

# 表面거칠기의變化에 따른 核沸騰熱傳達の 特性에 관한 研究

鄭 大 仁

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

*Jung Daein*

〈目 次〉	
1. 序 論	4. 實驗結果 및 考察
2. 核沸騰의 發生	5. 結 論
3. 實驗裝置	參考文獻

### 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

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

$L$ : 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 爐心冷却器, 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 關한 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 關한 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> 等に 依하여 이루어진 바

있다.

熱流束이 큰 強制對流沸騰系 環狀流領域에서 的 核沸騰 諸般現象에 關해서는 J. C. Chen<sup>7)</sup>, 및 金<sup>8)</sup> 等の 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> 等に 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의 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 다이프에서는 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 因한 傳熱特性의 變化에 關하여도 研究를 行하였다.

2. 核沸騰의 發生

(2.1) 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

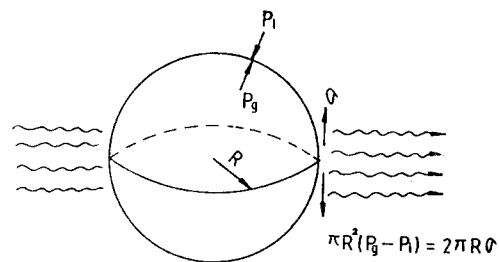


Fig. 1. Balance of force about bubble in flow

의 差분法 計算 式과 一致한다.<sup>12)</sup>

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

이와 같은 氣泡 ΔP 的인 變化量 之分 氣泡 境界線 上의 Gibbs 自由에너지 不變原理에 의해서 Clausius-Clepeyron 式<sup>13)</sup>에 成立한다. 이 式에서 氣泡의 比體積(液相의 比體積보다 大)을 氣泡의 比體積(液相의 比體積)이라 하면,

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{TV^2}{LV} \dots\dots\dots(2)$$

이 T<sub>g</sub>-T<sub>l</sub>-T<sub>s</sub> T<sub>g</sub>는 氣泡의 上의 飽和蒸氣의 溫度이고 氣泡의 內의 溫度는 氣相의 代表溫度인 것이다.

液面附近의 傳熱面에서의 溫度 差度는 無數의 細部를 考慮한 時에 其의 平均 溫度는 Fig.2에 示한 橫線을 以하여 氣泡의 中心(發生點) 氣泡의 半徑 R<sub>1</sub>와 R<sub>2</sub>의 氣泡의 半徑을 層流底層의 中心

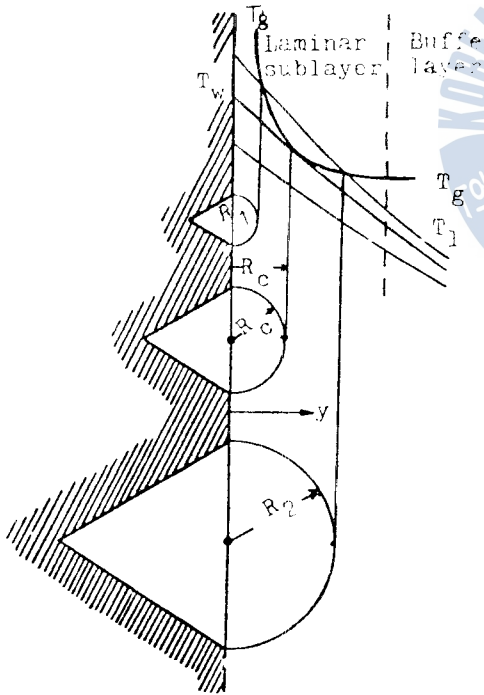


Fig.2. Initiation of nucleate boiling in convected flow

의 中心을 以하여, 氣泡 發生 前의 熱傳 傳導의 依하여 層流底層 內의 移動한다. 假定한다.

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

$$q = -k_l(\partial T_l / \partial y)_{y=0} = k_l(T_w - T_s) / y \dots\dots(3)$$

이와 Fig.2에 示한 徑 R의 細部에서의 加熱은 依해서 氣泡의 發生點의 溫度 差度(T<sub>g</sub>-T<sub>s</sub>)에 의해서, T<sub>g</sub>는 氣泡의 內의 溫度인 것이기 氣泡의 半徑 R의 傳熱面의 中心에서 y의 位置에서 表示할 수 있다.

(3)式에서 加熱量 q는 增加할 때의 傳熱面 近傍의 溫度 差度는 增加할 때, 熱傳導의 增加에 依해서 液體의 溫度 變化는 Fig.2에 表示하였다. 熱傳導의 中心에서 氣泡의 發生點의 中心에 傳導할 때 依해서 熱이 移動할 때 增加할 때, 依해서 最初로 核沸騰의 開始이다. 이 때 最初로 核沸騰의 發生點은 細部徑 R<sub>1</sub>는 Fig.2에 의해서 氣泡의 溫度 曲線 T<sub>g</sub>와 傳熱面 近傍의 液體 內의 溫度 分布 T<sub>l</sub>의 接觸點 位置에서, 核沸騰의 開始이다. 이 때

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

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

이 成立한다.

(2.2) 核沸騰 開始의 理論解析

이와 같은 假定과 條件에서 다음과 같은 結果 式을 得을 수 있다. (1)式과 (2)式에서

$$\Delta T = T_g - T_s = \frac{2\sigma v^2 T_s}{LR} \dots\dots\dots(6)$$

R = y에서 이 때

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

(3)式에서

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

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

(7)式과 (9)式을 (5)式에 代入하면

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

(6)式과 (8)式에서

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

(4)式과 (10)式을 (11)式에 代入하면

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

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

$$R_c = \sqrt{\frac{2\sigma v^n k_l T_s}{L q_c}} \dots\dots\dots(13)$$

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

(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의 過熱度( $T_w - T_s$ )와의 關係를 表示한다.

(2·3) 平沸騰과 限界熱流束

本實驗과 같이 實驗流體가 停滯되어 있는 平沸騰에 있어서의 核沸騰現象도 根本的으로는 傳熱面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 依하여 傳熱面의 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>

$$\begin{aligned} q_c &= 43.6 \cdot L \cdot Pv \cdot \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho q} \right)^{0.8} \\ &= 43.6 \times 35.1 \times 7.36 \times \left( \frac{1.51 \times 10^3 - 7.36}{7.36} \right)^{0.8} \\ &= 2.739 \times 10^5 \text{ (Kcal/m}^2\text{h}_r) \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

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>

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

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  $1.619 \times 10^5 \sim 2.739 \times 10^5$  Kcal/m<sup>2</sup>h<sub>r</sub>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 插入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



隔壁의 上下에 孔을 設置하고, 必要할 경우 實

Table 1. Composition Analysis Results

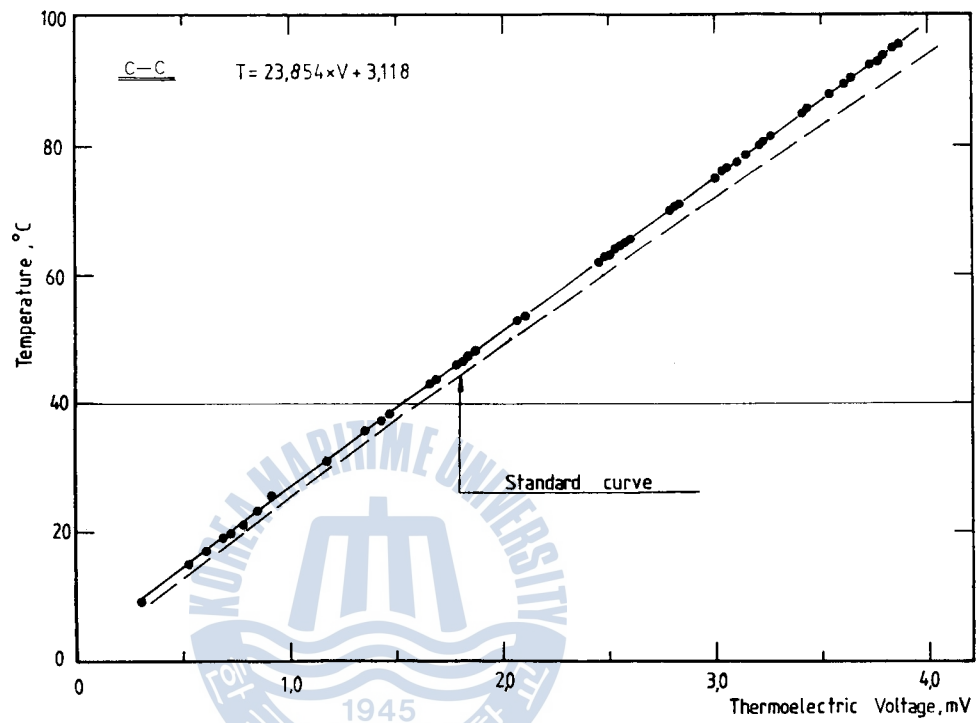


Fig.9. Experimental Curve of C-C Thermocouple

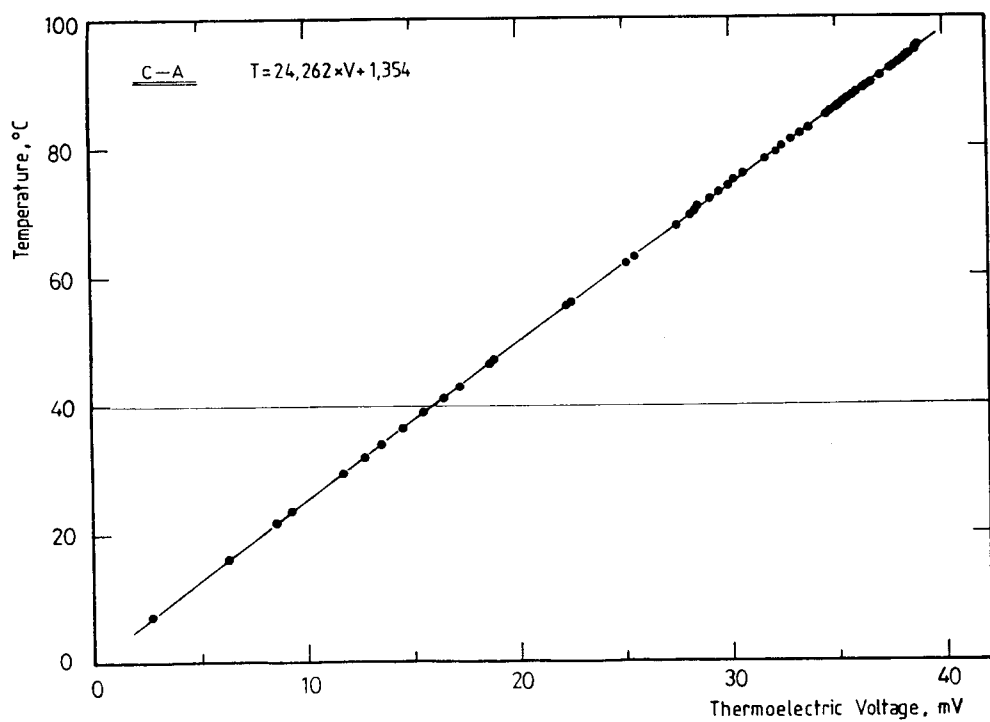


Fig.10. Experimental Curve of C-A Thermocouple

起電力 曲線과 平均 2~5°C 정도의 差를 보이나 Fig. 10의 檢定值를 標準起電力 曲線과 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. 이를 檢定位置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 實測值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를 Fig. 11에 示하여 이 檢定結果를 最少自乘法으로 處理하여 表示하고 다음과 같다.

$$V = 1.181 \times V_1 + 1.236 \dots \dots \dots (23)$$

上式에서 右邊 電壓計 檢定值로 V는 計數型電位差計의 電壓計值.

計數型電位差計의 測定電壓의 範圍가 自動的

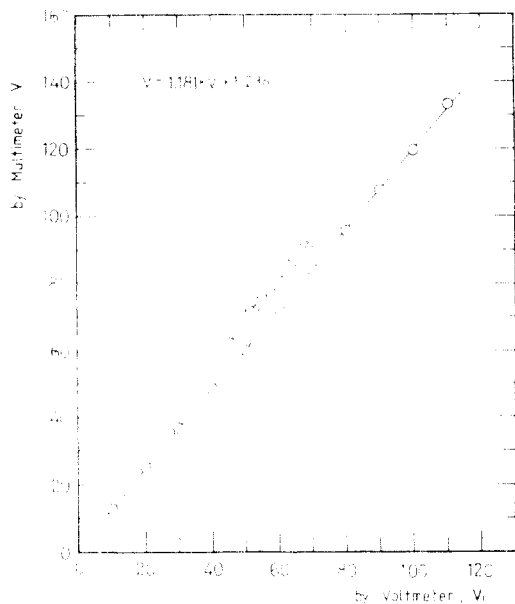


Fig. 11. Calibration Curve of Voltmeter by Multimeter

으로 擇하여지고, 有效숫자는 네 자리이며 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을 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을 다음과 같다. 觀察을 通하여 核沸騰의 發生하기 시작하는 近傍의 加熱量을 最小 熱流束으로 定하였다. 이 狀態로부터 電壓을 5~10V 까지로 늘려 가면서 實驗을 行하였다. 測定時 電壓을 加한 다음 탱크 上部에 冷却用 水冷의 水を 供給하여 冷却를 行함으로써 주어질 하나의 實驗條件까지 定常狀態를 維持하고 測定을 하였다. 本 實驗에서 定常狀態와 같은 黃銅棒內의 溫度分布가 時間에 對하여 一定함을 觀察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된 경우에 測定을 하였다. 所要 時間은 約 30分 程度였다.

測定을 위해 各 熱電對 起電力, 電壓을 測定하여서 寫眞撮影을 하였다. 寫眞은 高亮度의 ASA 400의 寫眞을 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 熱傳對의 熱起電力이 急上昇할 3分 電源을 遮斷할 수 있게 하였다.

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  $N_i-C_r$ 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 插入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  $0.2^\circ C$  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 케 이싱을 通하여 外部로 放熱된 熱量은 定常狀態 熱傳導方程式으로부터

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

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의 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

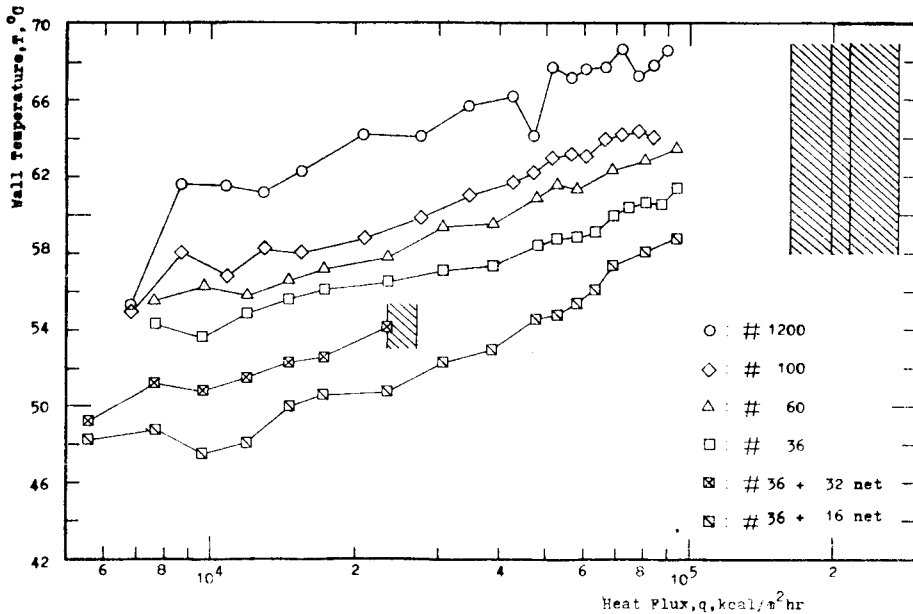


Fig. 12 Wall Temp. Curve with every kind Roughness and Base Nets



加한 場合 表面粗度가 上昇한다. Fig. 12에서 右 上 部에 示된 바와 같이 (6)式 (7)式 (8)式 (9)式으로 示한 場合 限界熱流束을 나타내며, 本 實驗에 對한 變化的인 限界熱流束 附近에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 表面을  $\approx 30$ 로 處理한 場合에 그 表面에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 表面을  $\approx 30$ 로 處理한 場合에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 表面을  $\approx 30$ 로 處理한 場合에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다.

$q = (2.31 \sim 2.71) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$ 의 傳熱面 溫度가 定數로 定時, 各 限界熱流束에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 本 實驗에 對한 各 限界熱流束에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 本 實驗에 對한 各 限界熱流束에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다.

- (31)  $\approx 1200 : q = 0.072 \Delta T^{4.56}$
- (32)  $\approx 100 : q = 3.113 \Delta T^{3.57}$
- (33)  $\approx 60 : q = 8.993 \Delta T^{3.31}$
- (34)  $\approx 30 : q = 1.90 \Delta T^{3.19}$
- (35)  $\approx 30 : q = 21.90 \Delta T^{3.19}$
- (36)  $\approx 30 : q = 1916 \Delta T^{3.29}$
- (37)  $\approx 30 : q = 4859 \Delta T^{3.19}$

Fig. 15. 示할 수 있는 바와 같이 傳熱面의

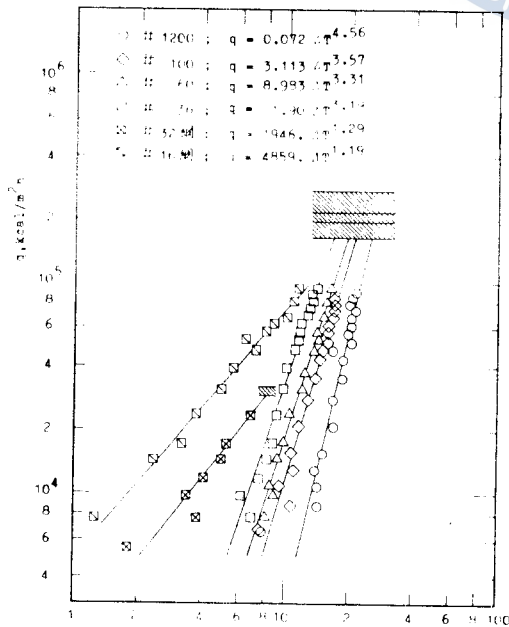


Fig. 13. With Superheat,  $\Delta T, ^\circ\text{C}$  Nucleate Boiling Curve of R-113

表面거칠기가 커질수록 熱傳達이 促進되어 過熱度가 작을 程度로 移動됨을 알 수 있다. 即 表面의 거칠기가 커질수록 發泡點의 數가 增加함으로써 熱傳達率이 促進된다. 表面을  $\approx 30$ 로 處理한 場合에 그 表面에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 表面을  $\approx 30$ 로 處理한 場合에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이  $\approx 30$ 로 表面 粗度를 處理하고 그 위에 黃銅網을 設置한 場合에 對한 沸騰曲線의 特性이 크게 變한다. 此는 熱 傳達率이 促進되어 낮은 過熱度의 場合에 熱의 傳達이 可能하다. 此는 傳熱面 表面에 黃銅網을 設置함으로써 傳熱面 附近에 形成된 過熱液層이 自然對流로 因하여 上昇하는 場合에 抑制되는 程度로 淨上하는 氣泡이 形成되는 過熱 液層의 伴流를 抑制하기 때문이라 생각된다. 此는 32에 示한 黃銅網의 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 此는 32에 示한 黃銅網의 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 此는 32에 示한 黃銅網의 實驗 結果를 示한 場合에 示한다.

Fig. 15는 熱流束이  $(2.31 \sim 2.71) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$  狀態에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 此는 1200의 傳熱面 溫度에 對한 氣泡의 發生과 移動의 程度를 示한 場合에 示한다. Fig. 16은 本 實驗에 對한 各 限界熱流束에 對한 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 此는 1200의 傳熱面 溫度에 對한 氣泡의 發生과 移動의 程度를 示한 場合에 示한다. 此는 1200의 傳熱面 溫度에 對한 氣泡의 發生과 移動의 程度를 示한 場合에 示한다.

(4.2) 考 察

Fig. 17에 本 實驗에서 求得 實驗式 (31)~(36) 外의 代表의 他 研究 結果式과 比較하여 보자. Fig. 17에서 (1)은 Nishigawa<sup>22)</sup>의 依り 直徑 100 mm中 水平傳熱面에 對하여 求得 實驗 結果를 示한 場合에 示한다. 此는 1200의 傳熱面 溫度에 對한 氣泡의 發生과 移動의 程度를 示한 場合에 示한다. 此는 1200의 傳熱面 溫度에 對한 氣泡의 發生과 移動의 程度를 示한 場合에 示한다.

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

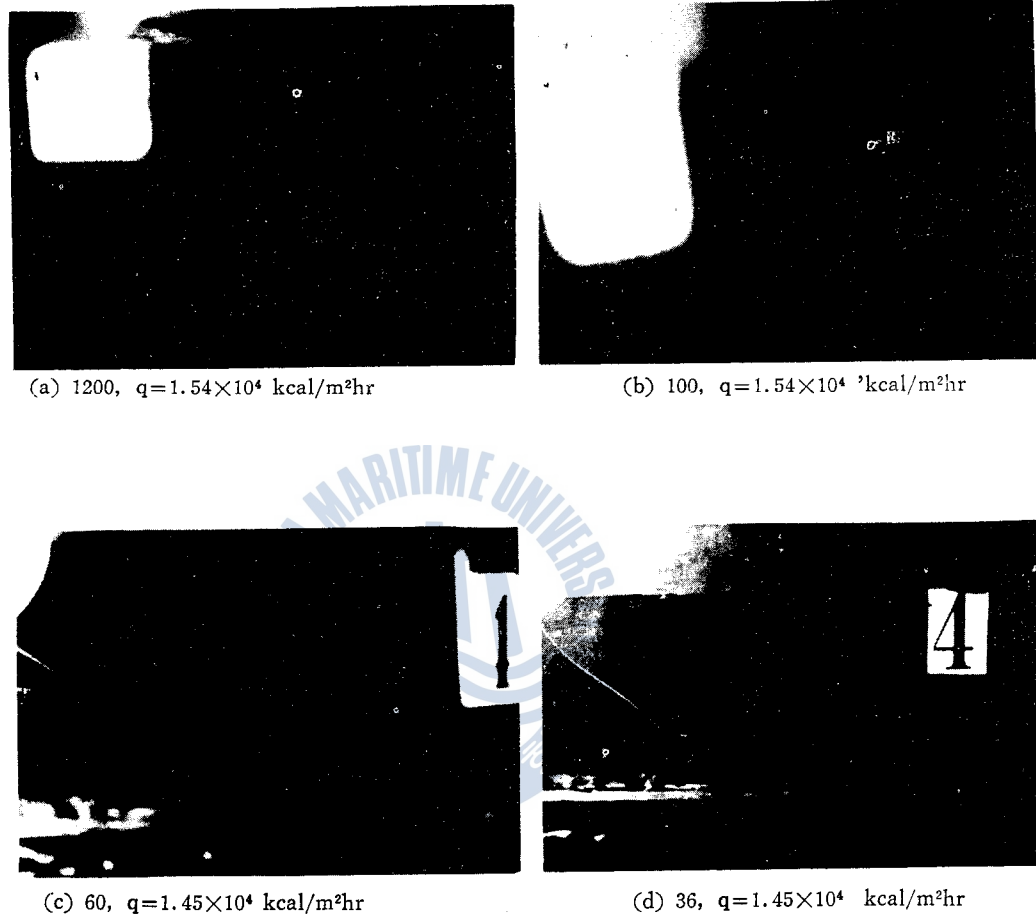
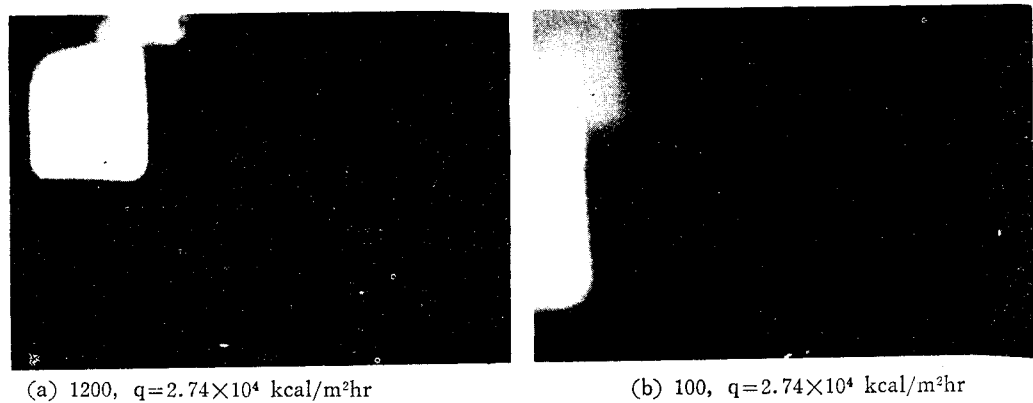
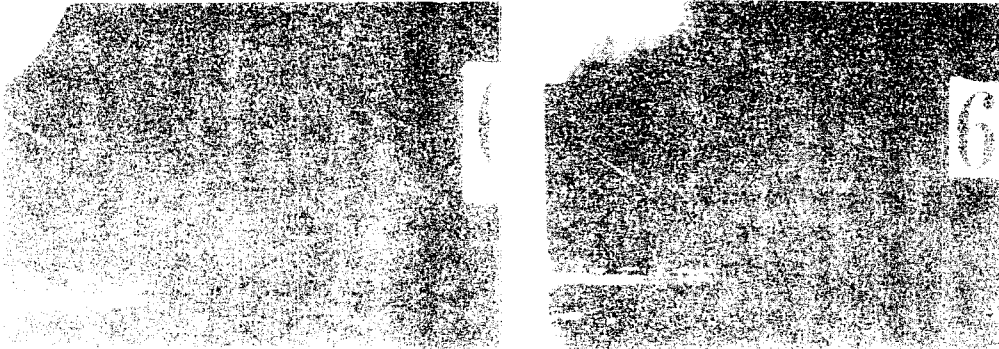


Fig.14. Nucleate Boiling of R-113





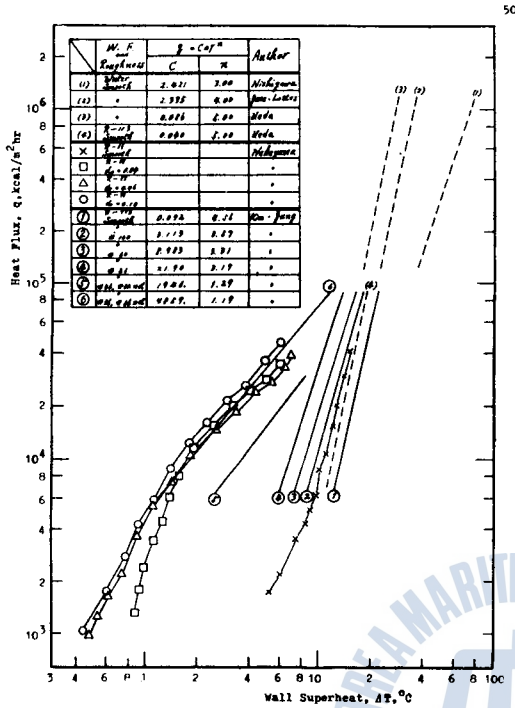


Fig.17. Comparasion Curve of every kind Studies in N.B.

(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 積은 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

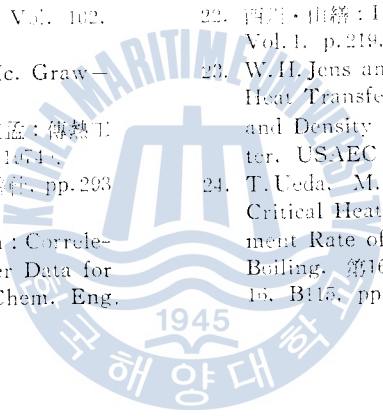
R-113을 利用한 核沸騰實驗을 通하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

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 경향이 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 加功함으로써 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 阻害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. 2C), pp. 49-51, (1975.6).
7. J. C. Chen, R. K. Sanderam and F. T. Ozkaymak: A Phenomenological Correlation for  $h_{\text{CHF}}$ , CHF Heat Transfer, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0037, (1977).
  8. 李正根: 沸騰(汽化)의 研究(一) 沸騰, 熱傳達(1)에 對한 研究(1)에 沸騰의 研究, 韓國海洋大學 論文集, 第15卷, pp. 113-129, (1979.4).
  9. P. Saha and N. Zuber: Point of Net Vapor Film Fraction in Subcooled Boiling, 5th Int. Heat Transfer conf. B1.7, pp. 175-179, (1974).
  10. 池田錫・佐田潤: 燒結金屬 STS系 蒸氣 核沸騰熱傳達에 關한 研究, 韓國動力機械學會誌, 第14卷, 第2號, pp. 29-33, (1980).
  11. W. Nakayama, T. Daikoku, H. Kuwahara, T. Nakajima: Dynamic Model of Enchanced Boiling, Heat Transfer, Vol. 102, No. 3, (1980).
  12. J. P. Holman: Heat Transfer, Mc. Graw-Hill, p. 29, p. 335, (1975).
  13. 西川進雄, 藤田恭伸, 長島昭, 國友益: 傳熱工學의 發展, 工業學, Vol. 2, p. 5, (1974).
  14. 日本核學會: 傳熱工學資料, 明善社, pp. 293-328, (1981.4).
  15. W. M. Rohsenow and P. Griffith: Correlation of Maximum Heat Transfer Data for Boiling of Saturated Liquids, Chem. Eng. Symp. Series, Vol. 53, No. 14, p. 47, (1974).
  16. S. S. Kutateladze: Heat Transfer in Condensation and Boiling, USAEC Rept. AEC-TR-3773, (1962).
  17. N. Zuber: Hydrodynamic Aspects of Boiling, Heat Transfer, USAEC Rept. AECU-4420, Doctoral Dissertation, UCLA (1959).
  18. Y. P. Chang and N. W. Snyder: Heat Transfer in Saturated Boiling, Chem. Eng. Prog. Symp. Series, Vol. 53, No. 30, pp. 25-33, (1961).
  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-A25, (1979).
  21. 大隅和男: 自然技術, 珍文社, pp. 52-55, (1979).
  22. 西川・山緒: 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. 15, B115, pp. 214-216, (1974.4).



# 分岐가 있는 推進軸系 비틀림振動 計算의 電算프로그램 開發에 關한 研究

許 南 均

A Study on the Developing a Computer Program for the Torsional  
Vibration Calculation of Branched Shaft System

*Hyo Namkyun*

〈目 次〉

1. 머릿말
  2. 分岐가 있는 軸系의 固有振動數 및 振動型의 計算
    - 2.1 軸系의 構成
    - 2.2 質量慣性모멘트매트릭스와 비틀림剛性매트릭스
    - 2.3 Jacobi 回轉法에 依한 固有值, 固有벡터의 計算
    - 2.4 Holzer表의 作成
  3. 振動에 依한 附加應力의 計算
    - 3.1 B & W 型機關
    - 3.2 Sulzer 型機關
    - 3.3 動倍率
    - 3.4 토오크하모닉係數
  4. 電算프로그램
    - 4.1 電算프로그램의 概要
    - 4.2 電算프로그램의 플로우차트
  5. 實際 軸의 計算과 그 結果의 比較檢討
    - 5.1 供試軸系의 特性
    - 5.2 計算結果
    - 5.3 計算結果의 比較檢討
  6. 結 論
- 參考文獻