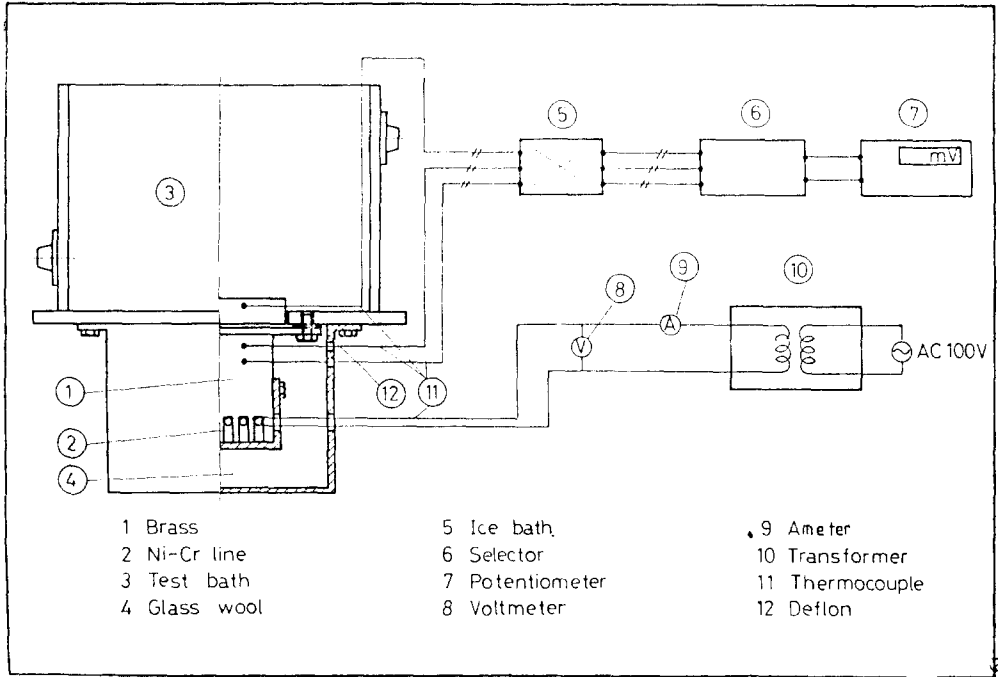


Fig. 3. Schematic Diagram of Experimental Apparatus



Fig. 4 Experimental Apparatus

과 같다. 이 Table의 材料 分析 結果를 基礎로 하여 實驗用 黃銅棒의 熱傳導率을 求하였으며<sup>19)</sup> 그 값은 다음과 같다.

$$k_b = 100.8 + 0.15(T - 20) \dots\dots\dots(20)$$

環狀形 홈에 히터를 插入한 다음에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 内部 케이싱을 附着시켜 히터가 빠지지 못하도록 한 다음 유리섬 斷熱材로써 斷熱을 하고, 外部 케이싱으로 斷熱材를 保護하였다. 傳熱面의 表面溫度를 豫測하기 爲하여 黃銅棒에는 上部 表面에서 距離가 各各

5mm, 35mm, 50mm의 位置에 直徑 1.5mm, 길이 40mm의 구멍을 鑿어 外徑 1.5mm의 씨스 形 C-C熱電對를 插入하였다. 이렇게 하여 定 常 狀態에서 黃銅棒內의 溫度分布를 直線近似함 으로서 外插法에 依하여 傳熱表面의 溫度를 推 定하였다. 이러한 方法은 各種 傳熱面의 表面溫度 測定에 잘 利用되며 또한 本實驗과 같이 氣泡의 發生消滅이 時時刻刻 行하여 질 때 時間平均 的인 傳熱面 溫度의 測定에 有効한 方法이다. 上部 傳熱面의 表面은 實驗流體가 담긴 탱크 底部보다 約 3mm 程度 높게 함으로써 寫眞攝影을 할 경우 氣泡의 觀察을 容易하게 하였다. 또 한 탱크와 加熱部 間의 接觸部 및 볼트로 조인 部分에서는 斷熱 및 實驗流體의 누설을 防止하 기 爲하여 板型의 데프론을 利用하였다.

實驗流體를 담은 탱크의 側面 및 底面은 加工 性이 좋고 熱膨脹率이 적은 베크라이트板을 利 用하였다. 特히 底面에는 홈을 파서 組立할 때 垂直面의 直角度를 維持하였다. 탱크의 前面 및 後面은 아크릴板을 利用하였으며, 이는 核沸騰의 觀察 및 寫眞攝影을 하기 위함이다. 또한 實 驗流體의 溫度를 一定하게 維持하기 爲하여 兩

側壁의 上下에 孔을 設置하고, 必要할 경우 實驗流體를 循環시킬 수 있도록 하였다. 그러나 本 實驗에서는 豫備實驗을 除外하고는 實驗流體로써 R-113을 利用하였기 때문에 兩側壁의 循環用孔을 密閉하고 탱크 上部에 얼음을 담을 수 있는 冷却板을 設置함으로써, 탱크內에서 蒸發

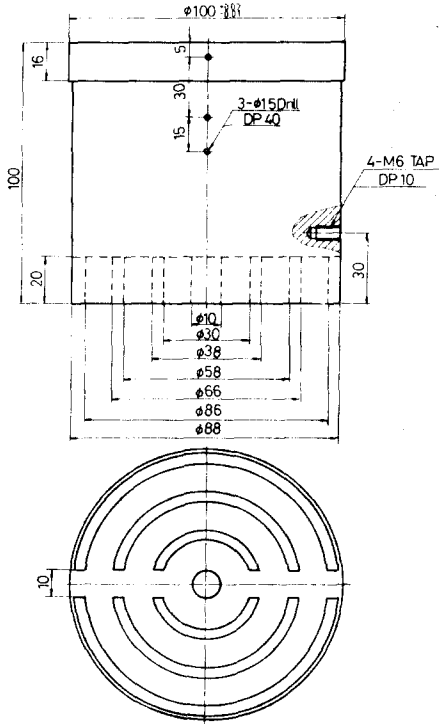


Fig. 5 The part of heat transfer

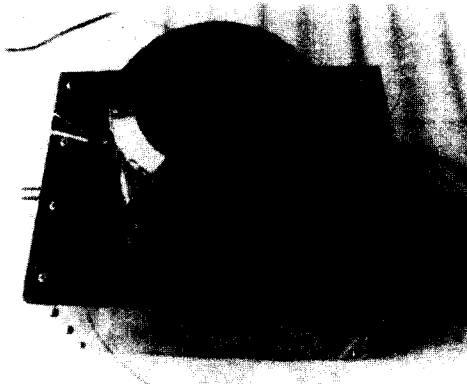


Fig. 6 Heating Part

Table 1. Composition Analysis Results

Cu : 59.98%	Fe : 0.21%
Zn : 35.78%	Sn : 0.76%
Pb : 2.84%	Ni : 0.16%
Si : 0.12%	Rest : 0.02%
Al : 0.14%	

된 R-113을 冷却板에서 凝縮시켜 탱크內에 되돌아가게 하였다.

### (3.2) 加熱部

加熱은 前述한 바와 같이 加熱量의 調節이 容易한 電氣的 加熱을 行하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 變壓器에서 適當한 電壓으로 調節되어 實驗用 黃銅棒의 下部에 設置된 히터에 電氣가 供給된다. 變壓器는 最大出力 10KVA이고 本 實驗에서 作用된  $N_i-C$  히터는 常溫에서 電氣抵抗이  $21.777\Omega$ 이고, 變壓器 2次側의 出力電壓 範圍가 0~145V이므로 2次側 最大電流는 約 6.7A. 이다. 따라서 變壓器의 2次側에서  $N_i-C$ ,

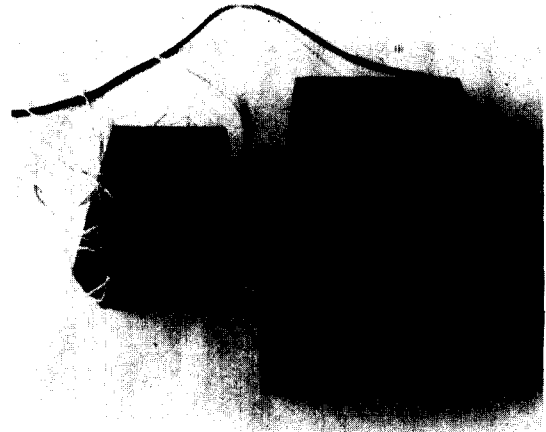


Fig. 7 Selector and Multimeter

히터까지는 許容電流 20A.의 電線을 利用하여 安全率을 높이었다. 加熱量을 測定하기 爲하여 電壓計 및 電流計가 設置하고 電氣抵抗 및 依用 電壓으로부터 加熱量이 測定된다.

### (3.3) 溫度測定裝置

實驗用 黃銅棒에 設置된 熱電計는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 熱電對用 基準接點 箱子에 連結

된다. 發生된 熱起電力은 選擇스위치 箱子에서 順次的으로 計數型電位差計에 入力되어 熱起電力을 測定하도록 하였다. 熱電對用 基準接點 箱子에는 얼음을 소량의 물과 混合하여 넣어서 基準接點의 溫度를 0°C로 維持하였다.

(3.4) 實驗流體

實驗流體로서는 蒸發潛熱이 적고 有毒性이 없는 R-113을 擇하였다. 大氣壓에서 R-113<sup>14)</sup>은 高溫에서도 잘 分解되지 않는 化學的 安定性을 갖고 있다. 本 實驗은 大氣壓 F에서 行하였고 大氣壓에서 R-113의 飽和溫度는 約 47.44°C이므로 쉽게 높은 過熱度  $\Delta T$ 를 얻을 수 있었다.

또한 傳熱面의 表面 溫度를 낮게 維持하여 탱크의 材料인 베크라이트 및 아크릴판의 熱膨脹에 依한 實驗流體의 누설을 防止할 수 있었다.

(3.5) 熱電對의 檢定

傳熱用 黃銅棒內에 挿入된 熱電對는 Fig. 8과 같은 配置로써 檢定을 行하였다. 實驗流體로서 R-113을 擇하였기 때문에 100°C 以下の 檢定

으로서 충분하였다.

그러므로 Fig. 8의 ④에 물을 넣고 熱電對의 熱起電力을 計數型 電位差計로써 測定하고 標準溫度計(Standard Thermometer)의 溫度를 읽음으로써 檢定曲線을 얻는다. 이 경우 熱電對의 感應速度에 比하여 標準溫度計의 感應速度가 훨씬 느리므로 물을 充分히 攪拌하면서 상당기간 두 측정기기가 同一溫度를 表示하도록 하여 檢定을 行하였다. 이렇게 하여 보온통 내의 물을 식혀가면서 대략 실온 程度까지 檢定을 行하고 室溫 以下에 對하여서는 보온통 內에 얼음을 넣어가면서 0°C가까이 까지 檢定을 行하였다. 熱電對檢定用 標準溫度計는 最小 눈금이 0.1°C로써 0.05°C의 正確度를 갖고 있는 것을 作用하였다.

檢定結果는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 黃銅棒의 表面에서 5mm와 50mm의 位置의 熱電對와는 同一起電力을 나타내기 때문에 Fig. 9에 나타냈으며, 이 Fig에 表示한 標準起電力 線圖는 熱電對 製作會社가 提示한 데이터를 나타낸다.<sup>20)</sup> Fig. 10에 表示된 熱電對의 檢定値는 標準 수 있게 하였다.

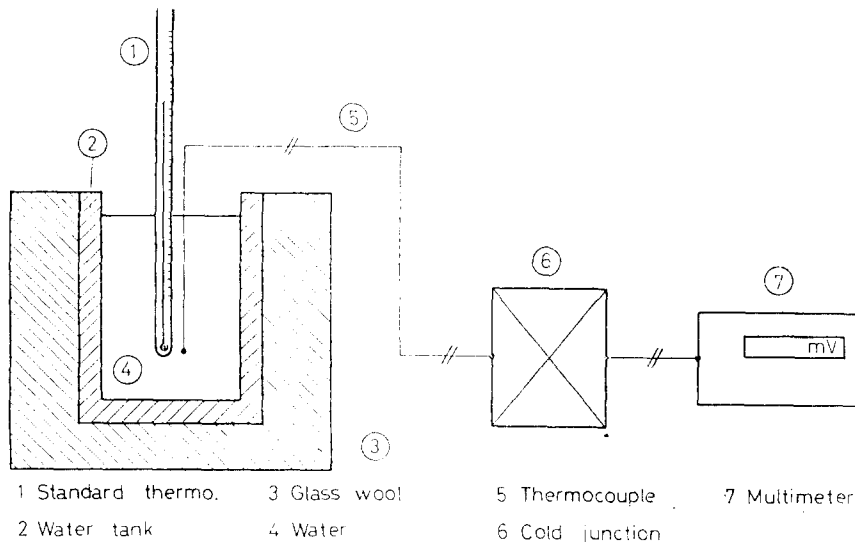


Fig. 8. Schematic Diagram of Detecting Apparatus for Thermocouples.

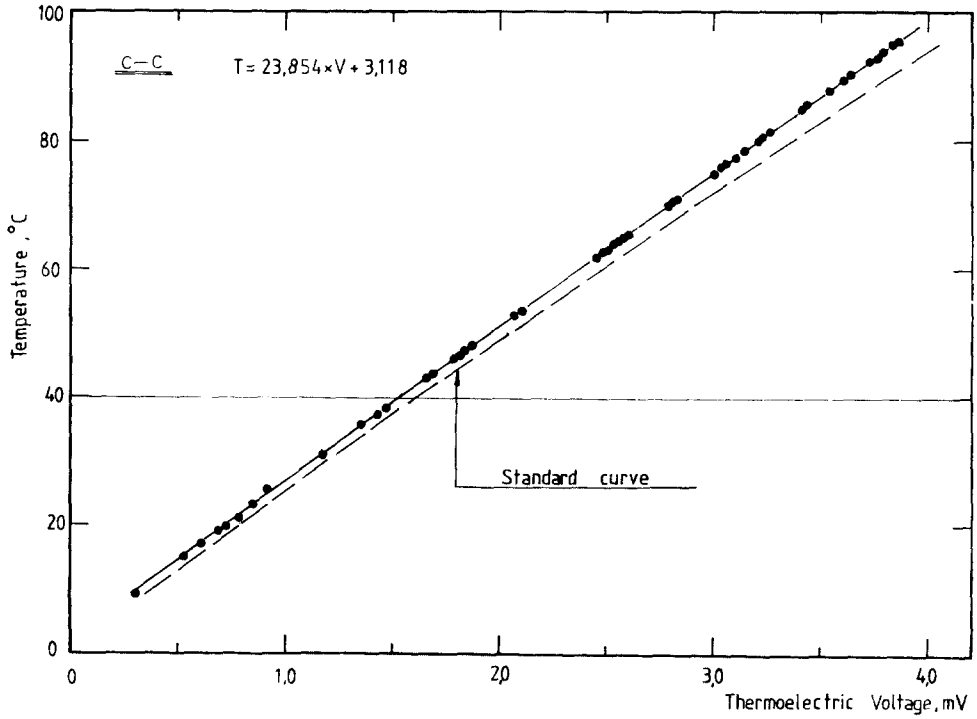


Fig. 9. Experimental Curve of C-C Thermocouple

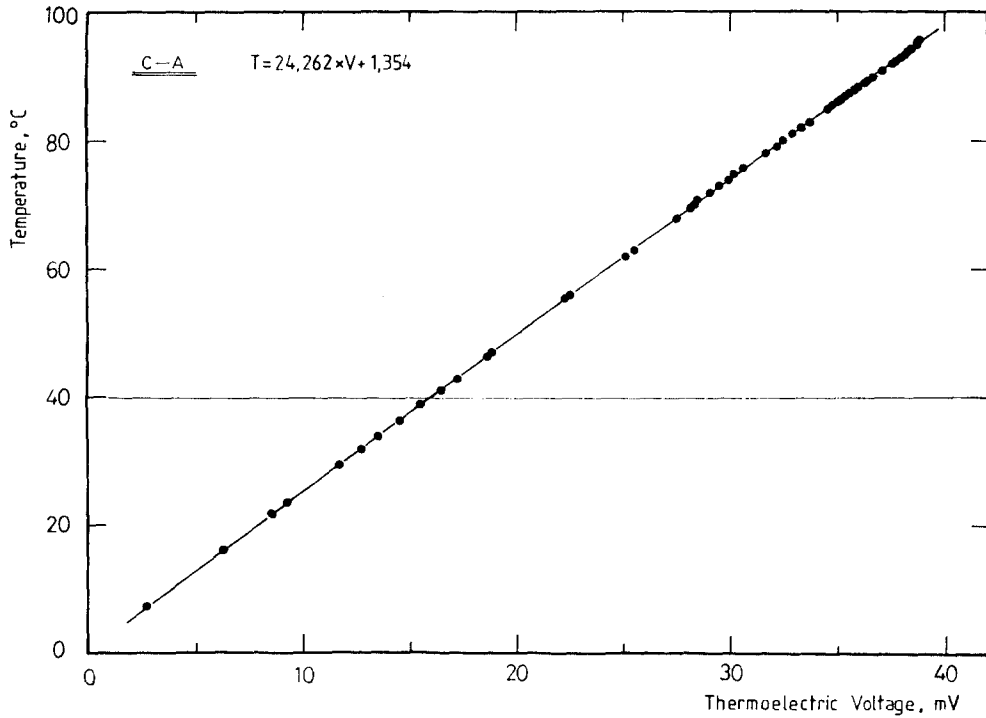


Fig. 10. Experimental Curve of C-A Thermocouple



起電力 曲線과 平均 2~5°C정도의 差를 보이나 Fig. 10의 檢定値는 標準起電力 曲線값과 거의 一致하였기 때문에 表示하지 않았다. 差異가 생기는 原因으로서는 各 熱電對 또는 基準接點 箱子 內 素線成分差 等に 起因한다고 생각된다. 이들 檢定置를 最少自乘法으로 處理하여 數式化하면 表面에서 5mm, 50mm 位置의 熱電對는 다음과 같다.

$$T=23.854 \times mV + 3.118 \dots\dots\dots(21)$$

35mm 位置의 熱電對에 關해서는

$$T=24.262 \times mV + 1.354 \dots\dots\dots(22)$$

이들 實驗式의 結果를 實測値와 比較할 때 오차가 平均 0.1°C 以下로써 充分한 正確度를 보여주고 있다.

**(3·6) 電壓計의 檢定**

Fig. 3 및 Fig. 4에서 보는 바와 같이 本 實驗에 使用한 電壓計는 無負荷狀態에서 計數型電位差計에 依하여 檢定을 行하였다.

結果는 Fig. 11과 같으며 이 檢定結果를 最少自乘法으로 處理하여 表示하면 다음과 같다.

$$V=1,181 \times V_1 + 1,236 \dots\dots\dots(23)$$

上式에서  $V_1$ 은 電壓計 눈금이고  $V$ 는 計數型電位差計의 電壓이다.

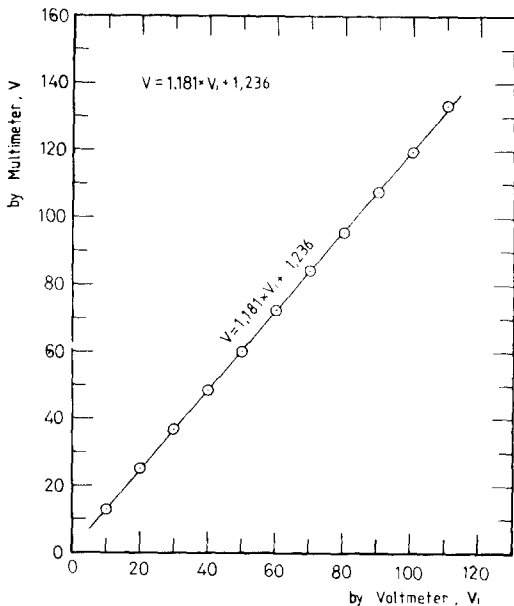


Fig. 11. Calibration Curve of Voltmeter by Multimeter

計數型電位差計는 測定電壓의 範圍가 自動的으로 擇하여지고, 有效숫자는 네자리이며 本 實驗 範圍에서 要하는 것은 두 자리이므로 充分히 信賴性 있는 結果를 얻을 수 있었다.

따라서 本 實驗에서 加熱用 히터에 供給되는 電壓은 이와 같이 檢定한 檢定式에 依한 값 또는 計數型電位差計가 表示하는 電壓을 眞의 값으로 하였다.

**(3·7) 實驗方法**

本 實驗에서는 傳熱 表面 또는 그 近傍의 狀態에 따라 沸騰特性이 어떻게 變하는가를 알기 위함이다.

傳熱面은 平滑한 面을 #100, #60, #36의 사포로써 表面거칠기를 바꾸었으며, 傳熱面 表面에 32메쉬, 16메쉬의 黃銅材 網을 設置하여 實驗을 行하였다. 먼저 平滑한 傳熱面의 狀態에서 最大熱流束까지 實驗을 한 다음 表面을 #100, #60 및 #36 사포로 處理하여 各各 實驗하였다. 또한 #36 사포로 處理한 狀態에서 表面으로부터 0.5mm程度 位置에 32메쉬, 16메쉬의 黃銅網을 設置하여 實驗을 行하였다.

各 實驗條件 下에서 實驗을 行하는 方法은 다음과 같다. 觀察을 通하여 核沸騰이 發生하기 시작하는 近傍의 加熱量을 最小 熱流束으로 취하였다. 이 狀態로부터 電壓을 5~10V 간격으로 높여 가면서 實驗을 行하였다. 所定의 電壓을 加한 다음 탱크 上部에 冷却用 얼음과 물을 저장하여 冷却을 시킴으로써 주어진 하나의 實驗條件에서 定常狀態를 維持하고 測定을 하였다. 本 實驗에서 定常狀態라 함은 黃銅棒內의 溫度分布가 時間에 對하여 一定함을 意味한다.

供給 電壓을 一定하게 維持하고서 傳熱面 上部에서 35mm 位置의 熱電對의 起電力이 5分 以上 一定히 維持될 경우에 測定을 하였다. 所要 時間은 約 30分 程度였다.

測定은 먼저 各 熱電對 起電力, 電壓을 測定하면서 寫眞撮影을 하였다. 寫眞은 高感度의 ASA 400의 필름을 利用하였으며 照明用으로 500W의 寫眞用 白熱燈을 利用하였다. 限界熱流束狀態에서의 傳熱面의 燒損(Burnout) 防止를 위하여 傳熱面 表面에서 50mm 位置의 熱電對의 熱起電力이 急上昇할 경우 電源을 遮斷할

### 4. 實驗結果 및 考察

#### (4.1) 實驗結果

(23)式으로부터 求한 電壓에 依하여 全加熱量  $Q$ 는 다음과 같다.

$$Q = 0.86 \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots(24)$$

本 實驗에서 使用된  $N_i-C_1$ 히터의 電氣抵抗은 21,777 $\Omega$ 이므로 單位傳熱面 當 加熱量, 卽 熱流束  $q$ 는

$$q = Q / \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right) = 0.86 \cdot \frac{V^2}{R} / \frac{\pi}{4} d^2 \dots\dots\dots(25)$$

黃銅棒 內에 設置된 位置 5mm, 35mm, 50mm의 熱電對에서 測定된 溫度로부터 溫度勾配를 求하고 이를 Fourier 熱傳導方程式에 代入하여 熱流束  $q$ 를 求하면 다음과 같다.

$$q = k \Delta T / \Delta x \dots\dots\dots(26)$$

黃銅棒 內에 設置된 3個의 熱電對의 指示溫度에 依한 表面溫度  $T_w$ °C는

$$T_{w1} = \frac{1}{6} (7F - T_2) \dots\dots\dots(27)$$

$$T_{w1} = \frac{1}{9} (10T_1 - T_3) \dots\dots\dots(28)$$

$$T_{w2} = \frac{1}{3} (10T_2 - 7T_3) \dots\dots\dots(29)$$

이다. 여기에서  $T_1, T_2, T_3$ 는 傳熱面 表面에서 5mm, 35mm, 50mm 位置의 熱電對의 溫度이다.

(27)式 (28)式 (29)式에서 各各 推算한  $T_w$ 는 同一한 값이어야 되지만 熱電對를 挿入했기 때문에 약간의 測定誤差가 생긴다. 實驗測定에 있어서는 上記 세式에 依한  $T_w$ 의 算術平均値와 比較하여 平均誤差가 0.2°C 以內인 範圍의 實驗데이터만 採用하였다. 또한 上述한 理由로 黃銅棒內 溫度分布로부터 (26)式에서 求한 熱流束과 電壓 및 電氣抵抗으로부터 (25)式에서 求한 熱流束은 같아야 하나 약간의 誤差가 있으나 實驗의 편의상 (24)式에 依하여 加熱量을 決定하였다. 이 경우 黃銅棒 주변으로부터 斷熱材와 케이싱을 通하여 外部로 放熱된 熱量은 定常狀態 熱傳導方程式으로부터

$$q = \frac{(T_1 - T_3)}{\frac{l_n(r_2/r_1)}{2\pi k_g l} + \frac{l_n(r_3/r_2)}{2\pi k_s l}} \dots\dots\dots(30)$$

그러나 이와 같이 近似的으로 計算한 放熱損失은 加熱量의 0.1% 미만이므로 無視하였다<sup>21)</sup>

以上の 傳熱面 表面溫도와 熱流束의 關係를 Fig. 12에 表示하였다. 以上에서 알 수 있는 바와 같이 表面의 거칠기가 커질수록 表面溫度가 낮아진다. 또한 同一 거칠기에서는 熱流束이 增

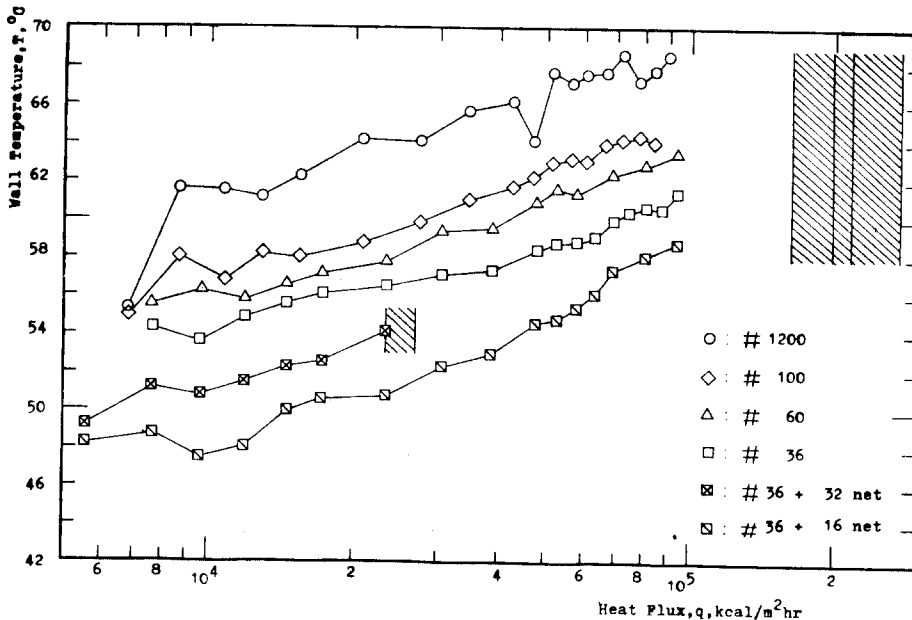


Fig. 12. Wall Temp. Curve with every kind Roughness and Brass Nets

加할수록 表面溫度가 上昇한다. Fig.12에서 右 上部의 斜線部는 (6)式 (7)式 (8)式 (9)式으로 부터 計算한 限界熱流束을 나타낸다. 本 實驗에서는 變壓器의 容量關係로 限界熱流束 近傍에서는 實驗데이터를 얻지 못하였다. 表面을 #36사 포로 처리하고 그 表面에 黃銅網을 놓은 상태에서 일반적으로 熱傳達이 促進됨을 알 수 있었다. 그러나 32메쉬의 黃銅網을 設置했을 경우가 16메쉬의 경우보다 核沸騰初期에는 核沸騰이 促進되나 氣泡發生이 많아짐에 따라 氣泡의 離脫을 妨害하므로

$q = (2.34 \sim 3.06) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 에서 傳熱面 溫度가 急上昇하는 상태, 즉 限界熱流束상태에 到達했다. Fig.13은 本 實驗에서 얻은 沸騰曲線이다. 各各의 實驗條件에 對하여 實驗데이터를 最少自乘法으로 처리하여 표시하면 다음과 같다

平滑面:  $q = 0.072 \Delta T^{4.56}$  .....(31)  
 #100:  $q = 3.113 \Delta T^{3.57}$  .....(32)  
 #60:  $q = 8.983 \Delta T^{3.31}$  .....(33)  
 #36:  $q = 21.90 \Delta T^{3.19}$  .....(34)  
 #36+32메쉬:  $q = 1946 \Delta T^{1.29}$  .....(35)  
 #36+16메쉬:  $q = 4859 \Delta T^{1.19}$  .....(36)

Fig.13에서 알 수 있는 바와 같이 傳熱面의

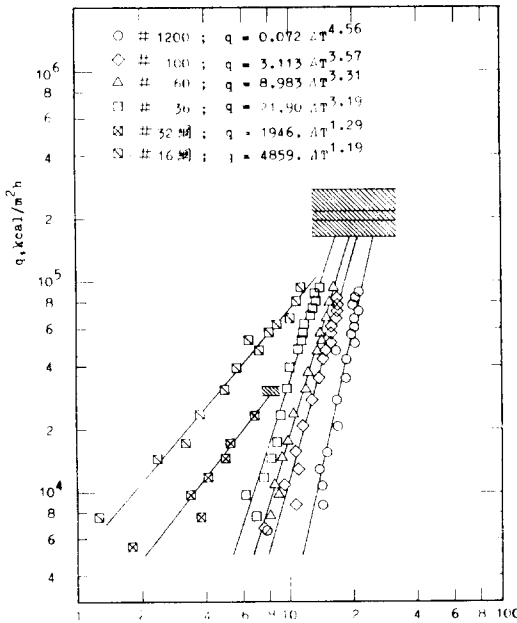


Fig.13. Wall Superheat,  $\Delta T$ , °C Nucleate Boiling Curve of R-113

表面거칠기가 거칠어질수록 熱傳達이 促進되어 過熱도가 적은 左側으로 移動됨을 알 수 있다. 即 表面의 거칠기가 더해질수록 發泡點의 數가 增加됨으로써 熱傳達率이 促進된다고 생각된다.

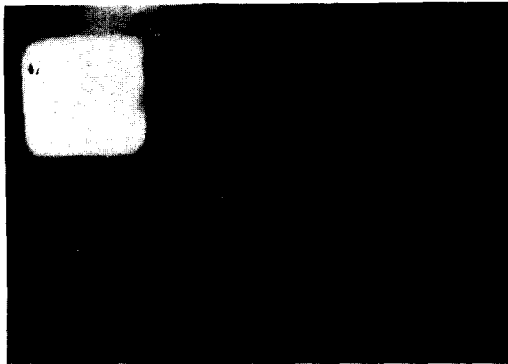
Fig.13에서 보는 바와같이 #36 사포로 表面 粗度를 處理하고 그 위에 黃銅網을 놓았을 때는 沸騰曲線의 特性이 크게 바뀌었다. 더욱 더 熱 傳達率이 促進되어 낮은 過熱度에서도 많은 熱 의 傳達이 可能하다. 이는 傳熱面 表面에 黃銅 網을 設置함으로써 傳熱面近傍에 形成된 過熱 液層이 自然對流로 因하여 上昇하는 것을 抑制하 는 동시에 淨上하는 氣泡과 함께 形成되는 過熱 液層의 伴流를 抑制하기 때문이라고 생각된다. 그러나 32메쉬 黃銅網의 實驗結果에서 알 수 있 는 바와 같이 核沸騰이 活潑히 일어나는 큰 熱 流束 상태에서는 오히려 傳熱面上에 發生한 氣 泡의 離脫이 억제된다. 即, 氣泡의 離脫을 저해 함으로써 氣泡의 合體가 進行되어 傳熱面上이 氣相으로 被覆되어 熱抵抗이 커지고 結果적으로 膜沸騰狀態로 용이하게 遷移하여 限界熱流束에 到達한다. Fig.14는 各 實驗條件에 對하여 거의 비슷한 比較的 적은 熱流束狀態의 寫眞이다. 寫 眞에서 알 수 있는 바와 같이 平滑한 傳熱面에 서 보다 거칠은 傳熱面에서 氣泡의 發生이 活潑 하고 表面을 거칠게 하였을 때는 사포로 形成된 홈을 따라서 氣泡이 發生하고 있음을 알 수 있다.

Fig.15는 熱流束이  $(2.34 \sim 2.74) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ , 狀態의 寫眞이다. 이 그림에서는 傳熱面 全體로부터 氣泡가 活潑히 發生하고 있다. Fig.16은 本 實驗 範圍에서는 熱流束이 큰 狀態이며 너무나 많은 氣泡가 發生하여 미처 凝縮하지 못 한 淨遊氣泡가 많이 存在하며 또한 탱크 内の 實驗流體가 周期的인 振動을 하고 있기 때문에 液面이 水平을 維持하지 않고 있다.

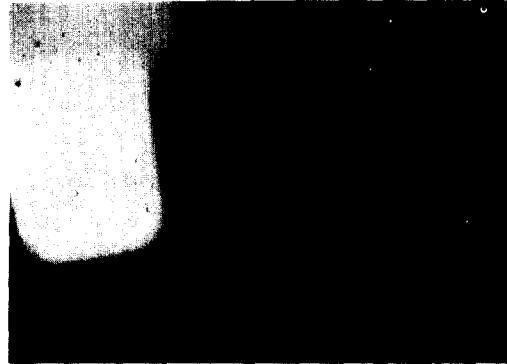
(4.2) 考 察

Fig.17에 本 實驗에서 求한 實驗式 (31)~(36) 까지를 代表的인 他研究 結果式과 比較하였다. Fig.17에서 (1)은 Nishigawa<sup>22)</sup>에 依해 直徑 100 mm中 水平傳熱面에 있어서 물의 實驗에서 얻은 結果로서 다음 式으로 表示한다.

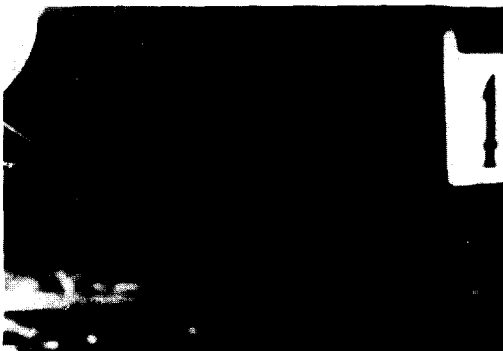
$q = 2.421 \Delta T^{3.00}$  .....(37)



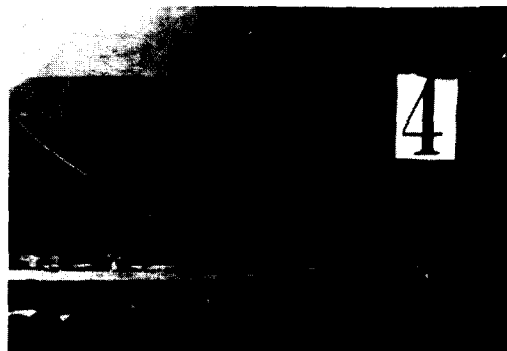
(a) 1200,  $q=1.54 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr



(b) 100,  $q=1.54 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

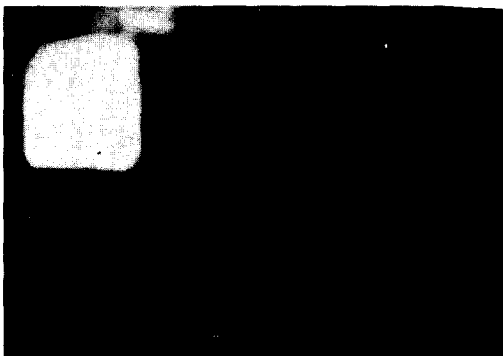


(c) 60,  $q=1.45 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

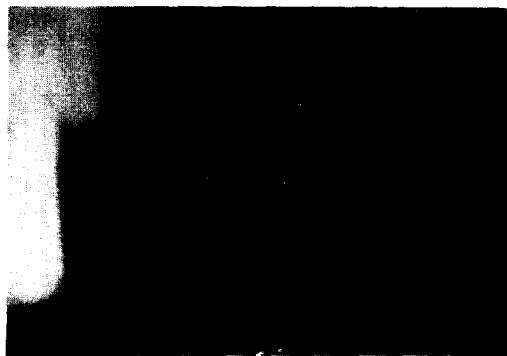


(d) 36,  $q=1.45 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

Fig.14. Nucleate Boiling of R-113



(a) 1200,  $q=2.74 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr



(b) 100,  $q=2.74 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

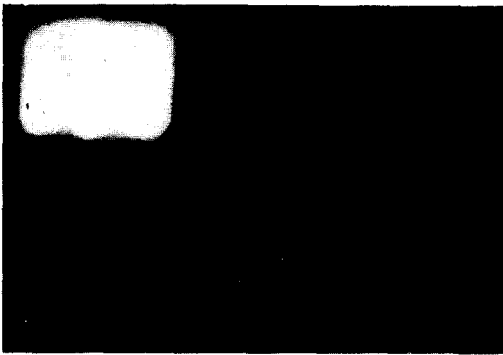


(c) 60,  $q=2.34 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

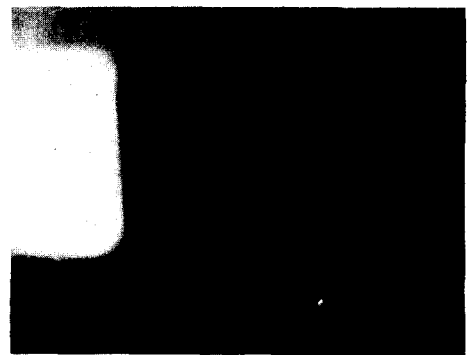


(d) 36,  $q=2.34 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

Fig.15. Nucleate Boiling of R-113



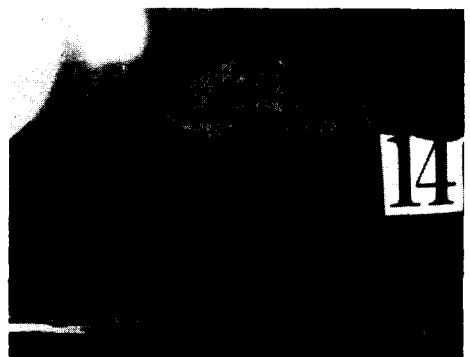
(a) 1200,  $q=7.22 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr



(b) 100,  $q=7.2 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr



(c) 60,  $q=7.46 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr



(d) 36,  $q=7.46 \times 10^4$  kcal/m<sup>2</sup>hr

Fig.16. Nucleate Boiling of R-113

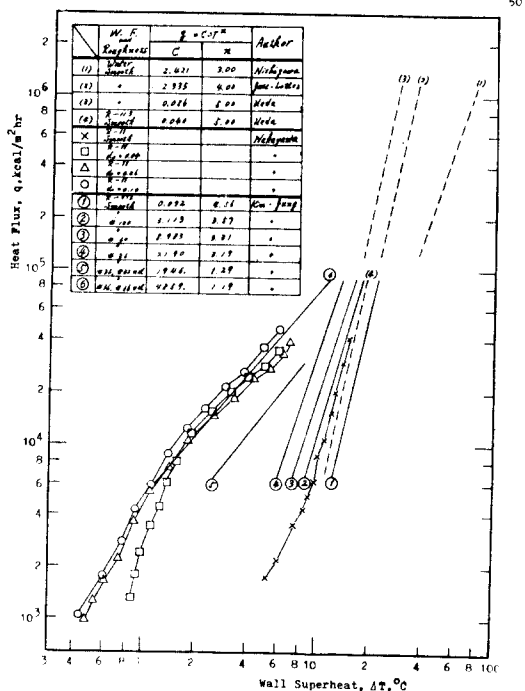


Fig. 17. Comparison Curve of every kind Studies in N.B.

(2)는 Jens and Lottes<sup>23)</sup>에 의한 물의 過冷狀態에 關한 結果로써 다음 式으로 表示된다.

$$q = 2.335 \Delta T^{4.00} \dots\dots\dots(38)$$

(3)은 T. Ueda가 구한 結果이며, 이는 電氣加熱하는 圓柱의 外側을 自由落下하는 狀態의 물의 實驗에서 求한 結果이며 다음 式과 같이 된다.

$$q = 0.086 \Delta T^{5.000} \dots\dots\dots(39)$$

또한 T. Ueda<sup>24)</sup>는 本實驗流體와 같은 R-113을 利用하여 (4)의 結果를 얻었으며, 다음 式으로 表示된다.

$$q = 0.04 \Delta T^{5.00} \dots\dots\dots(40)$$

傳達率이 좋은 Nakayama의 實驗結果<sup>11)</sup>와도 比較하였다. Nakayama는 더어브 冷凍機의 熱交換器에 있어서 沸騰熱傳達 促進을 爲하여 마련된 連續 tunnels을 갖는 傳熱面을 製作하여 R-11을 利用한 核沸騰實驗을 行하였다. Fig. 17과 같이 적은 熱流束에서 核沸騰이 開始되고 普通의 傳熱面보다 훨씬 높은 熱傳達率을 얻을 수 있음을 알았다. 즉 普通의 傳熱面에 比하여 훨씬 낮은 過熱度로써 同一한 熱을 移動시킬 수 있었다.

Nakayama의 긴 tunnels을 利用한 實驗結果는 本實驗에서 表面을 #36사포로 加工하여 約 0.5 mm 높이에 16메쉬의 黃銅網을 設置한 狀態의 沸騰曲線과 定量的 및 定性的으로도 類似함을 알 수 있다.

### 5. 結 論

R-113을 利用한 核沸騰實驗을 通하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. 傳熱面의 表面에 人工的으로 核沸騰의 發泡點을 增加시킴으로써 높은 熱傳達率을 얻을 수 있었다.
2.  $q = C \Delta T^n$ 으로 表示될 경우 指數 n는 거칠기 가 커질수록 작아지는 傾向이 있으며, 同一한 熱量에서는 거칠어질수록 過熱度  $\Delta T$ 는 적어진다.
3. 沸騰을 同伴하는 各種傳熱面의 加工에 있어서 傳熱面의 表面 거칠기를 가공함으로써 傳熱性能의 改善을 도모할 수 있다.
4. 液體를 氣化시키는 容器의 경우는 傳熱面 表面에 메쉬數의 金屬網을 設置함으로써 더욱 傳熱性能을 改善할 수 있다. 그러나 이 경우 너무 조밀한 網을 써서 氣泡의 離脫을 阻礙할 경우에는 氣泡의 合體가 進行되어 限界熱流束 값이 작아짐에 유의해야 한다.

### 參 考 文 獻

1. 桑原平吉: トンネルで連通された多數の細孔を持つ面からの沸騰熱傳達, 第14回 日本傳熱シンポジウム, pp.121~123, (1977).
2. Y. Y. Hsu: On the size range of active nucleation cavities on a heating surface, Trans ASME Ser C, J. Heat Transfer, Vol. 84, pp.207~216, (1962).
3. A. E. Bergles and W. M. Rohsenow: The determination of forced convection surface boiling heat transfer, Trans. ASME Ser. C, J. Heat Transfer, Vol. 86 pp.365~372. (1964).
4. E. J. Davis and G. H. Anderson: Nucleate boiling in forced convection flow, AIChE Journal Vol. 12 pp.774~780, (1966).
5. W. M. Rohsenow and J. P. Hartnett: Handbook of Heat Transfer, Mc. Graw-Hill Book Co. New York, (1973).
6. P. Griffith: Nucleation and Bubble Formation in Boiling, Proc. Instn. Mech. Engrs.

- Pt 3C., pp.93~100, (1965.6).
7. J.C.Chen, R.K.Sundaram and F.T.Ozkaynak : A Phenomenological Correlation for Post-CHF Heat Transfer, U.S.Nuclear Regulatory Commision, NUREG-0237, (1977).
  8. 金京根 : 沸騰二相流의 흐름 및 傳熱, 熱傳達率 및 對流領域의 傳熱特性, 韓國海洋大學 論文集, 第15輯, pp.113~139, (1980.4).
  9. P.Saha and N.Zuber : Point of Net Vapor void Fraction in Subcooled Boiling, 5th Int. Heat Transfer conf. B4.7, pp.175~179 (1976).
  10. 崔甲錫·徐正閔 : 燒結金屬(STS系)面의 核沸騰熱傳達에 관한 研究, 韓國船用機關學會誌, 第四卷, 第2號, pp.29~35, (1980).
  11. W.Nakayama, T.Daikoku, H.Kuwahara, T.Nakajima : Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer, Vol. 102, No.3, (1980).
  12. J.P.Holman : Heat Transfer, Mc. Graw-Hill, p.36, p.365, (1976).
  13. 西川兼廉, 藤田恭伸, 長島昭, 國友孟 : 傳熱工學の進展, 養賢堂, Vol 2, p.5, (1974).
  14. 日本機械學會 : 傳熱工學資料, 明善社, pp.293~328, (1980.4).
  15. W.M.Rohsenow and P.Griffith : Correlation of Maximum Heat Transfer Data for Boiling of Saturated Liquids, Chem. Eng. Symp. Series, Vol. 52, No.18, p.47, (1959).
  16. S.S.Kutateladze : Heat Transfer in Condensation and Boiling, USAEC Rept. AEC-tr-3770, (1952).
  17. N.Zuber : Hydrodynamic Aspects of Boiling. Heat Transfer, USAEC Rept. AECU-4439, Doctoral Dissertation, UCLA(1959)
  18. Y.P.Chang and N.W.Snyder : Heat Transfer in Saturated Boiling, Chem. Eng. Prog. Symp. Series, Vol.56, No.30, pp.25~38, (1960).
  19. American Society for Metals : Metal Handbook, Vol.1, Eight Edition, Metal Part, Ohio, pp.1007~1028, (1969).
  20. OMEGA Eng.InC : Temperature Measurement Handbook, pp.A8~A35, (1979).
  21. 大隅和男 : 斷熱技術, 珍文社, pp.52~55(1979)
  22. 西川·山籐 : Int. J.Heat Mass Transfer, Vol.1, p.219, (1960).
  23. W.H.Jens and P.A.Lottes : Analysis of Heat Transfer, BurnrOut, Pressure Drop and Density Data for High Pressure Water, USAEC Rept. ANL-4627, (1951).
  24. T.Ueda, M. Inoue and S.Nagatome : Critical Heat Flux and Droplet Entrainment Rate of Falling Liquid Films with Boiling, 第16回 日本傳熱シンポジウム Vol. 16, B115, pp.214~216, (1974.4)