

## 環狀流路에 있어서 垂直高溫管의 過渡的 冷却過程에 관한 研究

鄭大仁\*·金京根\*\*

## A Study on the Transient Cooling Process of a Vertical-High Temperature Tube in an Annular Flow Channel

D. I. Jung, K. K. Kim

**Abstract**

In the case of boiling on high temperature wall, vapor film covers fully or partially the surface. This phenomenon, film boiling or transition boiling, is very important in the surface heat treatment of metal, design of cryogenic heat exchanger and emergency cooling of nuclear reactor.

Mainly supposed hydraulic-thermal accidents in nuclear reactor are LCCA (Loss of Coolant Accident) and PCM (Power-Cooling Mismatch). Recently, world-wide studies on reflooding of high temperature rod bundles after the occurrence of the above accidents focus attention on wall temperature history and required time in transient cooling process, wall superheat at rewet point, heat flux-wall superheat relationship beyond the transition boiling region, and two-phase flow state near the surface. It is considered that the further systematical study in this field will be in need in spite of the previous results in ref. (2), (3), (4).

This paper is the study about the fast transient cooling process following the wall temperature excursion under the CHF (Critical Heat Flux) condition in a forced convective subcooled boiling system. The test section is a vertically arranged concentric annulus of 800mm long and 10 mm hydraulic diameter. The inner tube, SUS 304 of 400 mm long, 8 mm I.D, and 7 mm O.D., is heated uniformly by the low voltage AC power. The wall temperature measurements were performed at the axial distance from the inlet of the heating tube,  $z=390$  mm. 6 chromel-alumel thermocouples of  $76 \mu\text{m}$  were press fitted to the inner surface of the heating tube periphery. To investigate the heat transfer characteristics during the fast transient cooling process, the outer surface (fluid side) temperature and the surface heat flux are computed from the measured inner surface temperature history by means of a numerical method for inverse problems of transient heat conduction. Present cooling (boiling) curve is sufficiently compared with the previous results.

\* 正會員, 東明專門大學

\*\* 正會員, 韓國海洋大學

使用記號

- $C$  ; Specific heat
- $D$  ; Inside diameter of pipe
- $f$  ; Weighting factor
- $g$  ; Gravity acceleration
- $H$  ; Latent heat
- $k$  ; Thermal conductivity
- $L$  ; Length
- $P_i$  ;  $= b_i / (a_i - c_i P_{i-1})$
- $Q_i$  ;  $= (d_i - c_i Q_{i-1}) / (a_i - c_i P_{i-1})$
- $q$  ; Heat flux
- $T$  ; Temperature
- $t$  ; Time
- $x$  ; Distance
- $\alpha$  ; Heat transfer coefficient
- $\rho$  ; Density
- $\mu$  ; Viscosity
- $\sigma$  ; surface tension
- Subscript
- 0 ; Time  $t$
- 1 ; Time  $t + \Delta t$
- $c$  ; Critical
- $fg$  ; Evaporation
- $g$  ; Gas
- $i$  ;  $i$ -node
- l ; Liquid
- s ; Saturation
- w ; Wall

1. 序 論

傳熱面의 溫度가 매우 높을 때는 傳熱面이 全面的으로 또는 部分的으로 蒸氣膜에 뒤덮히어 傳熱이 이루어지는 膜沸騰(Film boiling) 또는 遷移沸騰(Transition boiling) 狀態가 된다. 이와 같은 高溫狀態下의 傳熱은, 金屬의 熱處理와 같은 高溫面의 非定常 冷却, 蒸發溫度가 매우 낮은 極低溫流體 蒸發器의 設計, 原子爐의 事故時 急冷却 過程에 매우 重要하다.<sup>1)</sup> 특히, 原子爐에 있어서 冷却水 喪失事故(LOCA, Loss of

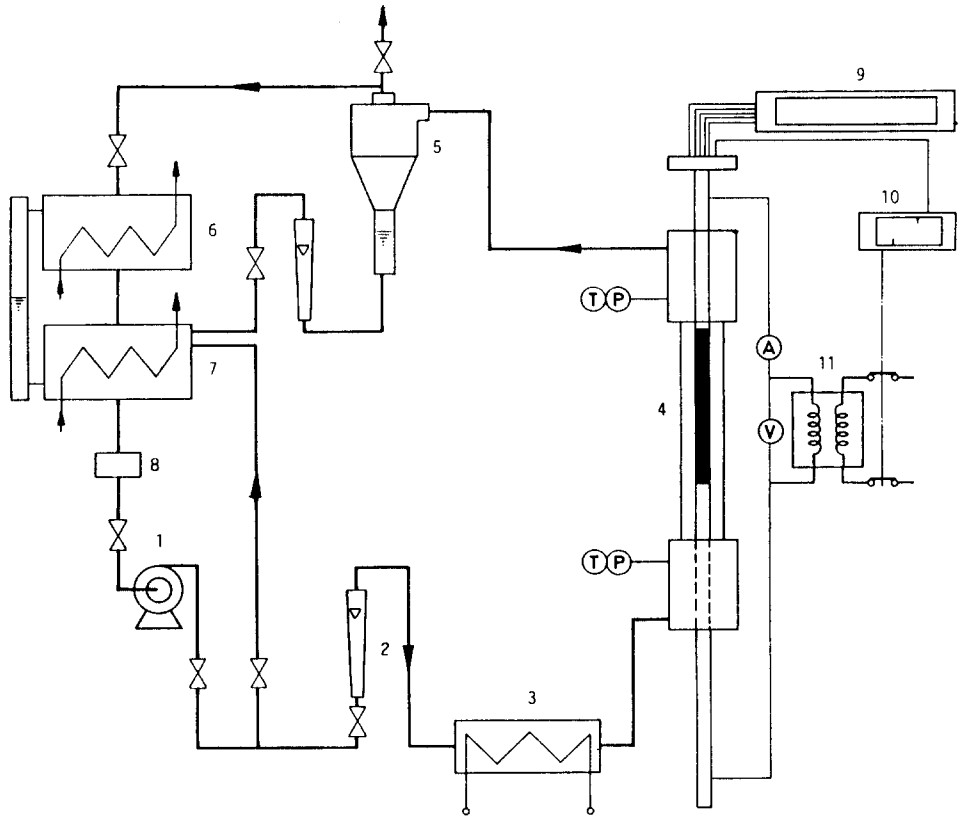
Coolant Accident)와 出力과 除熱能力과의 不正合事故(PCM, Power-Cooling Mismatch) 등으로 인한 高溫의 燃料集合體를 再冠水(Reflooding)에 의하여 急冷却 시킬 경우는, 傳熱面 溫度의 時間的 舉動, 膜沸騰과 遷移沸騰 狀態에서의 熱傳達率 또는 壁面過熱度(Wall superheat)와 熱流束과의 關係, 리벳팅 溫度, 膜沸騰에서 核沸騰으로의 遷移過程 및 傳熱面 近傍에서의 氣液二相流의 流動狀態 등이 研究의 關心이 되고 있다. 이들에 關하여는 世界的으로 많은 研究가 얼어져 있으나<sup>2),3),4)</sup> 特有의 流動 및 傳熱解析의 難解性 등으로 인하여 不明한 點이 많아, 今後 많은 研究結果를 必要로 하고 있다.

本研究에서는, 強制發熱하는 두께 0.5 mm 길이 400 mm의 SUS 304管을 等價水力直徑 10 mm가 되도록 透明管內에 同心上으로 設置한 實驗部에서, 加熱量을 높여 限界熱流束 狀態에서 壁溫이 急上昇하여 所定の 溫度에 到達하던 加熱電源이 遮斷되고, 연이어 繼續되는 過渡的 冷却過程에 關한 研究結果를 報告하는 것이다. 加熱部 出口에서 上流方向으로 10mm 位置에, 加熱管 內壁에 設置된 5個의 熱電對에 의하여 圓周方向 內壁面 溫度의 時間的 變化(Wall temperature history)를 測定하여 이를 一次元 非定常 熱傳導의 數值解析을 함으로써, 流體側의 傳熱面 表面溫度의 時間的 變化, 表面熱流束의 時間的 變化, 過渡的 冷却過程에서의 冷却曲線을 얻었다. 또한 여러가지의 傳熱 및 流動狀態에서 報告되어 있는 冷却曲線 및 沸騰曲線과 本研究에서 얻어진 冷却曲線을 比較, 檢討하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗範圍

Fig. 2-1은 實驗裝置의 全體 配置圖를 나타낸다.

實驗裝置는 Fig. 2-1에 나타낸 바와 같이 (1) 主循環펌프 (2) 流量計 (3) 콘트롤 히터 (4) 實驗部 (5) 氣液分離部 (6) 凝縮器 (7) 필터와 드라이어 (8) 貯藏탱크 (9) 記錄計 (10) 指示溫度計 (11) 加熱用 電源裝置로 구성되어 있으며, 凝縮器와 貯藏탱크에는 各各 冷却用 清水循環 루프가 별도로 設置되어 있다.



1. Main pump 2. Flowmeter 3. Control heater 4. Test section  
 5. Liquid-vapor separator 6. Condenser 7. Storage Tank 8. Filter and dryer  
 9. Recorder 10. Excess temperature trip 11. Voltage regulator

Fig. 2-1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 2-2는 實驗部의 詳細圖이다. 實驗部의 全 길이는 1550 mm이며, 直流電源으로 加熱되는 加熱內管과 流動狀態를 觀察할 수 있게 된 透明 外管으로 되어 있다. 加熱用 內管은 外徑 8 mm, 內徑 7 mm, 길이 400 mm의 SUS 304管으로서 兩 端에는 銅電極이 銀接되어, Fig. 12-1의 加熱用 電源裝置로부터 直接 通電되어 強制發熱된다. 이 發熱管의 上端에서 10mm 下側의 管內部에는 Fig. 2-3에 보이는 바와 같이 데프론 프릭에 直徑 76  $\mu\text{m}$ 의 C-A熱電對를 圓周方向 等間隔으로 配置하였다. 5個의 C-A熱電對는 비저그라프 記 錄計에 結線시켰으며, 또 1個의 C-A熱電對는 高 溫으로 인한 實驗部의 物理的 燒損을 防止하도 록 設定溫度 220°C에서 加熱用 電源裝置의 一 次 側을 遮斷시키도록 하였다.

Fig. 2-2에서 보는 바와 같이 實驗部의 加熱前 入口區間(Entrance region)의 全길이는 411 mm, 즉 等價水力直徑이 10 mm이므로,  $L/D=41.1$ 로 서 充分한 入口區間을 取하였다.

定常狀態에서 段階의으로 限界熱流束狀態直 前까지 加熱量을 높여가면, 限界熱流束狀態下 에서 傳熱面의 溫度가 急上昇하게 되고 加熱用 電源裝置의 設定溫度인 220°C에서 電源이 遮 斷된다. 이어서 實驗部로의 流入流量, 流入溫 度와 入口壓力을 一定하게 維持시키면 非定常 冷却過程에 들어가게 되는데, 이 過程 동안이 測定期間으로서 비저그라프에 依하여 測定位置  $L/D=39$ 에서 發熱管 內壁溫度의 時間的 變化를 記錄하였다. 入口壓力은 1.5kg/cm<sup>2</sup> abs. (0.147 MPa)로 一定하게 維持하였으며, 入口 過冷度는

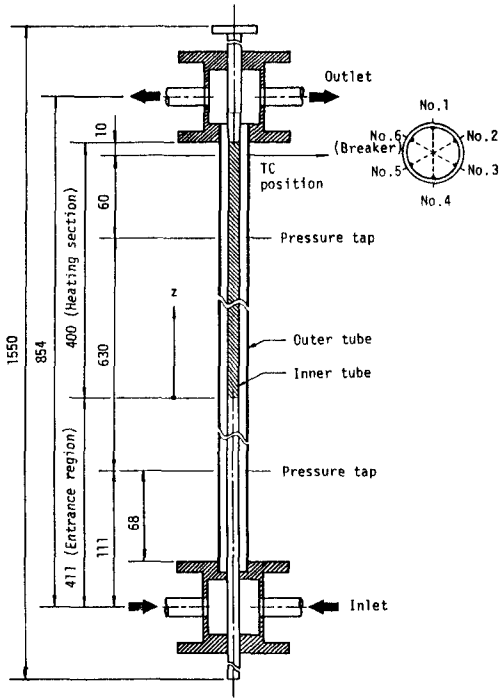


Fig. 2-2 Detailed diagram of test section and TC position.

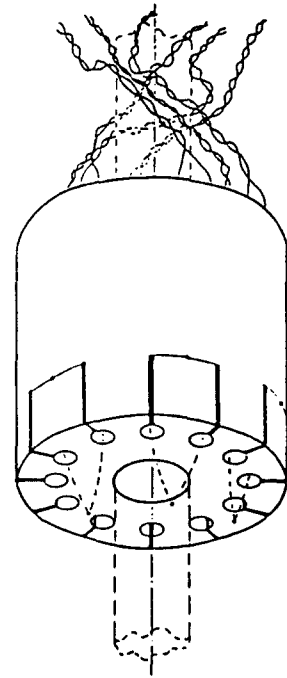


Fig. 2-3 Assembly of deflon plug for thermocouples.

10 K, 20 K, 30 K이고, 質量速度(mass velocity)가 261, 396, 514, 832, 1239 kg/m<sup>2</sup>s로서  $3 \times 5 = 15$ 로 되는 實驗條件 매트릭스에 關하여 實驗을 하였다. 實驗流體는 Freon-113이며, 實驗條件에 있어서 實驗流體의 臨界點에 對한 無次元 壓力比(Reduced inlet pressure)는 0.0148이고, 入口壓力에 相當하는 液相과 氣相의 密度比(Density ratio)는 約 153이다. Freon-113의 臨界點에서의 壓力과 溫度는 各各 53.9kg/cm<sup>2</sup> abs., 487.25K이고, 關係되는 物性値는 電算處理를 위해 數式化 하였다.

### 3. 數值計算

垂直高溫管의 過渡的 冷却過程중의 傳熱特性을 알아보기 위하여 熱電對에 依하여 測定한 內表面 溫度로부터 流體側 即, 傳熱이 이루어지는 外表面 溫도와 熱流束의 時間的 變化를 數值計算에 依하여 求하였다. 이러한 問題는 熱傳導 逆問題(Inverse problem of heat conduction)라

고 指稱된 범주의 것으로 高精度의 解를 求하는 것은 本質的으로 어렵다. 이는 傳熱面 表面에서의 時間的 溫度變化가 物體內部로 갈수록 減衰됨에 比하여 計算은 그 逆方向으로 進行되지 않으면 안되기 때문이다. 非定常 熱傳導에 있어서 逆問題 解析에 關하여는, 金屬의 熱處理<sup>5)</sup>나 로켓의 燃料과 같은 低溫流體의 膜沸騰傳熱<sup>6)</sup>과 關聯되어 解析의 方法과 數值의 方法이 研究되어 있으나, 大部分 간단한 形象, 境界條件 및 初期條件下에서의 問題의 것으로, 本研究과 같은 境遇에 容易하게 適用시킬 方法이 없다.

本 實驗結果의 解析은 最近 熱流體 工學의 數值解析을 對象으로 Patanker<sup>7)</sup>가 研究한 TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm) 方法에 依하였다. Fig. 3-1과 같이 두께 0.5mm의 SUS 304 實驗管을 分割하여 一次元 熱傳導 逆問題의 數值計算을 行하였다. 管壁의 두께가 얇은 高溫壁의 冷却解析에 있어서는 軸方向 溫度勾配와 傳熱面積이 적기 때문에 半徑方向 一次元 解析으로 滿足스움이 알려져 있다.<sup>8)</sup>

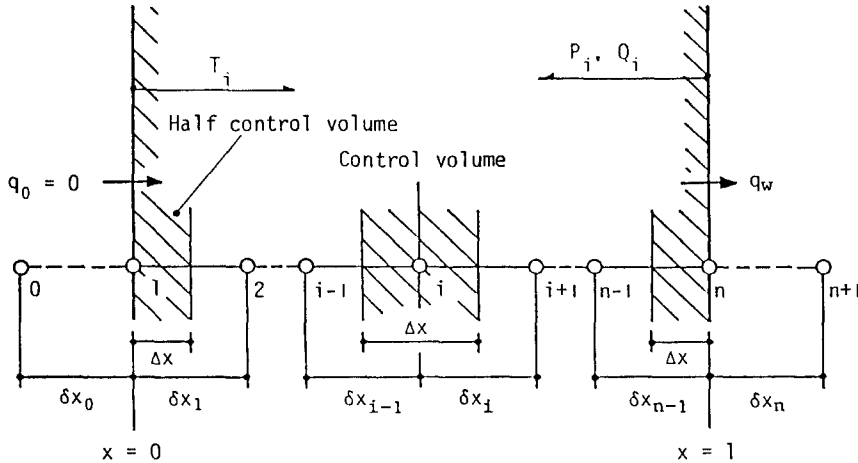


Fig. 3-1 Nodal points and control volumes for the one dimensional situation.

따라서 實驗管을 平板으로 近似시켜, 다음과 같은 一次元 熱傳導 方程式

$$\rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

를 內表面에서의 境界條件

$$x=0 : T(0, t) = T_i^0, \quad \partial T / \partial x = 0 \quad (3.2)$$

와 初期條件

$$T(x, 0) = T(0, 0) \quad (3.3)$$

下에서 解析한다.

上式에서  $t$ 는 時刻,  $x$ 는 內表面으로부터의 거리이며,  $T(0, t)$ 는 時刻  $t$ 에서 內表面의 測定溫度이다. 式(3.1)을 콘트롤 볼륨법(Control volume method)에 의하여 離散化시킨다. 加重因子를 導入하여 加重因子  $f=1.0$ 으로 한 陰解法(Fully implicit scheme)으로 Fig. 3-1의  $i$ 번째 切點周圍에서 式(3.1)을 整理하면 다음과 같다.

$$\left( \frac{\rho_w C_w \Delta x}{\Delta t} + \frac{k_w}{\delta x_{i-1}} + \frac{k_w}{\delta x_i} \right) T_i^1 = \frac{k_w}{\delta x_i} T_{i+1}^1 + \frac{k_w}{\delta x_{i-1}} T_{i-1}^1 + \frac{\rho_w C_w \Delta x}{\Delta t} T_i^0 \quad (3.4)$$

上式을 TDMA法에 의하여 풀이 하기 위하여 다음과 같이 置換 시킨다.

$$a_i T_i^1 = b_i T_{i+1}^1 + c_i T_{i-1}^1 + d_i \quad (3.5)$$

式(3.5)에서 보면  $i$ 번째 切點의 時刻  $t + \Delta t$ 에서 溫度는  $i+1$ ,  $i-1$  切點의 溫度에서 決定되지만, 실은  $i-1$  切點의 溫度만으로도 數值解析이 可能

하다. 即,

$$T_i^1 = P_i T_{i-1}^1 + Q_i,$$

$$T_{i+1}^1 = P_{i+1} T_i^1 + Q_{i+1} \quad (3.6)$$

上記의 方法에 依하여 熱傳導 逆問題를 解析함에 있어서, 初期條件의 影響과 解의 精確度에 決定的으로 關係되는 測定時間 間隔等에 關한 詳細한 內容은 參考文獻<sup>9)</sup>에 報告되어 있다.

## 4. 實驗結果

### 4.1. 壁溫分布의 測定

Fig. 4-1은 壁溫分布의 測定例로서 質量速度(Mass velocity)가  $261 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 入口過冷度(Inlet subcooling temprature)가  $10 \text{ K}$ (飽和溫度는  $56.8^\circ\text{C}$ )의 境遇이다. 橫軸(時間軸)의 最小 눈금은  $0.1 \text{ sec}$ 이며 縱軸(溫度軸)의 最小 눈금은 約  $1.6^\circ\text{C}$ 이다. 또한 5個의 熱電對는 便宜上 溫度 눈금을 어긋나게 記錄시켰다. Fig. 4.1에서 보는 바와 같이 限界熱流束 狀態에서는 壁溫이 振動하면서 上昇하다가 어느 溫度 以上에서는 單調롭게 急上昇하며, 所定溫度에서 加熱電源 遮斷裝置가 作動하여 電源이 遮斷되어 冷却過程에 들어간다. 이러한 冷却過程에서는 一般的으로 심한 流量과 壓力의 脈動을 同伴하나, 本實驗에서는 最大한 이를 抑制시켰으며, 壁溫變化 自體

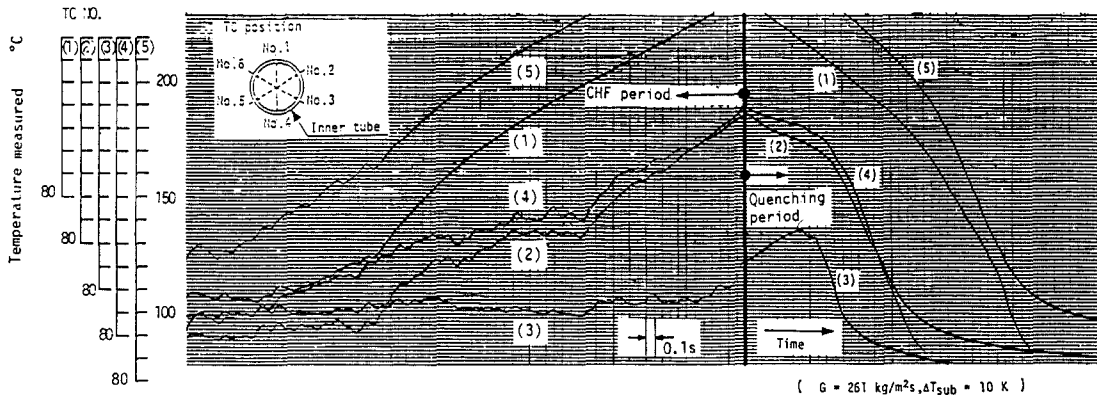


Fig. 4-1 Measured results of inside wall temperature during the CHF and rapid-cooling process.

는 時間의 經過와 더불어 比較的 單調롭게 減少하면서 傳熱面이 冷却되는 樣相을 보이고 있다. 또한, 限界熱流束 狀態에서의 흐름은 이 境遇 스텝流로 判斷되는데, 複雜한 傳熱 및 流動狀態로 因하여 圓周方向으로 均一히 溫度가 急上昇하거나 急冷却되지 않음을 알 수 있다.

4.2. 傳熱面 表面溫度 및 熱流束의 時間的 變化

式(3.4), 式(3.5), 式(3.6)으로 構成되는 알

고리즘에 依하여 傳熱面 表面溫度와 表面에서의 熱流束의 時間的 變化를 計算한 結果를 Fig. 4-2에 나타낸다. 實際의 計算에 있어서 解의 精確度에 影響을 갖는 測定時間 間隔에 關하여는, 無次元時間( $K \cdot \Delta t / l^2$ )을 0.9-1.5程度로 하였다. Fig. 4-2에서 알 수 있는 바와 같이 高溫狀態에서는 比較的 낮은 表面熱流束을 維持하다가, 어느 領域에서 表面熱流束이 急증하면서 傳熱面도 急冷되고 있다.

Fig. 4-3은 위 結果를 一般的인 沸騰曲線(Boi-

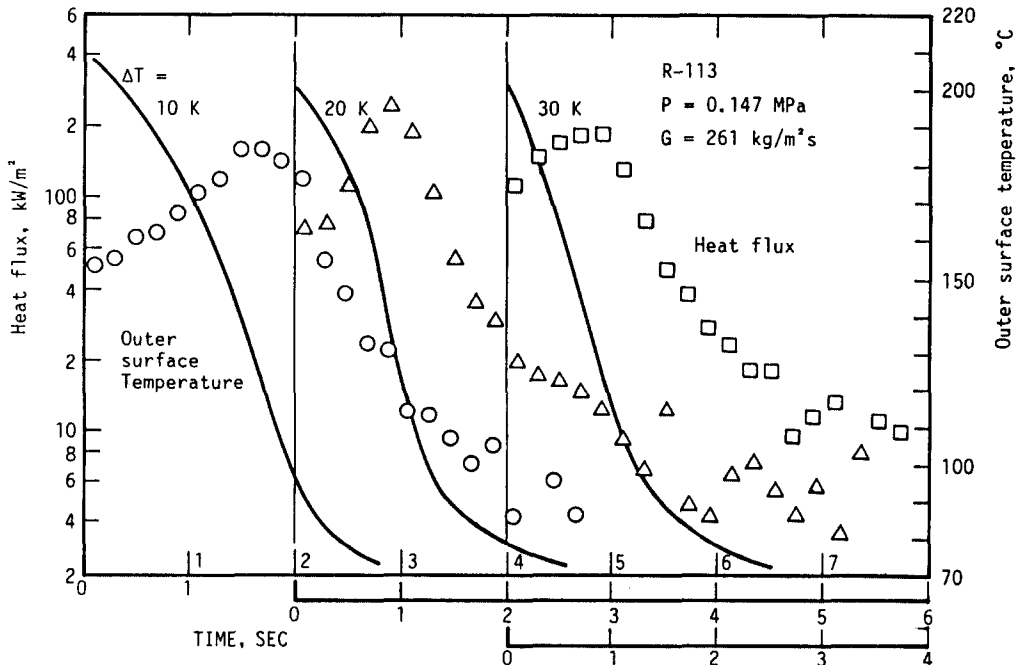


Fig. 4-2 Numerical analysis results for heat flux and temperature at the outer wall surface.

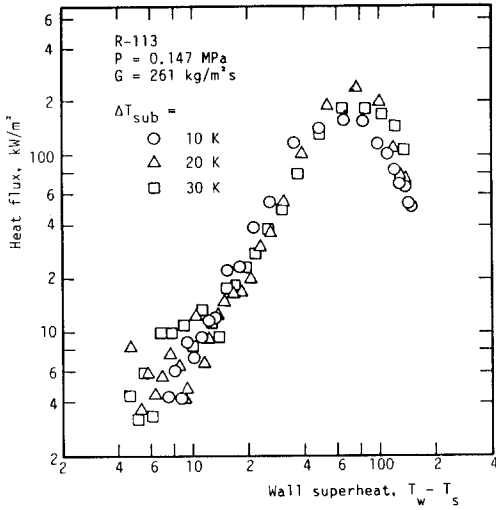


Fig. 4-3 Cooling curve (heat flux and wall superheat relation).

ling cuve)을 表示하는 그래프에 나타난 冷却曲線(Cooling curve)이다. 冷却曲線上의 結果에서 알 수 있는 바와 같이 實驗領域은 遷移領域에서 核沸騰領域에 걸쳐 있음을 알 수 있다. 또한, 最大熱流束點(Maximum heat flux point, DNB)를 包含한 高溫領域 即, 遷移領域에서는 入口過冷度가 클수록 높은 表面熱流束을 維持함을 알 수 있다. 그러나 이러한 熱流束은 傳熱面 表面의 溫度뿐만 아니라 流動의 狀態에도 關係되며 特別히 表面 極히 近傍의 境界層 程度에서의 흐름에 支配를 받는다. 또한, 本實驗의 傳熱管은 管의 두께가 0.5 mm이기 때문에 極히 짧은 時間에 全冷却過程이 끝나므로 測定用 熱電對가 附着된 곳의 흐름의 偶然性에 따라서 傳熱面 溫度의 測定曲線도 影響을 받게 된다.

이러한 點에 있어서는 熱容量이 보다 큰 高溫面의 冷却實驗이 緊후 要求된다.

Fig. 4-4는 Fig. 4-3의 本 研究結果중에서 入口過冷度가 10 K인 境遇를 他研究結果와 綜合的으로 比較한 것이다. 먼저 Fig. 4-4에서 實線으로 表示된 結果<sup>4)</sup>는 核沸騰領域에서의 定常實驗結果와 Fig. 4-1의 限界熱流束 狀態下에서 壁溫의 上昇過程을 記錄, 數值計算하여 얻은 移遷領域과 膜沸騰領域에서의 平均的인 沸騰曲線이다. 이 結果에서는 局所的으로 壁面이 過熱(遷移의 傳熱

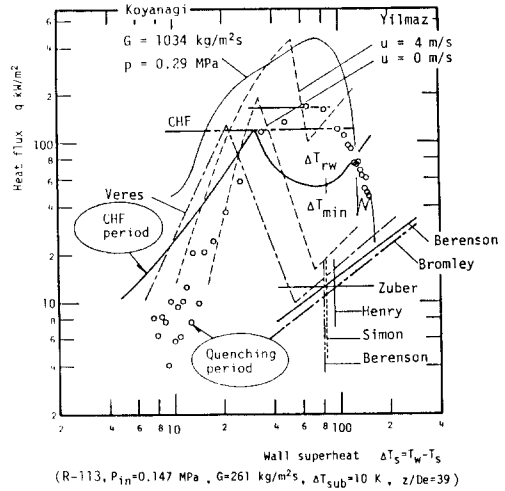


Fig. 4-4 Boiling and cooling curves.

特性)과 冷却(核沸騰支配的 傳熱特性)을 되풀이 하면서 壁溫이 急上昇하는 過程에 있어서 Fig. 4-4에 보이는 바와 같이 두개의 線을 얻고 있으며, 이들은 從來의 加熱熱量으로부터 求한 限界熱流束值(Fig. 4-4에서 CHF로 表示)와 다른 값을 갖고 있음을 알 수 있다.

Yilmaz<sup>10)</sup>의 研究結果는 水平管内 飽和狀態의 蒸氣를 흘러보내 이를 加熱源으로 하여 이에 直角으로 實驗流體(R-113)를 衝突시키는 所謂 Cross Flow 에서 流速에 따른 沸騰曲線의 變化를 알기 위한 實驗으로서, 全沸騰領域에 걸쳐 流速이 클수록 傳熱量도 增大함을 보이고 있다.

Veres<sup>11)</sup>의 結果는 直徑 約 1"의 熱傳導率이 매우 큰 銀球를 利用하여, 球의 中心에 熱電對를 裝置하여, 高溫狀態로부터 急冷却시켜, 過渡的 熱量計法(Transient calorimeter technique)으로 얻은 停滯된 R-113 飽和液에 對한 것이다. 또한 Koyanagi의 데이터<sup>12)</sup>는 熱容量이 큰 銅블록內의 垂直上昇流(R-113)에 依한 冷却實驗의 結果이다.

極小熱流束點 또는 리벳팅點의 壁面過熱도에 關하여는 從來로부터 많은 研究가 되어져 있다. Spiegler<sup>13)</sup>는 Van der Waals 式으로부터 一般的인 物性値와 같이 高溫面에 液이 接觸할 수 있는 最大 可能한 過熱도에 關하여

$$\frac{T_{min}}{T_c} = \frac{27}{32} \tag{4.1}$$

을 얻고 있으며, 이 式에 依한 計算値는 高溫面에의 液滴衝突에 關한 Leidenfrost 溫度와 잘 一致하고 있다. 上式에서  $T_c$ 는 臨界點 溫度,  $T_{min}$ 은 極小過熱面에서의 壁溫이다.

Simon<sup>14)</sup>은 內徑 12.8 mm, 두께 0.25 mm, 길이 305 mm의 比較的 短管을 利用한 垂直上昇의 環狀流路에서 臨界溫度  $T_c=487.25 K$ 의 液體窒素(液流束 0.2~0.8m/s)에 依한 急冷實驗의 結果로부터 Spiegler의 式을 無次元壓力比  $P/P_c$ 에 對하여 修正하여

$$\frac{T_{min}}{T_c} = 0.13 \frac{P}{P_c} + \frac{27}{32} \quad (4.2)$$

을 提示하고 있다.

Berenson<sup>15)</sup>은 膜沸騰에 있어서의 流體力學의 安定性的 限界로부터

$$\Delta T_{min}' = 0.127 \frac{\rho_g H_{fg}}{k_g} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l + \rho_g} \right]^{-2/3} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[ \frac{\mu_g}{g(\rho_l + \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (4.3)$$

을 提示하고 있으며 Henry<sup>16)</sup>는 Berenson의 모델에 基礎하여 傳熱面의 物性値를 考慮한 다음과 같은 相關式을 實驗的으로 얻고 있다.

$$\frac{T_{min} - T_{min}'}{T_{min}' - T_l} = 0.42 \left[ \sqrt{\frac{k_l \rho_l C_{pl}}{k_w \rho_w C_w}} \cdot \frac{H_{fg}}{C_w \Delta T_{min}'} \right]^{0.6} \quad (4.4)$$

式(4.4)에서  $T_{min}'$ 는 式(4.3)에서 求한  $\Delta T_{min}'$ 로부터  $T_{min} = T_s + \Delta T_{min}'$ 로서 求한 값이다.

한편 Zuber<sup>17)</sup>는 基本的으로 膜沸騰에 있어서의 極小熱流束點의 熱流束을 提示하고 있다.

$$q_{min} = 0.09 \rho_g H_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\rho_l + \rho_g} \right]^{1/2} \left[ \frac{g_0 \sigma}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/4} \quad (4.5)$$

Berenson<sup>15)</sup>은 膜沸騰域의 熱傳導率에 關하여 理論解析으로부터

$$\alpha = 0.425 \left[ \frac{k_g^3 H_{fg} \rho_g g(\rho_l - \rho_g)}{\mu_g \Delta T \sqrt{\frac{g_0 \sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}} \right]^{1/4} \quad (4.6)$$

을 얻었으며 Bromly<sup>18)</sup>는

$$\alpha = 0.62 \left[ \frac{k_g^3 H_{fg}' \rho_g g(\rho_l - \rho_g)}{\mu_g D \Delta T} \right]^{1/4} \quad (4.7)$$

$$H_{fg}' = H_{fg} \left[ 1 + \frac{0.4 C_{pg} \Delta T}{H_{fg}} \right]$$

를 얻고 있다.

이들 式으로부터 計算한 리벳트點 (또는 極小熱流束點)의 過熱度에 關한 Fig.4-4의 結果와 本實驗의 結果를 比較하여 보면 最大熱流束點의 過熱度는 거의 從來에 提示된 式에서 求한 리벳트點 近傍의 過熱度와 一致함을 알 수 있다. 이러한 現象은, 本研究에서와 같이 氣液平均流束이 큰 境遇의 冷却過程에서는 一般的으로 膜沸騰領域으로 알려진 높은 壁面過熱度 狀態에서 遷移가 始作되어, 部分的 核沸騰이 開始된다고 알려진 最小熱流束點에서 最大의 熱流束을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한, 最大熱流束點에서의 熱流束値는 壁溫上昇過程의 解析에서 얻어진 遷移領域에서 核沸騰이 支配的인 期間의 平均熱流束과 거의 一致하고 있다.

## 5. 結 論

垂直高溫管의 過渡의 冷却 實驗結果의 解析을 通하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 限界熱流束 狀態에서 壁溫上昇過程동안은 傳熱面 溫度가 過熱과 冷却을 되풀이 하면서 壁溫이 上昇함에 比하여 冷却時는 單調롭게 壁溫이 내려가고 있다.

2) 測定된 內表面 溫度를 TDMA方法으로 數値解析을 한 結果, 外表面 溫度와 熱流束의 時間的 變化를 Fig.4-2와 같이 求할 수 있었으며, 이를 Fig.4-3과 같이 冷却曲線으로 表示한 結果, 遷移領域에서는 比較的 過冷度가 클수록 높은 熱流束을 갖음을 알았다.

3) 過冷狀態로 冷却流量이 상당히 큰 境遇는 一般的으로 알려진 膜沸騰領域에서 遷移가 開始되며, 리벳트點 過熱度 近傍에서 最大熱流束點이 存在한다.

本實驗에서는 傳熱面의 두께가 0.5 mm로서 非定常 冷却現象의 進行速度가 빠르기 때문에 傳熱面 測定點 近方の 氣液의 流動狀態의 偶然性과 關聯되기 쉽다. 따라서 今後 이러한 冷却過程을 서서히 進行시켜 어느 程度 흐름에 無關한 時間平均的인 實驗結果를 얻기 위하여는, 熱容量이 큰 傳熱面을 利用한 實驗이 要求되며, 低



流量領域의 이러한 實驗은 原子爐의 急冷과 더불어 매우 重要하다.

### 參 考 文 獻

- 1) 金京根, 氣液二相流, 제19장 막비등과 리벳팅, 태화출판사(1986)
- 2) D. C. Groeneveld and S. R. M. Gardiner, A method of obtaining flow film boiling data for subcooled water, Int. J. of Heat and Mass Trans., Vol. 21, 664-665(1978)
- 3) H. S. Ragheb, S. C. Cheng and D. C. Groeneveld, Measurement of transition boiling boundaries in forced convective flow, Int. J. of Heat and Mass Trans., Vol. 21, 1621-1624 (1978)
- 4) K. K. Kim, Critical heat flux and transition to film boiling in a subcooled flow boiling system, Doctoral thesis, Tokyo Univ. (1985)
- 5) G. Stolz, Numerical solutions to an inverse problem of heat conduction for simple shapes, Trans. of the ASME, Ser. C, Vol. 82, No. 1, 20-26(1960)
- 6) H. Merte and J. A. Clark, Boiling heat transfer with cryogenic fluids at standard, frictional and near-zero gravity, Trans. of the ASME, Ser. C, 351-359(1964)
- 7) S. V. Patankar, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Pub. (1980)
- 8) Van der Molen, S. B. and Galjée, F. W. B. M., The boiling mechanism during burnout phenomena in subcooled flow boiling, Proc. 6th Int. Heat Trans. Conf., Toronto, Vol. 1, 381-385(1978)
- 9) 金明煥·金京根·金喜澈·金鎔模, 數值計算에 의한 熱傳導 逆問題에 있어서 時間間隔의 限界性, 大韓機械學會 釜山支部 春季學術 講演會, 20-30(1985)
- 10) S. Yilmaz and J. W. Westwater, Effect of velocity on heat transfer to boiling Freon-113, Trans. of the ASME, Ser. C, Vol. 102, 26-31(1980)
- 11) D. R. Veres and L. W. Florschuetz, A comparison of transient and steady-state pool-boiling data obtained using the same heating surface, Trans. of the ASME, Ser. C, 229-232(1971)
- 12) M. Koyanagi and T. Ueda and S. Tsunenari, An investigation of critical heat flux and surface rewet in flow boiling systems, Int. J. of Heat and Mass Transfer 26-8, 1189-1198(1983)
- 13) P. Spiegler, J. Hopfenfeld, M. Silberberg, C. F. Bumpus and A. Norman, Onset of stable film boiling and the foam limit, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 6, 987-994(1963)
- 14) F. F. Simon and S. S. Papell and R. R. Simoneau, Minimum film boiling heat flux in vertical flow of liquid nitrogen, NASA TND-4307(1967)
- 15) P. J. Berenson, Film boiling heat transfer from a horizontal surface, Trans. of the ASME, Ser. C, Vol. 83, 351-358(1961)
- 16) R. E. Henry, A correlation for the minimum film boiling temperature, AIChE Symp. Ser., 70-138(1974)
- 17) Zuber N. et al., Further remarks on the stability of boiling heat transfer, UCLA Rept. 58-5(1958)
- 18) L. A. Bromly, Heat transfer in stable film boiling, Chem. Eng. Progress, 46-5, 221-227(1950)