

強制對流系에 있어서 膜沸騰熱傳達에 관한 研究
A Study on Film Boiling Heat Transfer in a Forced
Convective Flow System.

김 유 택* 권 순 석** 정 대 인***
Y. T. Kim, S.S.Kwon, D. I. Jung

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the heat transfer characteristics in the transient cooling process of a high temperature wall. The slow transient cooling experiment was carried out with a copper block of high thermal capacity. The results of these experiments are as follows.

1. Temperature histories measured by the thermocouple, which is 0.99, 2.00, 2.99mm from the heat transfer surface showed monotonous during the cooling process. These variation are the curves of typical temperature histories in film-boiling, transition-boiling, and nucleate-boiling regions.
2. The temperature histories were measured by thermocouple installed in the copper block. The variations of the surface heat fluxes and surface temperature were computed from the numerical solution method TDMA from the measured temperature histories for radial position one dimensional heat transfer inverse problem. The boiling curves were found by the computed temperature histories.
3. The rewetting point which starts to change from film boiling to nucleate boiling is not connected with the mass velocity and it were found that the temperature of rewetting point indicated about 100°C .
4. The heat flux of rewetting point was about $10^5\text{Kcal/m}^2\text{h}$, at that time, the heat transfer coefficient indicated about $1000\text{Kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ irrelevant to mass velocity.
5. The wall superheat decreases as the pressure increases. But I found that rewetting point appeared under higher condition in the wall temperature.

* 정회원, (주)신성엔지니어링

** 정회원, 동아대 학교

*** 동명전문대학

1. 序 論

傳熱面の溫度가 매우 높을 경우 傳熱面이 全面的으로 또는 部分的으로 蒸氣膜에 뒤덮히어, 熱抵抗이 큰 蒸氣膜을 통하여 氣液의 境界面에서 流體가 蒸發을 함으로써 傳達이 이루어진다. 이러한 傳熱의 狀態를 膜沸騰(film boiling)이라고 하며 이는 高溫面 冷却의 初期段階에서의 傳熱, 蒸發溫度가 낮은 流體를 이용한 蒸發器 및 原子爐를 急冷却할때에 發生하는 중요한 現象이다.¹⁾ 金屬의 熱處理 등과 같은 高溫面的 急冷却 過程에 있어서 傳熱面 表面의 傳熱狀態는 傳熱面 表面의 溫度가 下降함에 따라 膜沸騰, 遷移沸騰(transition boiling) 그리고 核沸騰(nucleate boiling) 狀態로 連續的으로 變化하게 된다. 이와같은 傳熱面상의 沸騰狀態가 變함에 따라서 傳熱面的 冷却速度는 膜沸騰狀態에서 가장 느리다가 遷移沸騰狀態에서 점점 빨라지고 最大 熱流束點(maximum heat flux point)을 지나면서 다시 느려지게 된다. 이러한 傳熱의 過程에 있어서 가장 중요한 것은 遷移沸騰이 始作되기 前까지의 膜沸騰狀態이다.¹⁾ 金屬의 表面熱處理와 같은 경우 金屬內部에서의 非定常 熱傳導 問題의 경우는 傳熱面 表面에 있어서의 表面溫도의 變化에 대한 熱傳達率의 變化 및 膜沸騰 등이 持續되는 溫度[리워팅(rewetting)溫度]의 정확한 豫測이 可能하면 數值計算을 통하여 金屬內部的 溫度變化를 豫測하여 金屬組織을 制御할 수 있게 된다. 그렇지만 膜沸騰狀態에 있어서는 傳熱面的 初期溫度, 傳熱面과 冷却材의 物性值, 冷却材의 冷却度, 그리고 質量流速 등 복잡한 關係된다. 특히, 原子爐에 있어서 冷却水 喪失事故(loss of coolant accident)와 出力과 再熱能力의 不定合事故(power cooling mismatch) 등으로 인한 高溫의 燃料 集合體를 再管水(reflooding)에 의하여 急冷却시킬 경우는 傳熱面 溫도의 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, 리워팅溫度, 膜沸騰에서 核沸騰으로의 遷移過程 및 傳熱面 近方에서의 氣

液 二相流의 流動狀態 등이 研究의 對象이 되고 있다.¹⁾ 이러한 沸騰曲線을 얻기 위한 實驗方法으로서는 初期段階에 白金線을 利用한 풀沸騰(pool-boiling)의 實驗²⁾을 하기도 하였으며, 대체적으로 다음의 세가지로 分類할 수 있다.

첫째는 定常狀態下에서 膜沸騰과 遷移沸騰을 實現하는 方法으로서 飽和蒸氣에 의한 傳熱管을 加熱하여 加熱用 蒸氣의 壓力를 制御함으로써 傳熱面的 溫度를 調節하는 方法이다. 둘째는 傳熱面을 高溫狀態로 하여 非定常狀態에서 冷却을 시키면서 傳熱面的 過度的 溫度變化를 記錄하여 解析하는 方法으로서, 銀球를 利用한 Stevens의 實驗³⁾, 銅球를 이용한 Veres의 實驗⁴⁾, 本 實驗과 같이 銅블록을 利用한 Groenveld의 實驗^{5), 6)} 등이 이에 속한다. 셋째는 傳熱管을 電氣的으로 直接 加熱할 경우 限界熱流束(critical heat flux)狀態⁷⁾나 傳熱面 溫度가 急上昇하여 연이어지는 冷却過程의 溫度變化를 記錄하여 이를 解析하는 方法 등이 있다. 本 研究는 熱容量이 큰 銅블록을 使用하여 비교적 긴 25~30分 정도의 時間에 걸쳐서 高溫狀態의 銅블록을 過度的으로 冷却시켜 實驗的으로 얻어지는 溫度變化를 Patanker의 TDMA⁸⁾로 數值解析하여 溫度舉動, 壁面過熱도에 따른 熱流束의 變化, 리워팅 포인트의 變化 등을 考察하여 冷却過程의 特性을 밝히고자 한다.

이 論文에서는 특히 金屬의 熱處理 및 原子爐의 冷却水 喪失事故時의 再管水 初期段階인 低 質量速度에 관한 實驗을 행하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

2.1 實驗裝置

Fig. 1은 實驗裝置의 全體 配置圖를 나타내고 있다.

이 그림에 나타난 바와같이 實驗裝置의 主要부는 實驗部, 冷却水, 循環루프, 加熱部 氣液分離器, 流量計, 凝縮器, 液貯藏탱크, 필터와 드라이어 및 溫度記錄計 등으로 構成되어 密閉루프를 形成하고 있다. 또한 凝縮器와 液

貯藏탱크 사이에 레벨 게이지를 設置하여 液體의 適正量을 監視토록 되어 있으며 眞空 펌프를 設置하여 密閉루프 안에 眞空을 시킨 다음에 實驗 液體를 주입하도록 하였다. 또한 凝縮器 및 液貯藏탱크에는 각각 별도로 設置되어 있는 冷却水 탱크에 의하여 冷却水가 供給되도록 되어 있다. 이 實驗流體는 蒸發潛熱이 적고 氣相과 液相의 密度比가 비교적 高壓의 水蒸氣와 비슷하며 常溫에서 液體狀態로서 保管이 용이한 R-113 ($C_2F_2Cl_3$)을 使用하였다. 實驗裝置를 設置한 後 壓力를 5kgf/cm^2 (게이지 壓力)에서 2時間 維持시켜 氣密 및 耐壓 實驗을 行하였고 全 實驗 루프는 グラス울 및 폴리 에틸렌을 使用하여 충분히 斷熱하였다. Photo. 1 은 實驗裝置의 全景을 보여주고 있다.

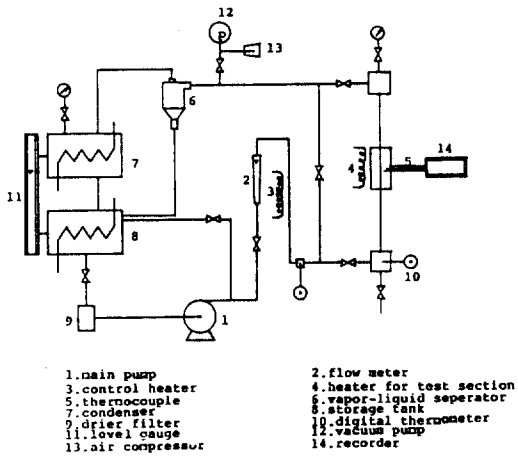


Fig. 1 schematic diagram for the experimental apparatus



Photo. 1 photo of the experimental apparatus

實驗流體인 R-113을 泵핑하기 위한 主 循環펌프는 3kw의 모타가 附着된 最大流量 $6\text{m}^3/\text{h}$ 인 循環펌프를 使用하였다.

펌프의 出口側에는 바이패스 라인을 設置하여 부자식 流量計의 눈금을 보면서 流量調節을 할 수 있게 하였다. Fig. 2는 實驗部를 나타내고 있다. 實驗部의 全 垂直높이는 1,260 mm이며 銅블록 入口 및 出口에 연결된 管은 銅블록 內徑과 同一하게 10 mm가 되도록 하였다.

銅블록 入口 및 出口, 즉 上·下部에 連結된 管은 STS 304로서 플랜지를 使用하여 銅블록과 連結하였는데 銅블록과 플랜지 사이에는 高溫에 견딜 수 있는 테프론을 使用하였다. Fig. 3은 銅블록의 設計圖面을 보이고 있다. 銅블록은 市販用으로서 길이 240mm 外徑95mm이며 銅블록의 內側에는 直徑 10mm의 구멍을 加工하여 實驗流體가 垂直方向으로 흐르게

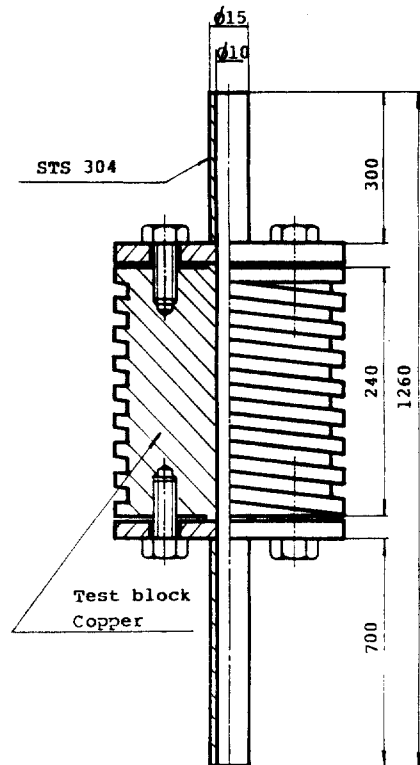


Fig. 2 Detailed diagram of the section

되어 있으며銅블록의 外側에는 피치 16mm 깊이 8mm의 四角螺線形의 홈을 加工하여 加熱用 히타를 設置했다. 加熱 히타는 캔탈선 (FeCr)으로서 耐熱 最高溫度는 1,250℃, 體積 抵抗率은 20℃에서 $142 \pm 7 \mu\Omega m$ 이며 銅블록을 設置후 測定한 加熱線의 총 抵抗은 常溫에서 28.281Ω이었다. 이 加熱線은 容量 50 kw 단권 變壓器에 連結되어 銅블록을 加熱한다.

Fig. 3는 實驗部の 外部 詳細圖로서 銅블록의 外側 홈內에 設置된 加熱用 히타의 취부 方法은 電氣爐 등의 製作에 쓰는 것과 같은 에어셀을 흡내어 등글게 발라서 固着시켜 絶緣을 한다음 그 위에 캔탈선을 連續的으로 감고 그 위에 다시 에어셀을 발라 固着시켰다. 캔탈선을 감기전에 캔탈선 돌레에 斷熱 테이프를 고르게 감아서 二重 絶緣을 시켰고 히타의 끝부분에서 電線과 連結部에는 터미널을 使用하여 高溫 加熱時의 單線을 對備하였다. 그리고 銅블록 全體는 高溫이므로 銅블록 表面에는 그라스울과 그 위에 폴리에틸렌 斷熱材를 使用하여 충분히 斷熱을 하였다. 그리고 氣液 分離器를 製作 使用하였다. 이 氣液 分離器의 성능은 氣液 二相流中 蒸氣의 流速이 8~16m/sec 일 경우 液滴의 直徑이 1.55~2.20μm 以上을 分離할 수 있는 性能을 갖고 있다.

그리고 이 氣液 分離器에 의하여 分離된 蒸氣는 凝縮器로 보내져 凝縮되어 液貯藏 탱크로 보내지며 液體는 液貯藏 탱크에 바로 流入하여 冷却水에 의하여 필요한 溫度를 調節할 수 있도록 되어있다. 實驗部の 溫度測定을 위한 銅블록內에 熱電對의 軸方向 位置는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 中心部에 3個의 熱電對가 設置되어 있고 깊이 方向의 熱電對의 詳細한 距離는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 測定用 熱電對인 (1), (2), (3)番의 熱電對는 流路表面으로부터 0.99, 2.00, 2.99 mm 이다. 따라서 銅블록 外徑으로부터 구멍깊이는 各各 41.51, 40.50, 39.51 mm 이다. 또한 모든 熱電對의 設置用 구멍은 모두 1mm로 精密加工하였으며 加工後 생기는 구멍끝에 V자형 加工의 不安全部도 別途의 精密加工을 통하여 斷

面을 반듯한 狀態로 함으로써 C·A 熱電對 (chromel-alumel thermo-cuple)를 구멍에 密着시켜 測定誤差를 最小化하도록 하였다.

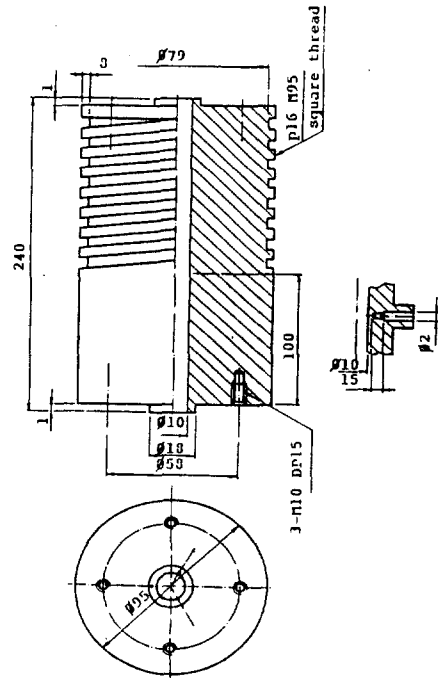


Fig. 3 Structure of the copper block

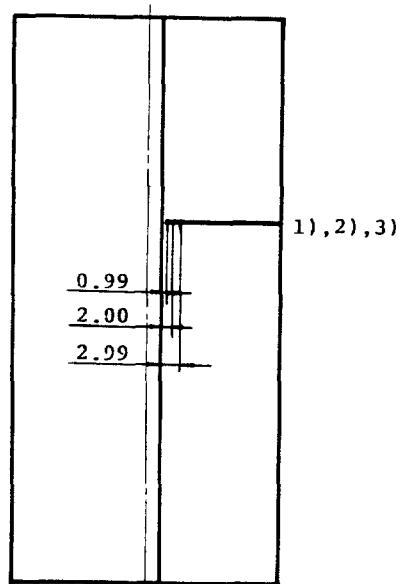


Fig. 4 Depth-directional position of thermocouples in the copper block

2.2 實驗方法 및 條件

本 實驗은 實驗部 入口에서의 入口溫도와 入口壓力를 一定히 維持시키면서 管壁의 溫度가 250℃에 이르면 電源을 차단하고 過度的 冷却過程에 突入하게 된다.

限界熱流束에 가깝게 加熱量이 커지거나 高溫面의 빠른 冷却 期間中에는 實驗裝置 全體系內의 壓力이 심하게 脈動하게 되며 따라서 流量도 심하게 波動을 하게된다. 그러므로 이러한 流體力學的인 脈動을 抑制하기 위하여는 實驗部の 入·出口밸브 및 主 循環펌프의 出口에 있는 밸브를 調節하여 最大限으로 脈動을 抑制시켜 壓力 및 質量速度가 一定한 狀態에서 實驗이 遂行되도록 하였다.

특히 過度的으로 高溫의 發熱內管을 急冷却시킬때는 發生蒸氣의 體積이 爆發的으로 增加되므로 過度的인 冷却 實驗의 開始 直前に 壓縮機內의 冷却水量을 增加시켜 壓力의 脈動을 制御하였다. 熱容量이 큰 銅블록의 過度的 冷却 實驗에서는 傳熱面의 熱容量이 크기 때문에 冷却에 所要되는 時間이 30~40分 정도이다. 그러므로 이러한 冷却實驗은 어느정도 準定常 狀態에서의 冷却過程이라고 할 수 있다.

實驗方法으로서는 主 循環펌프를 지나 調節用 加熱器를 통과한 實驗流體는 液貯藏탱크로 바이패스되면서 入口溫도와 入口壓力를 所定の 狀態로 維持시키고 同時에 銅블록 內로는 實驗流體가 통과하지 않으므로 거의 斷熱된 狀態에서 銅블록을 加熱하게 된다. 이렇게 하여 銅블록의 溫度를 250℃ 정도로 加熱한 後 電源을 遮斷시키면서 바이패스 밸브를 잠그고 流路를 實驗部로 거치도록 하면서 本 實驗에 들어가서 溫度 記錄計에 의하여 冷却過程이 記錄되도록 한다. 그리고 溫度測定에 있어서는 Fig. 4에서 나타난 바와같이 (1), (2) 및 (3)熱電對의 溫度를 測定하기 위해서 펜 溫度記錄計를 利用하였다. 實驗部の 入口壓力은 約2.7 kgf/cm² abs로 이에 相當하는 飽和溫度는 78.81℃이며 入口의 過冷液 溫度는 30~35℃의 範圍에서 質量速度를 變化시키면서 實驗을 行하였다. 質量速度는 80.85, 134.75, 188.65

kg/m² sec의 3種類에 대한 實驗을 各各 遂行하였다.

3. 數值解析

銅블록을 利用한 過度的 冷却過程 中에 傳熱特性을 알아보기 위하여 먼저 熱電對에 의한 傳熱面의 表面溫度 및 熱流束의 時間的 變化를 計算하였고, 좌표계는 원통좌표계를 취하였다. 따라서 本 實驗과 같이 內部 溫度를 測定하여 전열표면의 온도로 해석하는 것을 열전도 역문제라 한다. 이와 같은 熱傳導 逆問題의 解析을 위하여 前述한 바와같이 Patanker의 TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm)를 利用하였다.

圓筒座標系에 있어서 非發熱의 境遇 半徑方向 1次元 熱傳導 方程式은 式(1)과 같다.

$$\rho_w c_w \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_w}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 5에서와 같이 銅블록 內를 等間隔으로 n個의 節點과 制御 體積(control volume)의 境界를 정하고, 式(1)을 時間 및 距離에 대하여 Fig. 5의 i節點 周圍의 콘트롤體積에 대하여 重積分을 한다. 이 積分에서 使用된 加重因子(weighting factor)의 選擇은 陰解法(Crank Nicolson Method)으로 擇하였다. 이는 陰函數法이 샘플링 時間의 크기에 아무런 制約條件이 없다는 이유이다.⁹⁾

이와같은 方法으로 式(1)을 利用하면 式(2)와 같은 離散化 方程式(discretization equation)이 구해진다.

$$\begin{aligned} a_i T_i^1 &= b_i T_{i+1}^1 + c_i T_{i-1}^1 + d_i \\ a_i &= (k_w r_{i+1}^1 / \delta r_i) + (k_w r_i / \delta r_{i-1}) + \rho_w c_w r_i \Delta r_i / \Delta t \\ b_i &= k_w r_{i+1} / \delta r_i \\ c_i &= k_w r_{i+1} / \delta r_{i-1} \\ d_i &= \rho_w c_w r_i \Delta r_i T_i^0 / \Delta t \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

또한 i = 1(境界面)에서 離散化 方程式을 구하면 式(3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \{(k_w r_2 / \delta r_1) + (\rho_w c_w r_1 \Delta r_1 / \Delta t)\} T_1^i \\ & = (k_w r_2 / \delta r_1) T_2^i + 0 \times T_0^i + [(\rho_w c_w r_1 \Delta r_1 / \Delta t) - \{(k_w r_1 / \delta r_0) \times (T_1^i - T_0^i)\}] \dots (3) \end{aligned}$$

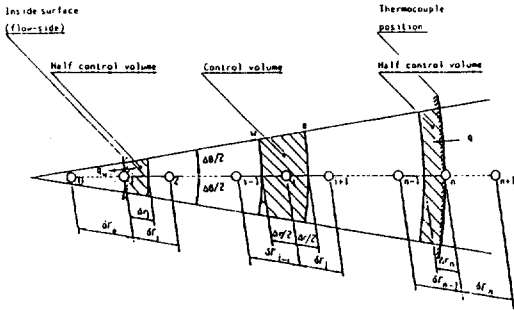


Fig. 5 Nodal points inside copper block

式(3)의 T_0^i 는 시간 $t + \Delta t$ 에서 $i = 1$ 節點의 外側에 있는 假想節點이 되고 右邊의 괄호안의 값을 r 으로 나눈 값은 銅블록으로부터 實驗 流體로의 시간 t 에서 $t + \Delta t$ 사이의 表面 熱流束을 意味한다. 이러한 非定常的인 熱傳導 逆問題의 解析에 필요한 境界條件은 圓微分 方程式에서 알 수 있는바와 같이 一般적으로 2個의 境界條件이 要求되나, 逆問題의 取扱에서는 Fig. 5에서와 같이 熱電對에 의하여 測定하는 n 節點의 溫度와 流體側 表面 즉 $i = 1$ 節點에서의 未知의 Δt 時間 동안의 平均的 熱流束이 境界條件이 된다. 이와 같이 생각하면 逆問題의 計算에서는 反復計算이 必然적으로 要求되고, 溫度分布가 구하여지면 $i = 1$ 節點 近方의 溫度 勾配로부터 流體로의 Δt 時間 동안의 平均的인 熱流束을 구할 수 있다. 實際의 計算에 있어서는 (3)熱電對 즉, 流路表面에서 2.99mm 位置에 있는 熱電對의 非定常狀態의 溫度變化로부터 數值計算을 할 境遇 各節點間의 距離는 0.5mm의 等間隔으로 하였으며, 實驗用 銅블록의 熱傳導 率은 $k = 320.0$ kcal/mh $^{\circ}\text{C}$, 密度는 $\rho = 8,900$ kg/m 3 , 比熱은 $c = 0.1$ kcal/kg $^{\circ}\text{C}$ 이다.

4. 結果 및 考察

4.1 實驗結果 및 考察

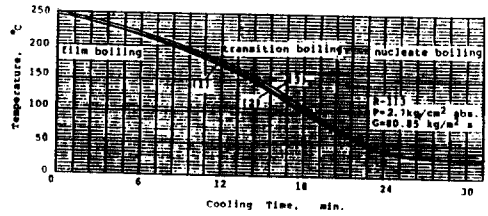


Fig. 6 Temperature histories measured in the copper block

Fig. 6은 流體側 內表面으로부터 0.99 mm, 2.0mm, 2.99mm에 位置하는 熱電對에 의한 銅블록 內部의 非定常狀態의 溫度變化를 測定한 結果이다. Fig. 6의 縱軸은 溫度를 나타내고 있으며 最小 눈금은 5 $^{\circ}\text{C}$ 이고 記錄紙 速度를 500mm/h로 하였기 때문에 冷却時間을 나타내고 있는 橫軸의 最小 눈금은 1.2分(min)이다. Fig. 6에서 보여주는 것처럼 冷却에 所 要된 時間은 35min 정도이고, 따라서 이러한 冷却實驗은 準定常狀態의 冷却過程이라 생각된다. Fig. 6에서 알 수 있는 바와같이 3個의 熱電對에 의해서 記錄된 結果는 銅블록의 冷却 速度가 熱電對의 變化와 더불어 變化하며, 初期에는 膜沸騰의 狀態와 같이 서서히 冷却하다가 다시 冷却速度가 빨라지는 遷移沸騰의 狀態로 되고 또다시 冷却速度가 느려지는 核沸騰 狀態의 순으로 冷却曲線을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 實驗의 境遇 初期의 流體의 形態는 氣泡流(bubbly flow)로 判斷되며, 冷却이 進行됨에 따라 흐름狀態도 슬러그流(slug flow)를 거쳐 環狀噴霧流(annular-dispersed flow)까지 形態가 變化되어감을 豫測할 수 있다. Fig. 6에서의 (1), (2) 및 (3)은 流體側 內表面으로부터 0.99mm, 2.0 mm, 및 2.99mm에 位置하는 熱電對에 의한 測定 結果를 나타내고 있으며 數值解析用 熱電對는 (3)의 測定結果를 利用하였다.

4.2 數值解析 結果 및 考察

Fig. 6에서 測定結果를 利用한 數值解析의 方法으로는 앞에서 記述한 圓筒座標系에서 半徑方向 1次元熱傳導 逆問題의 TDMA에 의하여 計算을 하고 그 結果로써 그래프를 作하였다.

이러한 熱傳導 逆問題의 解析에 필요한 銅블록 內部의 熱電對는 하나만으로 충분하다. 따라서 本 研究에서는 流體側 表面으로부터 2.99 mm 位置에 있는 (3)番 熱電對를 數值解析用으로 選擇하였다. 또한 實驗條件으로 選擇한 質量速度 80.85, 134.75, 188.65kg/m²s 의 3가지 境遇 數值解析의 初期溫度를 比較할 수 있도록 하기 위하여 245℃로 統一하였다. Fig. 7은 熱電達係數의 時間的 變化를 나타낸 結果이다. Fig. 7은 膜沸騰狀態에서 核沸騰의 狀態로 遷移하기 始作하는 리벳팅點을 결정, 이해하기 위한 그림이다.

리벳팅點 또는 極小熱流束點에 관하여는 過去로부터 高溫面의 熱處理, 原子爐의 安全性, 蒸發溫度가 낮은 蒸發器의 設計 등과 關聯하여 많은 理論的, 實驗的 研究가 行하여져 있다. 먼저, Spiegler¹⁰⁾은 van der Waals 式으로부터 熱力學的인 蒸氣의 存在 可能領域을 考察하여, 리벳팅點에 해당하는 過熱度에 관하여 式(4)를 提示하고 이를 Spiegler는 foam limit 라고 부르고 있다.

$$(T_{min}/T_c) = (27/32) \dots\dots\dots (4)$$

常識에 있어서 T_{min} 은 極小熱流束點에서의 傳熱面溫度를, T_c 는 流體의 臨界溫度를 의미한다. Simon¹¹⁾은 實驗을 통하여 常識을 臨界壓力에 대하여 實驗的으로 修正을 가하여 式(5)을 提示하고 있다.

$$(T_{min}/T_c) = 0.13(p/p_c) + (27/32) \dots (5)$$

그리고, Berenson¹²⁾은 傳熱面上에 形成되는 蒸氣膜의 流體力學的 安定性에 관한 考察로부터

$$\Delta T_{min} = 0.127(\rho_g H_{fg}/k_g)[g\{\rho_1 - \rho_g\} / \rho_1 + \rho_g]^{(2/3)} \times \{\sigma/g(\rho_1 - \rho_g)\}^{(1/2)} \times \{\mu_g/g(\rho_1 - \rho_g)\}^{(1/3)} \dots\dots\dots (6)$$

을 提示하고 있다. 또한 Henry¹³⁾는 Berenson의 모델에 基礎하여 高溫面에 液이 接觸하는 瞬間에 있어서의 非正常熱傳導의 問題를 考慮하여, 傳熱面과 流體의 物性值의 影響을 考慮한 다음式을 提示하였다.

$$\begin{aligned} & ((T_{min} - T_{min}') / (T_{min}' - T_i)) \\ & = 0.42 [\sqrt{\{(k_1 \rho_1 C_{p1}) / (k_w \rho_w C_w)\}} \\ & \times (H_{fg} / C_w \Delta T_{min})]^{0.6} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

이상의 式들에서도 나타난 바와같이 리벳팅點에서의 壁面過熱度는 여러요소에 의하여 좌우된다. 또한 Ueda¹⁴⁾의 實驗結果에서는 리벳팅點에서의 壁面過熱度가 약 120K 정도로 나타남을 指摘하여 둔다.

初期狀態의 冷却이 始作됨과 아울러 熱傳達係數의 값이 1000kcal/m²h℃ 以下の 적은 값에서 낮은 기울기로 上昇하다가 約 11分 近處에서 急上昇함을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 7에서 表示한 點을 리벳팅點이라 決定하였다. Fig. 7에서 質量速度가 적을수록 膜沸騰狀態에서 核沸騰狀態로의 遷移가 늦게 일어남을 알 수 있다. 이러한 리벳팅點이 時間的 豫測은 原子爐의 再管水인 境遇나 金屬의 表面熱處理의 境遇 매우 重要한 事項이 된다. 왜냐하면 金屬의 表面熱處理의 境遇 時間的인 變化에 따른 熱傳達率의 값을 豫測할 수 있으면, 그에 따른 金屬의 組織을 豫測할 수 있기 때문이다. 다시 말하면 이와 같은 傳熱工學的인 條件들을 逆으로 制御할 수 있다면 熱處理의 全過程을 逆으로 制御할 수 있는 프로그램의 開發이 可能하다는 結果가 된다는 것이다. 또한 이 質量速度의 境遇 리벳팅點의 熱傳達係數의 값이 모두 約 1000kcal/m²h℃로서 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 冷却過程에 있어서 熱流束의 變化를 나타내고 있다. 冷却初期에는 8×10⁴~10⁵ kcal/m²h의 값을 維持하다가 約 10分 後부터 熱流束의 增加率이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 6의 測定結果를 상술한 數值計算에 의하여 나온 結果를 沸騰曲線의 形態로 정리한 結果이다.

Fig. 9에서 나타나듯이 初期狀態인 傳熱面의 溫度가 高溫인 境遇에는 熱流束이 7×10⁴ kcal/m²h 以下인 狀態에서 점차로 增加함을 알 수 있다. 이와 같이 初期의 熱流束이 적은 이유는 膜沸騰의 特性인 氣泡膜이 形成되어 熱傳達率이 極도로 低下된 狀態인 輻射에 의한

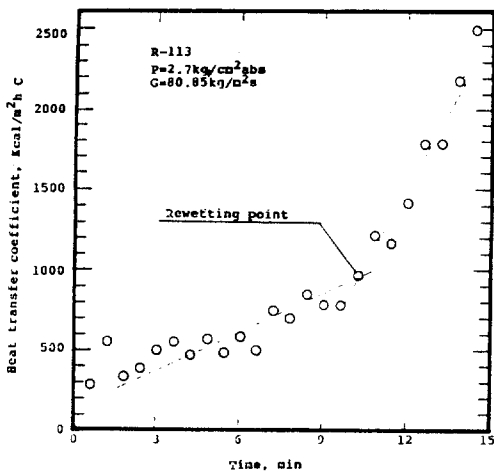


Fig. 7 Heat transfer coefficients vs. cooling time

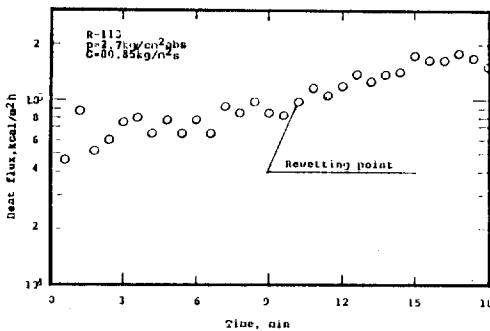


Fig. 8 Numerical calculation results of heat fluxes

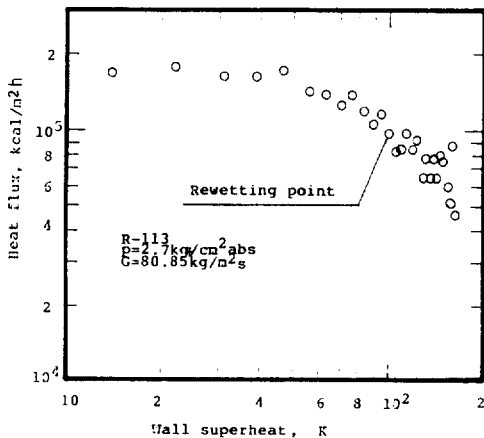


Fig. 9 Boiling curve ($G = 80.85 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$)

傳熱現象임을 쉽게 짐작할 수 있다. 또한 壁面過熱도가 約 100°C 近方에서 熱流束이 빠른 速度로 增加함을 알 수 있다.

이 沸騰曲線은 初期의 膜沸騰領域과 遷移沸騰領域에 걸쳐 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9에서 보여 주듯이 리벳팅點的 壁面過熱도가 모두 約 100°C 로 나타내고 있으며, 이때의 表面熱流束이 다같이 $10^5 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$ 로 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 質量流量 80.85, 134.75, 185.65 $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ 인 세 경우의 沸騰曲線을 함께 보여주고 있다.

이 그림에서 보여주는 것처럼 리벳팅點은 세 가지 境遇 모두 비슷한 壁面過熱도와 熱流束을 나타내고 있으나 壁面過熱도가 $50 \sim 80^\circ\text{C}$ 附近에서는 質量流量의 增加에 따라 熱流束이 增加함을 알 수 있다. 이는 리벳팅點, 즉 液體가 傳熱面に 닿기 始作한 以後 質量流量이 熱流束에 큰 影響을 미치지 때문이라 생각된다.

Fig. 11는 入口의 液體溫度가 約 30°C , 質量流量이 約 $171 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 로서 本 實驗과 類似한 銅블록을 利用한 Jung¹⁵⁾의 實驗結果와 比較한 그림이다.

實驗條件은 質量流量(各各 171, 188.65 $\text{kg/m}^2 \text{ s}$)과 入口의 液體溫度(各各 30°C , 32.5°C) 비슷하며 實驗壓力이(1.1, 2.7 $\text{kg/cm}^2 \text{ abs}$)이다. 이들 두 實驗結果를 比較해 보면 리벳팅點의 壁面過熱도가 Jung¹⁵⁾의 實驗에서는 112.3°C , 本 實驗結果에서는 104°C 를 나타내고 있으며

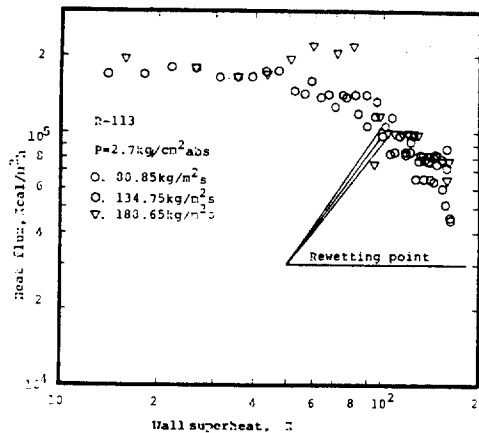


Fig. 10 Boiling curve

이때의 壁面溫度는 各各 約 162°C와 182.8°C를 나타내고 있다. 이 둘의 實驗結果는 壓力이 클수록 리벳팅點의 過熱度는 낮게 나타나지만 實際의 壁面溫度는 더 높게 나타나고 있으며 그 原因은 壓力差에서 나타난다고 생각된다. 다시말해서 壓力이 클수록 壁面過熱度가 더 적은 狀態에서 液象이 傳熱面에 接近하는 現象으로 理解할 수 있다. Fig.12은 本 實驗을 Jung¹⁰⁾의 實驗結果에서 나타난 리벳팅

點을 比較한 그림이다. Jung¹⁵⁾의 實驗結果에서는 平均 壁面過熱度가 124.2°C이며 質量流量에 따라 큰 變化가 없음을 알 수 있다. 또한 本 實驗의 結果도 平均壁面過熱度가 102.3°C로서 質量流量에 따른 變化가 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 그러나 壓力이 큰 境遇가 적은 境遇보다 리벳팅點의 壁面過熱度가 낮다는 것을 보여주고 있다. 이는 質量流量 보다 壓力이 리벳팅點에 더 큰 影響을 미치는 要素라고 생각된다.

5. 結 論

強制對流系에 있어서 實驗流體 R-113에 대한 熱容量이 큰 銅블록을 利用한 過度的 冷却 實驗의 結果에서 얻은 溫度를 Patanker의 TDMA에 의하여 數值解析하고, 檢討한 結果에서 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 傳熱面表面으로부터 0.99, 2.00, 2.99mm 떨어진 熱電對에 의하여 冷却過程에서의 溫度 變化를 測定한 結果, 溫度의 變化가 比較的 單調로왔으며 膜沸騰, 遷移沸騰, 核沸騰으로 이루어지는 전형적인 溫度變化曲線을 나타내고 있었다.

2. 銅블록內에 設置한 熱電對에 의하여 測定한 銅블록 內部的 溫度變化로부터 半徑方向 1次元熱傳導 逆問題를 TDMA로 數值解析하여 流體側表面의 熱流束 및 表面溫度의 變化를 구하고 이를 沸騰曲線으로 表現할 수 있었다.

3. 膜沸騰에서 核沸騰으로의 遷移하기 始作하는 리벳팅點은 質量速度와 無關하였으며 리벳팅點의 壁面過熱度는 約 100°C 정도로 나타남을 알 수 있었다.

4. 리벳팅點의 熱流束은 約 10⁶ kcal/m²h로 나타남을 알 수 있었고, 이 때의 熱傳達係數도 質量速度와 無關하게 1000 kcal/m²h°C 정도로 나타남을 알 수 있었다.

5. 壓力이 增加할수록 壁面過熱度는 減少하지만 壁面溫度는 더 높은 狀態에서 리벳팅點이 나타남을 알 수 있었다.

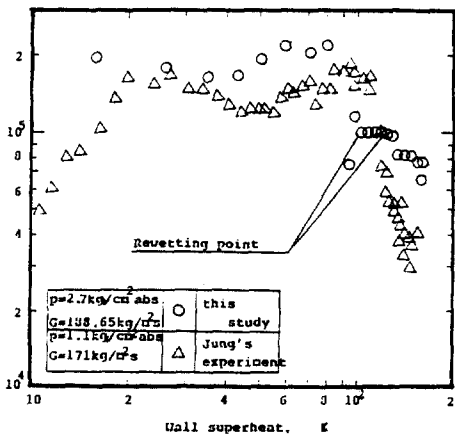
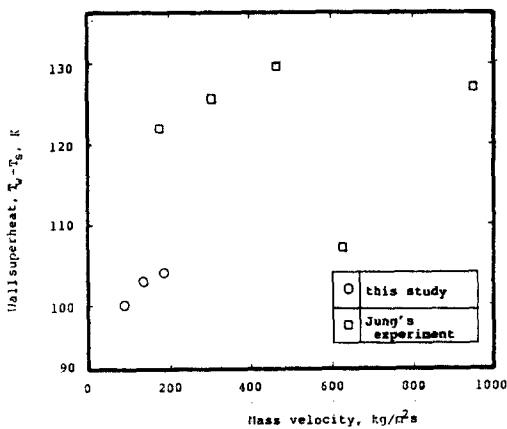


Fig. 11 Boiling curve



Mass velocity kg/m ² sec	80.65	134.7	133.63	171.2	301.3	463.9	626.6	951.8
Rewetting point K	100.0	103.9	104.0	122.1	125.5	129.6	117.0	127.1

Fig. 12 Wall superheats of rewetting points vs. mass velocities

參 考 文 獻

1. 김경근, “기액이상류”, 제19장 막비등과 리웨팅, 태화출판사, pp. 333~347, 1986.
2. E.A. Fardner and R.L. Scoria, “Heat transfer to water boiling under pressure”, *Trans. of the ASME*, 79-4, pp. 369-384, 1968.
3. J.W. Stevens and L.C. Witte, “Destabilization of vapor film around spheres”, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 16-5, pp. 669-678, 1973.
4. D.R. Veres and L.W. Florschuetz, “A comparison of transient and steady-state pooling-boiling data obtained using same heating surface”, *Trans. of the ASME*, 21, pp. 229-232, 1971.
5. 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 Transfer*, 21, pp. 664-665, 1978.
6. D.C. Groeneveld and J.C. Stewart, “The minimum film boiling temperature for water during film boiling collapse”, 7th *Int. Heat Transfer Conf.*, Munich, FB37, pp. 393-398, 1982.
7. 김경근, “과냉 비등류의 한계열유속과 막비등친이”, 동경대학 공학부 기계공학과, 박사학위청구논문, 1985.
8. S.V. Patanker, “Numerical method in heat transfer”, 7th *Int. Heat Transfer Conf.*, 1Vol. 1, RK3, pp. 33-90, 1982.
9. Crank J. and P. Nicolson, “A practical method for numerical evaluation of solutions of P.D.E. of the heat conduction type”, *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 43, pp. 50-67, 1947.
10. P. Spiegler, J. Hopenfeld, 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.
11. F.F. Simon, S.S. Papell and R.W. Simon-eau: Minimum film boiling heat flux in vertical flow of liquid nitrogen, NASA TN D-4307, 1967.
12. J.P. Berenson: Film-boiling heat transfer from a horizontal surface, *Transfer of the ASME*, Ser. C, 83, 351-358, 1961.
13. R.E. Henry: A correlation for the minimum film boiling heat transfer, UCLA Rept. Ser., 70-138, 81-90, 1974.
14. T. Ueda, M. Koyanagi 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, 1198, 1983.
15. 정대인, “강제대류계에 있어서 R-113을 이용한 고온면의 냉각과정에 관한 연구” 한국 해양대학 박용기관학과, 박사학위청구논문, 1986.