

圖 3-1 流道方位 0°,  $\Delta T_{sub}:28^{\circ}\text{C}$ , Re:2000 之熱損失百分比圖

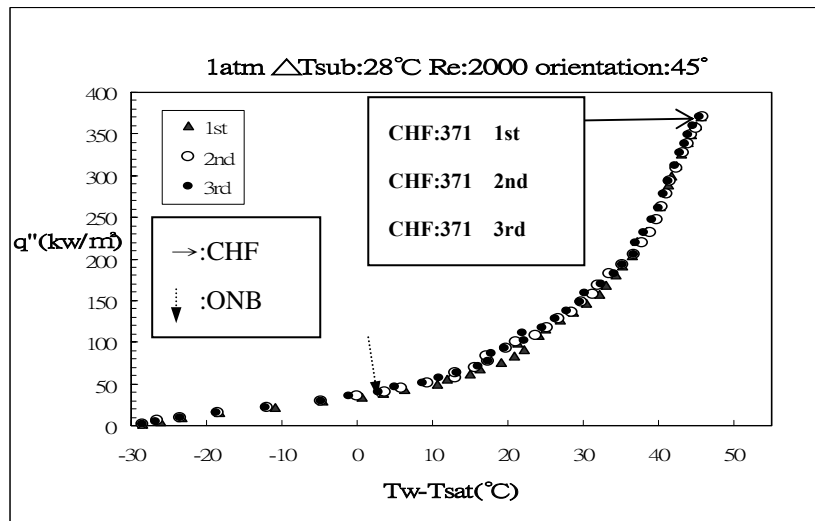


圖 3-2 流道方位 45°,  $\Delta T_{sub}:28^{\circ}\text{C}$ , Re:2000 之重複度實驗沸騰曲線圖

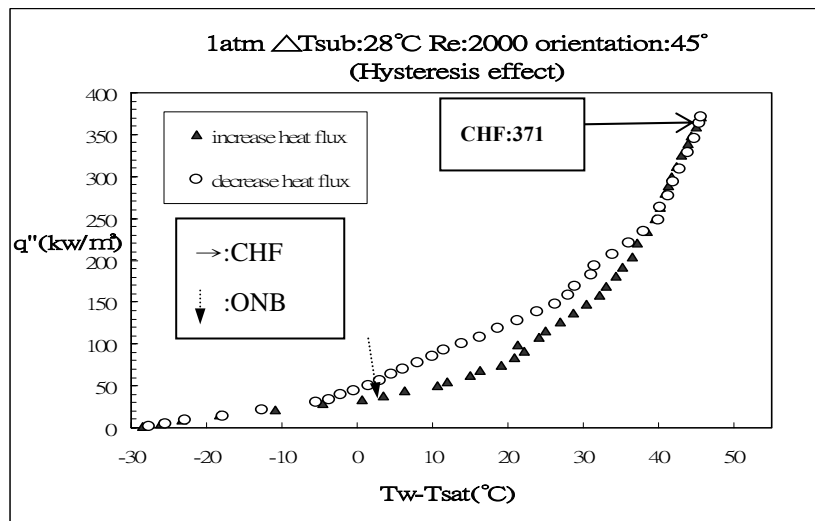


圖 3-3 流道方位 45°,  $\Delta T_{sub}:28^{\circ}\text{C}$ , Re:2000 之遲滯效應圖

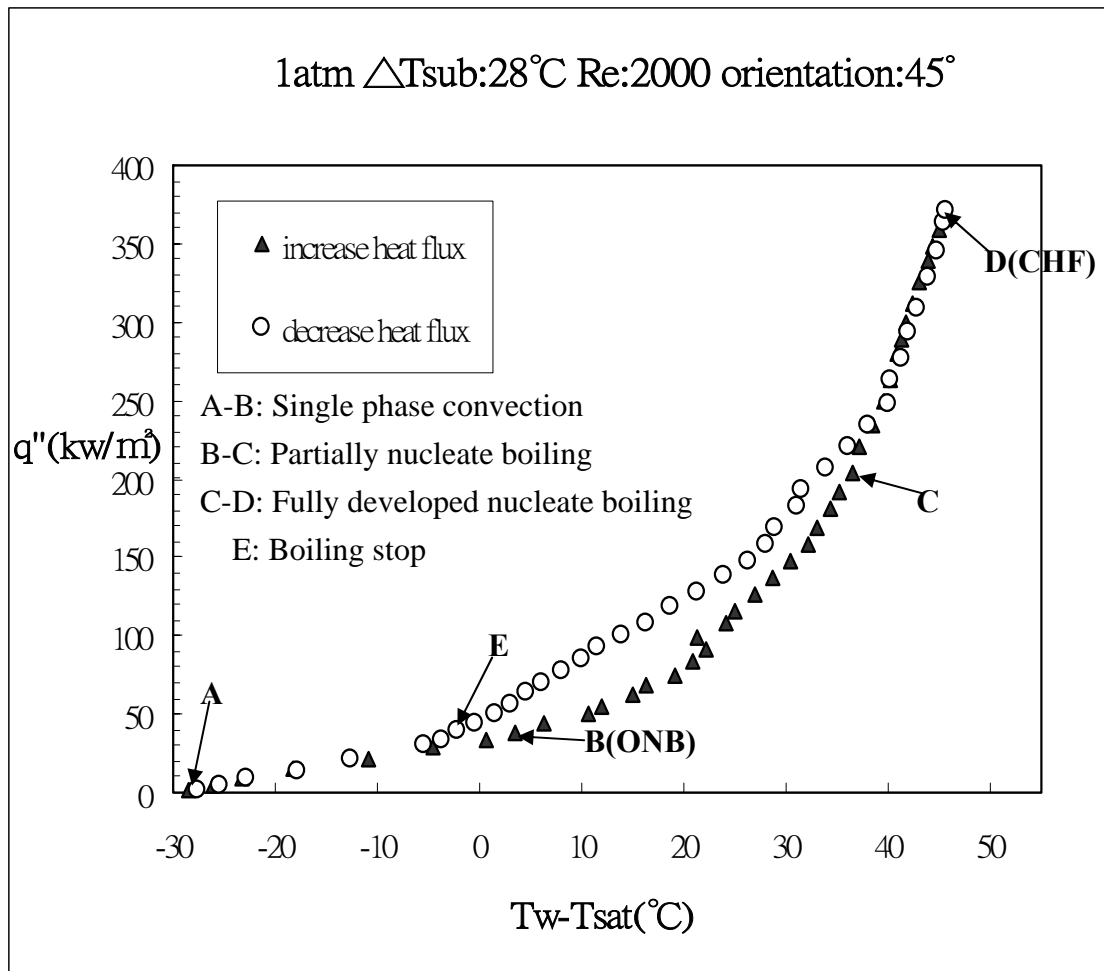


圖 3-4 流道方位  $45^{\circ}$  之沸騰曲線圖與各階段之熱傳機制(1atm,  $\Delta T_{sub} : 28$ ,  
 Re=2000)

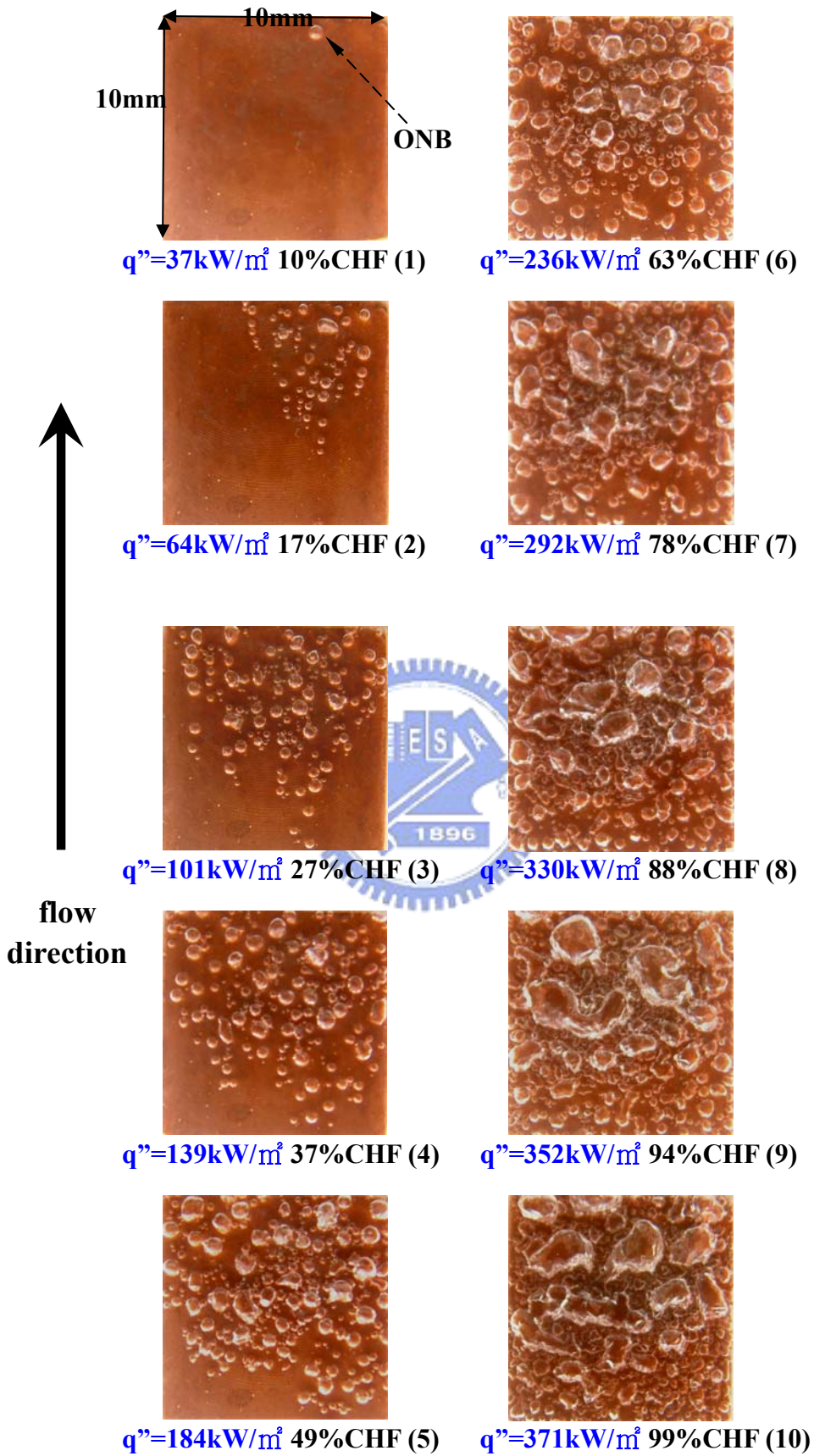


圖 3-5 流道方位  $45^\circ$ ,  $\Delta T_{\text{sub}}: 28^\circ\text{C}$ ,  $Re=2000$  情況下之氣泡發展流譜圖

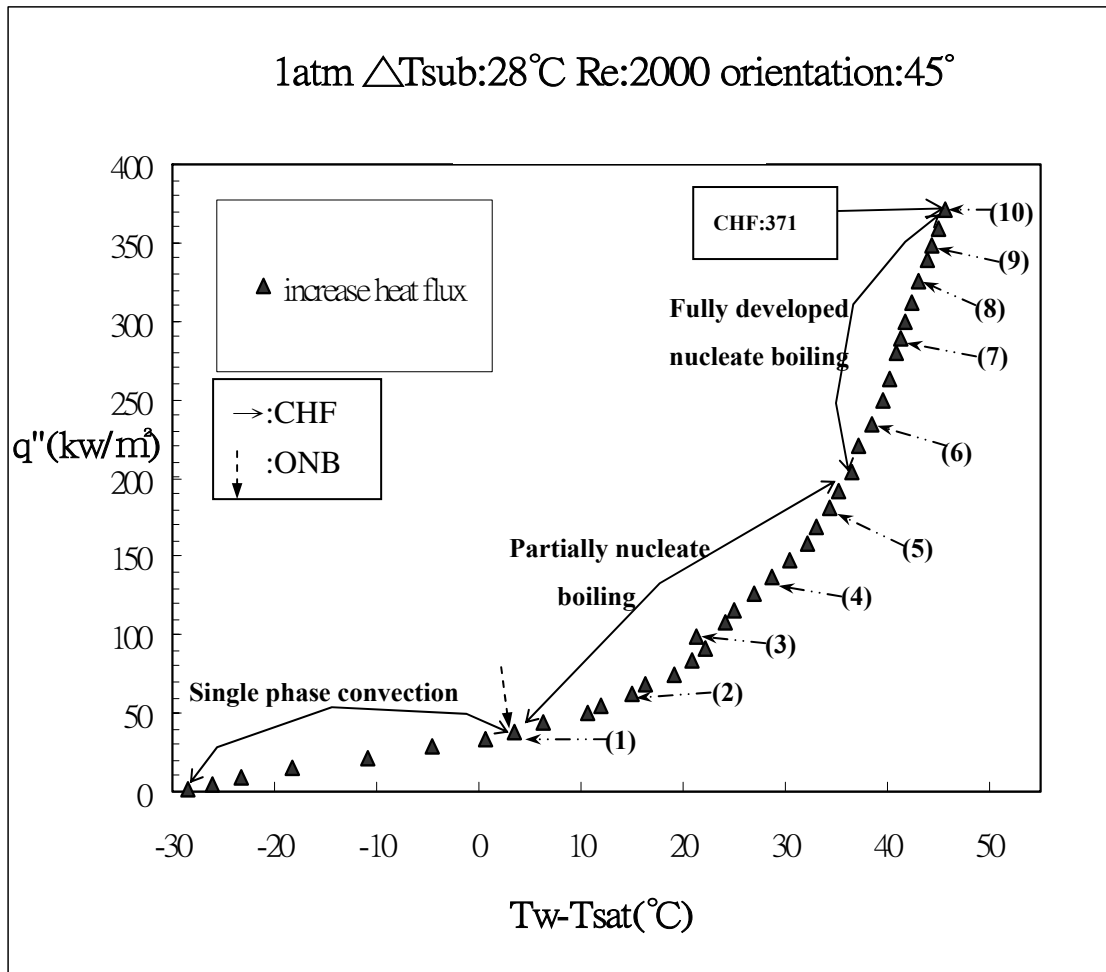


圖 3-6 流道方位 45°， $\Delta T_{sub}:28^{\circ}\text{C}$ ， $Re=2000$  情況下之氣泡發展流譜圖於沸騰曲線之對應圖

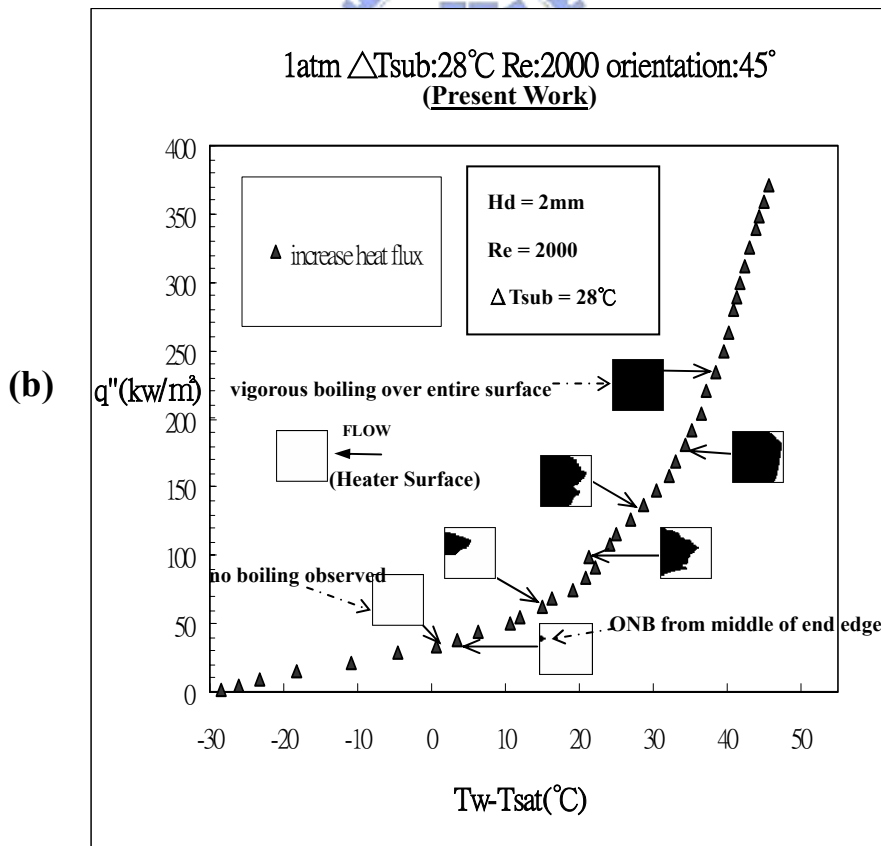
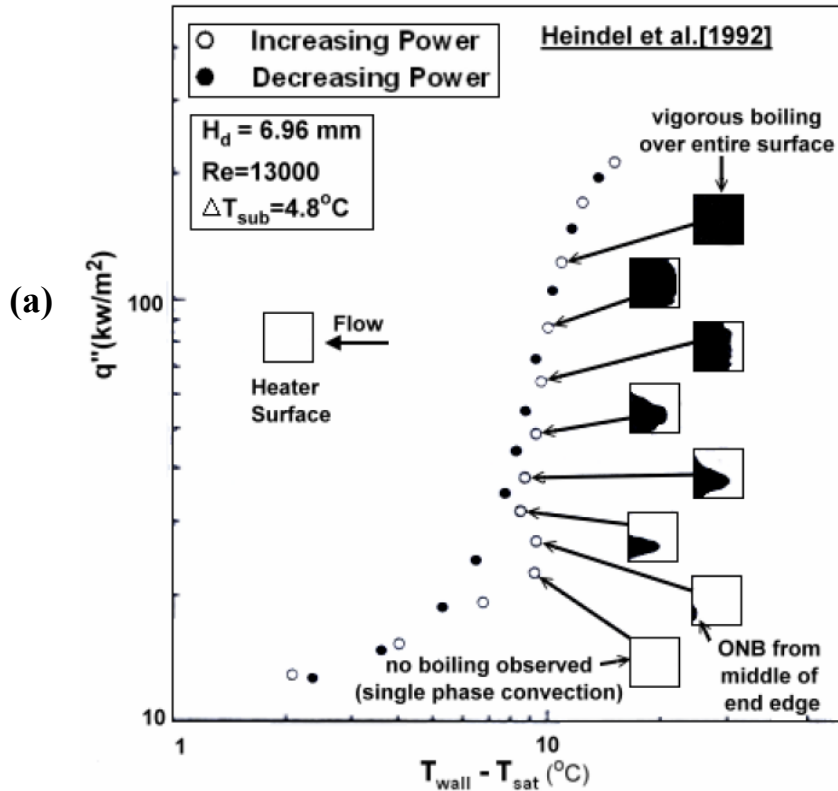


圖 3-7 氣泡成長過程圖 (a)Heindel (b) Present Work (圖中黑色區塊為生成氣泡)

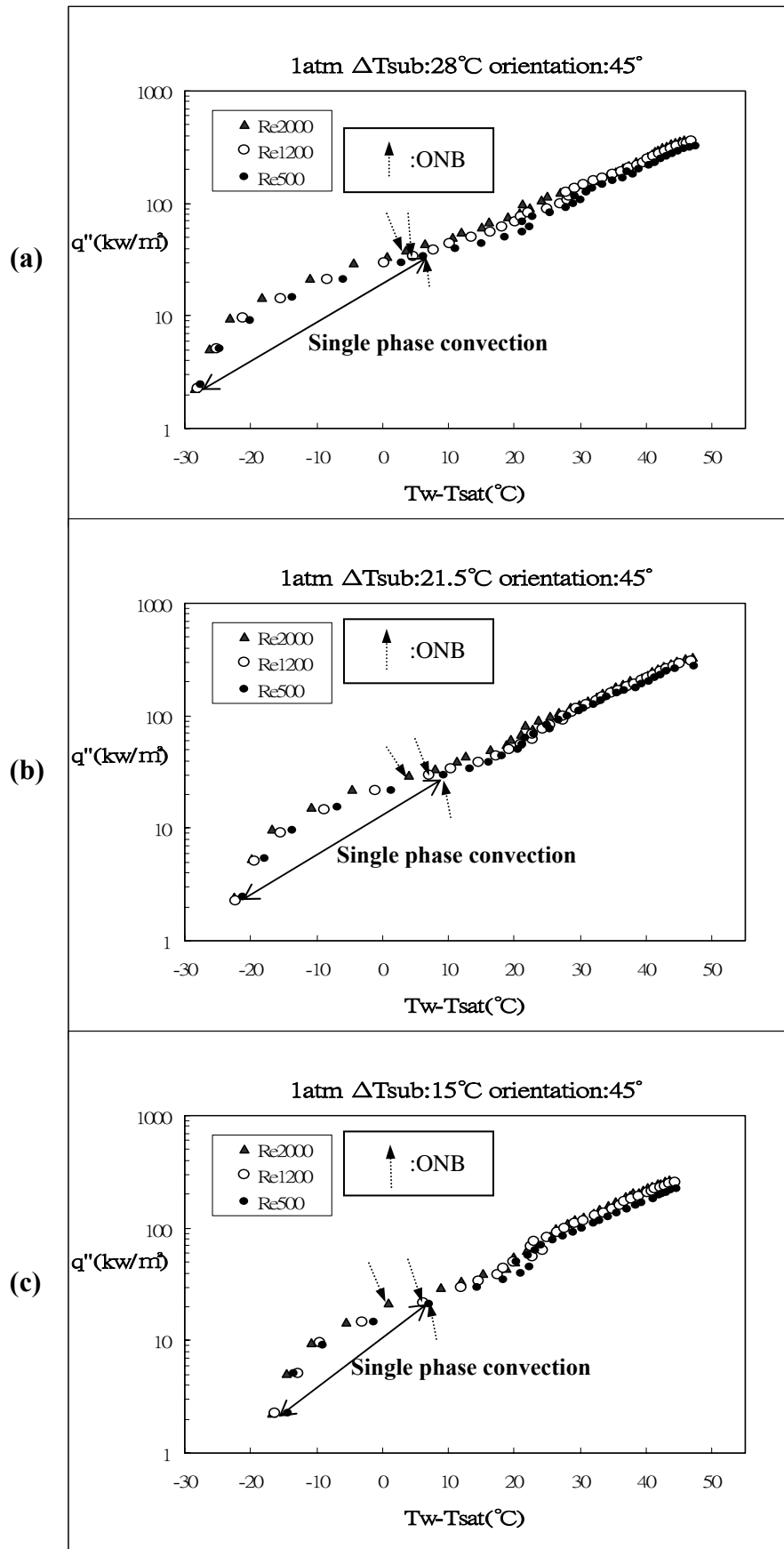


圖 3-8 流道方位  $45^{\circ}$ ，次冷度： $28^{\circ}\text{C}$ (a)， $21.5^{\circ}\text{C}$ (b)， $15^{\circ}\text{C}$ (c)情況下，不同  $Re$  之沸騰曲線圖( $Re$  於單相熱傳區對於晶片壁溫之影響)

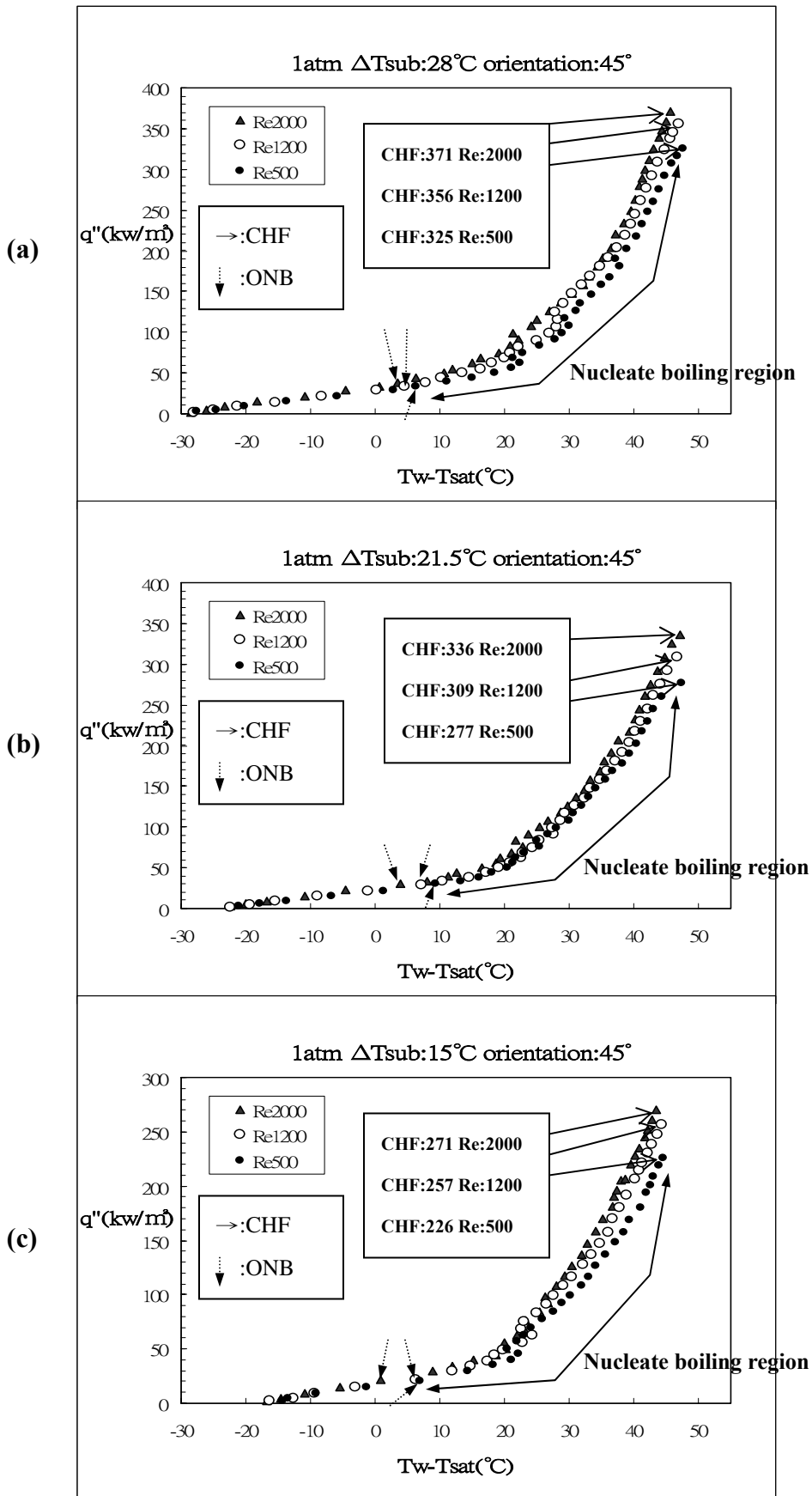


圖 3-9 流道方位  $45^{\circ}$ ，次冷度:  $28^{\circ}\text{C}$  (a),  $21.5^{\circ}\text{C}$  (b),  $15^{\circ}\text{C}$  (c) 情況下，不同 Re 之沸騰曲線圖 (Re 對於 CHF 之影響)

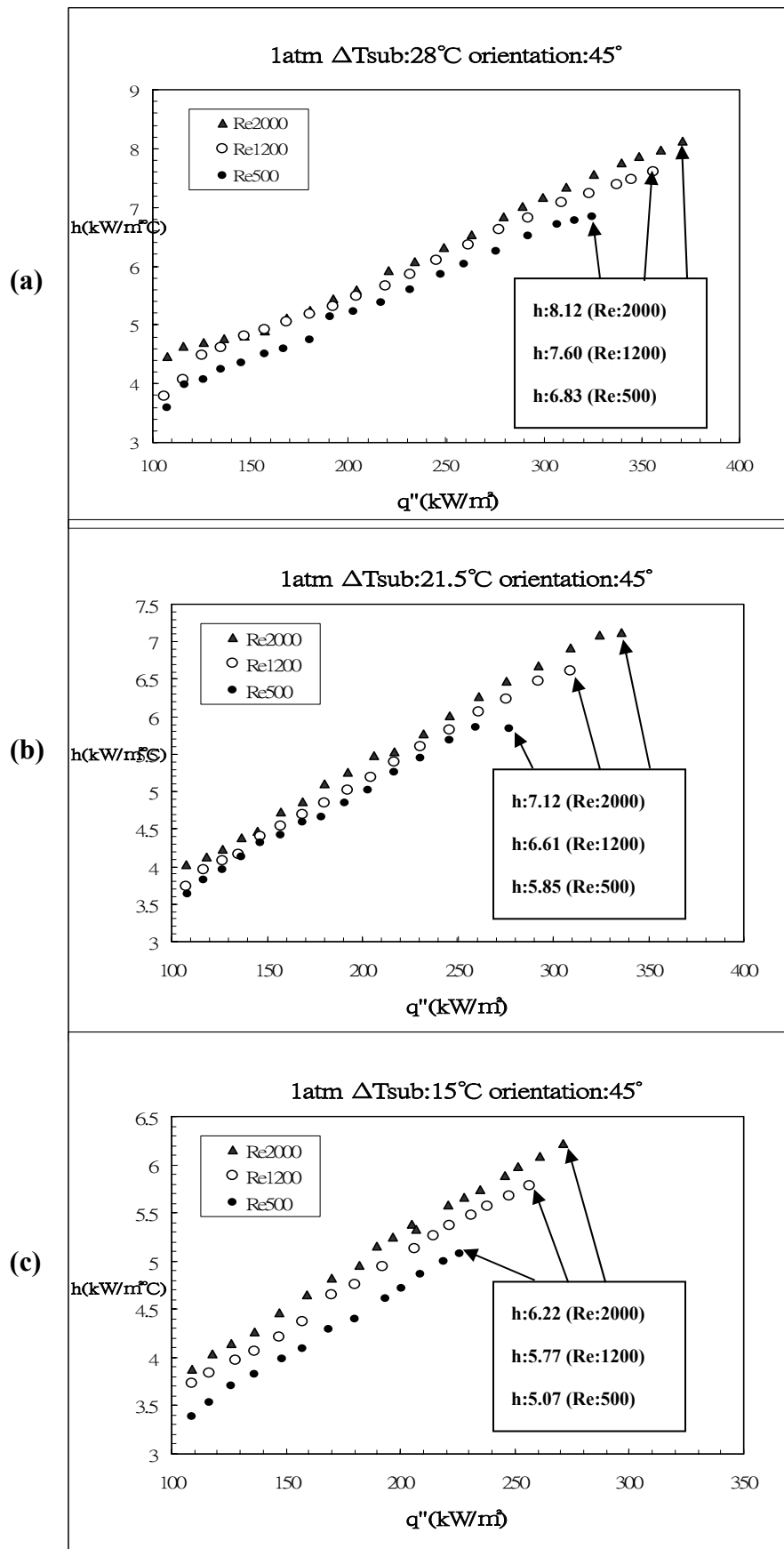


圖 3-10 流道方位  $45^{\circ}$ ，次冷度： $28^{\circ}\text{C}$ (a)， $21.5^{\circ}\text{C}$ (b)， $15^{\circ}\text{C}$ (c)情況下，不同 Re 之熱傳係數圖



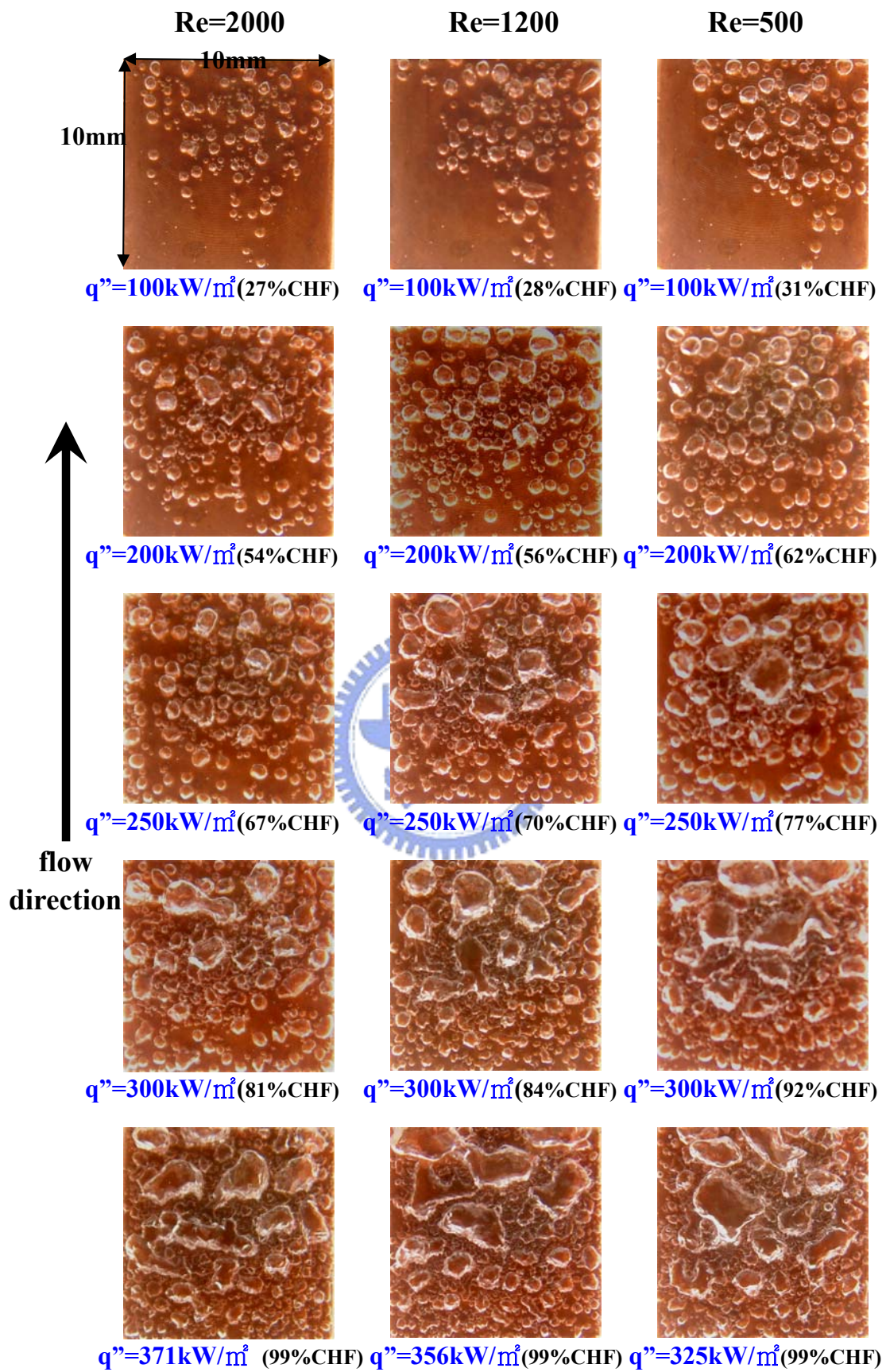


圖 3-11(a) 流道方位  $45^\circ$ ，次冷度  $\Delta T_{\text{sub}}$ ： $28^\circ\text{C}$  情況下，不同雷諾數之流譜圖

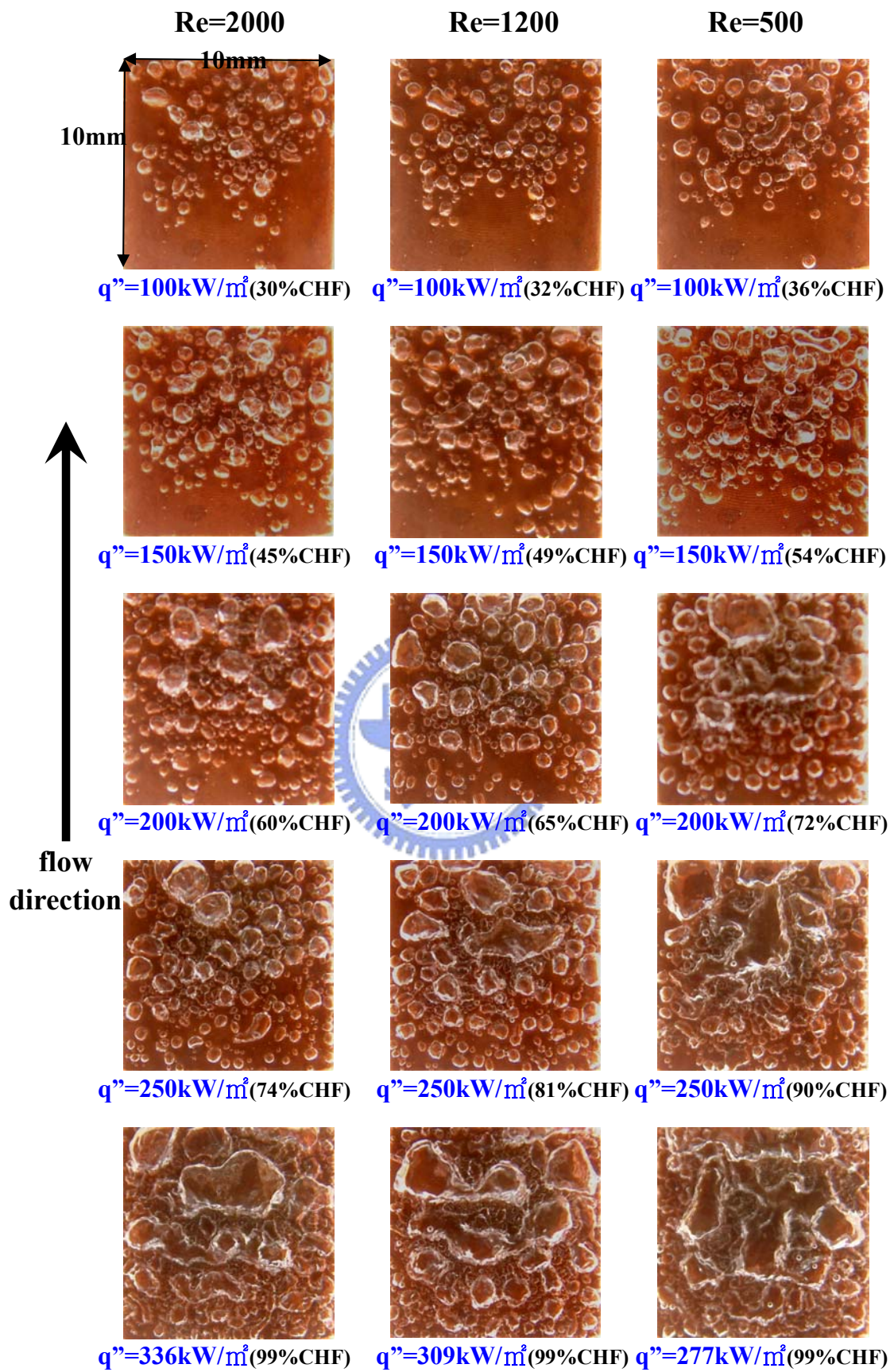


圖 3-11(b) 流道方位  $45^\circ$ ，次冷度  $\Delta T_{\text{sub}}$ ： $21.5^\circ\text{C}$  情況下，不同雷諾數之流譜圖

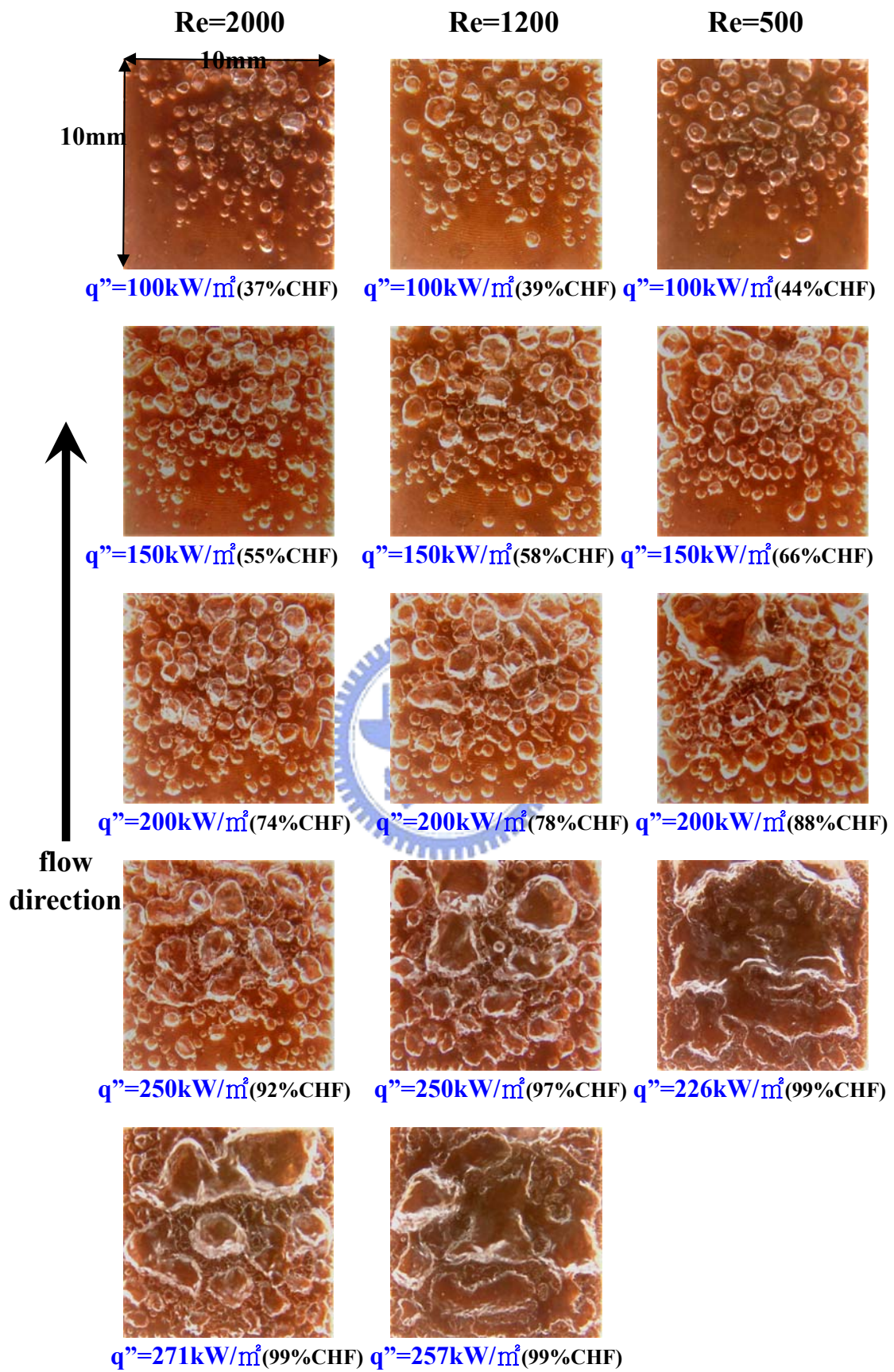


圖 3-11(c) 流道方位 45°, 次冷度  $\Delta T_{sub}$ : 15°C 情況下, 不同雷諾數之流譜圖

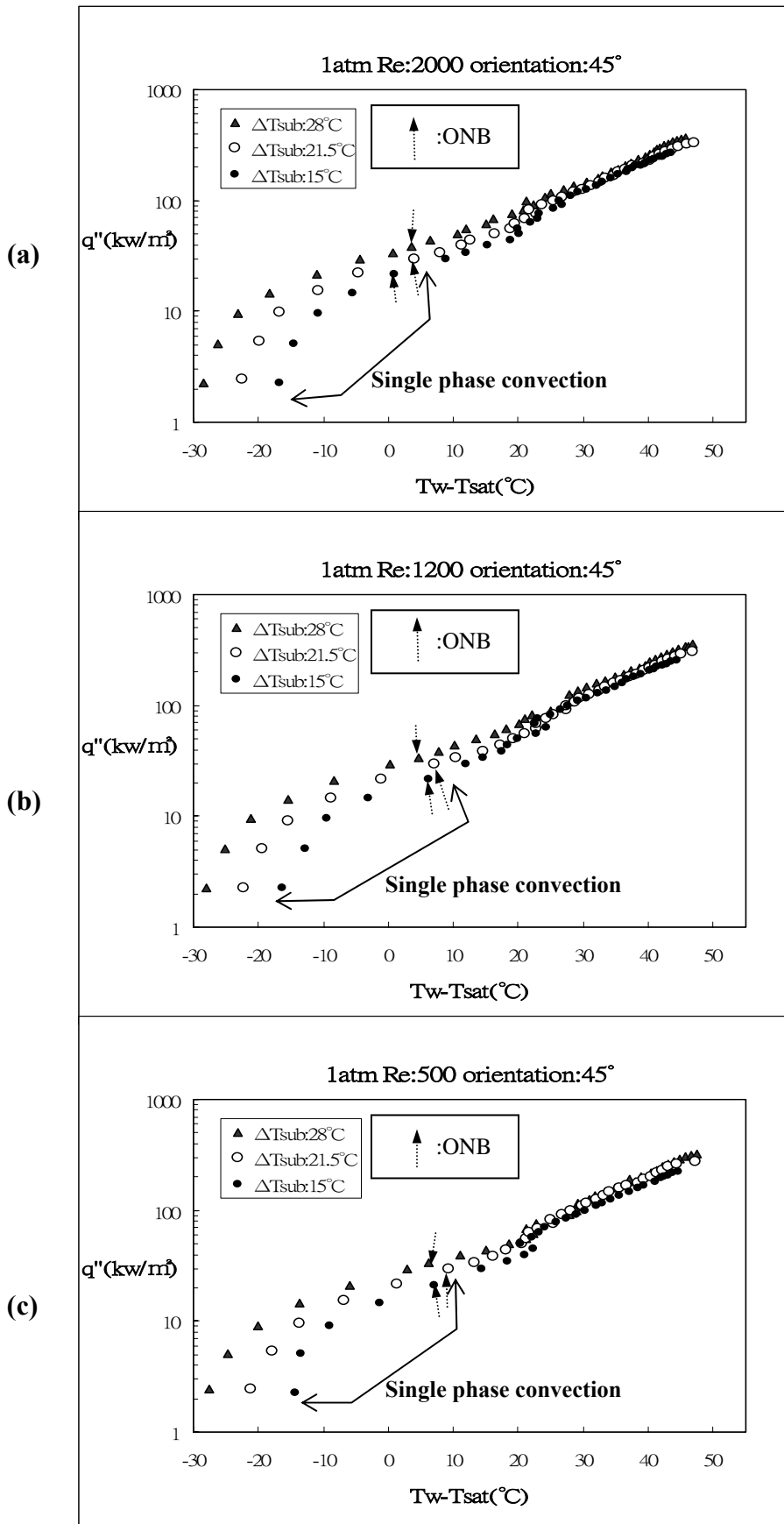


圖 3-12 流道方位 45°, Re: 2000(a), 1200(b), 500(c)情況下，不同次冷度之沸騰曲線圖(次冷度於單相熱傳區對於晶片壁溫之影響)

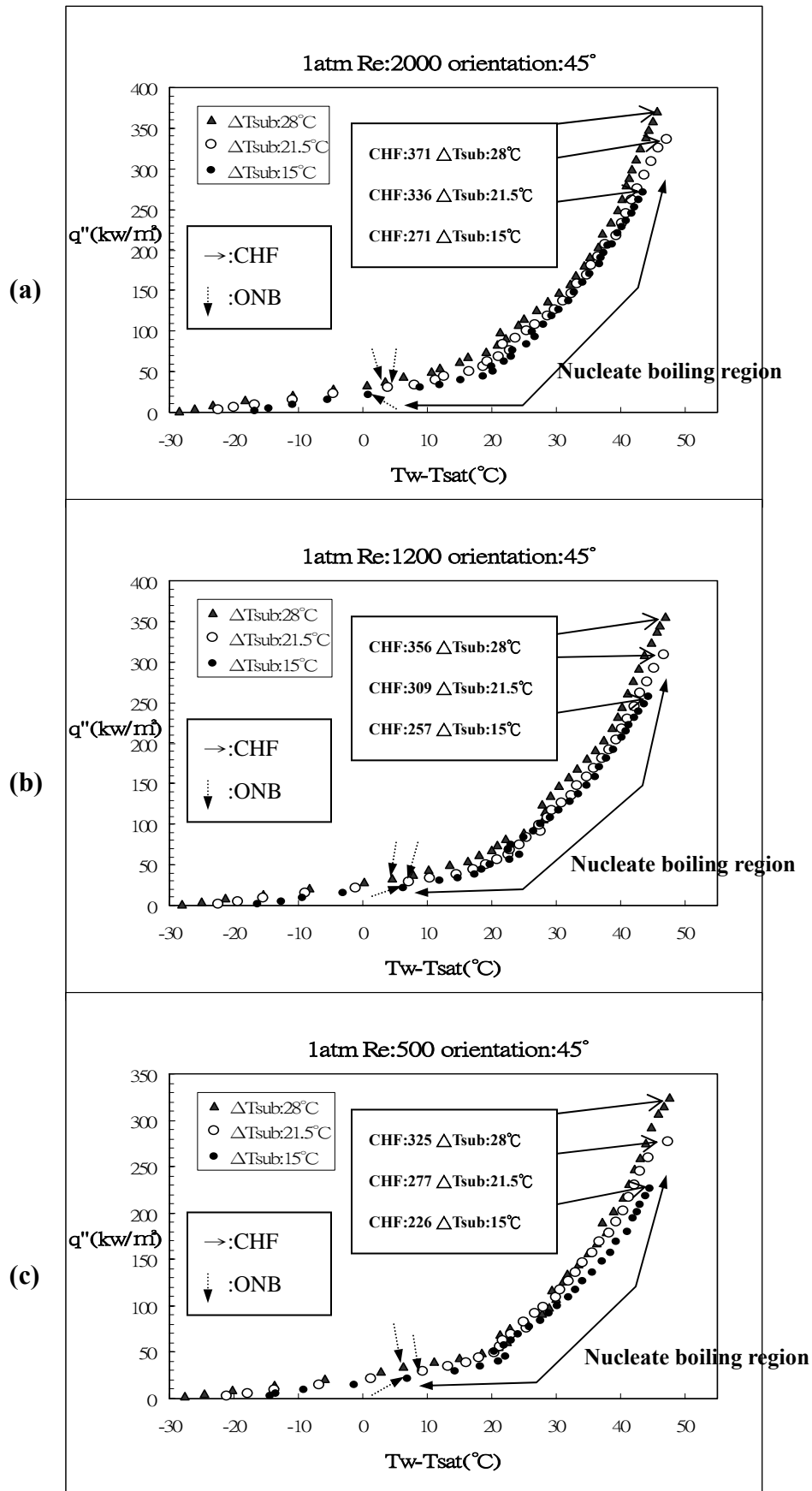


圖 3-13 流道方位 45°, Re:2000(a), 1200(b), 500(c)情況下，不同次冷度之沸騰曲線圖(次冷度對於 CHF 之影響)

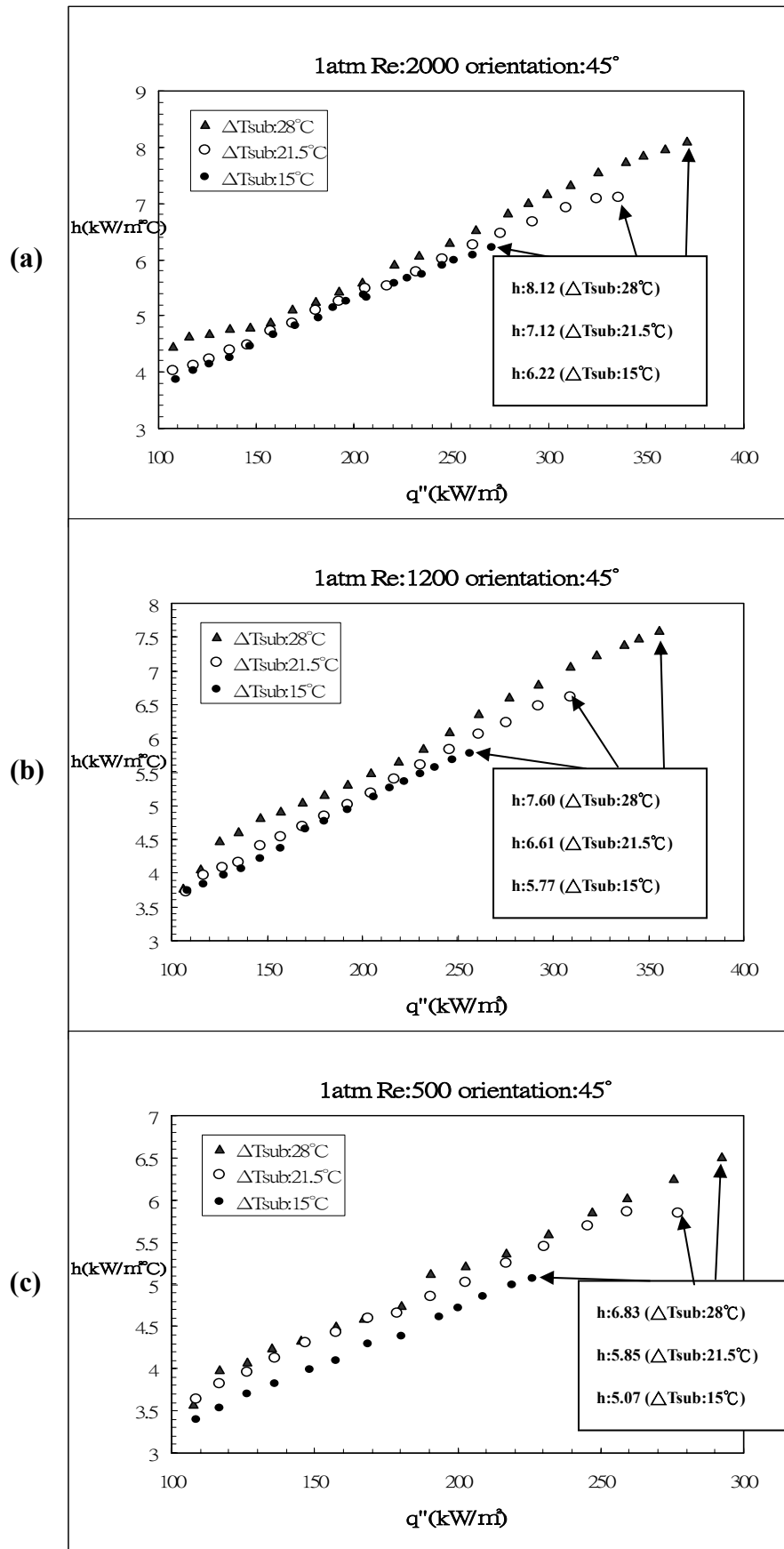


圖 3-14 流道方位  $45^\circ$ , Re:2000(a), 1200(b), 500(c)情況下，不同次冷度之熱傳係數圖

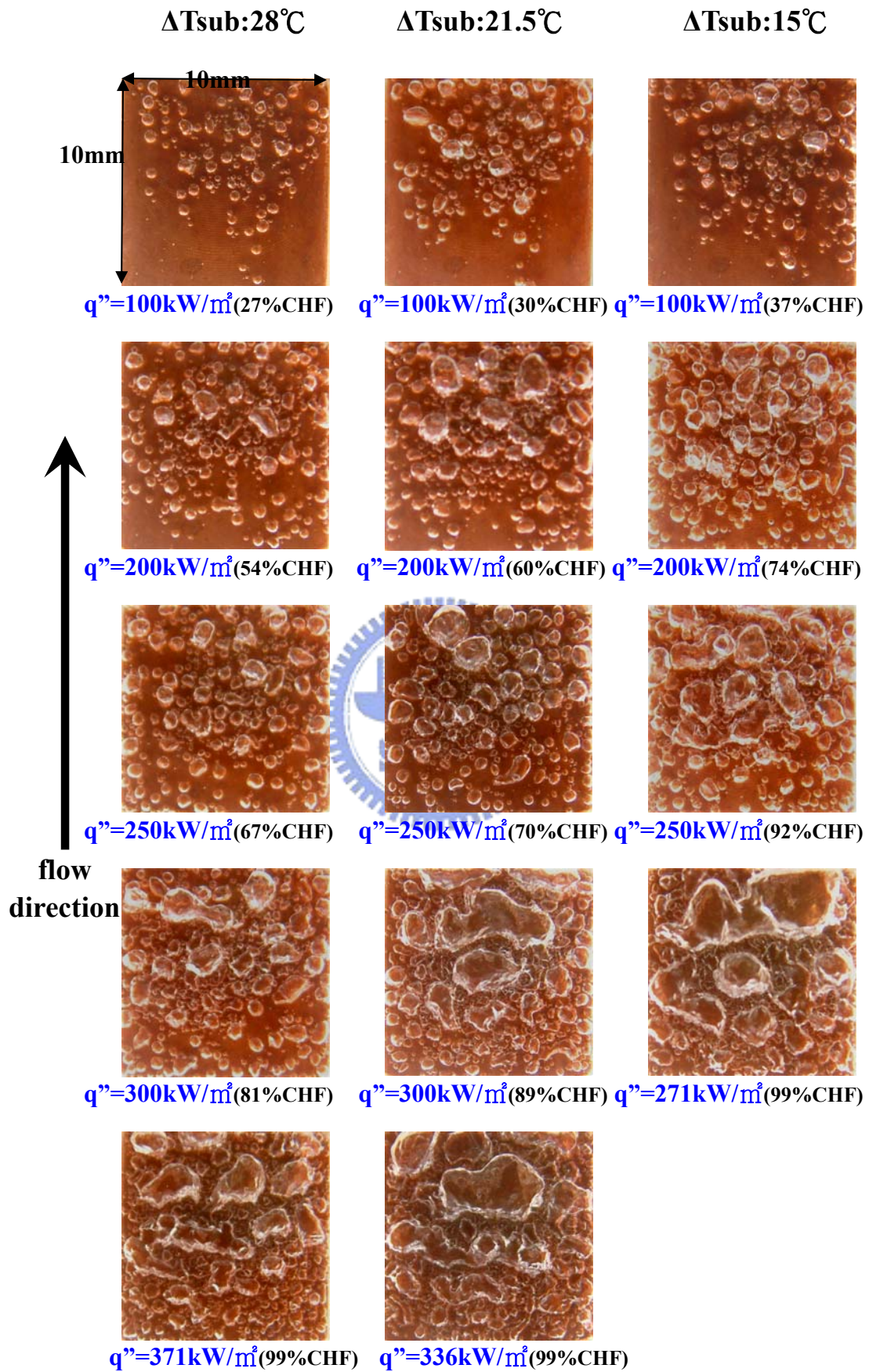


圖 3-15(a) 流道方位  $45^{\circ}$ ,  $Re=2000$  情況下，不同次冷度之流譜圖

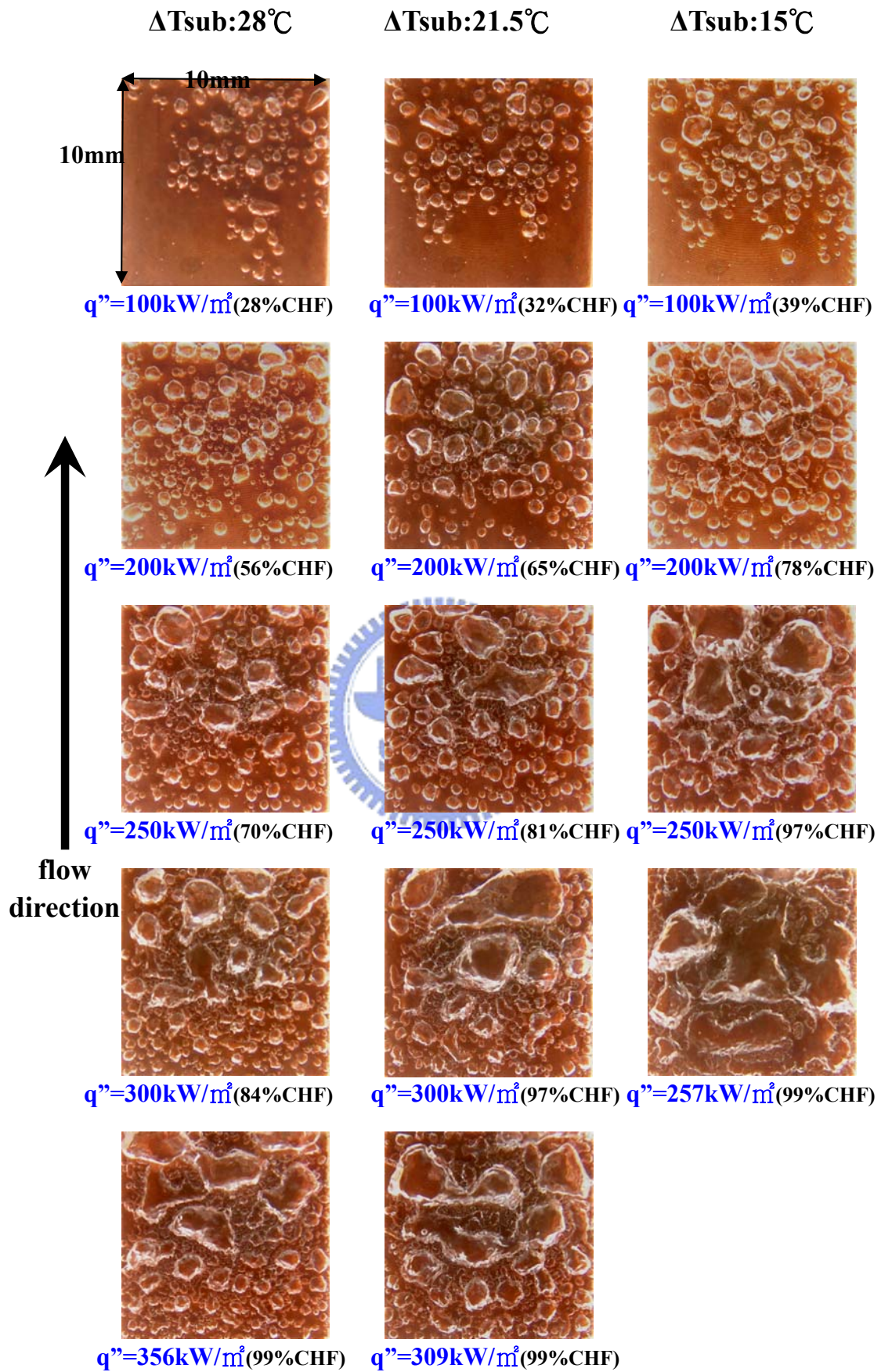


圖 3-15(b) 流道方位  $45^{\circ}$ ,  $Re=1200$  情況下，不同次冷度之流譜圖



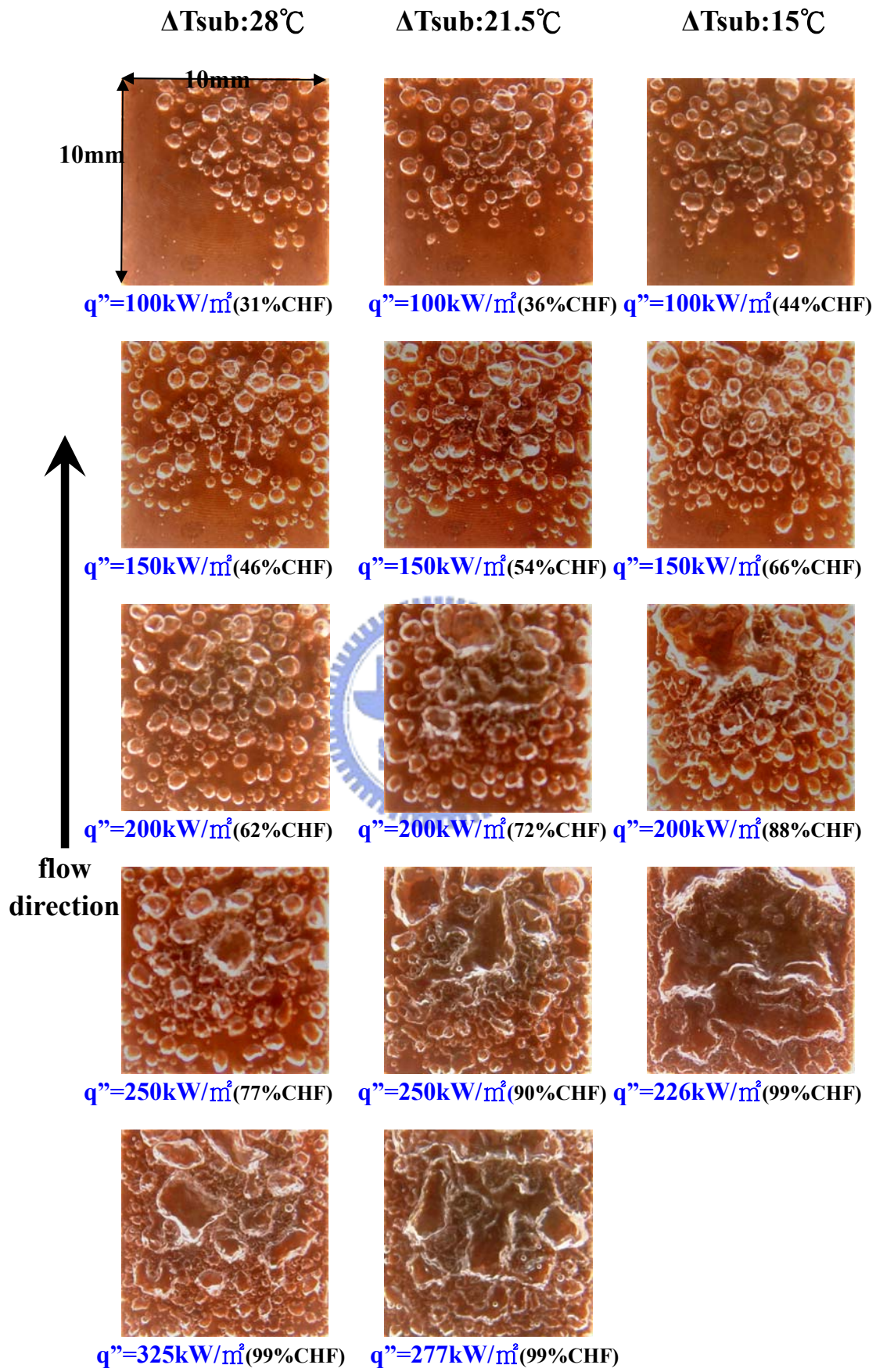


圖 3-15(c) 流道方位  $45^{\circ}$ ,  $Re=500$  情況下，不同次冷度之流譜圖

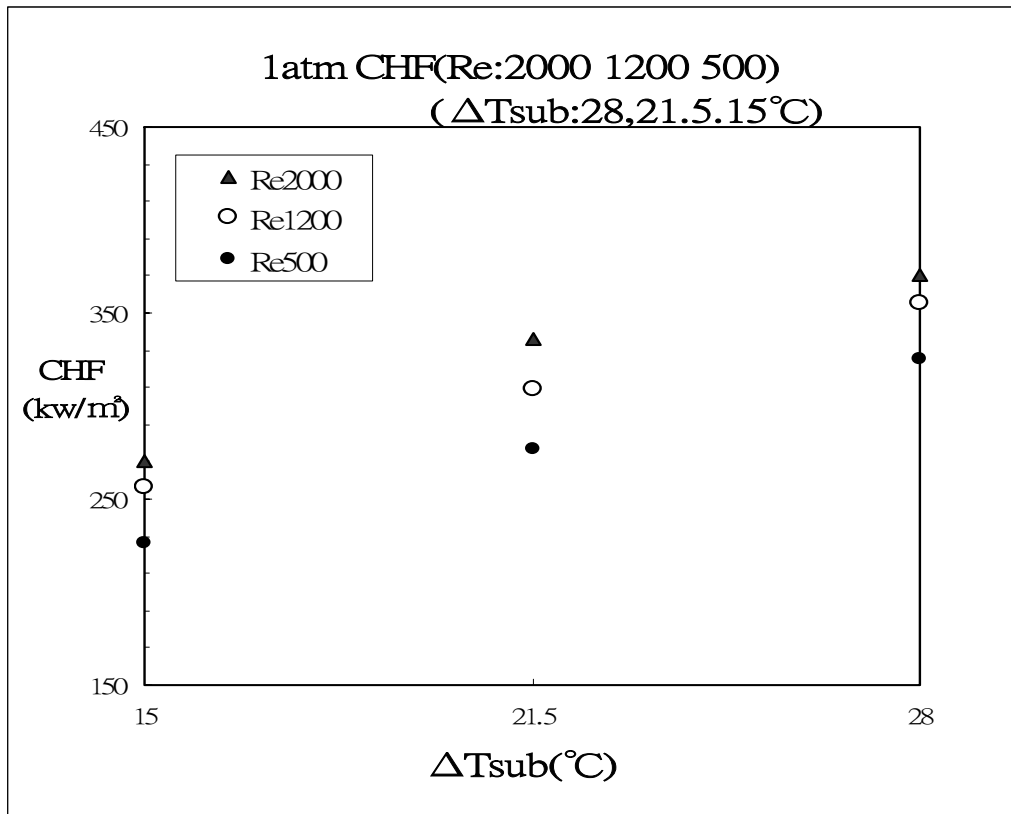


圖 3-16 流道方位 45° 於各次冷度和雷諾數之臨界熱通量比較

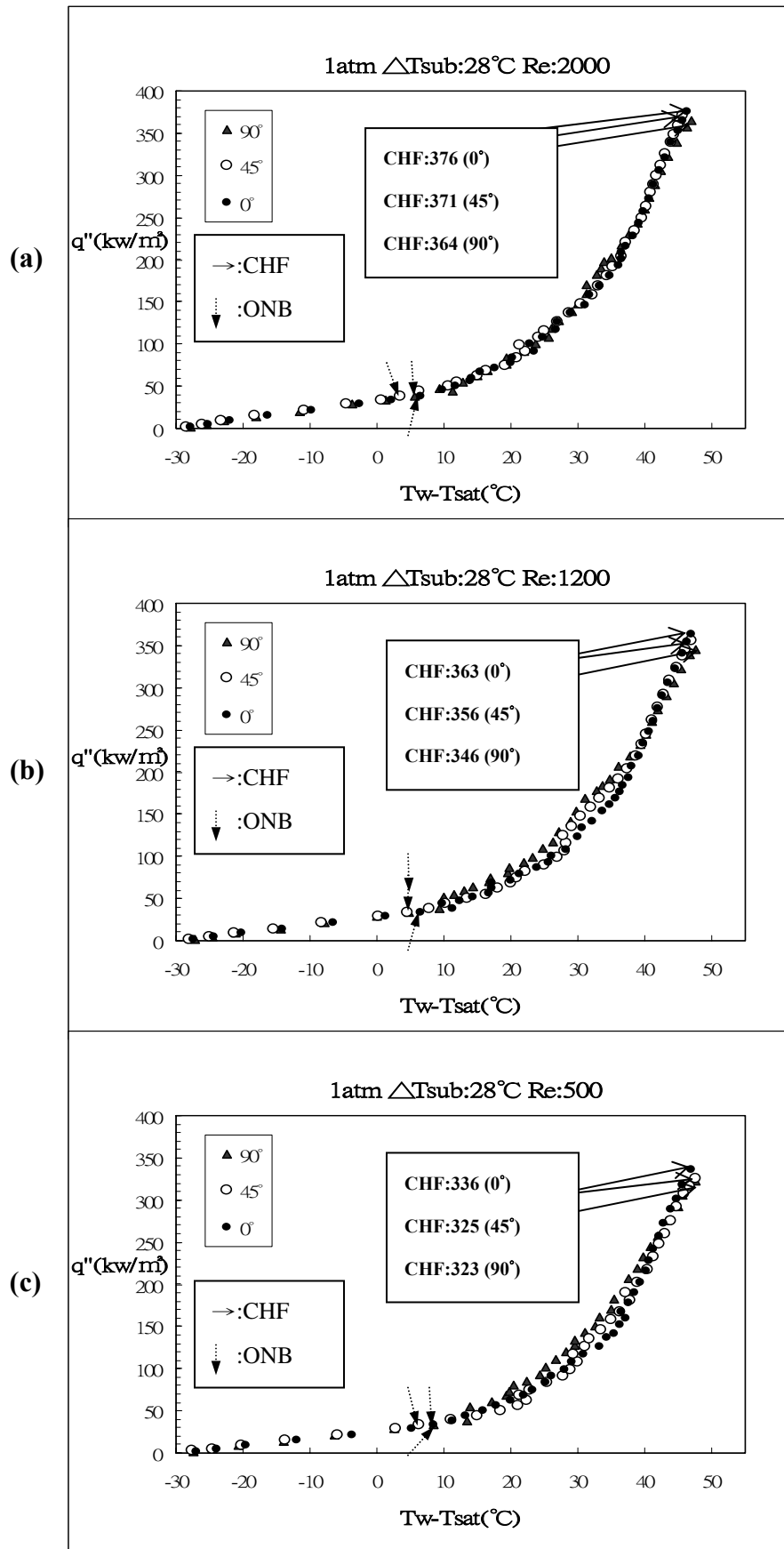


圖 3-17 流道方位於 0°, 45°, 90°, 次冷度:28°C 情況下, Re:2000(a), 1200(b), 500(c)之沸騰曲線圖

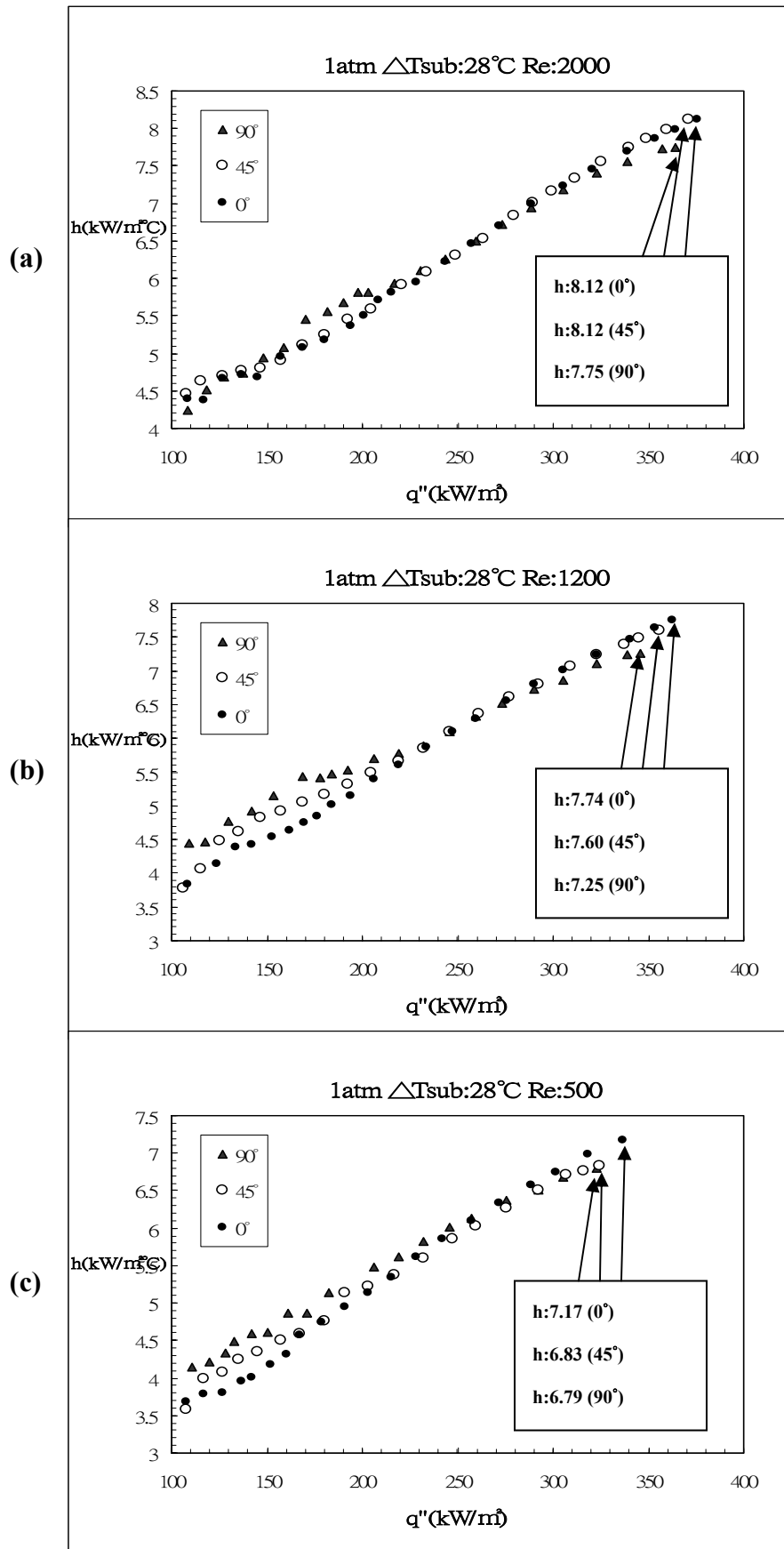


圖 3-18 流道方位於 0°, 45°, 90°, 次冷度:28°C 情況下, Re:2000(a), 1200(b), 500(c) 之熱傳係數圖

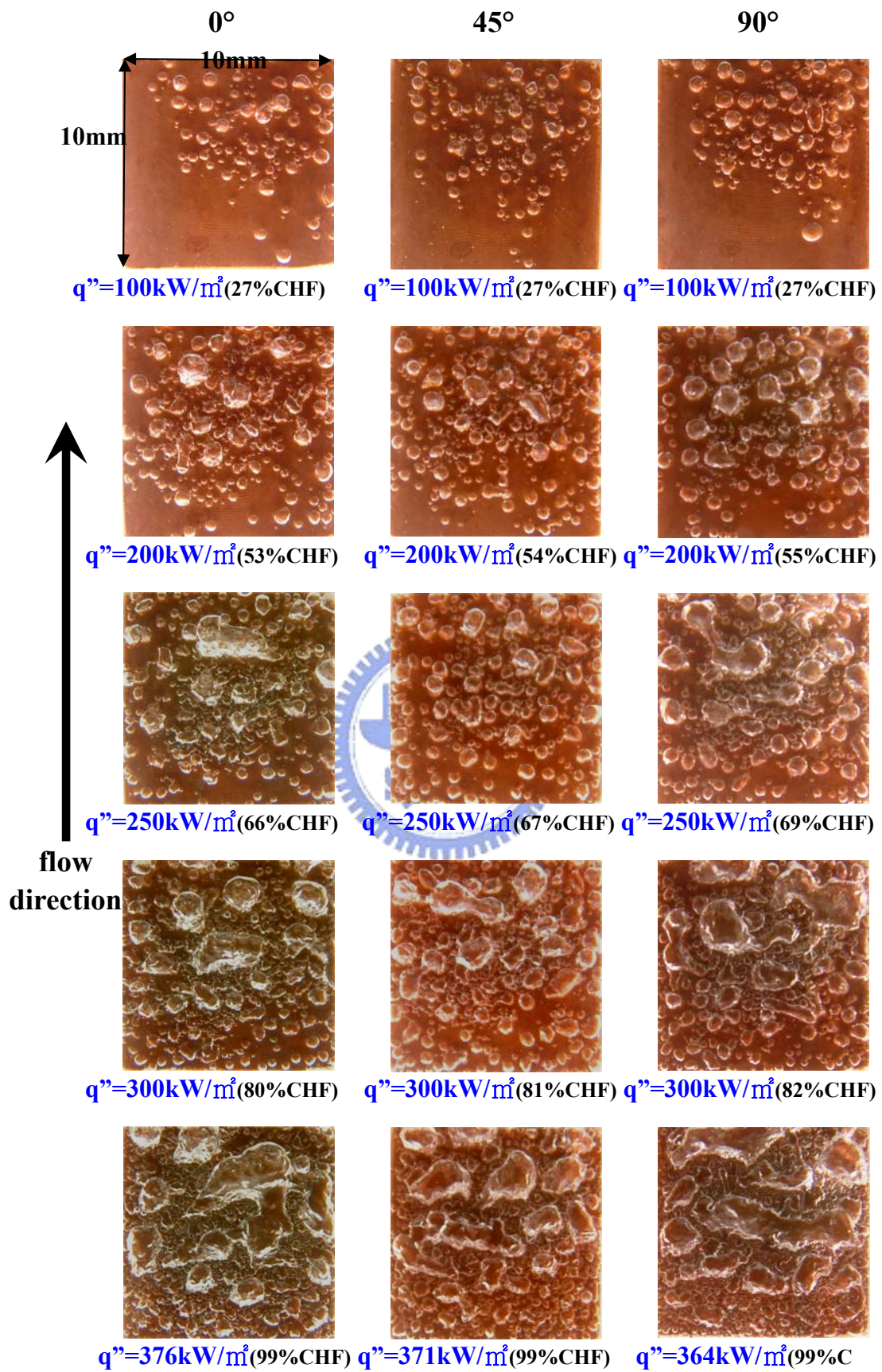


圖 3-19(a) 流道方位於 0°, 45°, 90°, 次冷度 28°C, Re=2000 情況下之流譜圖

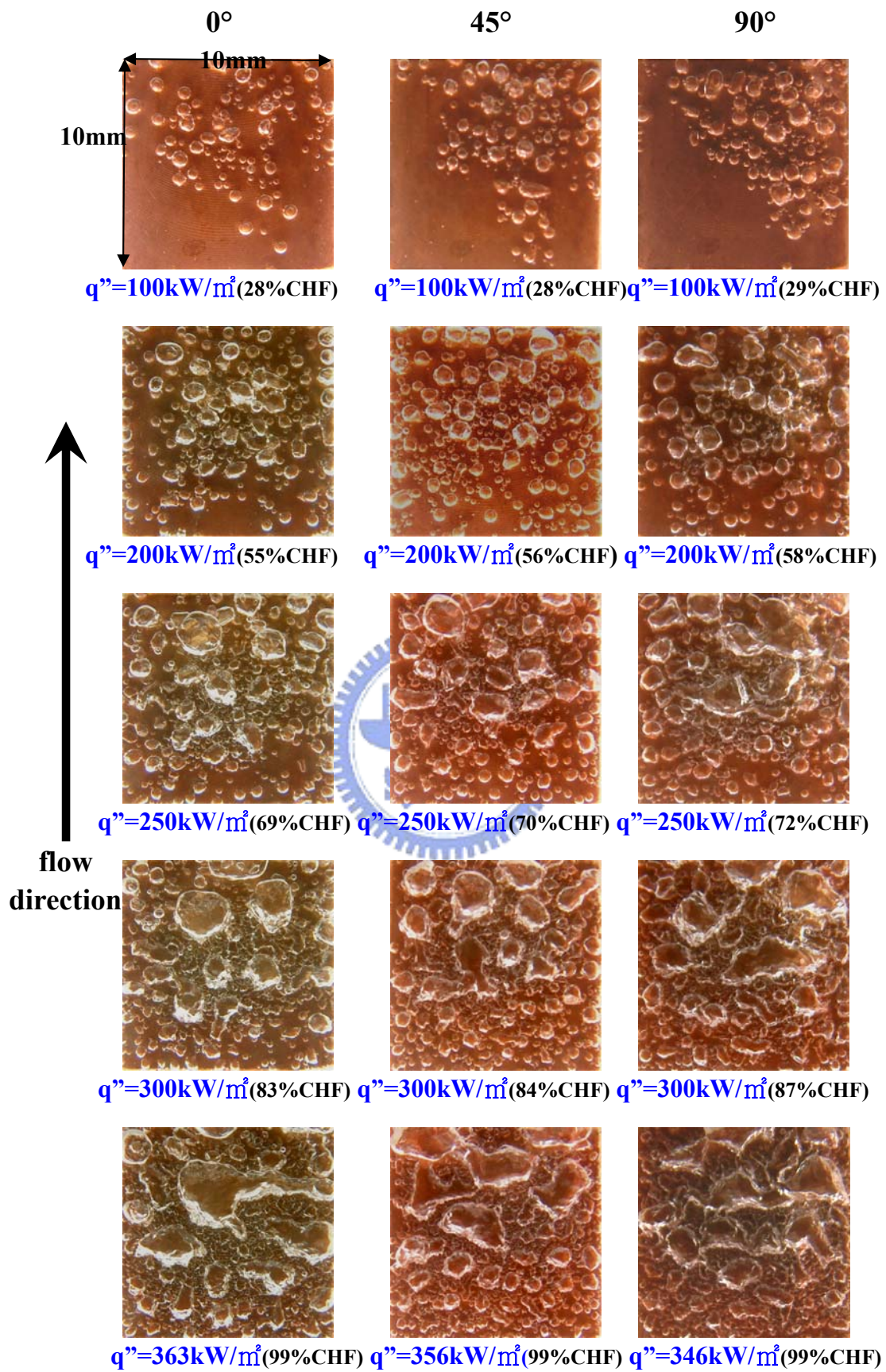


圖 3-19(b) 流道方位於 0°, 45°, 90°, 次冷度 28°C, Re=1200 情況下之流譜圖

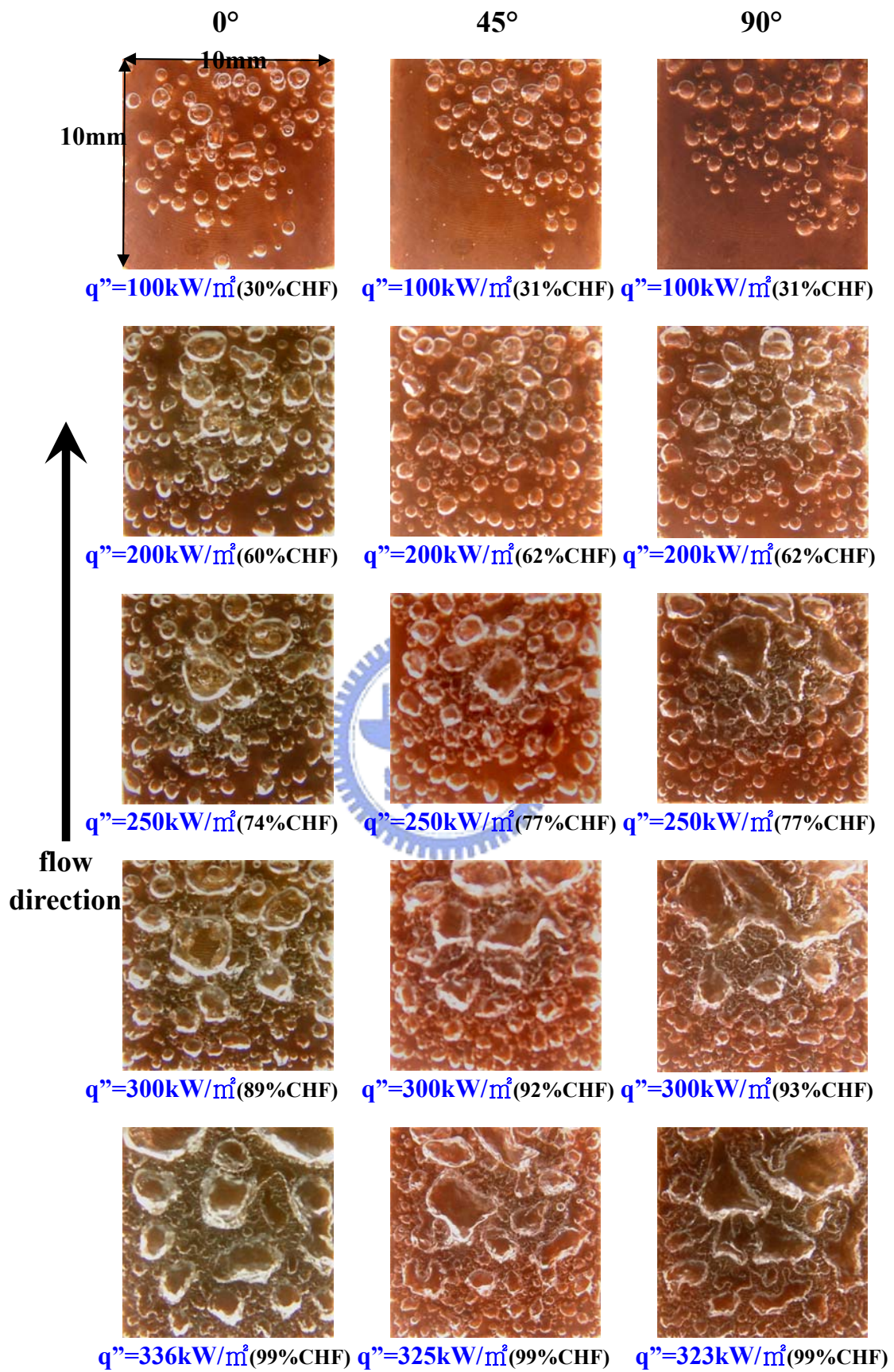


圖 3-19(c) 流道方位於 0°, 45°, 90°, 次冷度 28°C, Re=500 情況下之流譜圖

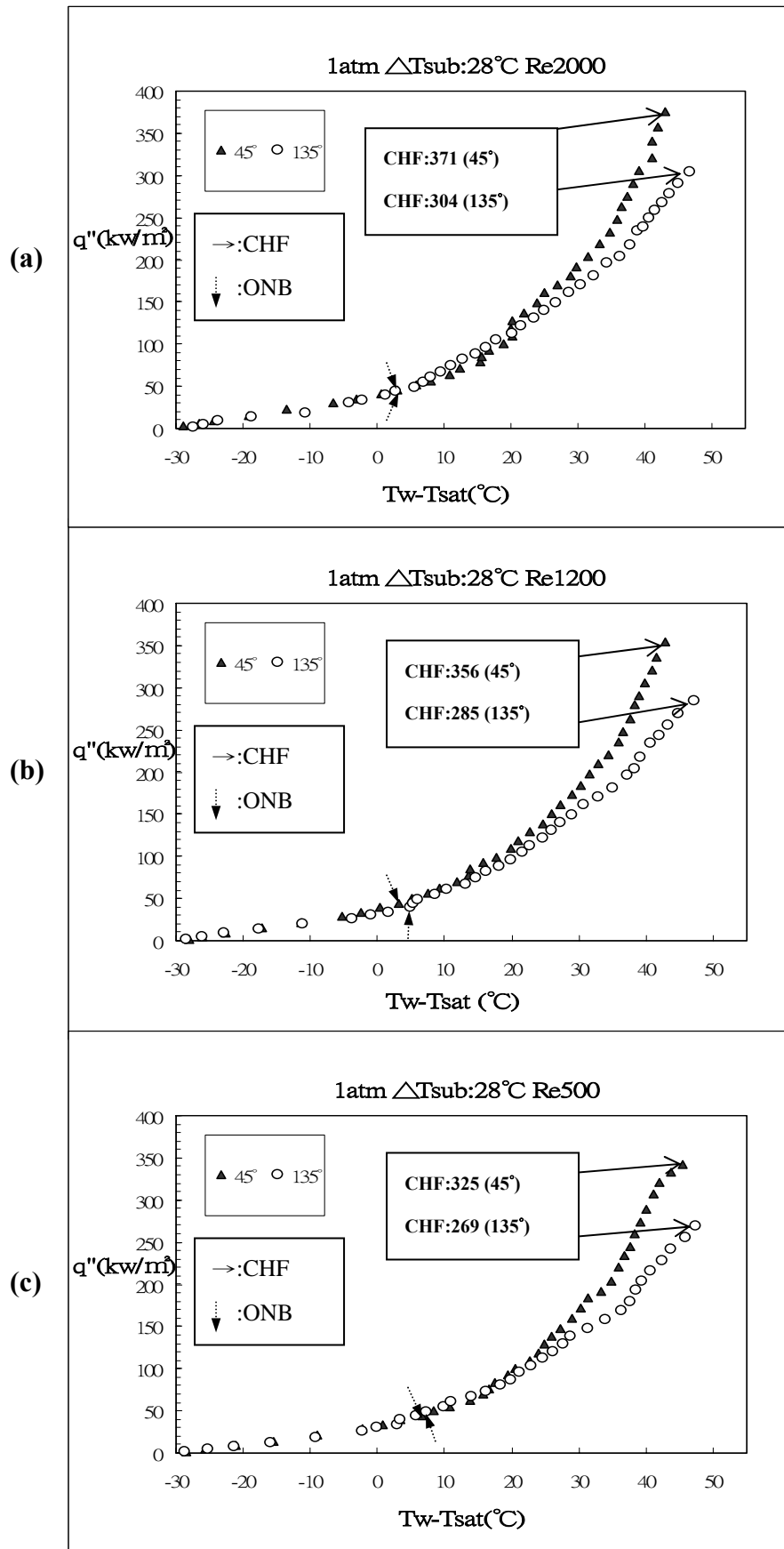


圖 3-20 傾斜角度加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於次冷度:28°C下，  
 Re:2000(a), 1200(b), 500(c)之沸騰曲線圖



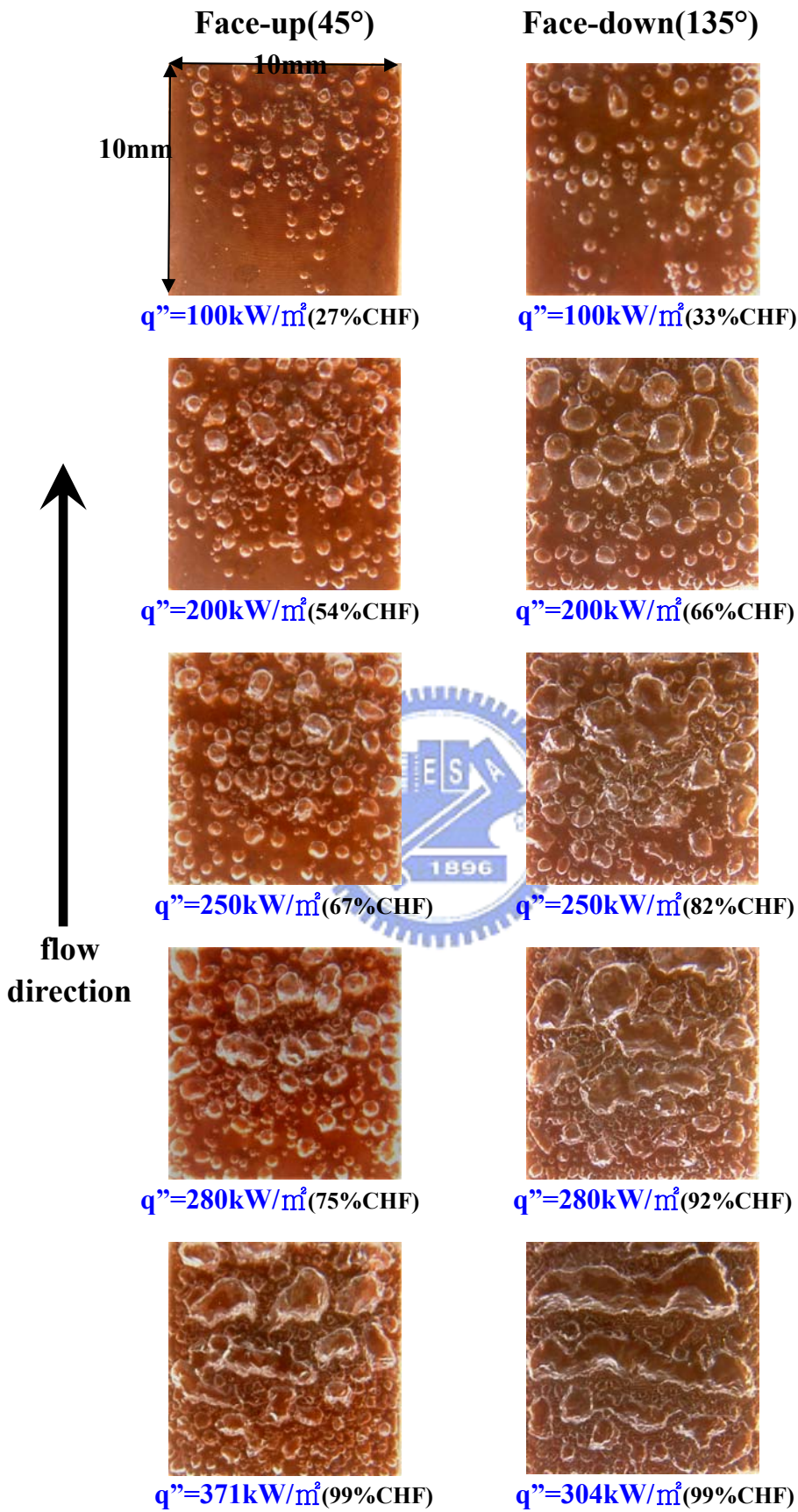


圖 3-21(a) 傾斜流道方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於次冷度: 28°C, Re=2000 情況下之流譜圖

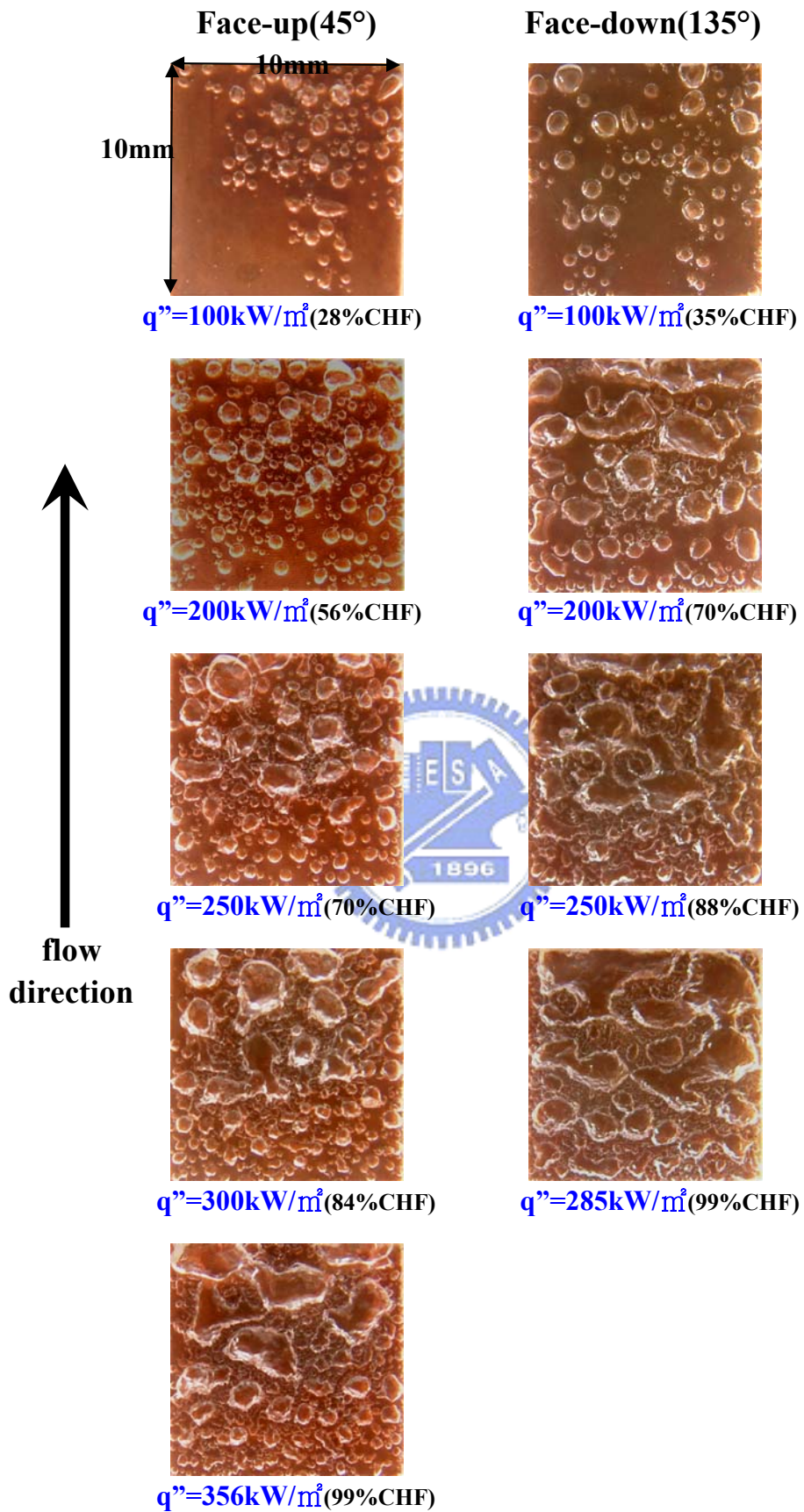


圖 3-21(b) 傾斜流動方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於次冷度: 28°C, Re=1200 情況下之流譜圖

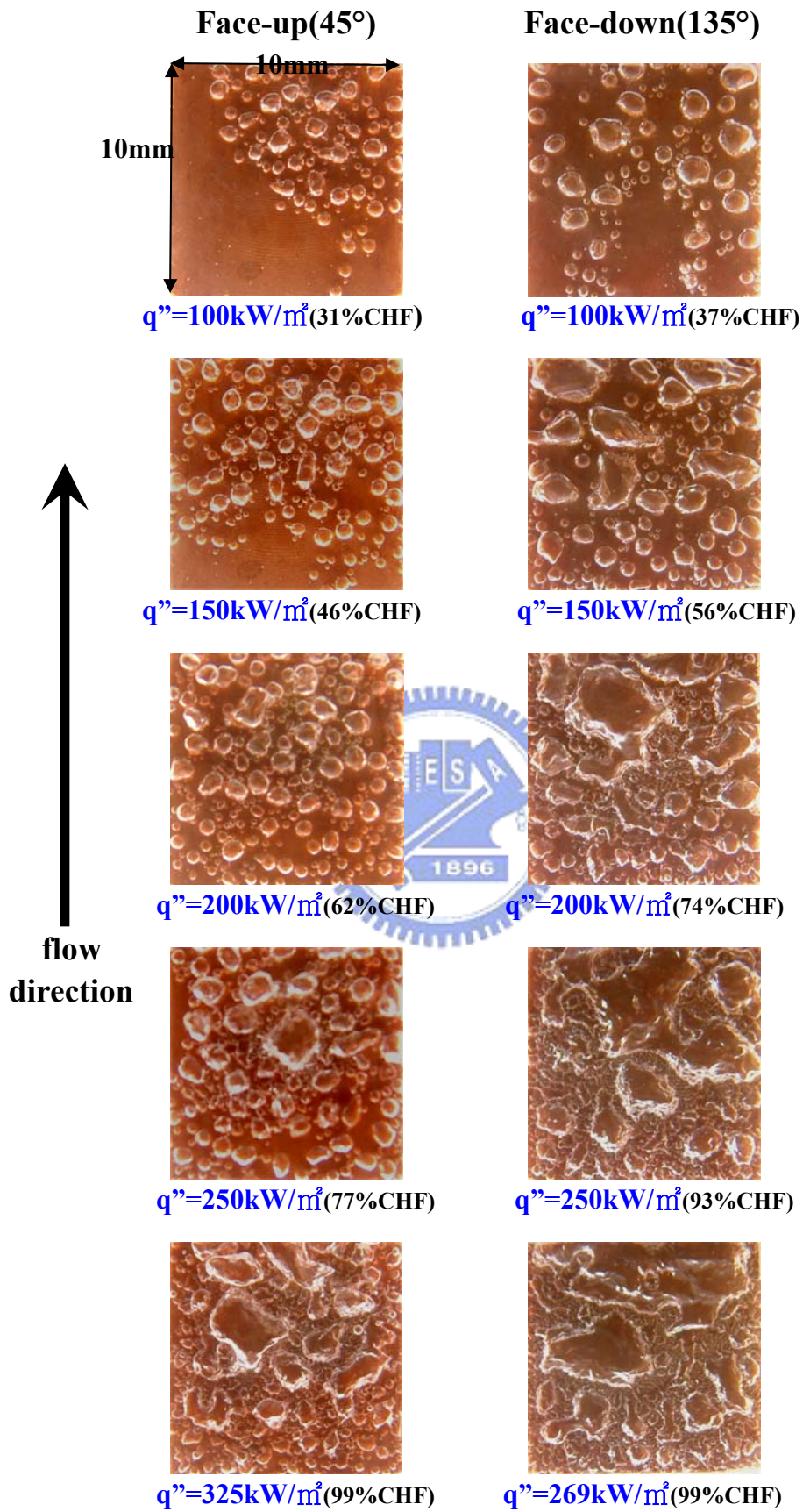


圖 3-21(c) 傾斜流道方位加熱銅片朝上與加熱銅片朝下於次冷度: 28°C, Re=500 情況下之流譜圖

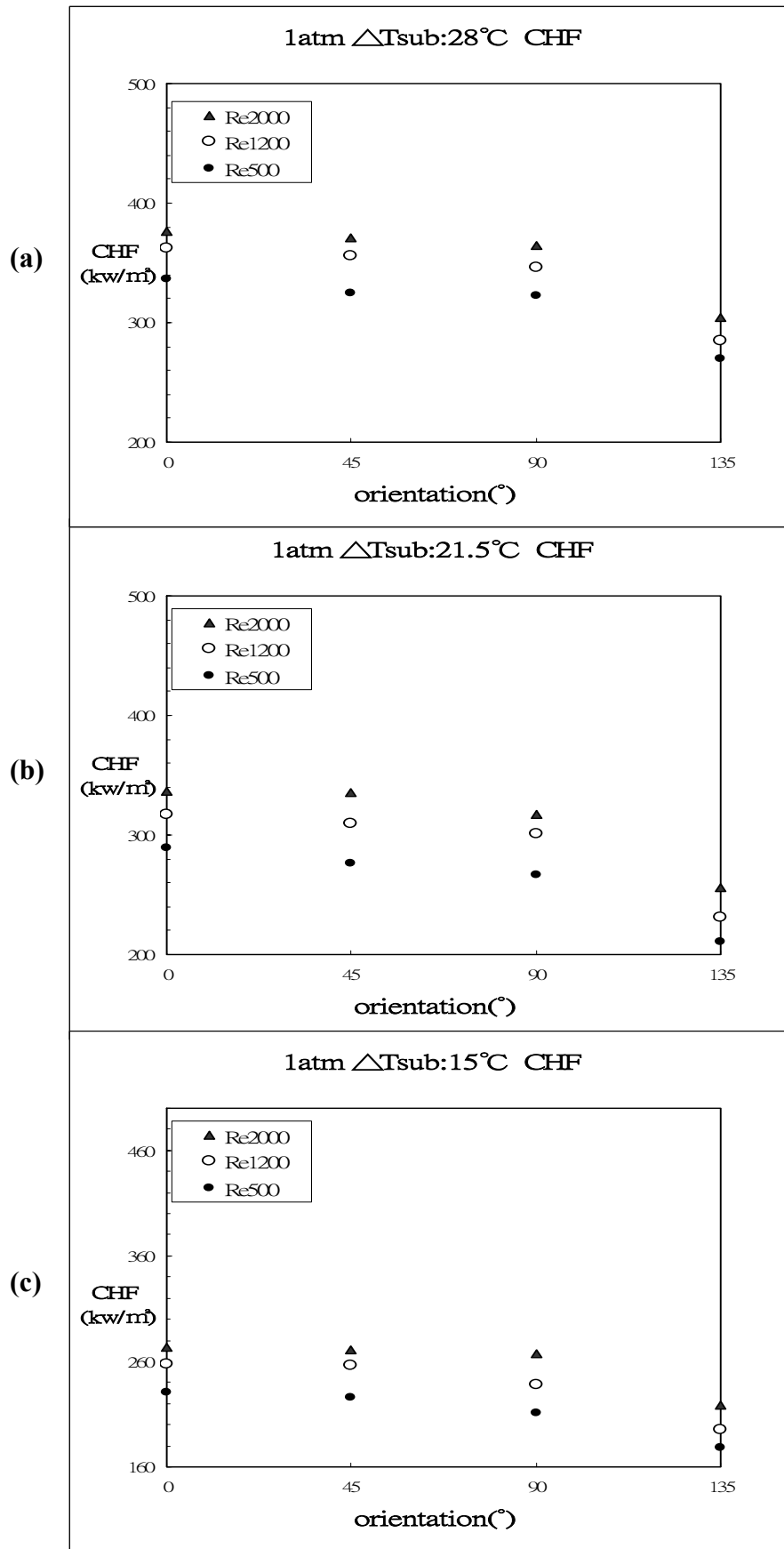


圖 3-22 各流道方位角度於不同次冷度(次冷度:28°C(a), 21.5°C(b), 15°C(c))情況下和不同雷諾數之臨界熱通量比較圖

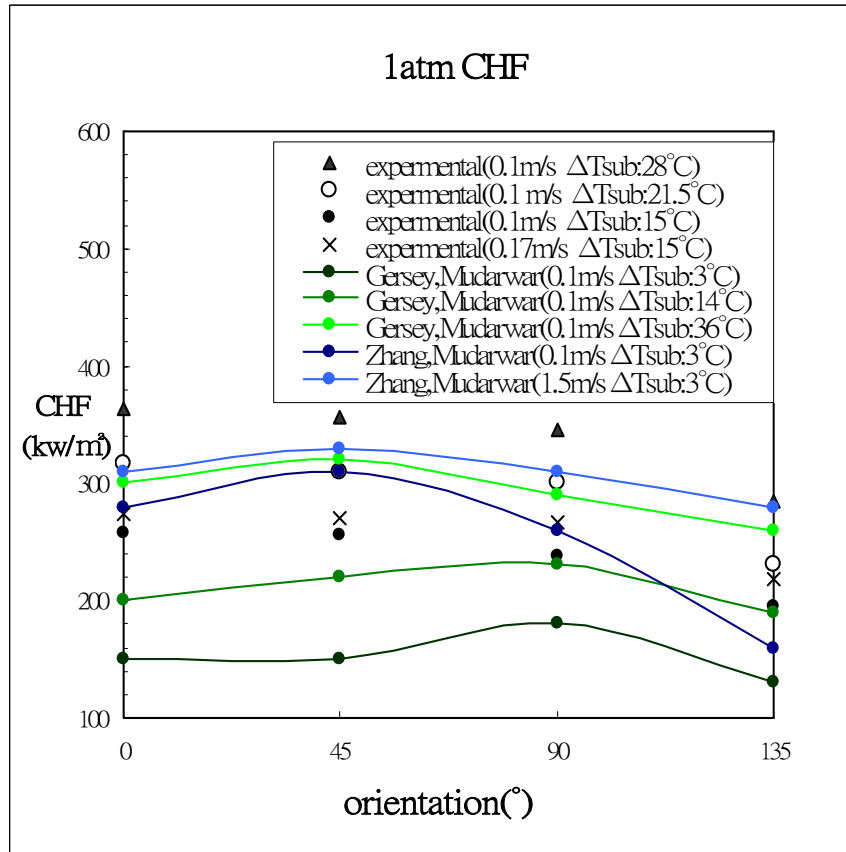


圖 3-23 不同流道方位之 CHF 在不同次冷度與流速的情況下與文獻比較

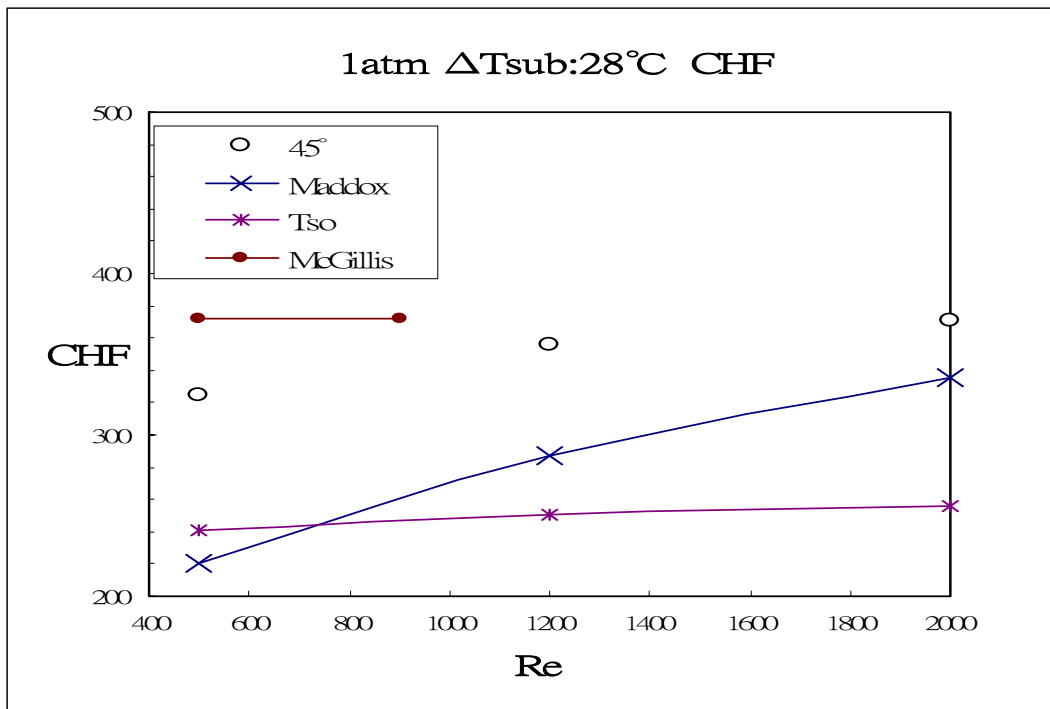


圖 3-24 流道方位  $45^\circ$ ，於  $\Delta T_{sub} : 28^\circ\text{C}$ ，不同雷諾數之 CHF 與文獻 correlations

比較

**Maddox:**

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.16 We^{-8/23}$$

**Tso:**

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.203 We^{-11/23}$$

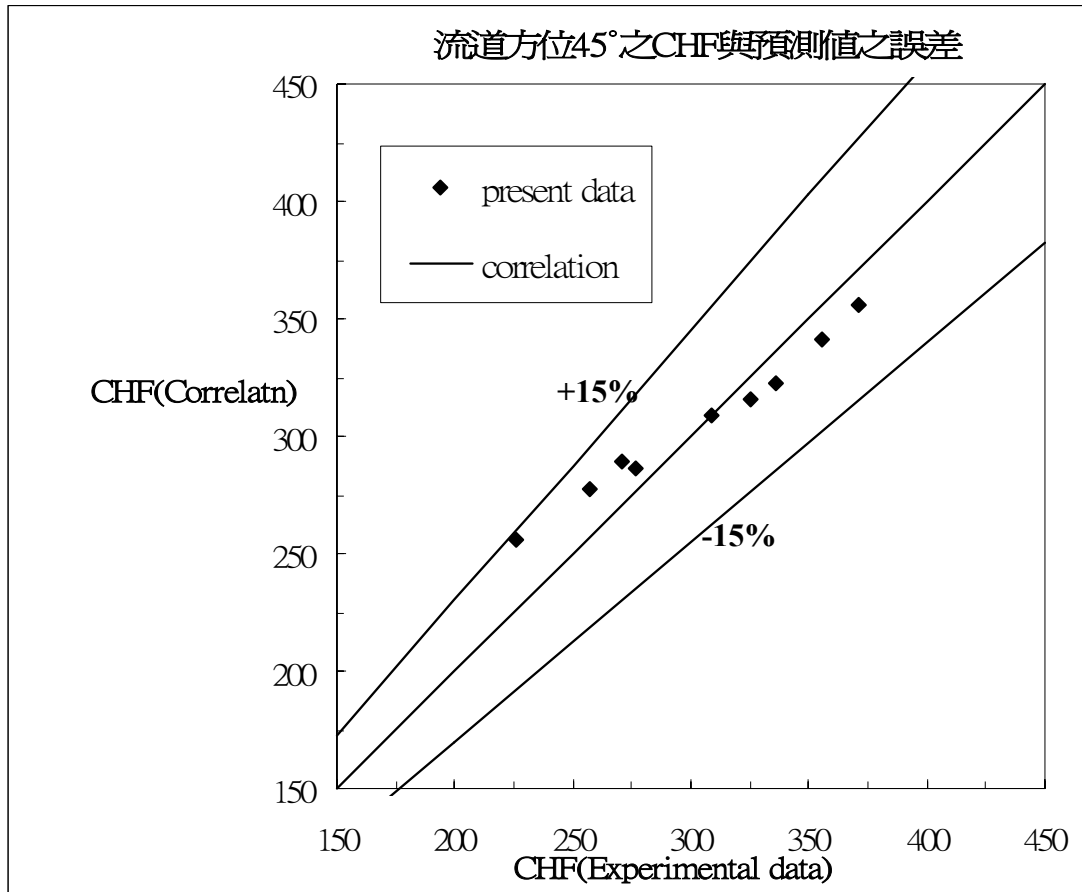
(We: 1~1000)

**McGillis:**

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.321 We^{-1/2}$$

(We < 10)  $\left(We = \frac{\rho_f U^2 L}{\sigma}\right)$



### CHF correlation for FC-72 in the inclined rectangular channel

(Re:500~2000 )( $\Delta T_{sub}$  :15°C~28°C)

#### Correlations:

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.26 We^{-21/46}$$

$$(We = \frac{\rho_f U^2 L}{\sigma})$$

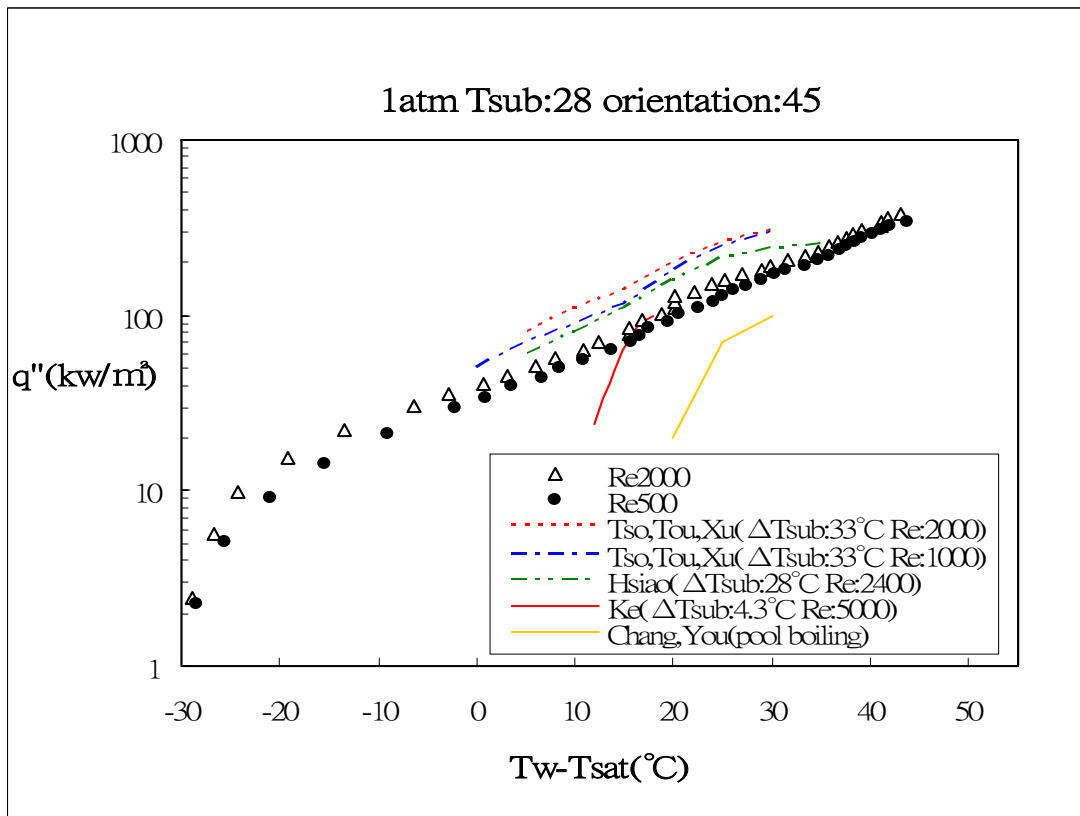


圖 3-26 實驗沸騰曲線與文獻比較



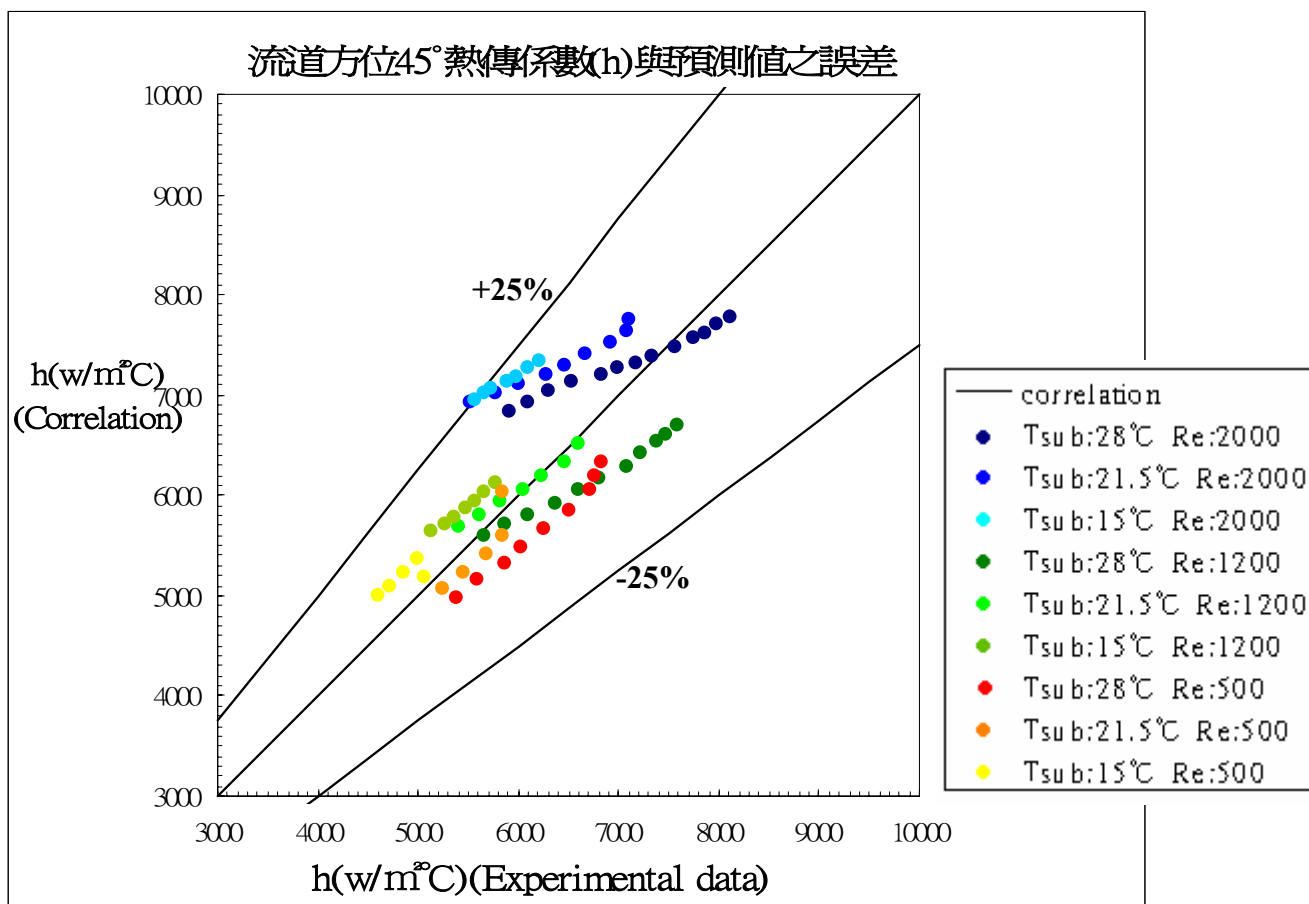


圖 3-27 流道方位 45°，熱傳係數(h)與預測值之誤差圖

Correlation of  $h(w/m^2C)$  for FC-72 in the inclined rectangular channel

$(Re: 500 \sim 2000) (\Delta T_{sub}: 15^{\circ}C \sim 28^{\circ}C)$

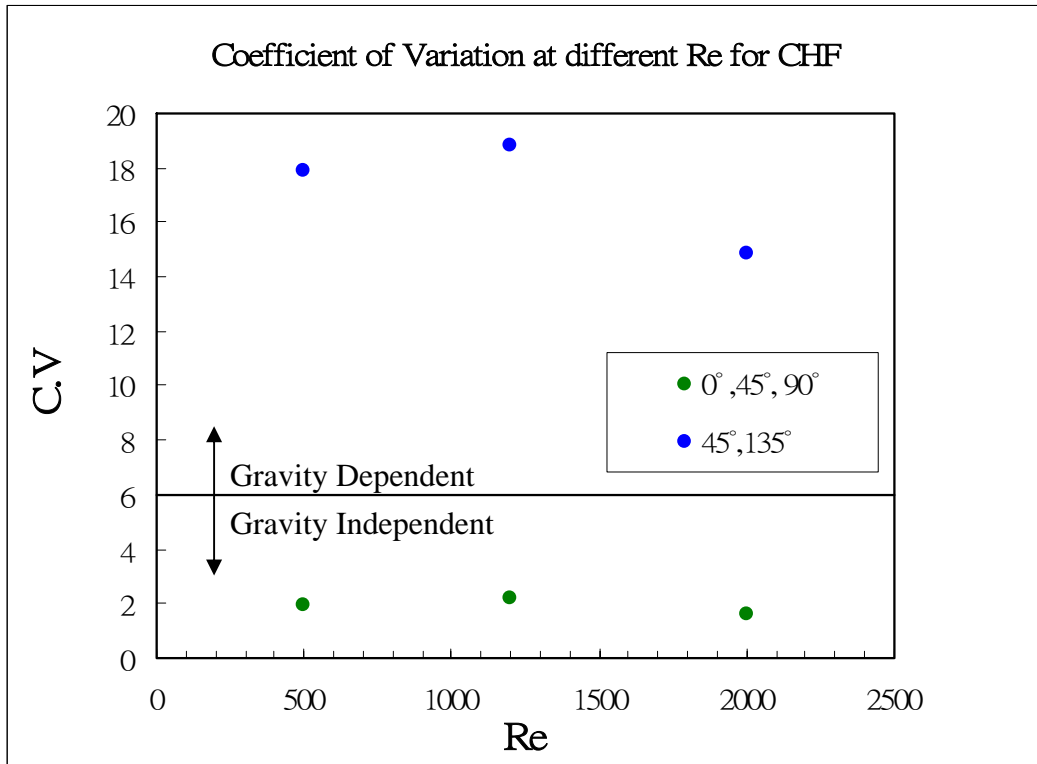


圖 3-28 流道方位 0°, 45°, 90° 和 45°, 135° 兩組實驗之紐賽數(Nu)變化係數 (Coefficient of Variation) 在不同雷諾數(Re) 於臨界熱通量時之比較圖

$$C. V. = \frac{\sigma_{\psi, Ja}}{\mu_{\psi, Ja}} \times 100$$

$$\left( \sigma_{\psi, Ja} = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M (Nu_{\psi, Ja, m} - \mu_{\psi, Ja})^2}}{M - 1} \right)$$

$$\left( \mu_{\psi, Ja} = \frac{\sum_{m=1}^M Nu_{\psi, Ja, m}}{M} \right)$$

## 第四章 結論與展望

### 4-1 結論

本論文以實驗方法，探討介電液 FC-72 於流道方位  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  中，工作流體由下往上於截面積  $10\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，水力直徑  $D_h = 3.33\text{mm}$  的狹窄矩形流道中，流經一塊模擬平滑加熱銅片，銅片表面尺寸為  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，在不同雷諾數 ( $Re = 2000$ 、 $1200$ 、 $500$ )，和不同次冷度 ( $\Delta T_{sub} = 28^\circ\text{C}$ 、 $21.5^\circ\text{C}$ 、 $15^\circ\text{C}$ )，於一大氣壓狀態下進行流動沸騰實驗，其實驗結果歸納如下：

1. 在相同實驗條件下，不同工作日之沸騰曲線，於部份發展核沸騰區因成核址發展的不同會有些許上下偏移的情形，而在單相熱傳區和完全發展核沸騰區之沸騰曲線則一致，並將得到相同之臨界熱通量。
2. 此次流動沸騰實驗，氣泡於晶片表面發展為漸變模式，氣泡由下游中間開始產生，再逐漸發展終至佈滿整個銅片表面。
3. 在單相熱傳區相同次冷度下，增加流速可增加散熱能力，此外流速越快，在加熱晶片表面所造成的擾動更大，有利於成核孔穴之活化。故流速越高沸騰起始之加熱銅片表面過熱度越低。
4. 在高熱通量相同次冷度下，流速對於壁溫的影響逐漸減小，熱傳機制由核沸騰主導，故不同流速之沸騰曲線在此區域逐漸逼近。流速

越快，臨界熱通量越高。當次冷度為  $28^{\circ}\text{C}$  狀態下，雷諾數為 500 時之臨界熱通量比雷諾數 2000 時之臨界熱通量降低 12.4%。

5. 在單相熱傳區相同流速下，次冷度對於加熱銅片表面過熱度有顯著的影響，平均降低次冷度  $1^{\circ}\text{C}$  銅片表面溫度也約增高  $1^{\circ}\text{C}$ 。
6. 在高熱通量相同流速下，不同次冷度之沸騰曲線逐漸逼近，工作流體之溫度對於壁過熱度的影響已降低。由於次冷度較低冷凝能力較差，氣泡尺寸較大易聚合成膜，故次冷度越低臨界熱通量越低，臨界熱通量產生時之加熱銅片表面過熱度也降低。當雷諾數(Re)為 2000 的情況下，次冷度為  $15^{\circ}\text{C}$  之臨界熱通量比次冷度  $28^{\circ}\text{C}$  時之臨界熱通量降低 27%。此外當雷諾數(Re)為 2000 的情況下，次冷度  $28^{\circ}\text{C}$  時，臨界熱通量發生之銅片表面過熱度為  $45.7^{\circ}\text{C}$ ，而次冷度  $15^{\circ}\text{C}$  時，臨界熱通量發生之銅片表面過熱度為  $43.5^{\circ}\text{C}$ ，得知當次冷度降低  $13^{\circ}\text{C}$ ，臨界熱通量發生時之銅片表面過熱度提前了  $2.2^{\circ}\text{C}$ 。

7. 流道方位於傾斜( $45^{\circ}$ )、水平( $0^{\circ}$ )、垂直( $90^{\circ}$ )中，相同實驗情況下，沸騰曲線與流譜發展大致相同，接近臨界熱通量時，在垂直流道中，浮力未能將氣泡於脫離晶片，故氣泡容易浮貼聚積於表面，導致臨界熱通量較早產生。在相同實驗情況下，臨界熱通量之大小，由大而小依序為：水平( $0^{\circ}$ )、傾斜( $45^{\circ}$ )、垂直( $90^{\circ}$ )。當次冷

度為 28°C，雷諾數為 2000 之狀態下，垂直矩形流道之臨界熱通量比水平之臨界熱通量降低 3.2%；相對於傾斜流道之臨界熱通量則降低 1.9%。

8. 在傾斜流道中，加熱銅片朝上(Face-up)(45°)與加熱銅片朝下(Face-down)(135°)對於沸騰曲線影響甚巨。當銅片朝下時，浮力會使氣泡貼於銅片表面，延緩脫離。導致散熱能力降低沸騰曲線偏右，臨界熱通量亦提早產生。當次冷度為 28°C，雷諾數為 2000 之狀態下，加熱片朝下之臨界熱通量比加熱片朝上之臨界熱通量降低 18%。

9. 在四種流道方位角度中(0°, 45°, 90°, 135°)，傾斜流道加熱銅片朝下(Face-down)(135°)之方位，散熱能力最差，臨界熱通量最低。當次冷度為 28°C，雷諾數為 2000 之狀態下，流道方位 135°之臨界熱通量比流道方位 0°之臨界熱通量降低 19%。

10. 本次實驗依據其實驗數據，與 Mudawar 和 Maddox[9]之經驗式，發展出傾斜流道(45°)中對應雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度 ( $\Delta T_{sub}$ ) 範圍 15°C~28°C 之臨界熱通量預測經驗式：

$$q_m^{**} = \frac{q_m / (\rho_g U h_{fg})}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{15/23} \left(\frac{L}{D_h}\right)^{1/23} \left(1 + \frac{c_{pf} \Delta T_{sub}}{h_{fg}}\right)^{7/23} \left(1 + 0.021 \frac{\rho_f c_{pf} \Delta T_{sub}}{\rho_g h_{fg}}\right)^{16/23}}$$

$$= 0.26 We^{-21/46}$$

其中  $We = \frac{\rho_f U^2 L}{\sigma}$ ，其誤差範圍在 15% 以下。

11. 本次實驗依據其實驗數據，與 Ke[23] 之經驗式，發展出傾斜流道 ( $45^\circ$ ) 中對應雷諾數(Re)範圍 500~2000，次冷度( $\Delta T_{sub}$ )範圍  $15^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$  之熱傳經驗方程式：

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} = [950 \cdot Fr^{0.4} + 23 \cdot Boi^{0.4} \cdot Ja^{1.1}]$$

$$\text{其中 } Fr = \frac{G^2}{\rho_f^2 \cdot g \cdot D_h}, \quad Boi = \frac{q''}{G \cdot h_{fg}}, \quad Ja = \frac{\rho_f \cdot C_{pf} \cdot \Delta T_{sat}}{\rho_g \cdot h_{fg}},$$

在中低流速(Re:1200~500)中，預測值與實驗值誤差在 12% 以內。

在高流速中(Re:2000)中，其誤差範圍在 25% 以內。

12. 本實驗依據 Bower、Klausner[15] 文獻中所定義之紐賽數(Nu)變化係數(C.V.: Nusselt number coefficient of variation)來判斷流道方位對於熱傳係數之影響，其結果發現，在主流液體由下往上以及加熱銅片朝上之流道方位( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) C.V. 值極小，代表改變此三種方位對於流動沸騰之熱傳能力影響很小。而在傾斜流道中晶片朝上與朝下之流動方位( $45^\circ, 135^\circ$ ) C.V. 值極大，代表加熱銅片方位之改變對於流動沸騰之熱傳能力影響甚巨。

#### 4-2 展望與建議

1. 本實驗針對主流液體由下往上流動以及加熱銅片朝上之較佳流道

方位進行流動沸騰實驗，未來可增加模擬加熱銅片個數或是加大尺寸，並增加管道側面之流譜拍攝，在由下往上流動以及加熱片朝上之流道方位條件下，進行多角度的流動沸騰實驗，找尋在不同晶片個數、尺寸以及不同流道尺寸中最佳散熱能力之擺置方位，並發展其經驗式。

2. 可在流道中加入些許氣體，增加晶片表面之擾動能力，誘使氣泡提早產生，探討在各種實驗情況下，氣體加入對於流動沸騰實驗之影響。
3. 比較不同介電液或工作流體，於不同流道方位之流動沸騰實驗，探討不同流體之性能以及對散熱能力之影響。



## 參考文獻

- [1] Mudawar, I., Maddox, D. E., 1989, “Critical Heat Flux in Subcooled Flow Boiling of Fluorocarbon Liquid on a Simulated Electronic Chip in a Vertical Rectangular Channel” Int. J. Heat Mass Transfer, pp. 379-394.
- [2] 3M, 2003, Fluorinert Electronic Liquid FC-72 product Information by 3M Center
- [3] Gersey, C. O., Mudawar, I., 1992, “Effect of Orientation on Critical Heat Flux From Chip Arrays During Flow Boiling” J. of Electronic Packaging, pp. 290-299.
- [4] Maddox, D. E., Mudawar, I., 1989, “Single-and Two-Phase Convective Heat Transfer From Smooth and Enhanced Microelectronic Heat Sources in a Rectangular Channel” J. of Heat Transfer, pp. 1045-1052.
- [5] 潘欽, 2001, 沸騰熱傳與雙相流, 國立編譯館主編, PP. 179
- [6] Del Valle M., V. H., Kenning, D. B. R., 1985, “Subcooled Flow Boiling at High Heat Flux” I. J. Heat Mass Transfer, pp. 1907-1920. graph from 潘欽, 2001, 沸騰熱傳與雙相流
- [7] Hino, R., Ueda T., 1985, “Studies on Heat Transfer and Flow Characteristics in Subcooled Flow Boiling-Part1, Boiling Characteristics. I. J” Multiphase, pp. 269-282.
- [8] Tso, C. P., Tou, K. W., Xu, G. P., 2000, “Flow Boiling Critical Heat of FC-72 from Flush-Mounted and Protruded Simulated Chip on a Vertical Rectangular Channel” I. J. of Multiphase Flow, pp. 351-365.
- [9] Levy, S., 1967, “Forced Convection Subcooled Boiling Prediction Of Vapor Volumetric Fraction” I. J. Heat Mass Transfer, pp. 951-965.



- [10] Hu, L. W., Pan, C., 1995, "Predictions of Void Fraction in Convective Subcooled Boiling Channels Using a One-Dimensional Two-fluid Model" J. of Heat Transfer, pp. 799-803.
- [11] Gersey, C. O., Mudawar, I., 1993, "Orientation Effects on Critical Effects on Critical Heat Flux From Discrete, In-Line Heat Sources in a Flow Chunnel" J. of Heat Transfer, pp. 973-985.
- [12] Zhang, H., Mudawar, I., Hasan, M. M., 2002, "Experimental Assessment of the Effects of Body Force, Surface Tension Force, and Inertia on Flow Boiling CHF" I. J. of Heat and Mass Transfer, pp. 4079-4095.
- [13] Zhang, H., Mudarwar, I., Hasan, M. M., 2002, "Experimental and Theoretical study of Orientation Effects on Flow Boiling CHF" I. J. of Heat and Mass Transfer, pp. 4463-4477.
- [14] Zhang, H., Mudawar, I., Hasan, M. M., 2004, "A Method for Assessing the Importance of Body Force on Flow Boiling CHF" J. of Heat Transfer, pp. 161-168.
- [15] Bower, J. Klausner, J., 2006, "Gravity Independent Subcooled Flow Boiling Heat Transfer Regime" Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 141-149.
- [16] 許中彥, 2005, "介電液 FC-72 在水平矩形狹窄流道內之流動沸騰熱傳與氣泡特性之實驗研究." 國立交通大學機械工程學系碩士論文, p. 30.
- [17] Mills, A. F., 2004, Heat Transfer second edition. Prentice Hall , p. 9
- [18] 蕭淵元, 2006, "介電液 FC-72 在垂直矩形流道之流動沸騰實驗研究." 國立交通大學機械工程學系碩士論文, p. 48.

- [19] Kline, S. J., 1985, "The Purpose of Uncertainty Analysis" *J. Fluids Engineering*, pp. 153-160.
- [20] Heindel, T. J., Ramadhyani, S., Incropera, F. P., 1992, "Liquid Immersion Cooling of a Longitudinal Array of Discrete Heat Sources in Protruding Substrates: II - Forced Convection Boiling" *Journal of Electronic Packaging*, pp. 63-70
- [21] McGillis, W. R., Carey, V. P., Strom, B. D., 1991, "Geometry Effects on Critical Heat Flux for Subcooled Convective Boiling From an Array of Heated Elements" *J. of Heat Transfer*, pp. 463-471.
- [22] Chang, J. Y., You, S. M., 1996, "Heater Orientation Effects on Pool Boiling of Micro-Porous-Enhanced Surfaces in Saturated FC-72" *J. of Heat Transfer*, pp. 937-943.
- [23] Ke, Jau-Han, Lin, Tsing-Fa, 2005, "Heat transfer and associated bubble characteristics for flow boiling of FC-72 on a heated micro-pin-finned silicon chip" 國立交通大學機械工程學系碩士論文, pp. 85.-91.

## 附錄一 不準度分析

本論文實驗值之不準度分析乃參考S. J. Kline [19] 所建議的不準度分析，方法如下：

設有一實驗值R 是由測量值x1、x2、x3……xn 所計算而來，而這些測量值各有不準度為：

$$\frac{\delta x_1}{x_1}, \frac{\delta x_2}{x_2}, \dots, \frac{\delta x_n}{x_n}$$

則R 的誤差量為：

$$\delta R = \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n$$

因為  $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$  皆很小，所以  $\delta R$  可近似為：

$$\delta R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

所以R 的不準度可以寫成：

$$\begin{aligned} \frac{\delta R}{R} &= \left[ \left( \frac{\partial R/R}{\partial x_1/x_1} \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial R/R}{\partial x_2/x_2} \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R/R}{\partial x_n/x_n} \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \\ &= \left[ \left( \frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_1} \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_2} \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial \ln R}{\partial \ln x_n} \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \dots (a) \end{aligned}$$

依照以上公式可以用來分析本實驗所須計算的總熱通量 $q''_{total}$ ，過熱度 $\Delta T$ ，及熱傳係數h。

例如：

總熱通量 $q''_{total}$  是由電流 $I$  與電壓 $V$  相乘而得

$$q''_{total} = IV$$

從公式(a) 可知不準度為：

$$\frac{\delta q''_{total}}{q''_{total}} = \sqrt{\left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)^2}$$

本實驗的不準度分析附於表 2-2。

