

過冷沸騰流에 있어서 동블록을 이용한 過渡的 冷却實驗

鄭大仁* · 金京根** · 金明煥**

Transient Cooling Experiments with a Copper Block in a Subcooled Flow Boiling System

D. I. Jung, K. K. Kim, M. H. Kim

Abstract

When the wall temperature is very high, a stable vapor film covers the heat transfer surface. The vapor film creates a strong thermal resistance when heat is transferred to the liquid though it.

This phenomenon, called "film boiling," is very important in the heat treatment of metals, the design of cryogenic heat exchangers, and the emergency cooling of nuclear reactors. In the practical engineering problems of the transient cooling process of a high temperature wall, the wall temperature history, the variation of the heat transfer coefficients, and the wall superheat at the rewetting points, are the main areas of concern. These three areas are influenced in a complex fashion such factors as the initial wall temperature, the physical properties of both the wall and the coolant, the fluid temperature, and the flow state. Therefore many kinds of specialized experiments are necessary in the creation of precise thermal design.

The object 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 block was 240mm high and 79mm O.D.. The coolant flowed through the center of a 10mm diameter channel in the copper block. In the copper block, three sheathed thermocouples were placed in a line perpendicular to the flow. These thermocouples were used to take measurements of the temperature histories of the copper block.

使用記號

c : 比熱	kcal/kg °C	h : 熱傳導係數	kcal/m hr °C
G : 質量速度	kg/m ² sec	p : 壓力	kg/cm ² , MPa
h : 熱傳達率	kcal/m ² hr °C	q : 熱流束	kcal/m ² hr
		r : 半徑	m
		T : 溫度	°C

*正會員, 韓國海洋大學 大學院

**正會員, 韓國海洋大學

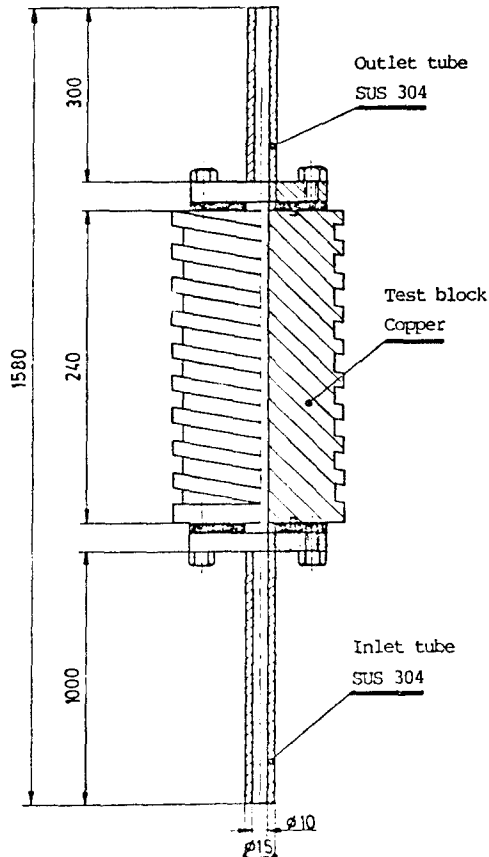


Fig.2-1 Detailed diagram of test section

각형 홈을 따라서 감고, 감기 前과 後에는 홈내에 마그네시아(MgO)를 利用하여 電氣的 絶緣을 하였다. 銅블록 内에는 過渡的 冷却過程中的 溫度變化를 記錄하기 위하여 높이방향 3곳에 熱電對를 삽입하였으며, 특히 測定用인 높이방향의 中心部에는 銅블록내 R-113이 흐르는 流路의 表面으로부터 1.05, 1.70, 3.00mm의 위치에 熱電對를 삽입하였다. 熱電對 삽입용 구멍은 內徑이 1mm의 狀態로 精密加工을 하였으며, 이 구멍에 씨스형 C-A熱電對를 타이트하게 삽입하도 록 하였다.

實驗部 入口에서의 壓力은 1.1kg/cm² ab. (0.108MPa)로 維持하였으며, 이에 相當하는 R-113의 飽和溫度는 49.37°C이다. 그리고 冷却材의 實驗部 入口溫度는 29.5~30.5°C로 一定히 維持하며, 質量速度가 171.2, 301.3, 463.9, 626.6,

951.8kg/cm² sec의 5가지 경우에 대하여 實驗을 수행하였다. 이러한 質量速度에 對한 實驗部 入口에서의 液相의 平均流速은 11.34~63.03cm/sec의 範圍에 相當한다.

實驗의 方法으로서는 上述한 바와 같이 實驗部 入口에서의 流量, 溫度 및 壓力을 維持하면서 實驗流體를 實驗部로 通過시키지 않고 바이패스 시키면서 加熱하는 동안, 實驗用 銅블록을 거의 斷熱狀態에서 加熱하여 銅블록이 250°C 정도에 到達하면, 實驗部에 實驗流體를 通하게 하여 過渡的 冷却實驗을 遂行하는 것이다. 이러한 冷却期間 동안 前述한 바와 같이 銅블록 길이방향의 中心部에 設置된 3개의 熱電對에 의하여 銅블록내의 溫度變化를 記錄하였다.

3. 數值計算

前의 報告에서는 傳熱面의 두께가 불과 0.5mm 인 파이프이었고 曲率의 影響을 無視하고서 直交座標系의 1次元 熱傳導逆問題를 취급하였다. 그러나, 銅블록의 實驗에 있어서는 曲率의 影響이 크므로 圓筒座標系에서의 非定常熱傳導에 關한 數值計算을 必要로 한다.

이 경우에도 熱傳導逆問題를 取扱함으로써 熱電對에 의하여 銅블록 内部에서 測定한 溫度變化로부터 流體側 表面의 溫度 및 熱流束의 變化를 計算할 수 있다.

數值計算의 方法으로서는 Patantar⁶⁾에 의한 TDMA를 利用하여 熱傳導逆問題를 取扱하였다. 그림(3.1)과 같은 半徑方向 1次元系에 있어 發熱하지 않는 경우의 熱傳導方程式은,

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

이 式을 時間 및 거리에 對하여 그림(3.1)의 i節點 周圍의 콘트롤 볼륨에 對하여 重積分을 한다. 이 積分過程에 必要로 하는 加重因子(weighting factor)에 관하여서는 前의 報告에서 詳述한 바와 같은 이유로 陰解法을 도입하였다. 이렇게 하여 直交座標系에서와 같은 요령⁷⁾으로 上式을 離散化시키면, i節點 周圍의 離散化方程式은,

$$a_i T_i^1 = b_i T_{i+1}^1 + c_i T_{i-1}^1 + d_i$$

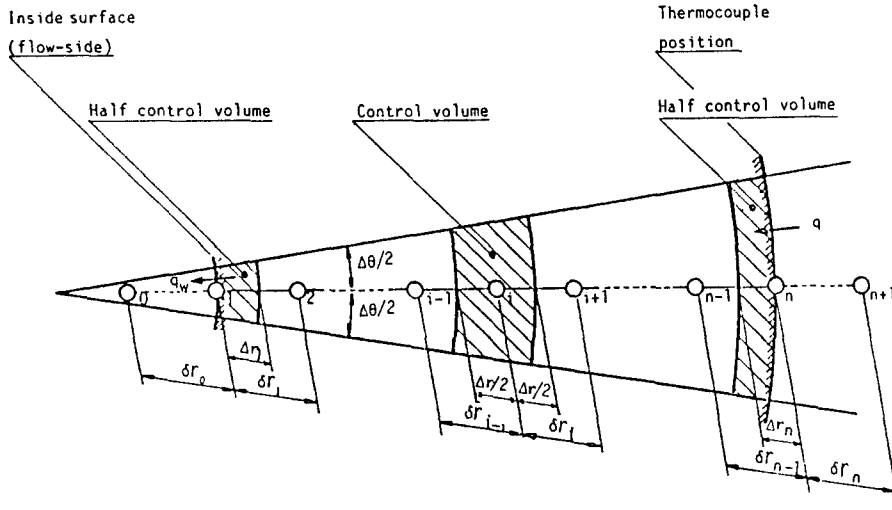


Fig.3-1 Nodal point and control volume for the cylindrical coordinate situation

$$\begin{aligned}
 a_i &= \frac{k_w \gamma_{i+1}}{\delta_{ri}} + \frac{k_w \gamma_i}{\delta_{ri-1}} + \rho_w c_w \gamma_i \Delta \gamma_i / \Delta t \\
 b_i &= k_w \gamma_{i+1} / \delta_{ri} \\
 c_i &= k_w \gamma_i / \delta_{ri-1} \\
 d_i &= \rho_w c_w \gamma_i \Delta \gamma_i T_i^0 / \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

다음의 이 式의 解析方法은 前의 解析方法⁵⁾과 同一하다. 단 圓筒座標系라는 座標系의 相異에서 發生되는 점에 關하여 細心한 注意를 할 必要가 있다.

이러한 非定常熱傳導逆問題의 解析에 必要한 境界條件은 原微分方程式에서 알 수 있는 바와 같이 一般的으로 두 개의 境界條件이 要求되나, 逆問題의 取扱에서는 例를 들어 그림(3.1)과 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 t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 必然的으로 必要하게 되며, 溫度分布가 求하여 지면 i=1節點 近傍의 溫度勾配로부터 流體의 Δt時間동안의 平均的인 熱流束을 求할 수 있다.

4. 實驗結果

그림(4.1)에 銅블록내 溫度變化의 測定結果의 한 例를 나타낸다. 이 그림의 橫軸은 經過時間을 나타내고, 縱軸은 溫度를 나타낸다. 測定의 初期區間은 加熱期間으로서 거의 斷熱狀態에

서 銅블록을 所定의 溫度까지 斷熱한 다음 加熱電源을 遮斷하고, 實驗區間인 冷却期間 동안의 溫度를 記錄하도록 하였다. 그리고, 3개의 熱電對에 의한 記錄에 있어서 溫度 및 時間軸은 편의상 서로 어긋나게 記錄하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 銅블록의 冷却速度는 傳熱面의 溫度變化와 더불어 變化하여, 初期의 膜沸騰狀態에서는 冷却速度가 느리다가 차츰 빨라지고 다시 冷却速度가 減少하는 典型的인 溫度變化狀態를 보이고 있다.

그림(4.2)는 3節에서 記述한 바와 같은 非定常熱傳導逆問題의 數值計算方法에 의하여 質量速度가 171kg/m²sec의 경우에 對하여 計算한 流體側 表面의 熱流束과 表面溫度의 時間的인 舉動을 나타내고 있다. 이 計算에 있어서 實際로 使用한 銅블록내의 溫度變化는 流路의 表面으로부터 3.00mm 떨어진 곳에 設置되어 있는 #4 熱電對에 의한 記錄의 結果를 使用하였으며 同一한 實驗條件에서 #3 熱電對에 의하여 解析한 結果와는 거의 차이를 보이지 않았다. 단, 表面으로부터 1.05mm 떨어진 곳에 設置한 #2 熱電對에 의한 溫度記錄結果로부터의 解析은 상당한 計算結果의 誤差를 가져 왔으나 이는 熱傳導率이 좋은 銅블록에 있어서 流路의 表面으로부터 거리가 매우 가까움에 비하여, 熱電對를 감싸고 있는 STS 304 管의 影響에 의한 測定의 誤

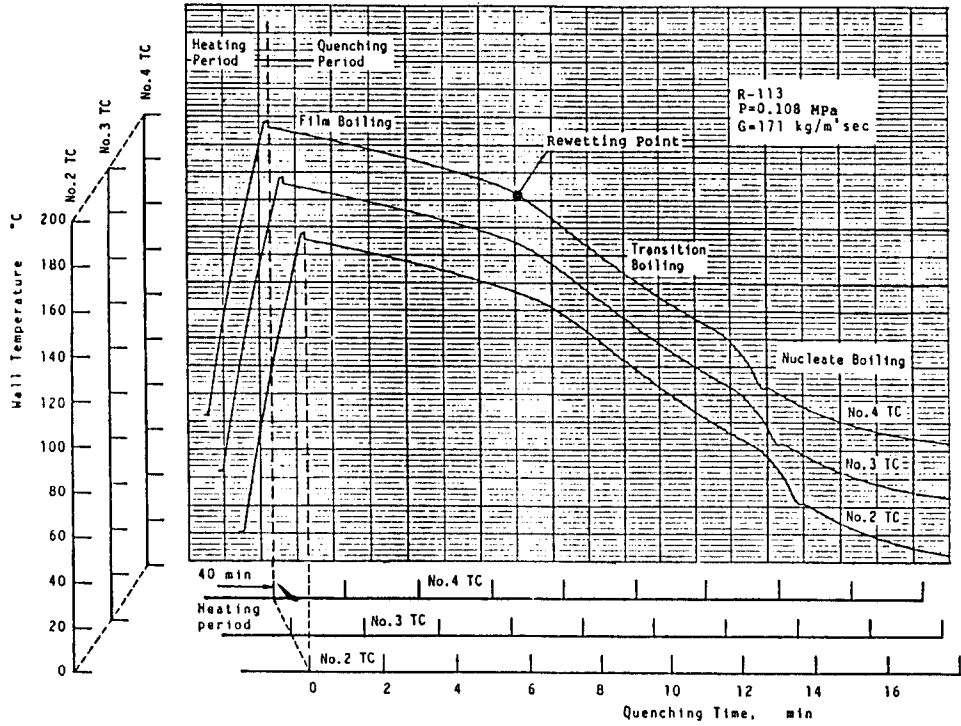


Fig.4-1 The measured wall temperature history during the quenching process of test block

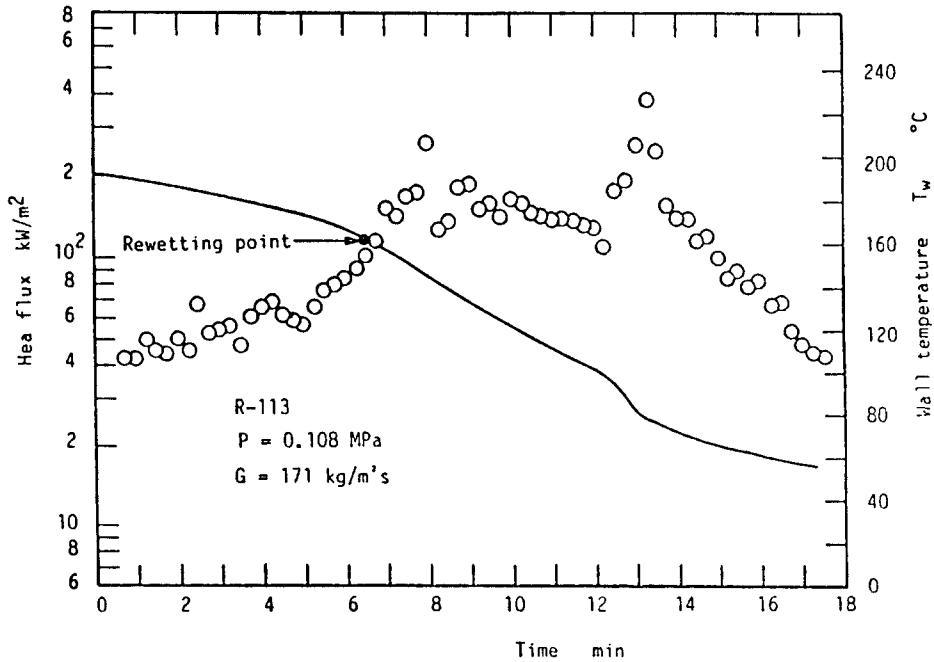


Fig.4-2 The numerical calculation results of the surface heat fluxes and the surface temperature variation

차에 起因한다고 생각한다. 그림(4.2)에서의 表面溫度의 變化樣相은 앞서 銅블록내부에서 測定한 그림(4.1)과 같은 傾向을 보이고 있으며, 이에 따라서 表面熱流束도 이에 相當하는 變動을 하고 있음을 알 수 있다.

그림(4.3)은 數值計算을 通하여 上述한 그림(4.2)와 같은 全實驗條件에 對하여 구한 計算結果를 沸騰曲線의 形態로서 나타낸 것이다. 그림의 橫軸은 壁面過熱度(wall superheat)로서, 飽和溫度를 T_s 라고 할 때 다음 式과 같은 定義된다.

$$\Delta T_s = T_w - T_s \quad (4.1)$$

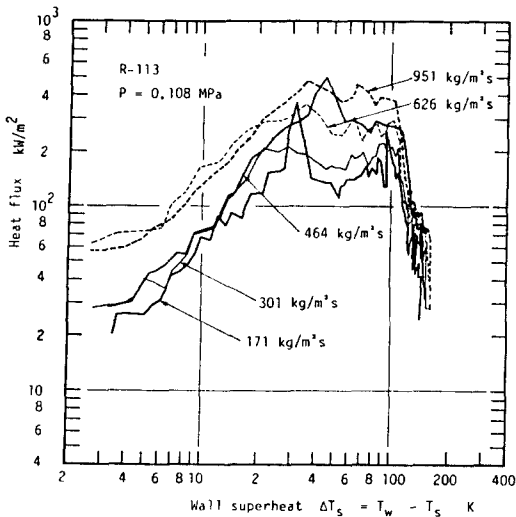


Fig.4-3 Boiling curves

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 220°C 程度 高溫面을 實驗流體로서 冷却하는 過渡의 冷却過程은 典型的인 膜沸騰, 遷移沸騰 그리고 核沸騰 등의 狀態를 經유하면서 冷却이 進行된다는 것을 나타내고 있다. 그리고 質量速度가 增加함에 따라서 3가지의 모든 沸騰領域에 있어서 熱流束이 增加하며, 이러한 傾向은 質量速度가 작은 範圍에서 더욱 뚜렷함을 알 수 있다.

그림(4.4)는 그림(4.2) 또는 그림(4.3)으로부터 다음과 같이 定義되는 熱傳達率값의 時間的인 變化를 나타낸다.

$$h = q / (T_w - T_s) \quad (4.2)$$

上式에 있어서 流體側의 代表溫度로서는, 中心部의 流體溫度가 물론 過冷의 狀態이지만 傳熱

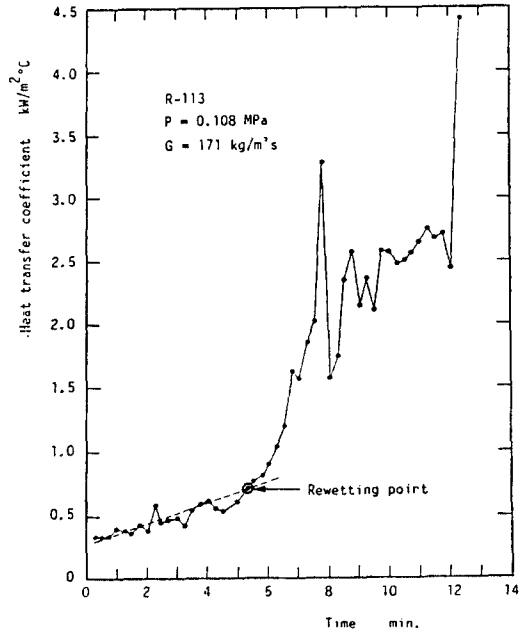


Fig.4-4 The variations of heat transfer coefficients

面 表面에서의 活潑한 沸騰에 의하여 飽和 또는 過熱狀態의 蒸氣가 存在하므로, 一般적으로 飽和溫度 T_s 를 취하는 것이 보통이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 먼저 膜沸騰領域에서는 時間의 경과 즉, 傳熱面表面의 溫度가 下降함에 따라서 熱流束이 점차 增加하다가 遷移沸騰이 시작되면서 급격히 增加함을 알 수 있다. 本研究에서는 膜沸騰領域의 熱傳達率에 關하여 이 그림에서 보는 바와 같이 點線으로 連結하여 이

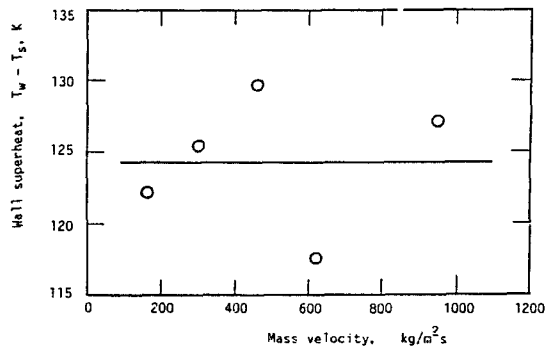


Fig.4-5 The wall superheats at the rewetting points

로부터 離脫을 시작하는 溫度의 位置를 리벳팅 포인트라고 定義하여 그림(4.2) 및 그림(4.3) 등에 表現하였다.

그림(4.5)는 이와 같이 하여 求한 全實驗에 對한 리벳팅 포인트의 結果를 나타낸다. 상당한 誤차는 있음에도 불구하고 質量速度에는 거의 無관하게 平均的으로 124.2 K를 나타내었다.

金屬의 表面熱處理나 原子爐의 事故로 인한 急冷時 電算코드의 開發 등에 있어서는 특히 高溫狀態의 膜沸騰下의 傳熱이 問題가 된다. 이러한 경우에 있어서는 流動 및 傳熱의 條件이 주어지면 計算을 通하여 傳熱面表面 및 内部의 溫度變化를 求할 必要가 있게 된다. 이와 같은 計算을 위하여서는 熱傳導의 逆問題에 있어서 第3種의 境界條件로 알려져 있는 表面의 熱流束을 알아야 이를 境界條件으로 하여 傳熱壁 内部의 非定常熱傳導下의 溫度變化의 解를 얻을 수 있다. 그리고, 膜沸騰의 終了條件으로는 그림(4.6)과 같은 리벳팅 포인트의 過熱度를 택할 수 있다. 특히 金屬의 表面熱處理를 위한 數值計算을 위하여서는, 먼저 基礎實驗을 通하여 膜沸騰狀態의 傳熱에 復雜하게 影響을 미치는 實驗因子들에 關하여 明確히 하면서 膜沸騰領域의 熱傳達率의 變化 및 리벳팅 포인트의 溫度에 關한 實驗 데이터가 사전에 要求된다고 생각된다. 이렇게 함으로써 원하는 急冷却모드를 決定할 수 있

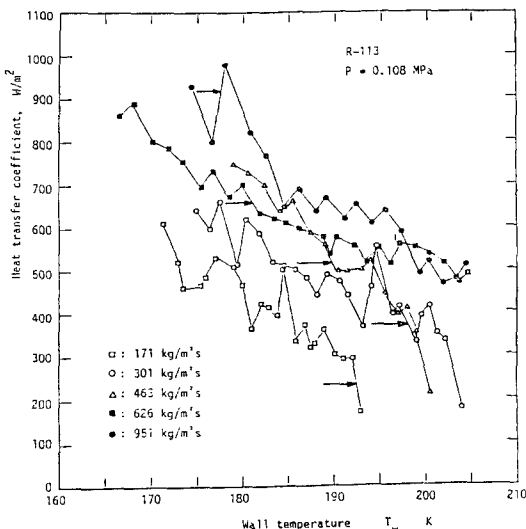


Fig. 4-6 The variations of the heat transfer coefficients to the wall temperature

고, 나아가서는 원하고자 하는 金屬組織이 얻어 지도록 冷却패턴을 콘트롤할 수도 있게 된다.

그림(4.6)은 이러한 경우에 必要하다고 생각 되는 膜沸騰領域에 있어서 熱傳達率의 傳熱面溫度에 對한 變化를 나타내고 있다. 傳熱面溫度가 높아질수록 熱傳達率이 거의 線型的으로 減少하는 경향을 보이고 있으며, 比較的 낮은 質量速度에서는 質量速度의 增加와 더불어 熱傳達率도 增加하는 경향을 보이고 있다. 그리고, 이 그림에는 參考로 각각의 全流量이 飽和狀態의 蒸氣로 銅블록내 流路를 強制循環한다고 假定하였을 때 Dittus Boelter式

$$h = 0.023 \left(\frac{k_f}{D} \right) (R_e)^{0.8} (P_r)^{0.4} \quad (4.4)$$

으로부터 計算한 蒸氣單相流의 熱傳達率값을 화살표로서 각각 表示하였다. 質量速度가 171, 301 kg/m sec의 경우 冷却初期의 膜沸騰의 熱傳達率은 式(4.4)에서 求한 蒸氣單相流의 熱傳達率 값과 거의 一致함을 알 수 있다.

5. 結 論

熱容量이 큰 高溫狀態의 銅블록을 過冷流體를 利用하여 過渡的으로 冷却을 하는 實驗을 通하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 傳熱面表面으로부터 1.05, 1.70, 3.00mm 떨어진 熱電對에 의하여 冷却過程中的 銅블록의 溫度變化를 測定하여 본 結果, 比較的 單調하게 溫度가 下降하는 것을 알았으며 膜沸騰, 遷移沸騰, 核沸騰으로 構成되는 典型的인 溫度變化 曲線을 나타내었다.

(2) 銅블록내에 設置한 熱電對에 의하여 測定한 銅블록의 溫度變化로부터, 半徑方向 1次元 熱傳導逆問題를 TDMA에 依하여 數值計算하여 流體側表面의 熱流束 및 表面溫度의 變化를 求하여 沸騰曲線으로 表現하였다.

(3) 本 實驗의 範圍에 있어서 리벳팅 포인트의 溫度는 質量速度에는 거의 無관하였으며, 平均的인 리벳팅 포인트의 過熱度는 124.2 K로서 從來의 理論式으로부터 주어지는 過熱度보다는 높았다.

(4) 리벳팅 포인트 以後의 高溫領域에서는 그림(4.6)에 제시한 바와 같이 傳熱面 溫度가 增

加함에 따라 熱傳達率이 減少하는 傾向을 보였으며, 比較的 質量速度가 작은 範圍에서는 質量速度의 增加와 더불어 熱傳達率 값도 增加하는 傾向을 보였다.

參 考 文 獻

- 1) 김경근: 기액이상류, 제19장 막비등과 리벳팅, 대화출판사, 333-347(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) D.C. Groeneveld, J.C. Stewart: The minimum film boiling temperature for water during film boiling collapse, 7th Int. Heat Trans. Conf., Munich, FB37, 393-398(1982)
- 4) L.C. Witte, J.H. Leinhard: On the existence of the two transition boiling curves, Int. J. of Heat and Mass Trans. Vol.25, No.6 771-779(1982)
- 5) 정대인, 김경근: 환상유로에 있어서 수직고온관의 과도적 냉각과정에 관한 연구, 한국박용기관학회지, 제10권 제2호, 156-164(1986)
- 6) S.V. Patankar: Numerical method in heat transfer, 7th Int. Heat Transfer Conf., Vol.1, RK3, 83-90(1982)