

|||||||  
論 文  
|||||||

## 衝突水噴流의 遷移 및 膜沸騰熱傳達에 關한 研究

嚴基讚\*·徐正閔\*\*

### An Experimental Study on Transition and Film Boiling Heat Transfer of Impinging Water Jet.

Ki Chan Ohm\* and Jeong Yun Seo\*\*

#### ABSTRACT

Experimental measurements of the heat flux to a upward impinging water jet on high heated test surface were obtained in the transition and film boiling regimes.

Test variables were nozzle outlet velocity, subcooled water temperature and height of supplementary water. Boiling curve of this investigation is similar to a pool boiling curve, but it has one or two cap-shaped peaks in the transition regime.

In the film boiling regime, the heat transfer rates are increased along with the increment of nozzle outlet velocity and subcooled temperature. There is optimum height of supplementary water for the augmentation of heat transfer.

Generalized correlations of boiling heat transfer are presented for maximum heat flux, minimum heat flux and  $q_c$  at each supplementary height.

\* 仁荷工業專門大學

\*\* 仁荷大學校 工科學

## 記 號 說 明

- $b$  : 試驗片의 폭( $m$ )  
 $d$  : 試驗片의 두께( $m$ )  
 $t$  : 時間( $sec$ )  
 $\Delta z$  :  $d/(n-1)$   
 $S$  : 補助水層의 높이( $m$ )  
 $T_w$  : 試驗片의 溫度( $^{\circ}C$ )  
 $T_l$  : 液體의 溫度( $^{\circ}C$ )  
 $V_o$  : 노즐出口速度( $m/s$ )  
 $k$  : 熱傳導率( $W/m^{\circ}C$ )  
 $Re$  : Reynolds 數( $= \rho_w d / \mu$ )  
 $c$  : 比熱( $KJ/Kg^{\circ}C$ )  
 $n$  : 試驗片두께의 分割數  
 $q$  : 熱流束( $W/m^2$ )  
 $D$  : 노즐出口直徑( $m$ )  
 $T_{sat}$  : 飽和溫度( $^{\circ}C$ )  
 $\Delta T_{sat}$  : 過熱度( $T_w - T_{sat}$ ) ( $^{\circ}C$ )  
 $\Delta T_{sub}$  : subcool 度( $T_{sat} - T_l$ ) ( $^{\circ}C$ )  
 $\rho$  : 密度( $Kg/m^3$ )  
 $\mu$  : 粘性係數( $N \cdot S/m^2$ )

## 1. 序 論

水噴流을 平板에 衝突시켜 冷却하는 方法은 工業에서 널리 利用되고 있다. 특히 冷却面이 高溫일 경우는 沸騰이 발생하고 熱傳達은 增大한다. 衝突液噴流의 沸騰傳熱에는 pool沸騰[1]과 마찬가지로 膜沸騰, 遷移沸騰 및 核沸騰의 領域이 存在하며, 噴流沸騰特性의 究明은 높은 冷却效果를 圖謀하는데 매우 중요하다.

衝突液噴流의 沸騰熱傳達에 關해서는 M. A Ruch[2] 등이 冷却液으로서 Freon-113을 使用하여 上向式 液噴流에서, 核沸騰域의 熱流束은 噴流의 速度와 노즐直徑에는 關係가 없고 오직 過熱度에만 의존하며, 膜沸騰域의 熱流束은 噴流의 노즐直徑과 試片表面의 傾斜度에 無關하다는 것을

發表하였다.

M. Monde[3-4] 등은 Freon-113 및 물을 使用하여 高溫傳熱面(定常加熱法)에 衝突液噴流의 burn-out 實驗에서 burn-out 熱流束은 重力과 無關하고 단지 噴流速度에 의해 決定된다는 結論을 얻었다.

非定常加熱法을 利用하여 核沸騰, 遷移沸騰, 膜沸騰實驗을 한 中西[5] 등은 Leidenfrost 溫度 以上의 高溫으로 加熱된 試片에 下向式 二次元 水噴流을 衝突시켜 얻은 結果에서, Stagnation point 에 대한 核沸騰, 遷移沸騰, 膜沸騰의 全領域에 걸친 沸騰曲線은 pool 沸騰曲線과 유사하고, 噴流速度와 Subcool 度가 增加하면 沸騰曲線은 高熱流束쪽으로 移動하며, 遷移沸騰域에서 작은 平行部가 存在함을 밝혔다.

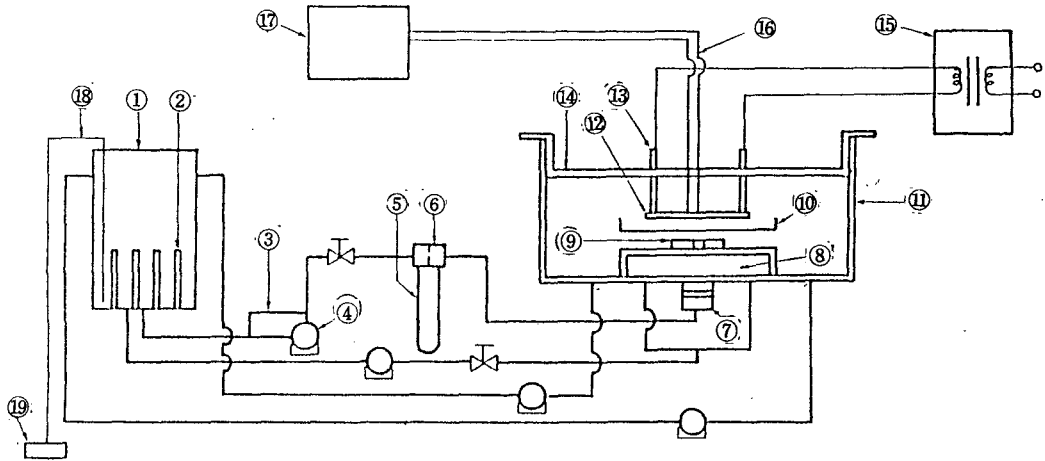
越智[6] 등은 같은 方法으로 圓形水噴流을 利用하여 實驗한 結果, 노즐直徑이 작아지면 Leidenfrost 溫度가 높아지고 그 熱流束을 노즐直徑과의 關係式으로 나타냈다.

本 試驗에서는 單一水噴流 및 補助水의 同伴水噴流을 電氣적으로 加熱(非定常加熱法)한 傳熱面에 鉛直上向으로 衝突시킬 때 遷移領域 및 膜沸騰領域에 대한 Stagnation 點에서의 水噴流 沸騰熱傳達을 究明하고자 한다.

## 2. 實驗裝置 및 實驗方法

## 2-1 實驗裝置

實驗裝置의 概略圖는 Fig.1 과 같다. 加熱탱크 내 ①의 一般水道물은 heater ②(3KW × 3)로 所定の 溫度까지 加熱된 후 Fu-jet valve ③을 거쳐 pump ④로 送出し키고 orifice ⑥에서 所定の 速度로 調整하여 노즐⑦(正弦曲線形, 出口直徑 6 mm  $\phi$ )을 지나 噴出한다. 이 물은 補助水層을 다시 通過하므로써 補助水 同伴水噴流가 試片 ⑩에 衝突하게 된다. 노즐과 試片사이에 Shutter ⑩을 設置하여 水噴流가 試片으로의 衝突을 차단할 수 있게 하였고, 노즐-試片間 距離는 180 mm ( $H/D = 30$ )로 하였다.



- |                 |                   |                         |                             |
|-----------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1. Heat tank    | 2. Heater         | 3. Fu-jet valve         | 4. pump                     |
| 5. Manometer    | 6. Orifice        | 7. Nozzle               | 8. Supplementary water tank |
| 9. Guide plate  | 10. Shutter       | 11. Recovery water tank | 12. Test specimen           |
| 13. Copper bar  | 14. Holding plate | 15. Thermocouple        | 16. Rectifier               |
| 17. Multicorder | 18. Thermocouple  | 19. Thermometer         |                             |

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

衝突한 水噴流은 回收탱크⑪에서 回收되어 다시 加熱탱크①로 循環시킬 수 있도록 하였으며, 補助水의 供給은 加熱탱크로부터 別途의 配管을 하여 溫水펌프로 同伴水噴流에 의해 流出된 量만큼 valve를 調整하여 供給할 수 있게 하였다.

노즐出口速度는 manometer ⑤에 의해 구하고 물의 溫度는 thermometer ⑱(C-A thermo couple, 100  $\mu\text{m}$   $\phi$ )를 使用하여 測定하며, 所定の 溫度로 一定하게 될때까지 20~30분간 순환시킨 후 實驗을 實施하였다.

實驗에 使用한 傳熱試驗片은 두께 2mm의 Stainless 鋼板(sus316)으로 그 形狀은 Fig.2와 같으며, 通電加熱할 수 있게 하였다.

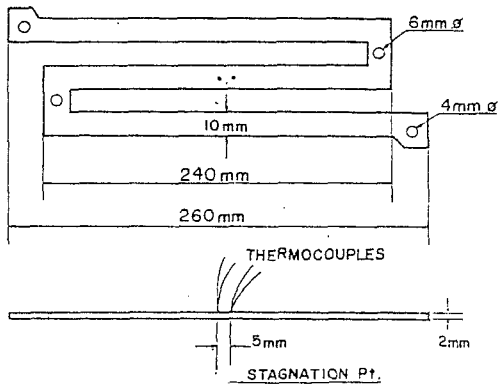


Fig.2 Test Plate & Location of Thermocouples

2-2 實驗方法 및 條件

加熱탱크에서 加熱된 물이 노즐에서 噴出할때 물의 溫度가 所定の 溫度로 一定할때까지 循環시키고, 定常流가 될때까지 Shutter로 試片에 대한 水噴流의 衝突을 차단시킨다. 물이 所定溫度, 定常流임을 確認한 후 試片을 通電加熱시켜 試片溫度가 1000~1100  $^{\circ}\text{C}$ 가 되었을때 shutter를 열어 試片에 水噴流를 衝突시킴과 同時에 加熱을 停止하고, 試片裏面의 溫度變化를 multicorder ⑰로 測定하였다. 이때 試片의 溫度가 冷却水의 溫度까지 降下하는데 걸리는 時間은 1~

8.5 초이며, 實驗條件은 노즐出口速度( $V_0$ )는 2.8 ~ 7.18 m/s, subcool 度( $\Delta T_{sub}$ )는 20, 30, 40, 50 °C, 補助水層높이(S)는 0, 6, 12 mm ( $S/D = 0 \sim 2$ )이다.

3. 實驗結果

3-1 表面溫度和 熱流束의 算出

試驗片의 冷却表面溫度和 熱流束의 算出은 裏面溫度-時間曲線(冷却曲線)으로부터 다음의 假定下에서 有限差分法(explicit method)으로 구한다.

가) 熱傳導는 二次元的이다.

나) 熱輻射에 의한 損失은 空中放冷時의 損失熱量에 고려하였으며, 試片주위의 분위기 차이에서 오는 熱輻射量은 미소량이므로 무시한다.

다) 傳熱試驗片의 物性置는 溫度만의 函數이다.

여기서 SUS 316의 物性值의 溫度變化에 대한 關係式은 다음과 같다[5].

$$k = 13.47(1 + 0.001163 T) \text{ W/m}^\circ\text{C} \dots (1)$$

$$\rho c = 1092(1 + 0.004246 T) \text{ Wh/m}^3\text{ }^\circ\text{C} \dots (2)$$

解析을 위한 座標系는 Fig.3과 같으며, 熱傳導方程式은 다음 式으로 表示된다.

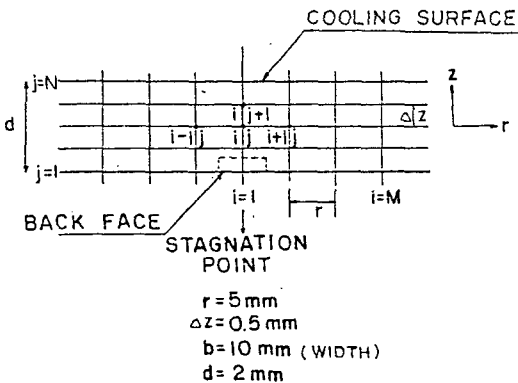


Fig.3 Two - Dimensional Coordinate

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

1)  $i = 1$  ( stagnation line ),  $j = 3 \sim 5$ 의 溫度算出.

$$\text{境界條件은 } T_{i-1,j} = T_{i+1,j} \dots (4)$$

$$T_{i,j+1}^p = \frac{(\rho c)^p_{i,j}}{k_{i,j}^p} \cdot \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \cdot \Delta z^2 - 2 \left( \frac{\Delta z}{\Delta r} \right)^2 (T_{i+1,j}^p - T_{i,j}^p) + 2T_{i,j}^p - 2T_{i,j-1}^p \dots (5)$$

2)  $i = 2$  (  $r = 5 \text{ mm}$  line ),

$j = 3 \sim 5$ 의 溫度算出.

境界條件 [6] 은

$$T_{i+1,j} = 2 T_{i,j} - T_{i-1,j} \dots (6)$$

이 條件의 妥當性을 確認하기 위해  $r = 0, 5, 10 \text{ mm}$  點에서의 冷却曲線을 Fig.4와 Fig.5에 例示하였다.

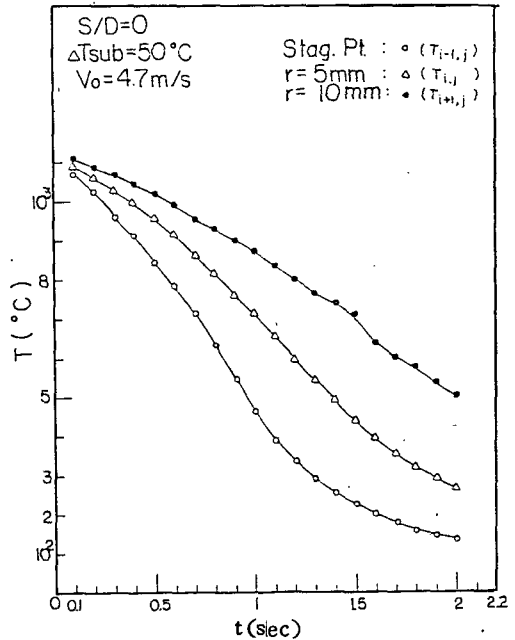


Fig.4 Correlation of Back Face Temperature & Cooling Time ( $S/D=0$ )

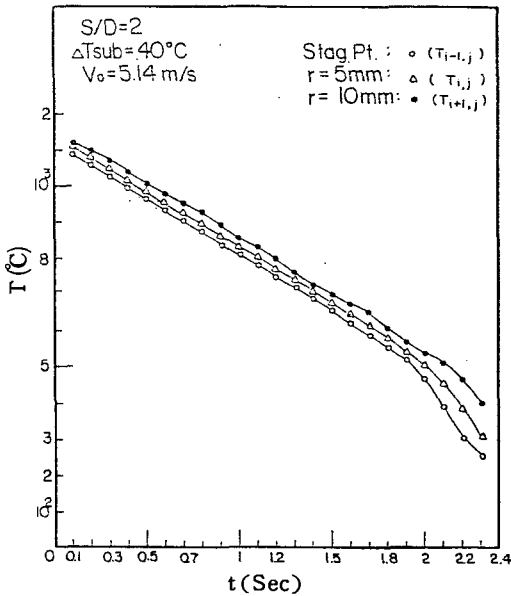


Fig.5 Correlation of Back Face Temperature & Cooling Time (S/D = 2)

$$T_{i,j+1}^p = \frac{(\rho c)_{i,j}^p}{k_{i,j}^p} \cdot \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \cdot \Delta z^2 - \frac{\Delta z^2}{r \Delta r} (T_{i,j}^p - T_{i-1,j}^p) + 2T_{i,j}^p - T_{i,j-1}^p \dots (7)$$

3)  $i = 1, j = 2$  點의 溫度算出.  
 $i = 1, j = 1$  點의 境界條件 [6]은

$$T_{i-1,j} = T_{i+1,j} \dots (8)$$

$$T_{i,j-1} = T_{i,j+1} - q_{loss} \frac{\Delta z}{2k_{i,j}} \dots (9)$$

$j = 1$  로 했을 때

$$T_{i,j+1}^p = \frac{(\rho c)_{i,j}^p}{2k_{i,j}^p} \cdot \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \Delta z^2 - \left(\frac{\Delta z}{\Delta r}\right)^2 (T_{i+1,j}^p - T_{i,j}^p) + T_{i,j}^p + \frac{\Delta z}{4k_{i,j}^p} \cdot q_{i,loss} \dots (10)$$

여기서  $q_{loss}$ 는 試片裏面으로부터의 放熱量이고 裏面溫度만의 函數로 假定하여, 試片을 空中 放冷( 이때, Shutter 에 水噴流를 衝突시켜 試

片주위의 분위기가 試片에 水噴流를 衝突시킬 때의 분위기와 최대한으로 同一하게 했다)했을 때의 冷却曲線을 이용하여 外部로 放出하는 全熱損失量과 內部에너지의 減少量의 關係로부터, 다음式으로 표시된다.

$$q_{loss} = -\rho c \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{b \cdot d}{2(b+d)} \dots (11)$$

단,  $\Delta T = T^{p+1} - T^p$

4)  $i = 2, j = 2$  點의 溫度算出.

$i = 2, j = 1$  의 境界條件은

$$T_{i+1,j} = 2T_{i,j} - T_{i-1,j} \dots (6)'$$

$$T_{i,j-1} = T_{i,j+1} - q_{i,loss} \frac{\Delta z}{2k_{i,j}} \dots (9)'$$

$j = 1$  로 했을 때

$$T_{i,j+1}^p = \frac{(\rho c)_{i,j}^p}{2k_{i,j}^p} \cdot \frac{T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p}{\Delta t} \Delta z^2 - \frac{\Delta z^2}{2r \Delta r} (T_{i,j}^p - T_{i-1,j}^p) + T_{i,j}^p + \frac{\Delta z}{4k_{i,j}^p} q_{i,loss} \dots (12)$$

5) 水噴流로 傳達된 熱流束

Fig3에서  $n = 5$  로 하였으며  $n = 1 \sim 2$  領域  $n = 2 \sim 4$  領域 및  $n = 4 \sim 5$  領域에서의 區間解析의 結果에 따라 傳熱試驗片으로부터 流體로 傳達된 總熱流束은 다음式으로 표시할 수 있다.

$$q = -\frac{d}{2(n-1)} \left[ (\rho c)_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta t} + 2 \sum_{j=2}^{n-1} (\rho c)_j \frac{\Delta T_j}{\Delta t} + (\rho c)_n \frac{\Delta T_n}{\Delta t} \right] - q_{loss} \dots (13)$$

3-2 冷却曲線과 沸騰曲線

試片裏面에서의 冷却曲線과 3-1 節의 方法에 의해 算出된 冷却表面의 冷却曲線은 Fig.6 과 같다. 이것을 沸騰曲線 ( $q - \Delta T_{sat}$ )으로 나타낸 것이 Fig.7이다. 이 두그림 중의 A, B...는 同一時刻에서의 點을 나타낸다. 冷却이 開始된 후 A點까지는 膜沸騰領域이며, 冷却水와 傳熱面 사이에 安定된 蒸氣膜이 形成되고 赤熱

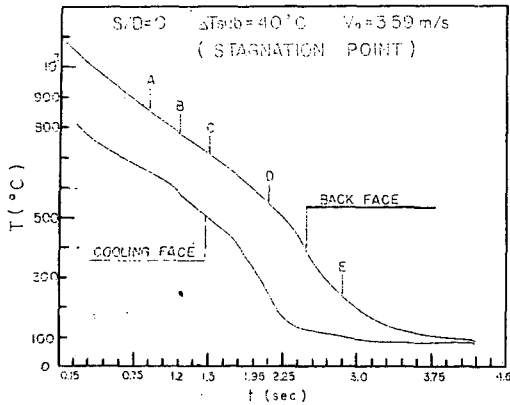


Fig.6 : Correlation of Cooling Curve between Cooling Face & Back Face at Stagnation Point

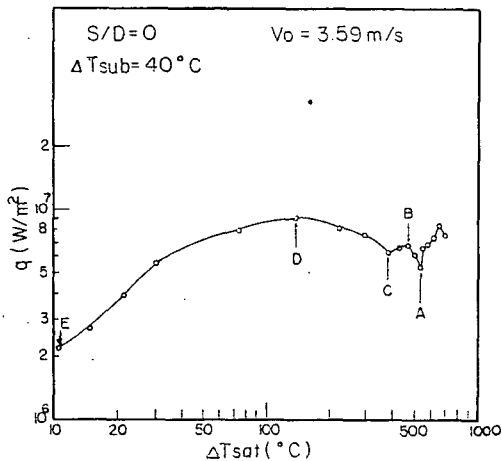


Fig.7 : Boiling Curve of Experimental Result at Stagnation Point (S/D=0)

상태가 된다. 냉각開始 直後의 熱流束이 약간增加하는 傾向이 나타나는 것은, 水噴流가 최초로 傳熱面에 衝突할 때 일시적으로 固-液接觸이 이루어지기 때문인것으로 생각되며 그 이후부터는 蒸氣膜이 形成되면서 熱流束은 傳熱面溫度의 降下와 더불어 작아진다. A點에 이르면蒸氣膜이 破壞하기 시작하여 심한 沸騰音과 함께 熱流束이 增大한다. A點이 leidenfrost 點이며 이때의 熱流束을 最小熱流束 ( $q_{min}$ )이라 부르

기로 한다. A點에서 D點까지가 遷移領域인데, B點까지는 熱流束이 急激히 增加하면서 溫度는 약간 減少한다. 이 現狀은 氣-液境界面의 破壞에 다른 流體의 亂動에 起因한 것으로 생각된다. 또한 遷移領域에서는 A-B-C와 같은 cap 形態의 特異한 現象이 나타나며 C點에서 다시 熱流束이 增大하기 시작하여 D點에서 最大가 된다. D點을 지나면 衝突領域에서 傳熱面은 冷却水와 완전히 固-液接觸狀態가 되며, 점차 接水面積이 壁面噴流領域으로 擴大되어 stagnation point의 熱流束은 계속 減少한다. 여기서 pool 沸騰에 의한 沸騰曲線과 比較하면 遷移領域에서 cap 形狀이 나타나는 것이 特異하며 그의 傾向이 유사함을 알 수 있다.

3-3 衝突速度的 영향

노즐出口速度를 변화시켰을 때의 沸騰曲線은 Fig.8, 9에 表示하였다. 水噴流의 衝突速度를 增加시키면 全般的으로 沸騰曲線 全體가 高熱流束 쪽으로 移動하며, 아울러 最大·最小 熱流束의 값도 增大한다. 또 膜沸騰域에서 熱流束分布의 기울기가 거의 同一함을 알 수 있으며, 이들 線圖에서 보면 噴流速度가 增加할수록 leiden-

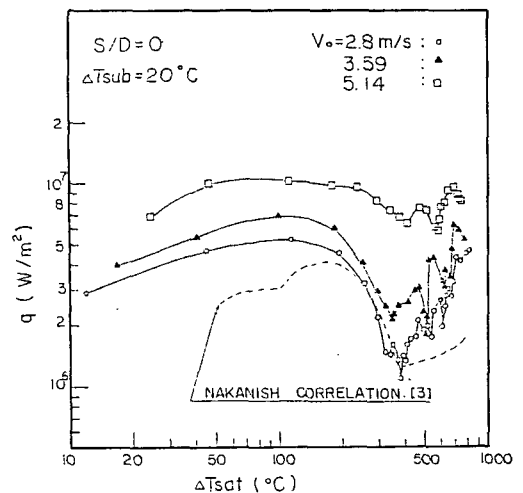


Fig.8 : The Effect of Nozzle Outlet Velocity on Boiling Curve at Stagnation Point (S/D=0)

frost 點의 溫度가 增加하는 傾向을 알 수 있다. Fig.8 에서 點線은 越智[6]의 下向式 衝突水噴流 ( $D = 5 \text{ mm } \phi$ ,  $\Delta T_{sub} = 15^\circ \text{C}$ ,  $V_o = 3 \text{ m/s}$ ) 에서의 沸騰曲線이며 遷移領域에서 cap 形狀은 나타나지 않고 있다.

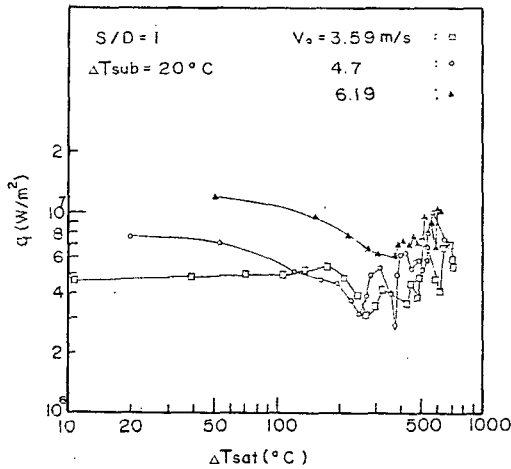


Fig.9 . The Effect of Nozzle Outlet Velocity on Boiling Curve at Stagnation Point ( $S/D=0$ )

3-4 Subcool 度의 영향

水噴流의 subcool 度를 20 ~ 50 °C로 變化시켰을 때의 沸騰曲線은 Fig 10, 11 과 같이, sub-

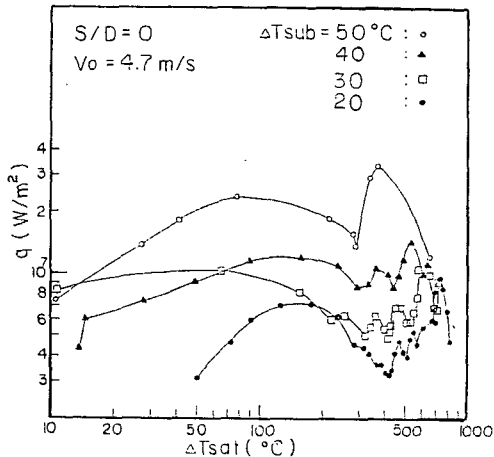


Fig.10 The Effect of Subcool Temperature on Boiling Curve at Stagnation Point ( $S/D=0$ )

cool 度의 增加에 따라 熱流束이 增加하여 高熱流束 쪽으로 移動한다. 이들 線圖에서는  $\Delta T_{sub} = 50^\circ \text{C}$ 인 경우에는 膜沸騰域이 存在하지 않으며, subcool 度가 增加할 수록 leidenfrost 點의 溫度가 增加하는 傾向을 볼 수 있고, 이것은 噴流速度의 增加에 따른 영향과 유사하다.

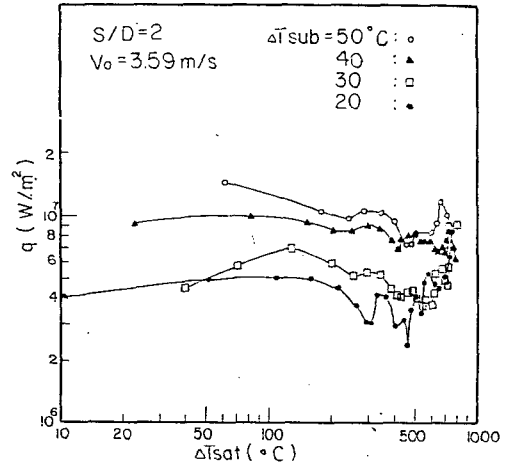


Fig.11 The Effect of Subcool Temperature on Boiling Curve at Stagnation Point ( $S/D=2$ )

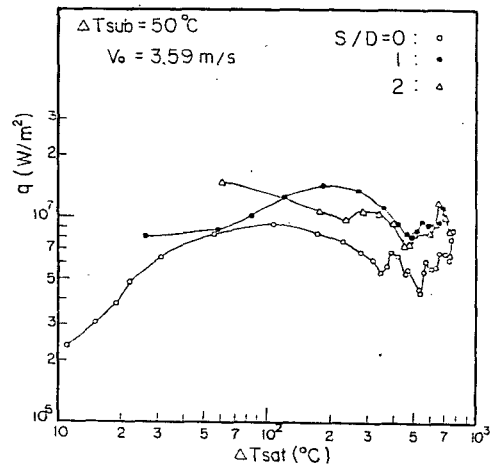


Fig.12 The Effect of Supplementary Water on Boiling Curve at Stagnation ( $\Delta T_{sub} = 50^\circ \text{C}$ )

3-5 補助水의 영향

이미 發表될 著者의 實驗結果[7]에서 同半水噴流에 의한 傳熱增進效果는  $S/D = 1$  또는

2에서 最大가 된 점에 注目하여, 本 實驗에서는 補助水層의 높이를  $S/D = 0, 1, 2$ 로 택하였다. 이 때의 沸騰曲線은 Fig.12 ~ 15와 같으며, 이들 線圖에서, 補助水를 사용하지 않는 경우 ( $S/D = 0$ )에 비해 補助水를 사용한 경우 ( $S/D = 1, 2$ )가 遷移 및 膜沸騰域에서

熱流束이 增大하며, 따라서 冷却效果를 最大로 할 수 있는 最適 補助水層의 높이가 存在함을 알 수 있고, 本實驗結果는  $\Delta T_{sub} = 20, 40, 50$  °C에서는  $S/D = 1$ ,  $\Delta T_{sub} = 30$  °C에서는  $S/D = 2$ 인 경우가 最適條件으로 볼 수 있다.

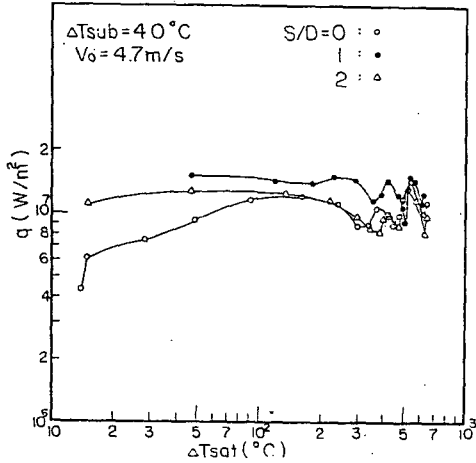


Fig.13 The Effect of Supplementary Water on Boiling Curve at Stagnation Point ( $\Delta T_{sub} = 50$  °C)

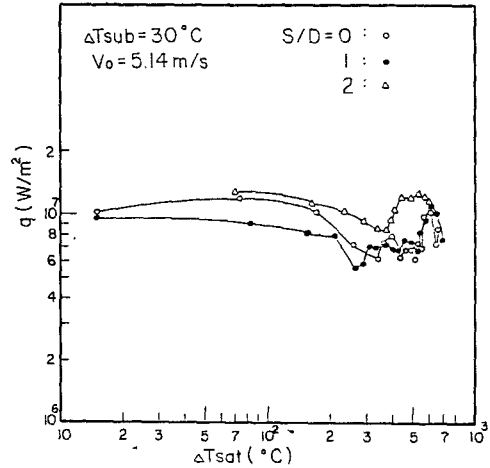


Fig.14 The Effect of Supplementary Water on Boiling Curve at Stagnation Point ( $\Delta T_{sub} = 30$  °C)

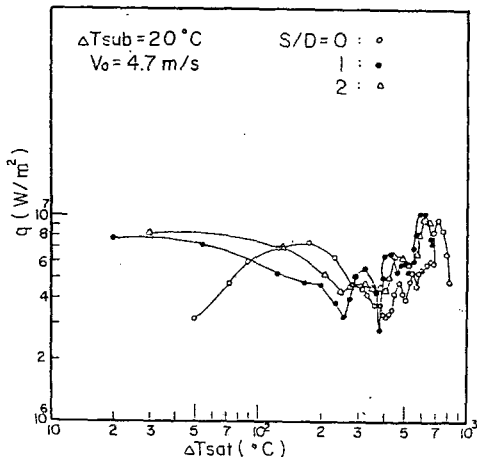


Fig.15 The Effect of Supplementary Water on Boiling Curve at Stagnation Point ( $\Delta T_{sub} = 20$  °C)

### 3-5 熱流束에 대한 關係式

沸騰曲線의 特性點(A.C.D)에 대한 熱流束과 노즐出口速度에 의한 Reynolds 數 및 Subcool 度의 關係는 Fig.16 ~ 18에 나타냈다. 이들 線圖에 의하면, Reynolds 數가 增加할때 각 熱流束의

<表 1>

熱流束	S/D	c	m	n
$q_{max}$	0	$7.872 \times 10^{-6}$	2.5562	1.6904
	1	$6.868 \times 10^{-5}$	1.9524	1.6759
	2	$1.914 \times 10^{-4}$	1.7282	1.6589
$q_{min}$	0	$3.295 \times 10^{-2}$	1.2474	1.3913
	1	$1.967 \times 10^{-1}$	1.3850	1.2299
	2	$2.570 \times 10^{-4}$	1.6868	1.6989
$q_c$	0	$6.569 \times 10^{-6}$	2.1386	1.8338
	1	$2.819 \times 10^{-4}$	1.9619	1.5585
	2	$7.864 \times 10^{-3}$	1.6179	1.3750



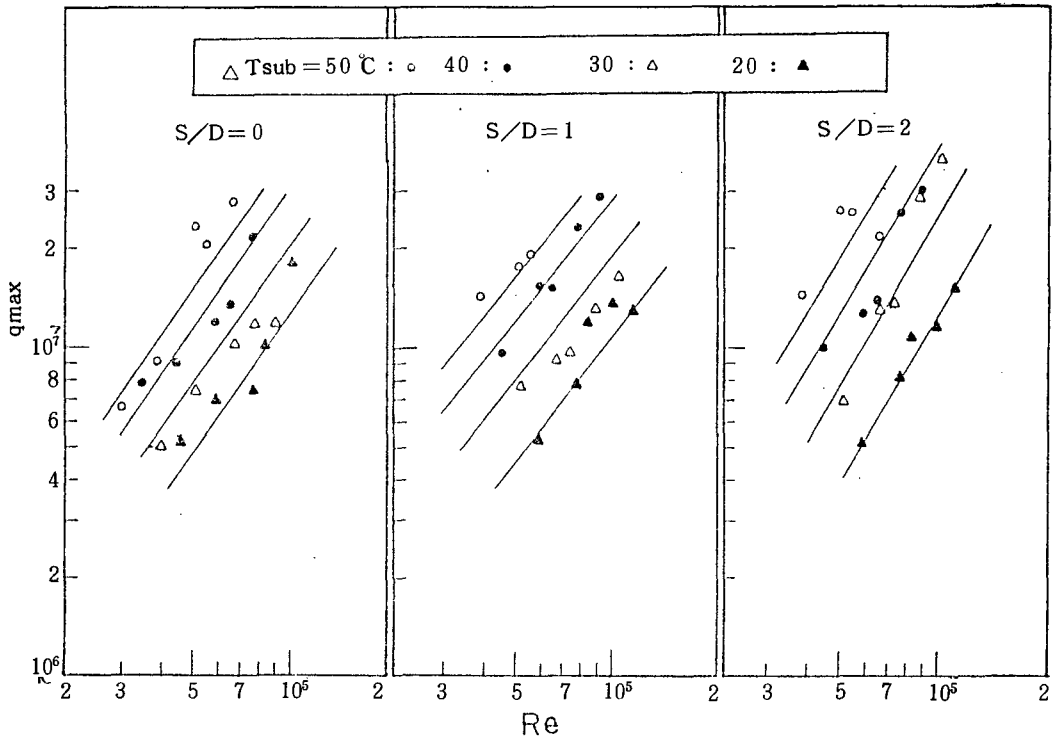


Fig.16 Comparison of Experimental Results of Maximum Heat Flux & Reynolds No.

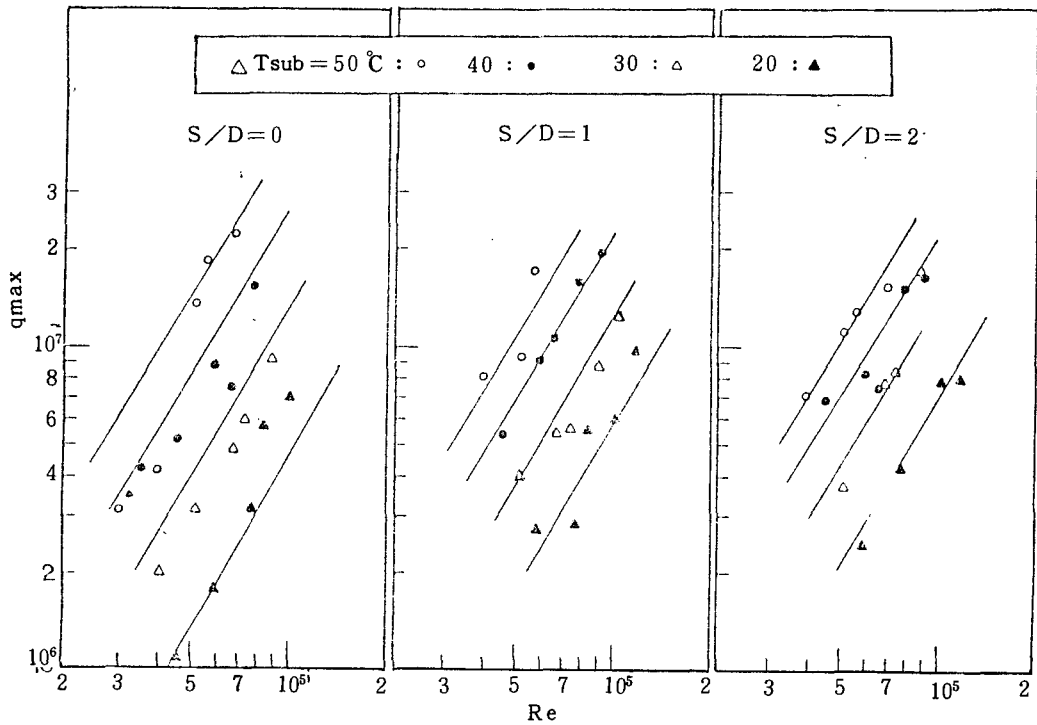


Fig.17 Comparison of Experimental Results of Minimum Heat Flux & Reynolds No.

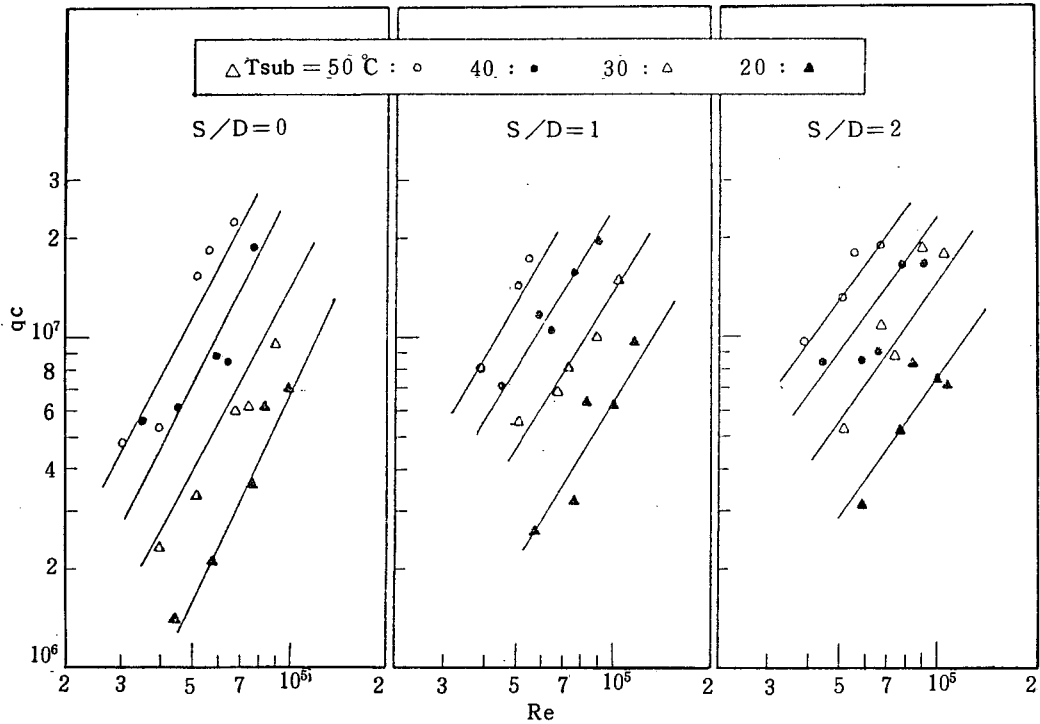


Fig.18 Comparison of Experimental Results of  $q_c$  & Reynolds Number.

增加率は Subcool 度와는 관계없이 一定하게 增加함을 알 수 있으며 이들의 相關關係를 式으로 整理하면 式(14)와 같고 각 경우의  $c, m, n$ 의 값

은 表 1과 같은 값을 갖는다.

$$q = c (\Delta T_{sub})^m \cdot (Re)^n \dots\dots\dots (14)$$

$q_{max}$ 과  $q_{min}$ 과의 關係는 Fig. 19에서 보는 바와 같이 Subcool 度, 補助水層높이에 관계없이 거의 一定한 關係가 있다.

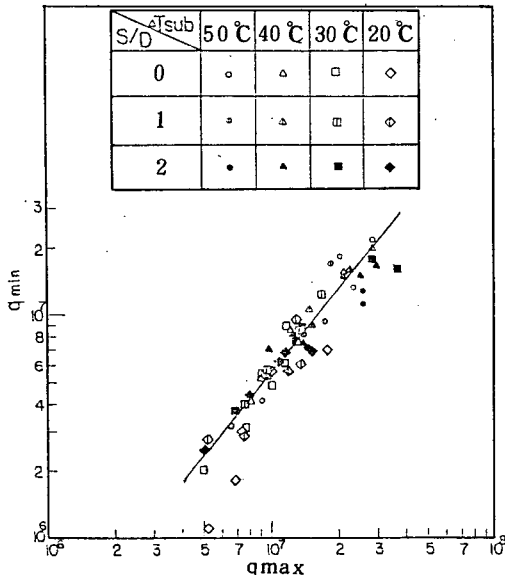


Fig.19 Correlation of Maximum & Minimum Heat Flux

4. 結 論

高溫으로 加熱한 水平傳熱面이 鉛直上向 水噴流의 衝突로 冷却할때, 노즐出口速度 2.8 ~ 7.18 m/s, Subcool 度 20 ~ 50°C, 補助水層높이 S/D=0, 1, 2 條件에 따라 실시한 實驗結果를 要約하면 다음과 같다.

- (1) 衝突水噴流에 의한 沸騰曲線의 樣相은 Pool 沸騰曲線과 유사하나, 遷移領域에서 cap 形狀이 나타나고, 노즐出口速度와 Subcool 度の 增加에 따라 沸騰曲線은 全般的으로 高熱流束쪽으로 移動하며 leidenfrost 點의 溫度도 上昇하

는 傾向이 있다.

(2) 노즐出口速度와 Subcool 度가 一定할 때, 補助水層의 높이 (S/D) 에 따른 冷却增大效果의 最適條件은 Subcool 度 50, 40, 20°C 에서는 S/D=1, Subcool 度 30°C 에서는 S/D=2 가 된다.

(3) 노즐出口速度를 基準으로 한 Reynolds 數 및 Subcool 度의 各 特性點에서의 熱流束에 대한 相關關係는 다음 式으로 表示된다.

$$q = c (\Delta T_{sub})^m (Re)^n$$

(4) 各 補助水層의 높이에서 Reynolds 數의 增加에 따라 特性點의 熱流束 ( $q_{max}$ ,  $q_{min}$ ,  $q_c$ ) 은 增加하고 그 增加率은 Subcool 度에 관계없이 一定하다.

(5)  $q_{max}$  과  $q_{min}$  의 關係는 Subcool 度, 補助水層높이와 關係없이 一定한 關係가 있다.

REFERENCE

1. Nukiyama, 金屬面と沸とう水との間の熱傳達の極大値ならびに極大値決定の實驗, 抜山西部論文集, pp. 1~3, 1969.

2. M. A. Ruch, Boiling heat transfer to a freon-113 jet impinging upward onto a flat, heated surface, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.18, pp.51~60, 1975.

3. 門出, 甲藤, 衝突噴流沸騰系のバーンアウトの研究, 日本機械學會論文集, Vol. 43, No. 373, pp.3408~3416, 1977-9.

4. M. Monde, Y. KATTO, Burnout in a high heat-flux boiling system with an impinging jet, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.21, pp.295~305,1978.

5. 中西, 石谷, 二次元水噴流による高温の冷却, 日本機械學會論文集 (B編), Vol.46, No. 404, pp.714~724, 1980-4.

6. 越智, 中西, 圓形水噴流による高温平面の冷却, 第19回 日本傳熱論文集, pp.499~501, 1982-5.

7. 嚴基讚, 徐正閔, 衝突水噴流에 의한 熱傳達促進에 關한 研究, 大韓機械學會論文集, 第6卷 第4號, pp.301~307, 1982.

8. M. Necat, Özisik, Heat Conduction, A Wiley-inter science publication, New York pp.504, 1979.