

|||||
論 文
|||||

衝突水噴流에 의한 飽和沸騰熱傳達

嚴基讚* 徐正閔**

(1986年 4月 25日 接受)

“Saturation Boiling Heat Transfer on a Heated Surface With Impinging Water Jet

Ki Chan Ohm*, Jeong Yun Seo**

ABSTRACT

Experimental measurements of the heat transfer and heat flux to a jet impinging on a heated surface were obtained in the nucleate boiling regimes. Test variables were jet velocity and aspect ratio (b/ℓ) of the heated surface.

A slope of nucleate boiling curve increased with increasing the aspect ratio of the heated surface, namely approaching a rectangular square, and it is shown that surface tension has an important role for the onset of nucleate boiling heat transfer. A generalized correlation of the jet nucleate boiling heat transfer was found using a pi theorem.

$$Nu_L = C \left[\left(\frac{q}{\rho_v L_h} \right)^2 \frac{\rho_v \ell}{\sigma} \right]^m \left[\frac{b}{\ell} \right]^n$$

NOMENCLATURE

A ; 傳熱面의 表面積(m^2)
 b ; 傳熱面幅(m)
 h ; 熱傳達係數($W/m^2 k$)
 I ; 電 流(Ampere)
 k ; 熱傳導率($W/m \cdot k$)
 ℓ ; 傳熱面길이(m)
 L_h ; 蒸發潛熱(J/kg)
 q ; 熱流束(W/m^2)

R ; 抵抗(Ohm)
 T_o ; 傳熱面裏面溫度($^{\circ}C$)
 T_w ; 傳熱面表面溫度($^{\circ}C$)
 ΔT_{sat} ; 壁面過熱度($=T_w - T_{sat}$)
 V ; 電位差(Volt)
 V_o ; 噴流速度(m/s)
 δ ; 試片厚께(m)
 σ ; 表面張力(N/m)
 ν ; 動粘性係數(m^2/s)
 τ ; 時 間
 Nu_L ; $h\ell/k$: Nusselt 數

* 正會員, 仁荷工業專門大學

** 正會員, 仁荷工大 機械工學科

1. 諸 論

強制對流沸騰에서는 pool 沸騰의 경우보다 높은 傳熱效果를 얻을 수 있다는 觀點에서 工業的 應用價値가 크다.

強制對流沸騰系에서 定性的으로 본 核沸騰熱傳達의 特性은, 低過熱度域에서는 強制對流의 支配를 받으며, 高過熱度域에서는 強制對流의 영향이 없는 發達된 沸騰이 되고, 中間過熱度域에서는 強制對流과 表面沸騰의 組合的인 影響을 받는다.¹⁾ 發達된 核沸騰에서는 流速, subcool 度, 流量, 傳熱面의 寸수 및 形狀, 傳熱面의 姿勢, 液膜두께, 노즐內徑의 變化가 沸騰曲線에 影響을 주지않는다는 結果가 報告되고 있다.¹⁻⁴⁾

Monde, Katto^{3,5,6)}는 衝突液噴流沸騰系의 流動모델을 實驗的으로 定立하였으며, 그 모델은 傳熱面위에 「核沸騰液層」이 存在하고 이것을 덮고 흐르는 「上層自由液流」는 바로 밑의 核沸騰液層으로부터 噴出하는 蒸氣流를 吸收하여 無數한 液滴의 「飛散液滴流」를 發生하며 噴流 流量에서 飛散液滴流를 뺀 量이 加熱面 주변으로 부터 오버플로우(overflow)로 流出하는데, 이

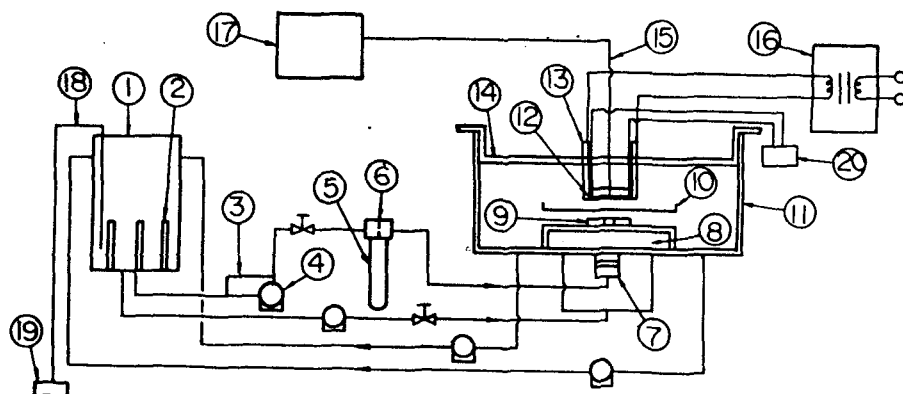
때 核沸騰液層은 液流의 流動狀況變化의 支配를 받지 않는다는 것이다.

核沸騰熱傳達到 影響을 미치는 主要因子는 液體속에 吸收된 ガス量, 表面의 汚染¹⁾, 密度變化에 의한 浮力, 氣泡의 攪亂力²⁾, 壓力, 表面粗度, 熱流束³⁾等이며 또한 核沸騰熱傳達到는 hysteresis 現象이⁹⁾ 나타나고 있어서 工業的 應用에서 考慮해야 할 特性이라고 생각된다.

本研究에서는 上向衝突水噴流系에서 非沸騰領域 및 核沸騰領域에 대한 巨視的 觀點에서 飽和水에 대한 噴流速度, 傳熱面의 形狀比의 影響을 檢討하고 次元解析에 의한 無次元整理式을 얻는데 그 目的이 있다.

2. 實驗裝實 및 實驗方法

本實驗에서는 正弦曲線形의 出口直徑 $D=6mm\phi$ 의 圓形노즐을 使用하여 노즐-傳熱面間 距離 180 mm에서 噴流速度를 $V_0 = 2.8 \sim 6.19 m/s$ 의 範圍로 變化시켰다. 沸騰液體는 一般水道水의 飽和液으로 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. Multi corder | 18. Thermocouple | 19. Thermomter | 20. Digital volt meter(D.C) |

Fig.1 Experimental apparatus.

Fig.1은 實驗裝置의 概略圖이다. 加熱탱크①의 물은 heater ②(9KW)에 의해서 飽和수로 加熱되어 Fu-jet 밸브③를 通過한 후 펌프④에 의해 送出되고, 오리피스⑥과 마노미터 ⑤에서 一定速度로 調整되어 노즐⑦로부터 噴出된다. 이때 流動은 噴流速度가 一定한 定常流이고, 水溫은 噴流時에도 一定狀態가 維持되도록 20~30分間 循環시킨다. 이 동안에는 傳熱面과 노즐 사이에 shutter ⑨를 設置하여 噴流가 飽和溫度, 定常流가 된것을 確認한 후, shutter를 除去하여 傳熱面에 水噴流가 衝突하게 하였다. 傳熱面에 衝突한 물은 回收탱크⑩에서 다시 加熱탱크①로 循環할 수 있도록 溫水펌프 2개를 設置하였다. 冷却水인 물의 溫度는 加熱탱크의 熱電對(C-C, 50 μ m ϕ)에 의해 溫度計⑩에서 測定하였다. 傳熱面은 通電加熱하는데 rectifier⑩으로부터 AC를 DC로 整流한다. 傳熱面의 裏面溫度는 그 면에 溶着한 C-A 熱電對(50 μ m ϕ)에 의

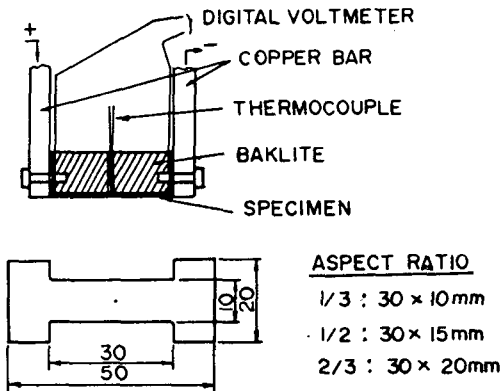


Fig. 2 Test plate and location

해 multicorder ⑩에 記錄하였다. 傳熱面의 形狀은 Fig.2와 같이 直四角形의 스텐레스箔板(두께 80 μ m)으로 하였다. 熱流束은 傳熱面 兩端에서의 電位差를 D.C. Voltmeter ⑩으로 測定하고 傳熱面의 溫度에 따른 스텐레스의 固有抵抗¹⁰⁾의 값에 의하여 式(1)에서 구하고, 表面溫度는 式(2)로 구하였다.

$$q = I^2R/A = V^2/AR \text{ (W/m}^2\text{)} \dots\dots (1)$$

$$T_w = T_o - \frac{1}{2} q \delta/k \dots\dots\dots (2)$$

3. 實驗結果 및 考察

3-1 噴流速度의 影響

Fig.3은 噴流速度를 一定하게 維持하면서 傳熱面의 溫度를 增加시킬때의 傳熱面過熱度 (ΔT_{sat})와 熱流束(q)의 關係를 表示한 것이다.

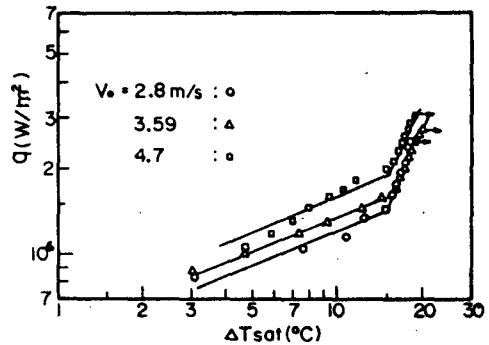


Fig.3. Effect of velocity on boiling curve (heated surface 30 x 20 mm)

傳熱面의 溫度가 낮고 熱流束曲線의 勾配가 比較的, 緩慢한 非沸騰領域에서는 加熱面上에 氣泡는 發生하지 않고 液膜을 形成하면서 半徑方向으로 흐른다. 이 非沸騰領域의 後半部 過熱度領域에서는 약한 核沸騰이 混在하는 狀況일 것이라고 推測된다. 曲線의 勾配가 급한 核沸騰領域에서는 傳熱面全面에서 高熱流束의 核沸騰이 나타나고 水滴이 飛散함을 볼 수 있으며, 여기서 \rightarrow 表示는 burnout 點을 나타낸다. burnout 點에서는 試片이 燥損切斷되어 每實驗마다 새로운 試片을 使用하였다. 이 線圖에서 核沸騰領域에서는 噴流速度의 增加에 따라 高熱流束쪽으로 沸騰曲線이 移動하는 것을 알 수 있고, 이러한 傾向은 傳熱面의 形狀比와는 關係없이 同一하다. 核沸騰領域에서도 噴流速度의 增加에 따라 高熱流束쪽으로 移動하며, 따라서 burnout 熱流束도 增加한다. 이때 核沸騰曲線의 勾配에는 影響을 주지 않는다.

3-2 核沸騰曲線

Fig.4는 飽和水를 冷却液으로 한 衝突水噴流系의 核沸騰曲線을 나타낸다. 核沸騰이 始作되면 3-1節에서 說明한 바와 같이 氣泡가 發生하고 水滴이 飛散하게 되는데 그 飛散角度는 噴流速度가 작을수록 크다. 이 線圖에서 一點鎖線은 Monde, Katto⁶⁾의 實驗結果를 나타내며, 使用된 傳熱面은 円形이고 傳熱面이 上向 및 下向에 關係없이 一致하는 曲線으로 나타나는데 本實驗에서 使用한 直四角形(30 × 15 mm) 傳熱面의 경우와 比較하면 勾配는 크게 나타난다. 또 細線은 Katsuta¹¹⁾가 얻은 結果이며, 傳熱面의 直徑이 22 mm φ인 円形이고 噴流速度가 比較的 작은 1.63 ~ 3.4 m/s의 範圍에서 沸騰液體로는 純水를 使用하였는데 勾配는 역시 本 實驗結果보다 약간 크게 나타나고 있다. 또한 二點鎖線으로 表示한 M.A.Ruch²⁾ 등의 Freon-113의 경우보다는 (上向衝突噴流) 本實驗에서 使用한 물의 경우가 熱傳達效果가 큰은 당연한 結果이다. 點線은 pool 沸騰에 대한 Nishikawa⁷⁾의 結果를 延長하여 나타낸 것이며, 核沸騰曲線의 勾配에 대한 差異에 대해서는 3-3節에서 說明할 것이다.

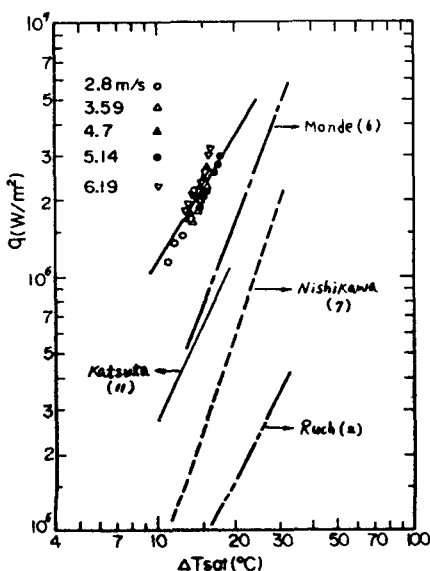


Fig.4 Saturated boiling curve (heated surface 30 × 15 mm)

3-3 傳熱面形狀比의 影響

本實驗에서 使用한 傳熱面은 直四角形(stainless 箔板, 두께 80μm)이며, $l \times b$ 를 30 × 10mm, 30 × 15 mm, 30 × 20 mm의 3種類로 하며 形狀比 (b/l)는 각각 1/3, 1/2, 2/3가 된다. 飽和 核沸騰의 實驗結果는 形狀比別로 Fig.5에 나타냈으며 그 變化의 勾配는 Fig.6에 表示하였다. 이들 線圖에서 核沸騰曲線의 勾配는 形狀比가 클수록, 즉 正四角形에 接近할수록 크게 나타나고 있으며, 円形 또는 正四角形傳熱面에서 나타나는 衝突液噴流系의 核沸騰曲線 勾配에 接近하게 되며 直四角形傳熱面의 核沸騰에 미치는 影響은 그 勾配의 大小로 나타남을 알 수 있다.

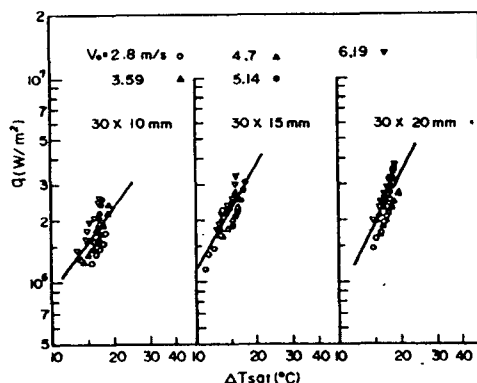


Fig.5 Effect of aspect ratio of heated surface on saturated nucleate boiling curve.

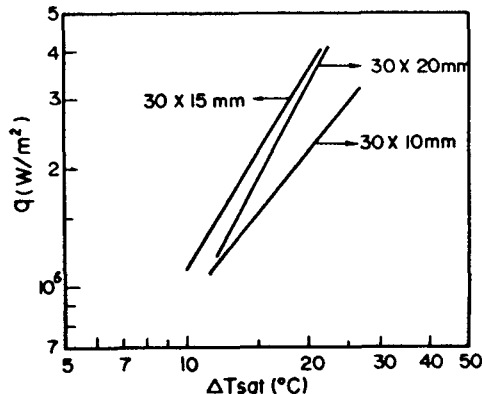


Fig.6 Comparison of saturated nucleate boiling curve.

3-4 飽和沸騰熱傳達의 無次元整理式

強制對流의 飽和沸騰을 支配하는 物理量은 다음과 같이 設定된다. 즉 壁面過熱度 (ΔT_{sat}), 氣泡發生速度 ($q/\rho_v L_h$), 熱流束 (q), 流體의 熱傳導率 (k), 表面張力 (σ), 流體의 動粘性係數 (ν), 氣·液의 密度 (ρ_v, ρ_l), 傳熱面의 길이 (ℓ) 및 幅 (b)의 10개로 취하고, 基本量을 5개 ($M, L, T, q/\rho_v L_h, \tau$)로 하여 π 定理를 써서 다음과 같은 5개의 無次元項을 얻을 수 있다.

$$\left[q\ell/k\Delta T_{sat}, (q/\rho_v L_h)^2, \frac{\rho_v \ell}{\sigma}, q\ell/\rho_v L_h \nu, \rho_l/\rho_v, b/\ell \right]$$

여기서 表面張力에 注目하여 上記 無次元項을 組合하면 近似的으로 다음과 같이 整理된다.

$$\frac{q\ell}{R\Delta T_{sat}} = Nu_L = C \left[\left(\frac{q}{\rho_v L_h} \right)^2 \cdot \frac{\rho_v \ell}{\sigma} \right]^\alpha \left[\frac{b}{\ell} \right]^\beta \dots\dots\dots (3)$$

이식에 각 傳熱面에 대한 實驗結果를 適用하여 左邊에 대한 右邊 第1項의 影響을 最小二乘法에 의해서 구하면 指數 $\alpha = 0.35$ 이며, 第2項인 加熱面形狀比의 影響을 나타내는 指數 $\beta = 0.103$, 그리고 常數 $C = 6,744$ 가 된다. 따라서 表面張力의 熱傳達係數에 대한 影響은 式(4)로 表示할

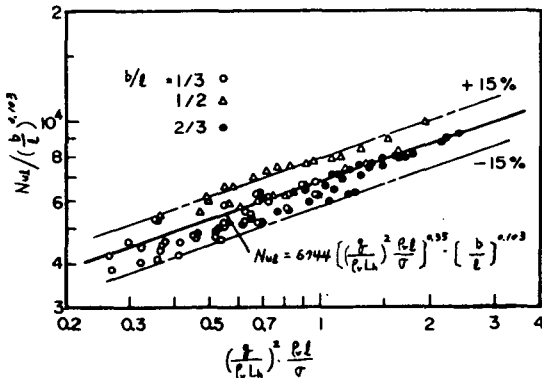


Fig.7 Dimensionless correlation of saturated nucleate boiling.

수 있으며, 表面張力은 核沸騰熱傳達에 큰 影響 $h = const \cdot \sigma^{-0.35} \dots\dots\dots (4)$

을 끼치는 것으로 나타난다. 核沸騰域의 實驗值를 整理하면 Fig.7과 같고, 이 沸騰曲線의 無次元整理式(5)는 $\pm 15\%$ 의 精度範圍에서 滿足하고 있다.

$$Nu_L = 6,744 \left[\left(\frac{q}{\rho_v L_h} \right)^2 \cdot \frac{\rho_v \ell}{\sigma} \right]^{0.35} \cdot \left[\frac{b}{\ell} \right]^{0.103} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 Nu_L 은 傳熱面의 길이 ℓ (30 mm)를 代表 길이로 취한 Nusselt 數이다.

4. 結 論

上向衝突水噴流系의 核沸騰實驗에서 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 噴流速度를 增加시킴에 따라 非沸騰曲線은 高熱流束쪽으로 移動하고 核沸騰曲線 勾配에 대한 噴流速度의 影響은 크게 받지 않으나 熱流束은 上昇한다.

2) 傳熱面의 形狀比가 클수록 核沸騰曲線의 勾配는 增加하며 本實驗結果의 無次元整理式을

$$Nu_L = 6,744 \left[\left(\frac{q}{\rho_v L_h} \right)^2 \cdot \frac{\rho_v \ell}{\sigma} \right]^{0.35} \cdot \left[\frac{b}{\ell} \right]^{0.103}$$

으로 表示할때 $\pm 15\%$ 의 精度範圍에서 滿足된다.

3) 飽和沸騰熱傳達係數와 表面張力사이에는 $h = Const \cdot \sigma^{-0.35}$ 의 關係를 갖는다.

References

1. A. E. Bergles, W.M. Rohsenow, "The Determination of Forced Convection Surface-Boiling Heat Transfer", Journal of Heat Transfer, Trans. ASME. Ser. C.,

- 86-3, pp.365-372, 1964.
2. M.A.Ruch, J.P.Holman, "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. 門出政則, 甲藤好郎, "衝突噴流沸騰系のバーンアウトの研究(第1報, 気液の挙動の特性)", *日本機械學會論文集*, 43巻, 373號, pp.3399 ~ 3407, 1977.
 4. 戸田三郎, 内田秀雄, "蒸發, 沸騰を伴うフィルム・リークングに関する研究", *日本機械學會論文集*, 38巻, 311號, pp.1830 ~ 1837, 1972.
 5. 甲藤好郎, 門出政則, "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*, 41巻, 341號, pp.306-314, 1975.
 6. 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.
 7. K.Nishikawa, K.Yamagata, "On the Correlation of Nucleate Boiling Heat Transfer", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.1, pp.219-235, 1960.
 8. K.Nishikawa, Y.Fujita, H.Ohta, S.Hidaka, "Effect of the Surface Roughness on the Nucleate Boiling Heat Transfer over the Wide Range of Pressure", *Proc. 7th, Int. Heat Transf. Conf. München*, Vol.4, PB.10, pp.61-66, 1982.
 9. 日野龍太郎, 植田辰洋, "サブクール沸騰流における傳熱および流動特性について(第1報, 沸騰特性)", *日本機械學會論文集*, 50巻, 458號, pp.2401-2408, 1984.
 10. 鐵鋼材料便覽, *日本機械學會, 日本鐵鋼協會, 日本東京, 丸善株式會社*, 1967.
 11. 勝田正文, 黒瀬式彦, "液膜の沸騰熱傳達に関する研究(第2報, 核沸騰限界熱流束について)", *日本機械學會論文集*, 47巻, 421號, pp.1849-1860, 1981.