

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

暫態液晶熱顯像技術 應用於旋轉內冷卻彎道區之熱傳研究

研究生：林裕順

指導教授：劉耀先 博士

中華民國一百零一年七月

暫態液晶熱顯像技術 應用於旋轉內冷卻彎道區之熱傳研究

研究生：林裕順

Student : Yu-Shun Lin

指導教授：劉耀先

Advisor : Yao-Hsien Liu

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

A Thesis Submitted to Department of Mechanical Engineering Collage
of Engineering National Chiao Tung University In Partial Fulfillment
of the Requirements For the Degree of Master of Science In Mechanical
Engineering

July 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

暫態液晶熱顯像技術應用於旋轉內冷卻彎道區之熱傳研究

學生：林裕順

指導教授：劉耀先

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要

將冷卻流體導入冷卻通道內部，藉以帶走大量熱能達到降溫之功用，此為內部冷卻技術，廣泛應用於渦輪葉片內部冷卻通道中。而渦輪葉片內部冷卻通道，部分通道以 180 度之彎道相連接，因此本實驗模型選用矩形的內冷卻雙通道。本實驗內冷卻通道的寬高比(aspect ratio)為 0.67， e/D_h 為 0.125，肋條與肋條之間距(p/e)為 10，肋條(Rib)與主流方向的攻角呈 45 度。

渦輪葉片常處在旋轉的環境中，為了符合真實流場之模擬情況，本文研究旋轉效應所造成流場之熱傳影響，並比較靜止情況以及旋轉狀態下，各區域熱傳分佈(第一通道區、流體轉向區以及第二通道區)之差異，並研究肋條(Rib)對於不同區域之熱傳效應。溫度量測採用平面式暫態液晶熱顯像技術，藉以得知模型各區域溫度的熱傳值，以及各種效應所引起之熱傳分佈情形，並配合閃頻攝影技術的使用，完整呈現流道內熱傳的分佈形態，結果顯示，隨著雷諾數增加，紐賽數比值有下降的趨勢。

關鍵字:熱傳分佈、肋條、暫態液晶量測、流體轉向區、閃頻攝影

Transient Liquid Crystal Thermography for Heat Transfer Measurement In Rotating Internal Cooling Turn Region

Student: Yu-Shun Lin

Advisor: Yao-Hsien Liu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

This study experimentally investigates the effects of rotation on heat transfer in a two-pass rotating rectangular channel. The experiments are conducted with two surface conditions: smooth walls and 45° angled ribbed walls. The channel aspect ratio is 0.67. Three Reynolds numbers are studied: 15000, 20000 and 25000. The rotational speed is fixed at 360 rpm for all tests. Rib turbulators are placed on the leading and trailing walls of the channel at an angle of 45° to the mainstream flow direction. The ribs height to hydraulic diameter ratio (e/D_h) is 0.125, and the rib pitch-to-height ratio (p/e) is 10 for all tests.

Detailed measurements are presented in the first pass, in the turn region, and further downstream in the second pass. This study presents the transient liquid crystal technique for local heat transfer coefficient measurements in an internal cooling channel. Stroboscope is used as the photography technique. In this study, the author is able to systematically analyze, and conclude the heat transfer comparison with both smooth walls and ribbed walls. The Nusselt number ratio decreases with increasing Reynolds number in both non-rotating and rotating channels with smooth and ribbed walls.

Keywords: Heat transfer · Rib · Transient liquid crystal · Turn region · Stroboscope

誌謝

感謝指導教授劉耀先博士的耐心教導，從基礎理論到實際操作實驗設備都給予良好的建議與解決方法，在此致上萬分的謝意。就讀研究所期間中，感謝父母的大力支持與栽培，能讓我無顧忌的順利完成碩士學位，並感謝研究所一同奮鬥的伙伴，一起渡過各種艱難挑戰。最後感謝交通大學以及熱傳強化工程實驗室，提供實驗環境以及精密儀器，讓我順利完成本論文的相關實驗。



目 錄

摘要	I
致謝	III
目錄	IV
圖目錄	VI
符號表	VIII
第一章 序論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究目的.....	3
1-3 文獻回顧.....	4
1-4 實驗參數.....	10
第二章 實驗原理.....	11
2-1 暫態液晶量測原理.....	11
2-2 觀測面之目標厚度.....	13
2-3 色彩轉換原理.....	13
2-4 液晶概論.....	14
2-5 靜止液晶校正曲線.....	16
2-6 旋轉液晶校正曲線.....	17
2-7 內冷卻通道之旋轉效應.....	18
2-8 不準度分析.....	19
第三章 實驗設備與步驟.....	22
3-1 液晶感溫設備.....	22
3-1-1 感溫液晶.....	22
3-1-2 照明設備.....	22
3-1-3 影像擷取.....	23
3-2 環境設備.....	23
3-2-1 旋轉機構與溫度擷取系統.....	23
3-2-2 空氣加熱系統與空氣供給系統.....	25
3-2-3 測試部模型.....	26
3-3 實驗步驟.....	26
第四章 實驗結果與討論.....	29
4-1 液晶校正曲線.....	29
4-1-1 液晶校正曲線之白平衡影響.....	29
4-1-2 液晶校正曲線之閃爍頻率影響.....	30
4-1-3 液晶校正曲線之偏差角度影響.....	31

4-1-4 液晶校正曲線之占空比影響.....	32
4-2 秒數時間、時間步階與紐賽數之關係.....	33
4-2-1 秒數時間對於紐賽數之影響.....	33
4-2-2 時間步階對於紐賽數之影響.....	33
4-3 平滑雙通道之熱傳分佈現象.....	34
4-3-1 雷諾數對於平滑通道之紐賽數比值影響	35
4-3-2 旋轉效應對於平滑通道之紐賽數比值影響	36
4-4 肋條壁面冷卻通道之熱傳分佈現象.....	39
4-4-1 雷諾數對於肋條壁面之平均紐賽數影響	39
4-4-2 旋轉對於肋條壁面之平均紐賽數影響	40
4-4-3 雷諾數對於肋條壁面之熱傳分佈效應	42
4-4-4 旋轉效應對於肋條壁面之熱傳分佈情形	43
4-5 比較肋條壁面和平滑壁面之熱傳現象.....	45
4-6 比較雷諾數對於冷卻通道之紐賽數值影響.....	47
4-7 和前人研究結果比較.....	48
4-7-1 比較平滑壁面冷卻通道之熱傳值差異	48
4-7-2 比較肋條壁面冷卻通道之熱傳值差異(靜止實驗)	49
4-7-3 比較肋條壁面冷卻通道之熱傳值差異(旋轉實驗)	50
第五章 結論與建議.....	52
5-1 結論.....	52
5-2 建議.....	53
參考文獻.....	54

圖目錄

圖 1-1：渦輪葉片內部冷卻通道示意圖.....	59
圖 1-2：渦輪葉片各部位的寬高比.....	59
圖 2-1：RGB 色彩空間.....	60
圖 2-2：HSV 色彩空間.....	60
圖 2-3：三種液晶之結構排列方式.....	61
圖 2-4：內部冷卻通道之旋轉效應.....	61
圖 2-5：冷卻通道旋轉示意圖.....	62
圖 3-1：感溫液晶顏色變化圖.....	62
圖 3-2：旋轉機構與其它設備圖.....	63
圖 3-3：實驗測試通道模型之尺寸大小.....	64
圖 3-4：實驗測試通道模型(平滑冷卻通道).....	65
圖 3-5：實驗測試通道模型(肋條冷卻通道).....	65
圖 3-6：肋條幾何示意圖.....	66
圖 3-7：實驗模型架構圖.....	66
圖 4-1：液晶校正曲線(白平衡之差異).....	67
圖 4-2：液晶校正曲線(閃爍頻率之差異).....	67
圖 4-3：液晶校正曲線(偏差角度之差異).....	68
圖 4-4：液晶校正曲線(占空比之差異).....	68
圖 4-5：橫向紐賽數平均趨勢.....	69
圖 4-6：主流溫度與加熱時間關係圖.....	69
圖 4-7：時間步階與平均紐賽數關係圖.....	70
圖 4-8：平滑通道之紐賽數分佈圖(雷諾數差異).....	70
圖 4-9：平滑通道之紐賽數分佈圖(靜止實驗).....	71
圖 4-10：平滑通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	72
圖 4-11：平滑通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	73
圖 4-12：平滑通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	74
圖 4-13：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分佈圖(靜止實驗).....	75
圖 4-14：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	75
圖 4-15：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	76
圖 4-16：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	76
圖 4-17：肋條冷卻通道之紐賽數分佈圖(靜止實驗).....	77
圖 4-18：肋條冷卻通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	78
圖 4-19：肋條冷卻通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	79
圖 4-20：肋條冷卻通道之紐賽數分佈圖(旋轉實驗).....	80
圖 4-21：比較肋條與平滑壁面之平均紐賽數分佈圖(靜止實驗)...	81
圖 4-22：肋條與平滑壁面之各區域平均紐賽數分佈圖(靜止實驗)...	81

圖 4-23：肋條與平滑壁面之各區域紐賽數分佈圖(靜止實驗).....	82
圖 4-24：肋條與平滑壁面之各區域紐賽數分佈圖(靜止實驗).....	82
圖 4-25：雷諾數對於冷卻通道各區域之平均紐賽數的影響.....	84
圖 4-26：參考文獻比較平滑通道之平均紐賽數值(靜止實驗).....	85
圖 4-27：參考文獻比較肋條通道之平均紐賽數值(靜止實驗).....	86
圖 4-28：參考文獻比較肋條通道之平均紐賽數值(旋轉實驗).....	86



符號表

C_p : 比熱 ($KJ/ Kg \times K$)

D_h : 水力直徑 ($4HW/2H + 2W$)

f : 摩擦因子

H : 通道高度

W : 通道寬度

h : 熱對流係數 ($W \times m^2 / K$)

k : 壓克力熱傳導係數 ($W \times m / K$)

k_f : 空氣熱傳導係數 ($W \times m / K$)

Nu : 紐賽數 ($h \times D_h / k$)

Ro : 旋轉數 ($\Omega \times D_h / V$)

Re : 雷諾數 ($\rho V D_h / \mu$)

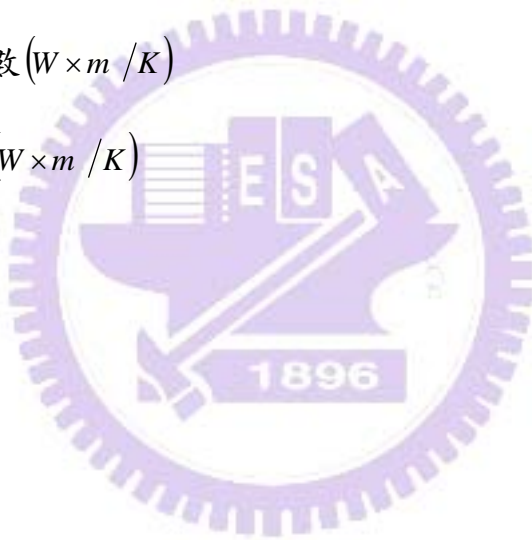
Bi : 拜爾特數 ($h \times L / k$)

AR : 通道寬高比 (aspect ratio)

P : 肋與肋之間的距離

e : 肋條高度

μ : 空氣的黏滯係數 ($N \times S / m^2$)



Q : 流量 (m^3/s)

A : 測試通道截面積

V : 流體流速 (m/s)

ρ : 空氣的密度 (kg/m^3)

Ω : 旋轉速度 (rad/s)

T_w : 壁面溫度 ($^{\circ}C$)

$T_{w,i}$: 表面初始溫度 ($^{\circ}C$)

T_m : 流體參考溫度 ($^{\circ}C$)

ΔT : 溫度增加量 ($^{\circ}C$)

t : 時間

τ : 時間步階

α : 壓克力熱擴散係數 ($k/\rho C_p$)



第一章 緒論

1-1 前言

在工業發達的世界裡，能源需求供不應求，伴隨著科技日新月異的持續發展，永續能源的開發極為迫切，在能源發電的系統中，燃氣渦輪機扮演著重要的地位，如何有效提升渦輪機電能轉換效率，是當今研究的主要目標。提高燃氣渦輪機入口溫度能有效提升總體發電效率，渦輪葉片常處於高溫度以及高壓力下的環境中，過熱的溫度會導致葉片損毀，因此新型複合材料不間斷的尋找中，對於葉片的材質選用，必須更耐高溫與高壓以及葉片的重量需要輕量化，防止葉片因高溫而毀壞，另一個關鍵為冷卻技術。

冷卻技術可區分為：外部冷卻技術以及內部冷卻技術；在葉片表面設置冷卻小孔，引導冷卻流體由孔洞噴出，進而在葉片表面形成一保護層，主要用以防止熱空氣將葉片本體熔毀，此為外部冷卻技術(Film Cooling)；另一方面，內部冷卻技術原理：導入溫度低的流體如空氣，藉由低溫度的流體帶走大量的熱能，能有效降低葉片通道內的溫度，進而提高葉片的使用壽命。一般常見的內冷卻技術有衝擊式冷卻(Impingement Cooling)，藉由噴口(nozzle)將溫度低的流體以高速的狀態下衝擊物體表面，利用熱對流的效應，達到冷卻物體之效應[圖 1-1]。

冷卻通設計受限於葉片外部幾何形狀，靠近翼前緣(Leading Surface)區域屬於寬與短之外型，靠近翼後緣(Trailing Surface)區域為窄與長的

形狀，因此在不同區域流道之寬高比也有所差異，靠近翼前緣的寬高比如為 1:4 以及 1:2，而在翼後緣的寬高比可為 4:1，葉片幾何示意圖[圖 1-2]。

冷卻通道又可分為：單通道、雙通道以及多通道；其中雙通道和多通道大多以彎道相連接而成，因彎道引起流體之分離、混合以及增強紊流之現象，使得此區域流場之熱傳分佈較為複雜。在葉片冷卻通道中，通常會設置強化熱傳之元件，如：肋條(Rib)以及鰭片(Pin-Fin)，因肋條引起之二次流效應能有效增強整體熱傳現象，許多學者研究肋條的相關應用，如：擺放位置、肋條高度以及肋條角度等，為了保護葉片免於熔毀，因此冷卻技術不斷創新，然而過度冷卻渦輪葉片，將會導致渦輪機效率的下降，如何有效取得平衡點，也是相當重要。

流場溫度量測有許多方法，以往單點量測技術以熱電偶為主，對於複雜流道之幾何外型，能有效測量出各部位的溫度值，若要更詳細分析區域熱傳分佈情形，此方法尚有不足，因此配合平面式量測技術：紅外線攝影機以及溫度感應漆；平面式量測方法能顯現冷卻通道內的溫度場分佈之型態，對於日後研究也有所幫助，善用合適的量測方法，尋找出冷卻通道最佳之熱傳分佈效應。

1-2 研究目的

旋轉對於流場之熱傳現象有極大的影響，因此研究旋轉下內冷卻通道之熱傳分佈型態，是本實驗主要目的。以往熱電偶量測只能得知特定區域之溫度值，屬於單點式量測技術，對於溫度場分佈型態無法呈現，因此使用平面式量測方法。暫態液晶熱顯像技術，利用感溫液晶伴隨不同溫度顯現出不同顏色的特性，藉以得知流場高溫熱傳區以及低溫熱傳區之位置，並配合閃頻攝影之技術使用，將高速旋速之物體以靜止的影像呈現。捕捉高速旋轉之影像，不需使用昂貴的超高速攝影機，使用視覺暫存的方法，可以使我們更輕易捕捉高轉速下的物體分佈情形。

本實驗模型寬高比(aspect ratio)為 1:1.5，前人研究大多為 1:1 以及 1:2，對於旋轉實驗之溫度測量，也以單點式量測技術居多，因此使用平面式旋轉量測技術相對少數。對於增強熱傳方式選用了肋條(Rib)之元件，並在第一通道區(First pass)以及第二通道區(Second pass)設置了 45° 肋條，藉以提升整體的熱傳效應。本實驗使用視覺暫存之新方法，因此對於感溫液晶的基本校正特別詳盡，對於不同閃爍頻率、角度偏差以及佔空比(Duty cycle)等，分別進行比較與分析，有助於提升整體測量的精確度。

1-3 文獻回顧

靜止通道實驗

早期研究冷卻通道以靜止單通道模型為主，研究基本的流道幾何形狀以及流道寬高比對於溫度場熱傳分佈之影響。單通道的研究不包括流體轉向區域的效應，並且靜止的實驗也忽略了科氏力與旋轉浮力的效應，由 Metzger 等人[1]最先對於矩形多通道做研究，文獻中探討強制對流對於平滑雙通道的熱傳現象，並修改分隔板和頂部(Tip)的間隙，隔年由 Fan 等人[2]對於不同通道的寬高比做研究，結果顯示，當通道的寬高比越大時，整體通道的熱傳效應將會增加。

本文以內冷卻雙通道為主，起初以平滑通道為實驗模型，雙通道模型可區分為三個區域：第一通道區、流體轉向區以及第二通道區。以平滑通道為例，熱傳最高值均出現在第二通道之入口處，以及流體轉相區域的頂部(Tip)位置，對於高度與寬度比值(W/H)較大的通道中，高熱傳導的區域伴隨著高壓力降的分佈，結果顯示平板與流道頂部(Tip)之間距建議為流道寬度的 0.75 與 1.25 倍之間，此範圍內有較高的熱傳效果以及最低的壓力降損失 [3-7]。

增加溫度場熱傳效應有許多方式，如：鰭片(Pin-fin)、溝槽(Groove)以及肋條(Rib)等，藉由強化熱傳之元件的使用，有效提升整體的熱傳值。因此由 Park 等人[8][9]利用有角度的平行肋條(Rib)和不同流道的寬高比

模型進行實驗，在低的流道寬高比中($AR=1:1$ 和 $1:2$)，以 60° 和 45° 肋條之熱傳效應最佳。肋條的排列以及擺放位置相對重要，由 Rau[10]等人比較單面牆有肋條以及兩面牆都擺放肋條，藉由擺放肋條的差異，分析比較溫度場之分佈情形。然而肋條與肋條之間的距離(P)以及肋條高度(e)的比值，對於溫度場熱傳分佈也有很大的影響，因此由 Taslim[11]等人分別比較不同距離與高度的比值，結果顯示當距離與高度的比值(P/e)介於 $8.5\sim 10$ 之間存在最高熱傳效應。肋條排列有許多方式，如：平行排列、交錯排列、V型排列等；不同的排列組合，溫度場的熱傳分佈效應也不同，研究中指出 60° 與 45° 肋條之 V 型排列組合的熱傳效果最佳，而 60° 與 45° 肋條之倒 V 型排列組合，冷卻通道內壓力損失最大，若為 60° 與 45° 肋條之交錯型排列組合，此時溫度場熱傳效果最差，但是對於壓力損失的減少有最大的幫助。結果顯示以 V 型的排列組合熱傳效果大於平行排列組合，最差的為倒 V 型之排列組合。[12-16]

旋轉通道實驗

前面所提起的皆為靜止實驗，在旋轉實驗中會產生旋轉浮力以及科氏力的效應，因此許多學者對於旋轉也做了許多研究，在高速旋轉下溫度場之熱傳分佈。由 Wagner[17, 18]等人研究旋轉效應(浮力與科氏力)對於多通道平滑通道區之熱傳分佈，結果顯示在第一通道區(First pass)因旋轉造成邊界層的變化，在翼後緣(Trailing surface)的區域，邊界層變薄進而

提升熱傳效應，另一方面，在翼前緣(Leading surface)的區域，邊界層變厚因而減低熱傳之效應。在第二通道區(Second pass)產生的效應和第一通道區剛好相反，因為科氏力方向的影響，因此在第二通道區內，翼前緣的熱傳值將會比翼後緣之熱傳值大。由 Han[19]等人研究不平滑之牆面，對於旋轉下矩形內冷卻雙通道模型之熱傳分佈影響，結果顯示在翼前緣以及翼後緣區域，因不平滑的牆面造成不同的旋轉浮力效應，各區域之熱傳係數也有改變。旋轉效應和冷卻通道之熱傳分佈情形有很大關連，旋轉數(Ro)越大，引起熱傳的變化越強烈，因此由 Kim 等人[20]研究在五種不同旋轉速下對於平滑雙通道造成的影響，雷諾數(Re)固定在一萬，結果顯示流道在靜止情況下，冷卻通道之溫度場位於翼前緣與翼後緣的分佈現象為對稱存在，因流體轉向區域的影響，第二通道區的熱傳效應會增強，並和先前學者研究的結果相符，在旋轉的實驗中，因旋轉科氏力引起二次流發生以及流體轉向區域的效應，使得整體流道熱傳分佈型態較為複雜，在第一通道區中，只有受到科氏力的影響，因此對於翼後緣(Trailing Surface)有熱傳增強作用，另一方面，減低翼前緣(Leading Surface)之熱傳效應。在流體轉向區域，因轉向流的交互作用，導致此區域溫度場出現單一渦流(Vortex Cell)之現象，在第二通道區域中，因科氏力以及流體轉向區域的影響，冷卻通道內熱傳分佈較為複雜，而此文對於旋轉數效應影響之結果為，當旋轉數(Ro)等於 0.1 時，翼前緣以及翼後緣之熱傳分佈差異最為

明顯。Liu 等人[21]對於高旋轉速下寬高比為 1:4 的矩形雙通道作分析，測量方法為熱電偶量測，在第一通道區中，翼後緣的熱傳值隨著旋轉數增加而變高，另一方面，翼前緣的熱傳值隨著旋轉數增加而變低，直到旋轉數達臨界值 0.3 後，熱傳效應才慢慢增加，整個冷卻通道中熱傳效應最強烈的區域為流體轉向區，因此區域結合二次流以及旋轉效應的複合影響，在第二通道中，翼前緣與翼後緣的熱傳效應皆隨著旋轉數提高而增大。

幾何形狀實驗

流道幾何形狀寬高比也有許多學者研究，在不同寬高比下，熱傳分佈效應也不盡相通，常見的寬高比為 1:1、1:2、2:1 以及 4:1，依照葉片的幾何形狀，在不同位置所存在的寬高比也不同，靠近翼前緣(Leading edge)區域時，葉片外型屬於寬廣型，此區域的流道設計大多為 1:4 以及 1:2，另一方面，靠近翼後緣(Trailing edge)區域時，葉片外型屬於狹長型，此區域的流道寬高比為 2:1 以及 4:1。結果顯示，在 45 度 RIB 模型中若處於相同旋轉數以及雷諾數下，流道入口以正方形流道存在最高入口速度以及旋轉速度，因為此時的正方形水力直徑為最小值，肋條高度與水力直徑比值 (e/D_h) 為最大值。同時在旋轉狀態下，第一通道區以寬高比為 1 之模型熱傳增強效應最強，無論在翼前緣還是翼後緣，正方形通道熱傳效果最佳，由於流體轉向區的強烈影響，在第二通道區域中，以寬高比為 0.5 之模型顯現最高熱傳係數。在低旋轉數(Ro)以及低雷諾數(Re)下，旋轉加上轉向

區的影響對於寬高比為 1:2 之流道有最強烈的效應，在高旋轉數(Ro)以及高雷諾數下(Re)，旋轉對於流道的效應，隨著寬高比變小持續減弱，當雷諾數從一萬增加到十萬，隨著雷諾數上升熱傳效應跟著變差，並且空氣密度比值(density ratio)增加，熱傳值也會跟著下降[22-25]。

溫度量測實驗

量測流場溫度有許多方式，依照實驗需求選擇適當的量測方式。以往單點量測以熱電偶量測為主，藉由銅片配合電阻加熱線進行加熱，並在銅片上黏接熱電偶線以得知壁面溫度，對於複雜的冷卻通道中適合使用熱電偶量測，並在冷卻通道內設置有角度之肋條，藉以強化整體的熱傳效應[26-29]。

本實驗使用暫態液晶熱顯像技術，不同溫度範圍所使用的液晶也有差異，因此液晶的校正方法由 Camci 等人[30]對於靜止實驗的液晶量測做基本校正，實驗過程中光源強度固定，並繪製不同溫度下所對應的色調(Hue)值，實驗的變數為光源距離以及光源照射角度，在不同光源距離下誤差值為 $\pm 0.08^{\circ}\text{C}$ ，光源角度以 60° 入射角時，達到較大誤差值 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，若在光源固定與各種條件都一致下，不同時間下所造成的誤差值為 $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$ 。由 Syon 等人[31]研究旋轉效應對於液晶校正曲線的影響，並配合紅外線熱像儀(IR Imager)之量測方法，應用於 1000~7000RPM 的圓盤中，結果顯示向心加速度對於液晶量測之精確度沒有太大的影響。平面式量測技術可詳細顯現冷

卻通道內的熱傳分佈之各種效應，如：渦流(Vortex)形狀、二次流動的方向以及溫度場高溫熱傳區等；由 Ekkad 等人[32]利用液晶熱顯像技術，應用於靜止矩形雙通道內的熱傳分析，並在單面牆放置不同角度之肋條，比較不同角度肋條引起熱傳之差異。

由Wagner等人[33]對於感溫液晶之量測物表面曲率以及觀測面厚度做研究。Lock[34]等人研究高速旋轉對於圓盤之熱傳分佈，光源使用閃頻儀當作實驗照明之功用，配合閃頻之技術，達到視覺暫時停留的效果，並使用三種量測不同溫度範圍之感溫液晶，在旋轉速度3000、4000以及5000RPM的狀態下，比較液晶校正曲線的差異。閃頻攝影技術常用於測定渦輪機葉片的轉速，利用閃爍的技術就可得知葉片轉動的速度以及頻率，對於閃頻攝影技術相關研究，由Veen[35]對於閃頻儀(Stroboscope)做基本研究，並介紹使用閃頻儀做測速器，以及影像處理之閃頻儀的應用範圍，對於閃頻儀相關資訊，此文獻詳細記載應用領域以及使用方法。本文捕捉旋轉狀態下，冷卻通道熱傳分布情形，也使用了閃頻攝影之技術，為了提升整體實驗的精確性，因此研究了閃頻攝影對於感溫液晶量測技術的影響，並對於影響校正曲線之參數做分析，因此本文對於閃頻攝影以及液晶校正曲線之關連，做了許多不同影響參數下之液晶校正曲線。

1-4 本實驗主要參數

1. 雷諾數設定為 15000、20000 和 25000
2. 旋轉數(Ro)為 0 至 0.02 之間
3. 冷卻通道的水力直徑(D_h) 為 12mm
4. 寬高比(aspect ratio)為 0.67
5. 冷卻通道中的肋條(ribs)和主流方向的攻角為 45 度
6. 肋條高度與水力直徑比值(e/D_h)為 0.125
7. 肋條間距與高度比值(P/e)為 10
8. 測試冷卻通道發展區長度為 105mm 測試區長度為 125mm
9. 占空比(Duty Cycle)為 1%
10. 實驗模型有兩種:平滑壁面通道區以及肋條壁面之通道
11. 旋轉速度固定為 360Rpm

第二章 實驗原理與方法

2-1 暫態液晶量測原理

對於冷卻通道內的熱傳的分佈觀測，本文使用平面式暫態液晶量測法，對於感溫液晶的基本假設，由 Wagner 等人[34]，對半無窮長固體而言，使用一維暫態熱傳導之統御方程式：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [2.1]$$

$$\text{初始條件： } T = T_{w,i} \text{，在 } t = 0 \text{， } x \geq 0 \quad [2.2]$$

$$\text{邊界條件： } -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h(T_m - T_w) \text{，在 } x = 0 \text{， } t > 0 \text{ 時} \quad [2.3]$$

其中定義： $\alpha = k / \rho C_p$

而 α 為壓克力之熱擴散係數， h 為局部熱對流係數， $T_{w,i}$ 為觀測區域初始溫度， T_w 為實驗中觀測區域隨時間變化的表面溫度， T_m 為主流溫度，並假設材料性質 ρ 、 C_p 和 k 皆為一定值，不隨時間、溫度或位置變化而改變，並將統御方程式利用拉普拉斯轉換(Laplace Transform)來求解，可得如下結果：

$$\frac{T_w - T_{w,i}}{T_m - T_{w,i}} = 1 - \exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) \quad \text{其中定義： } \beta = h \left(\frac{t}{\rho c_p k} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.4]$$

並且溫度 T_w 、 $T_{w,i}$ 、 T_m 和時間 t 為已知數， k 與 α 為材料性質參數，局部熱對流係數 h 為此實驗所求之參數。

在實際應用上，因為主流溫度(T_m)不是常數，所以[2.4]式必須利用杜罕莫疊加原理(Duhamel superposition theorem)，如以下數學式表示：

$$T_w - T_{w,i} = \sum_{j=1}^N \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{h^2}{k^2} \alpha (t - \tau_j)\right]} \operatorname{erfc} \left[\frac{h}{k} \sqrt{\alpha (t - \tau_j)} \right] \right\} \times \Delta T_m \quad [2.5] \text{ 其中:}$$

ΔT_m 和 τ_j 分別代表溫度增量和時間步階變化。

利用修正的公式[2.5]可求得觀測物體的熱對流係數，再配合空氣熱傳導係數(K_f)以及冷卻通道的水力直徑(D_h)，可得到一無因次參數：紐賽數(Nusselt number Nu)，利用公式[2.6]可分析冷卻通道內的熱傳效果。

$$Nu = hD_h / k_f \quad [2.6]$$

其中本實驗流體參考溫度之量測，使用區域平均線性化的方式，將實驗通道劃分為九個區域，入口第一區域使用入口溫度，流體轉向區為入口溫度和出口溫度的平均，冷卻通道最終出口區域使用出口溫度，之後各區域的流體參考溫度為線性分佈。

利用在非旋轉平滑圓管內完全發展紊流的經驗公式可減少雷諾數(Re)對熱傳係數的影響。由 Dittus/Boelter-McAdams 關係式可計算出紐賽數(Nu)的比值：

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{hD_h}{k_{air}} \frac{1}{(0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4})} \quad [2.7]$$

在高速旋轉過程中會產生科氏力以及旋轉浮力，對於通道內熱傳分佈有極大關係，因此為了定量分析旋轉對於熱傳的影響，定義了一無因次參數旋轉數(Rotation Number Ro):

$$Ro = \frac{\Omega \times D_h}{V} \quad [2.8]$$

旋轉數(Ro)的物理意義為科氏力與流場慣性力的比值。

2-2 觀測面之目標厚度

在實驗中，為了符合先前的半無窮長區間的一維暫態熱傳假設，在此厚度範圍內才可以符合半無窮長區間的一維暫態熱傳假設，也可以將計算得到的局部熱對流係數誤差降低如下：

$$\tau_d = \frac{\alpha t}{d^2} < \frac{1}{4} \quad [2.9]$$

2-3 色彩轉換處理

液晶量測技術中，需要用到一些色彩轉換處理，才能將色彩的定性(色調Hue)轉變為定量(溫度Temperature)，RGB色彩空間屬於直角系統，以光的三原色:紅(Red)、綠(Green)、藍(Blue)當作三個基準量，搭配不同比例混合出各種顏色[圖2-1]，另一方面，HSV色彩空間屬於圓柱座標中的倒圓錐子集，分別由色調(Hue)、飽和度(saturation)、明度(Value)組成，其

中色調(H)主要用來分辨顏色，不同波長的光顯現出不同顏色，如：紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等，色調的變化隨著繞V軸的角度決定，在0度時呈現紅色，120度為綠色，240為藍色；飽和度(S)亦稱彩度，主要用來分辨色彩的濃度，當S=1時為純色，在飽和度中加入不同比例的白色，飽和度(S)值會在0~1區間變化；明度(V)為色彩的深淺明暗程度，當V=1時顏色最淺，在明度中加入不同比例的黑色，明度(V)值會在0~1區間變化[圖2-2]。

本實驗CCD攝影機所擷取的影像為RGB色彩空間，配合matlab影像處理程式，將RGB色彩空間轉變為HSV色彩空間，提供數據會整理之功用。

2-4 液晶概論

液晶(Liquid Crystal)是一種介於液相和固相晶體間狀態的特殊第四相有機物質，若分子排列具有方向性的液體稱為液晶，液晶同時具有流體的特性以及晶體的光學性質。

法國晶體學家弗里德爾(Friedel)的分類，液晶依照其分子的排列方式，分為：層列型(Smectic)、向列型(Nematic)以及膽固醇型(Cholesteric)三大類[圖 2-3]。

(1) 層列型(Smectic): 由長型棒狀分子組成，排列方式呈現縱向平行排列，和向列型(Nematic)相比，層列型的排列較有規則性，黏滯性也比較大。

(2) 向列型(Nematic): 由長型棒狀分子組成，排列方式為縱向平行排列，不同層的結構中分子排列位置皆不相同，排列方式較無規則性，向列型優點為:黏滯性小，液晶分子的方向容易改變，反之，缺點為:易流動的特性不適用於當作顯像的介質。

(3) 膽固醇型(Cholesteric):由長型棒狀或板狀分子組成，排列方式逐層以螺旋方式堆疊而成，在各層中均沿著某特定方向平行排列，而層與層之間排列方向的角度略發生一些變化。膽固醇液晶的特殊排列方式，具有特別的光學性質，如:選擇性光散射以及旋光性等性質。

本實驗採用膽固醇型液晶，隨著溫度上升，螺旋旋距會縮減，波長也跟著變短，在液晶變色範圍內，從低溫到高溫的變化過程，起先為無色慢慢轉變成紅色，隨著溫度升高，液晶顏色順序為黃、綠、藍、紫，當超過液晶變成範圍後，漸漸的又變回無色狀態。

2-5 靜止液晶校正曲線

不同操作參數下，如：光源選用、CCD拍攝位置以及液晶噴塗厚度等，不同參數下液晶校正曲線有所差異，因此在實驗機台架設完成後，必須對液晶先進行一次校正，且確保日後實驗的環境和校正時之環境相同，並求出校正曲線圖。校正過程利用15mm × 15mm之銅片，將熱電偶線(type T)黏在銅片上並連接到溫度記錄器，以便記錄銅片溫度的變化過程，由於銅片的拜爾特數(Bi)遠小於0.1，因此銅片表面的熱對流效應遠小於銅片內部的熱傳導效果，因此銅片內部溫度梯度很微小，故可視整個銅片為均勻溫度。

首先將液晶均勻噴附於銅片上，之後把熱電偶線黏著於銅片中央並放置於測試部內，待固定攝影機位置以及光源後，即可進行校正。實驗開始時先將空氣加熱到某溫度範圍，依照流量大小選定恰當溫度，待達定溫後，使熱空氣導入測試部，並藉由熱電偶線連接電腦，記錄實驗溫度變化情形，另一方面，由CCD攝影機同步拍攝銅片顏色的變化過程，所擷取之影像透過matlab程式將RGB座標系統轉換為HSV座標系統，進而得知色調值(Hue)，在不同溫度下色調值也有所不同。

將實驗影片切割成照片檔，並將照片與其對應之溫度值匯入matlab進行計算，結果可得到溫度(T)與色調(Hue)的對應值，藉此畫出溫度和色調關係曲線圖，亦稱為液晶校正曲線圖。

2-6 旋轉液晶校正曲線

當測試通道處於高速旋轉狀態下，將造成光源之反射角度改變以及冷卻通道產生微小的角度偏差，為了避免上述變因造成實驗之誤差，因此本文列出不同操作條件下，對於液晶校正曲線的差異性。

對於微小角度偏差的影響，本實驗設置偏差角度為： 1° 、 3° 、 5° 以及 10° ，藉由結果來判別角度對於液晶校正曲線之影響程度。而在不同旋轉速度下，液晶校正曲線也會有些許差異，因此對於旋轉速度的影響，本文使用了三種頻率進行校正，分別為： 5Hz 、 6Hz 以及 7Hz ，所對應之旋轉速度為： 300RPM 、 360RPM 以及 420RPM ，經由各種測試方式，找出實驗之不準度誤差值。

閃頻儀中的占空比(Duty Cycle)也是影響實驗參數之一，本文使用固定方波之訊號，方波一個週期為 $1/6\text{s}$ ，而占空比的大小決定視覺暫留的時間，若占空比設定太大，導致冷卻通道產生殘影現象，因此必須選定適合的占空比，以占空比 1% 為例，表示真正有作用的時間為 $1/600\text{s}$ ，其餘時間不用，由此可見，占空比越小，視覺暫留的效果越佳，對此本實驗做了占空比為： 50% 以及 1% 之校正，並和全亮光源之校正曲線做比較。

2-7 內冷卻通道之旋轉效應

冷卻通道在高速旋轉中，熱傳分佈會被科氏力(Coriolis)以及旋轉浮力(buoyancy)所影響，科氏力的產生會改變速度場以及溫度場的偏移。[圖 2-4]顯示旋轉產生之科氏力與浮力，對於內冷卻通道之影響，在第一通道區中(First pass)，冷卻流體因科氏力的影響強制偏向翼後緣(Trailing Surface)，進而提升此區域之熱傳分佈，另一方面，在第二通道區中(Second pass)，冷卻流體因科氏力的影響強制偏向翼前緣(Leading Surface)之位置。高速旋轉的離心力(centrifugal force)以及溫度差的因素造成浮力產生，在第一通道中，浮力和流場慣性力有疊加的效果，而在第二通道區，因流體的流向導致旋轉浮力和慣性力的作用剛好相反，因此在第一通道區的熱傳值，翼後緣將會大於翼前緣，而第二通道區熱傳分佈，翼前緣將會大於翼後緣。由[圖 2-5]可得知，旋轉方向若為逆時針方向旋轉，迎風面的部位稱為翼前緣(Leading Surface)，背風面的部位稱為翼後緣(Trailing Surface)，不同的旋轉方向，翼前緣以及翼後緣的定義也不同。

2-8 不準度分析

本實驗不準度分析(Uncertainty)之計算是根據 Moffat 在 1988 年所提出的分析方法[37]，文中提到實驗的總結果 R 是由一連串的量測數據 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ (無論是由量測工具或是人為觀察) 所計算得知，故 R 的組成函數可以由 [2.10] 式表示：

$$R=R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad [2.10]$$

文中定義 X_i 為一量測結果之數值，其有一量測誤差為 δX_i ，並將其量測誤差所造成的量測結果數據表示成：

$$X_i = X_i(\text{measured}) \pm \delta X_i \quad [2.11]$$

並且必須符合以下定義：

1. 最精準的量測結果為 $X_i(\text{measured})$
2. X_i 量測的不準度最大值為 δX_i
3. $\pm \delta X_i$ 的值大於 X_i 的機率應為 2.5% 以下

文中並參考 Kline and McClintock 在 1953 年的論述[38]，在實驗中若第 i 項量測數據有誤差存在時，將 R 對 X_i 作偏微分可得：

$$\delta R_{X_i} = \frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i \quad [2.12]$$

而當實驗中的結果 R 函數中有數個各別獨立的量測誤差，則

將其總實驗誤差用統計平方公差法(root-sum-square method)表示：

$$\delta R = \left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i \right)^2 \right\}^{1/2} \quad [2.13]$$

利用[2.13]式前必須先計算出各實驗量測參數之不準確度，而[2.4]式為本實驗計算局部熱對流係數 h 之關係式，其中熱電偶線所測得的流體參考溫度為 T_m 、表面初始溫度為 $T_{w,i}$ 、測試面上塗佈之液晶經校正曲線轉換為 T_w 、影像擷取和熱電偶線溫度變化的時間誤差 t 和 Thermal Product ($\bar{k} = \sqrt{\rho C_p k} = \frac{k}{\sqrt{\alpha}}$) 為組成 h 的參數，此函數由(2.14)式表示之：

$$h = h(T_m, T_w, T_{w,i}, t, \bar{k}) \quad [2.14]$$

再將[2.14]式代入[2.13]式，可得：

$$\delta h = \left[\left(\frac{\delta h}{\delta T_m} \delta T_m \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\delta T_w} \delta T_w \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\delta T_{w,i}} \delta T_{w,i} \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\delta t} \delta t \right)^2 + \left(\frac{\delta h}{\delta \bar{k}} \delta \bar{k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [2.15]$$

(表 2.1)表示經計算後的各量測參數之誤差量，表中也列舉出本實驗各參數的誤差範圍，並且以本實驗非肋條正上方的局部熱對流係數值計算其不準度，可以計算出局部熱對流係數 h 之總誤差量，即：

$$\delta h = [(12.62)^2 + (19.36)^2 + (4.75)^2 + (11.62)^2 + (5.01)^2]^{\frac{1}{2}} = 26.77(\text{W}/\text{m}^2\text{°C})$$

故本實驗之不準確度 $\delta h/h$ 為 21.76%

$h=123.01$					
	T_m	$T_{w,i}$	T_w	t	\bar{k}
Uncertainty	0.5°C	0.5°C	0.5°C	0.2s	30
	h_{T_m}	$h_{T_{w,i}}$	h_{T_w}	h_t	$h_{\bar{k}}$
	135.63	142.37	127.77	134.63	117.99
	δh_{T_m}	$\delta h_{T_{w,i}}$	δh_{T_w}	δh_t	$\delta h_{\bar{k}}$
$\frac{\delta R}{\delta X_i} \delta X_i$	12.62	19.36	4.75	11.62	5.01
$\delta h/h = 21.76\%$					

表 2-1:不準度分析

第三章 實驗設備與步驟

3-1 液晶感溫設備

3-1-1 感溫液晶

不同感溫液晶量測範圍有所差異，因此配合實驗所需之溫度範圍選用適合的感溫液晶，本實驗使用的感溫液晶型號SPN100/R30C5W，由Hallcrest公司生產，顏色變化範圍 $30^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ [圖3-1]，根據原廠測試報告結果表示：紅色起始溫度為 30.5°C ，綠色起始溫度為 31.2°C ，藍色起始溫度為 35.2°C 。實驗前置作業中，先利用噴筆將感溫液晶均勻噴附在透明壓克力上，待感溫液晶乾燥後再以相同的方式將黑漆噴附在感溫液晶上，本實驗使用的黑漆型號SPB100，由Hallcrest公司生產，噴塗黑漆目的為減少實驗過程反光與折射的問題，日後每次重新噴附液晶，必須再做一次校正曲線。

3-1-2 照明設備

實驗過程中光源的控制非常重要，為了不影響 CCD 攝影機對感溫液晶顏色判別的差異性，因此本實驗使用黑色布簾遮蔽外在光源避免在實驗中產生干擾，而且液晶長期曝曬於紫外線中校正曲線有所改變，因此噴附液晶之模型平日應避免光源干擾造成實驗之誤差，實驗光源方面為晶創公司生產，大小為 $150\text{mm}\times 150\text{mm}$ 之陣列型 LED 燈，並配合波型產生器，調整輸出頻率以及占空比大小。

3-1-3 影像擷取系統

實驗影像擷取之設備型號為:SONY DSC-HX9V(日本製造)高速錄影 Full HD，最高解析度(resolution)為 1440×1080，快門速度為 30fps(Frame Per Second)，光圈值為 F3.3(W)-5.9(T)，焦距為 4.28-68.48mm。配合相機腳架的使用，固定相機位置以及相機焦距，確保日後實驗此項參數為定值，不同拍攝角度也會影響影像擷取之結果，因此本實驗校正過程必須和實際實驗條件一致，以減少實驗不必要的誤差。

3-2 環境設備

3-2-1 旋轉機構與溫度擷取系統

為了研究真實旋轉情況下矩形雙通道內之熱傳分佈現象，將模型置於測試區內並固定於旋轉機台上。旋轉機構底部利用鐵板焊接成中空的支架，整體基座大小為1.6m×1.6m×1m(長×寬×高)，而動能輸出部分由一台變頻馬達所提供，此馬達最高轉數可達1780rpm，並且配合齒輪與皮帶的連接帶動機台的旋轉軸，本實驗的旋轉軸為中空鋁合金製成，內部可導入冷卻空氣以提供實驗冷卻流體之通道，此外，旋轉軸承固定於中空的基座上，而管路和旋轉軸藉由旋轉接頭相連接而成。實驗測試模型放置於旋轉臂的其中一端，以鋁合金製成的圓盤相連接，並且圓盤鎖入旋轉臂其中一端以防止高速旋轉下模型通道飛出，另一方面，為了平衡旋轉臂兩端的重量，在旋轉臂另一端加裝了平衡塊，達到雙邊平衡之目的。

訊號傳輸透過旋轉軸上方的滑動環式電路旋轉連接器，此滑動電路旋轉連接器具有72條訊號線(MOOG 型號為AC6275) ，利用電刷連接訊號線達到傳輸訊號之功用，因此本實驗的熱電偶線(T-type)藉由快速拆換的方式，連接於滑動電路旋轉連接器其中一端訊號線上，另一端分別連接至電源供應器以及熱電偶線集線器(NI 型號為9213) 中，配合電腦軟體Labview express 3.0溫度擷取系統，將熱電偶線顯示的訊號擷取於電腦中，並將實驗溫度的數據輸出Excel檔案型式，以提供日後彙整數據用。

藉由實驗整體示意圖[圖3-2]可知，實驗用的冷卻空氣由往復式壓縮機提供配合空桶儲存冷卻空氣，等待空桶存滿氣體後，經過集水杯(filter)將空氣乾燥並且透過調壓閥調整壓力大小，在來利用針型閥以及流量計(TOKYO KEISO 型號為TF-4000)調整實驗所需之流量，而熱能來源由空氣加熱器配合溫度控制箱的使用達到加熱氣體之功用，當氣體達到實驗所需之溫度時，最後利用三向閥將熱空氣送入底部的旋轉接頭，熱空氣將沿著中空的旋轉軸往上流動經過旋轉軸承，最終到達旋轉臂的出口端，並進入測試通道的第一通道區中，空氣通過測試通道後便經由第二通道區排放至大氣中。

3-2-2 加熱系統與冷卻氣體供給

利用 220 伏特交流電源的空氣加熱器以及溫度控制箱，用以提供穩定的加熱來源，加熱器由彰化電熱有限公司生產，(型號為 D008)。實驗冷卻空氣由 5 馬力的往復式空氣壓縮機產生(型號為 HTA-80 FUSHENG 製)，冷卻空器連接氣體儲存桶，實驗最大流量為 800 L/min。

實驗中流量控制以電子式流量計(型號為 TF-4000 TOKYO KEISO 製)，其流量範圍 0~800 L/min，精度為±3%，此流量範圍可滿足實驗所需之雷諾數。

3-2-3 測試部模型

實驗模型由透明壓克力(acrylic)以及電木隔板(Division board)組成，為了方便冷卻通道之熱傳分佈觀測故選用透明壓克力材質，觀測區厚度為 10mm，整體模型大小為 230mm×35mm×40mm(長×寬×高)，實驗壓克力流道大小為 230mm×10mm×40mm(長×寬×高)，利用肋條產生分離以及流體再接觸等現象，藉以提高整體熱傳效應，其中肋條與主流方向呈 45 度，肋條寬度以及高度為 1.5mm×1.5mm。空氣入口區大小為 10mm×15mm (高×寬)，高寬比(aspect ratio)為 1:1.5 並利用 O-ring 來防止氣體外漏，實驗測試模型共分為三個部分：第一通道區(First-passage)、流體轉向區(Turn region)以及第二通道區(Second-passage)；第一通道區前段為長度 105mm 的平滑流體發展區，而後段長度為 115mm 並且置入 45 度肋條來幫助提升熱傳效應，

之後進入流體轉向區，最後流體在經過第二通道區域，同樣的置入 45 度肋條以增強熱傳之功用，流體通過第二通道區域後便排放置大氣中[圖 3-3]。

本文實驗冷卻通道共有兩種模型：平滑冷卻通道以及冷卻通道設置 45 度肋條之模型[圖 3-4] [圖 3-5]。流場的溫度量測，利用壓克力上的 12 個孔洞直徑為 1/16 英吋(inch)，藉由熱電偶線的置入與滑動環式電路旋轉連接器相連接，便可得冷卻通道內入口以及出口區域的溫度值。測試通道藉由一圓盤連接(材質為尼龍)直徑大小為 225mm 厚度為 100mm，並以 12 支 M6 螺絲分別固定於旋轉機構的白鐵圓盤上，整體實驗模型外部再以鋁合金製成的保護架包覆，用以防止旋轉時測試模型飛出與脫落[圖 3-5]。

3-3 實驗步驟

靜止實驗

1. 開啟 LED 光源以及固定電壓與電流，並拉上黑色布簾防止外在光源干擾，確保實驗光源固定。
2. 將 CCD 攝影機固定於相機腳架上，確保實驗中不會移動與鬆脫，調整好適當焦距與位置，實驗過程必須和校正時的環境狀態相同。
3. 開啟電腦中的 Labview express 3.0 用以顯示溫度變化過程，檢查熱電偶線訊號是否正常，並記錄當下之室內溫度。

4. 開啟往復式空氣壓縮機，將氣體存入空氣桶內，利用調壓閥將壓力調至為一大氣壓，待空氣體儲存滿後，便將氣體送出。
5. 利用針型閥以及電子式流量計，依照實驗雷諾數之數值，調整出正確的流量範圍。
6. 開啟空氣加熱器，利用溫度控制箱配合實驗流量調整適當溫度，加熱過程中確保有空氣通過，以免管路過熱使儀器燒毀。
7. 啟動 CCD 攝影機錄影功能，並配合碼錶使用，以便得知液晶變化過程中的正確秒數。
8. 待溫度達測試之溫度，旋開三向閥導入熱空氣進入測試部模型，測試區溫度也隨著電腦同步紀錄儲存。
9. 將實驗過程擷取之影像以及電腦紀錄之溫度，配合碼錶的使用，得知溫度與影像的關係，再利用影像處理程式(matlab)進行計算可求得對流熱傳係數 h 之分佈。
10. 彙整實驗數據進而分析比較數值的差異性。

旋轉實驗

1. 重複步驟 1-6
2. 開啟波型訊號產生器，此實驗外部觸發訊號為方波，並設定適當的占空比大小。
3. 開啟變頻馬達控制器，調整適當頻率用以提供實驗所需之轉速，並和 LED 光源達到同步之效果。
4. 啟動 CCD 攝影機錄影功能，並配合碼錶使用，以便得知液晶變化過程中的正確秒數。
5. 待溫度達測試之溫度，旋開三向閥導入熱空氣進入測試部模型，測試區溫度也隨著電腦同步紀錄儲存。
6. 將實驗過程擷取之影像以及電腦紀錄之溫度，配合碼表的使用得知溫度與影像的關係，再利用影像處理程式(matlab)進行計算可求得對流熱傳係數 h 之分佈。
7. 彙整實驗數據進而分析比較數值的差異性。

第四章 實驗結果與討論

4-1 液晶校正曲線

使用暫態液晶量測法之前，必須對實驗液晶做校正，使用不同溫度量測範圍之液晶所對應的校正曲線也不同，日後影像處理的數據以校正曲線為基礎，並在實驗過程中，各種參數之定義必須與校正時的情況相同，因此本實驗分別比較不同參數對於液晶校正曲線之影響，如：白平衡校正、不同頻率之校正以及占空比(Duty Cycle)校正以及偏差角度校正等。

4-1-1 液晶校正曲線之白平衡影響

實驗中照明之 LED 光源呈現微藍的顏色，為了避免微藍光造成實驗之誤差，因此調整攝影機的白平衡系統以及配合白平衡專用紙的使用，並比較白平衡狀態下的光源以及初始微藍光對於校正曲線之影響[圖 4-1](Duty 為 100%無閃爍狀態)。不同的色調值(Hue)代表著不同的顏色，色調(Hue)的分佈為：紅色 0、綠色 120、藍色 240；由圖中可看出，當溫度介於 30~32°C 之間，此時校正曲線誤差值約為 1.5%，而溫度介於 34~36°C 之間，此時校正曲線誤差值約為 0.6%，隨著溫度增加，校正曲線之差異性也跟著下降。從結果可知，實驗用之攝影機對於紅色之判別，和其他顏色相比較下，誤差值大了一些，所以本實驗選取溫度場圖片時，盡量選擇色調值較大的情況，藉以提高實驗之精確度。

4-1-2 液晶校正曲線之閃爍頻率影響

如果要拍攝高速轉動之物體，就必須配合超高速攝影機的使用，一般超高速攝影機成本昂貴，為了捕捉處在高速旋轉下的熱傳分佈型態，本文使用視覺暫存的技術，藉以降低實驗所需的成本，並將快速轉動之冷卻通道，以靜止的型態呈現出來，此技術之優點，利用簡單攝影機也能拍攝高速旋轉之物體。

本文以變頻馬達當作旋轉動力之來源，並利用波型產生器(Function Generator)外部觸發功能，讓實驗 LED 光源達到閃爍之目的。不同的旋轉速度所對應之觸發頻率也不同，本實驗旋轉速度為 360RPM，波型產生器設定的頻率為 6Hz，配合馬達變頻器以及波型產生器的使用，可使高速轉動的物體達到靜止之效果，因此本文探討旋轉速度對於液晶校正曲線之影響，便於日後旋轉實驗之基準[圖 4-2]。

圖中設定三種閃爍頻率(5Hz、6Hz 以及 7Hz)與無閃爍的狀態，使用白平衡系統以及占空比固定為 50%的狀態下，結果可知，旋轉速度的效應對於液晶校正曲線影響很微小，並和先前白平衡校正一樣，當校正曲線色調值(Hue)越大，各點的間距也變得更密更集中，此時的誤差也將變成很小，此結果可當日後實驗旋轉速度與校正曲線關係之基準，閃爍效應對於校正曲線之影響，最大誤差值為 3%。

4-1-3 液晶校正曲線之偏差角度影響

使高速旋轉之物體，達到視覺暫存的狀態，所存在些微角度偏差也是影響校正曲線的重要參數，因此本文將靜止實驗測試流道的位置定為基準，靠近攝影機方向定為正，遠離攝影機方向定為負，並探討冷卻通道在不同的偏差角度上，位置對於液晶校正曲線的影響。

圖中設定一基準點(測試部位處於靜止之位置上)，此時攝影機所拍攝到的影像可能會偏離一個微小的誤差角度，此微小的誤差角度由光電式轉速計(CHY-250)的誤差計算而來($\pm 0.02\% \cdot 360\text{RPM} \cdot 1/60\text{Min} \cdot 2\pi =$ 每秒最大誤差角度為 0.432°)，此誤差角度造成光源反射的方向和靜止的實驗有所差別，所以在正以及負的方向上，設定偏離角度為 1° 與 3° 的位置，尋找出角度偏差對於液晶校正曲線的影響，此時使用白平衡系統校正以及光源為全亮狀態。由[圖 4-3]可知，偏差角度對於液晶校正曲線影響並不明顯，在色調 0~120 之間(顏色由紅色轉變為綠色)，不同角度位置的校正曲線幾乎和靜止時的校正曲線重合，最大誤差值為 1.8%，而色調介於 120~240 之間(顏色由綠色轉變為藍色)，此時校正曲線些微產生偏移之現象，校正曲線在正的方向上，和靜止的校正曲線相比，最大誤差值為 3%，另一方面，校正曲線在負的方向上，和靜止的校正曲線相比，最大誤差值為 2.5%，因此在實驗過程中拍攝誤差角度的範圍內(每秒最大誤差為 0.432°)造成的量測誤差是可以接受的。

4-1-4 液晶校正曲線之占空比影響

波型產生器觸發 LED 光源閃爍，改變占空比(Duty Cycle)的方式可控制光源閃爍的停留時間，本文外部觸發使用的波形為方波，本文工作週期為 $1/6\text{ s}$ ，以占空比(Duty cycle)1%為主，真正有作用的時間為 $1/600\text{ s}$ (觸發時間)，其餘為不作用的關閉時間，藉由改變占空比的大小，可以有效微調光源閃爍的停留時間，達到視覺暫存之目的。

本文為了避免殘影現象的發生，因此選用占空比為 1%的狀態下操作，因觸發時間極為短暫，大幅提升對於冷卻通道的觀測清晰度。[圖 4-4]分別為占空比 100%(沒有閃爍)、占空比 50%、20%以及占空比 1%的比較，此時使用白平衡系統以及閃爍頻率為 6Hz，當色調介於 0~120 之間，此時顏色由紅色轉變為綠色，此時最大誤差值為 2%，而色調介於 120~240 之間，顏色變化由綠色轉變為藍色，此時最大誤差值為 7.9%，由實驗結果可得知，LED 光源閃爍的時間變化，對於液晶校正曲線造成的影響，誤差值可控制在 10% 內，本文對於液晶校正曲線之基礎研究詳細探討，對於影響曲線之變因分別尋找出來，此結果可用於日後實驗參考之依據。

4-2 秒數時間、時間步階與紐賽數之關係

4-2-1 秒數時間對於紐賽數之影響

本文使用暫態液晶測量冷卻通道之熱傳值分佈，因此在不同時間之量測點，冷卻通道熱傳效應也有些許差異，為了避免時間選取的不同，造成實驗上的誤差，本文選用雷諾數為 20000 之靜止肋條壁面冷卻通道，比較冷卻通道在不同的時間中，比較紐賽數之變化差異。冷卻通道分別在 40 秒以及 45 秒之熱傳分佈情形，由[圖 4-5]可知，冷卻通道整體熱傳趨勢相近，時間對於熱傳值影響不大，在第一通道區(First passage)中，冷卻通道在 40 秒的狀態下， Nu/Nu_0 整體平均為 2.99，而冷卻通道在 45 秒的狀態下， Nu/Nu_0 整體平均為 3.08，此區域誤差值為 2.9%，在流體轉向區域(Turn region)中，誤差值為 1.2%，在第二通道區域(Second passage)，誤差值為 3.9%。

4-2-2 時間步階對於紐賽數之影響

冷卻通道的流體參考溫度，和加熱時間有絕對的關係，由[圖 4-6]所示，加熱時間越長，冷卻通道的主流溫度也就越高，因此使用杜罕莫疊加原理計算時，時間步階(Time step)疊加範圍的選取，會造成紐賽數值的差異。疊加的次數太少，將導致紐賽數變動很大，時間步階的間距越密集(疊加的次數越多)，冷卻通道的紐賽數值越趨近於收斂狀態。

對於時間步階的選用，本文選用雷諾數 20000 之靜止肋條壁面冷卻通道，並分別比較時間步階為 1 秒、0.2 秒以及 0.1 秒，利用不同的時間步階計算，藉以求得紐賽數值之分佈情形，由橫向紐賽數平均之趨勢[圖 4-7]可得知，時間步階 0.1 秒以及 0.2 秒之熱傳值分佈曲線相重疊，表示此時間步階趨近於收斂狀態，最大誤差值低於 1%，而當時間步階為 1 秒之狀態時，明顯看出熱傳值有偏低的情形，因為時間步階的間隔太過於稀疏，導致整體熱傳值變動很大，在第一通道區(First passage)，時間步階為 0.1 秒時之熱傳值平均為 2.994，而時間步階為 1 秒時之熱傳值平均為 2.471，在第一通道區的熱傳值誤差值為 17.5%，由結果可知，若時間步階間隔選用過大，將導致實驗紐賽數值不準確，因此本文選用時間步階為 0.1 秒來進行疊加計算，並求出紐賽數在各區域的分布情形。

4-3 平滑雙通道之熱傳分佈現象

旋轉效應以及流體轉向區的設置，使得熱傳分佈現象較為複雜，平滑雙通道為本實驗模型之一，冷卻通道的寬高比(Aspect ratio)固定為 1:1.5，本文實驗包括靜止實驗(Stationary)以及旋轉(Rotating)之紐賽數比較，雷諾數設定為 20000 以及 25000。

4-3-1 雷諾數對於平滑冷卻通道之紐賽數值影響

本文在平滑冷卻雙通道中，設定兩種雷諾數範圍：20000 以及 25000，不同雷諾數產生的熱傳分佈現象也不同，由[圖 4-8]可得知，在第一通道區 (First passage) 為完全發展流 (Fully Development)，因此雷諾數 2 萬以及 2 萬 5 的 Nu/Nu_0 差異並不明顯， Nu/Nu_0 的平均值落在 1 附近，當流體到達流體轉向區 (Turn Region) 時，因彎道效應引起二次流以及流體分離之現象的發生，此時 Nu/Nu_0 值有增加的趨勢，而熱傳最高區域位於第二通道區 (Second passage) 之入口處，雷諾數為 2 萬 5 的冷卻通道中，最高 Nu/Nu_0 的比值為 3.185，而在雷諾數為 2 萬的冷卻通道中，最高 Nu/Nu_0 的比值為 3.32。

[圖 4-9] 可看到在第一通道區中，因沒有物體造成流體產生擾動之現象，此區域為冷卻通道低熱傳區 (完全發展流體)，當流體到達彎道區域時，此時溫度場產生變化，進而提升此區域的紐賽數 (Nu) 值，而冷卻通道的高熱傳區域出現在流體經過彎道區後之位置，並且雷諾數越高的溫度場，熱傳分佈效應較為強烈，從結果可看出，雷諾數為 2 萬 5 的溫度場型態，高熱傳區域的分佈和雷諾數為 2 萬相比，高熱傳區域分布的面積更為寬廣。

4-3-2 旋轉效應對於平滑通道之紐賽數值影響

在旋轉冷卻通道中，翼前緣(Leading Surface)以及翼後緣(Trailing surface)之熱傳分佈效應備受關注，[圖 4-10]顯現旋轉效應對於平滑冷卻通道之熱傳分佈影響，圖中包含靜止冷卻通道以及旋轉冷卻通道(Trailing Surface 和 Leading Surface)，雷諾數為 2 萬以及 2 萬 5，旋轉數(Ro)分別為 0.017 以及 0.014。

在第一通道區中，溫度場沒有受到元件的干擾，因此 Nu/Nu_0 比值之平均約在 1 附近，由圖中可看到翼後緣部分的熱傳增加量並不明顯，整體趨勢幾乎和靜止通道相重合，而最低 Nu/Nu_0 比值出現在進入彎道區的位置中，此現象以翼後緣最為顯著，在流體轉向區(Turn Region)，以旋轉數為 0.017 的測試條件中，可看到 Nu/Nu_0 比值因旋轉效應造成熱傳值有些微增加的現象，而 Nu/Nu_0 比值最高點出現在第二通道區的入口處，此區域的 Nu/Nu_0 比值最高可達 3.55(雷諾數為 2 萬)，而在雷諾數為 2 萬 5 的情況下，紐賽數比值最高為 3.2，並且在第二通道區可看到，因高旋轉速造成冷卻通道熱傳分佈的差異，翼後緣之紐賽數比值明顯高於靜止狀態的紐賽數比值，而翼前緣之紐賽數比值和靜止冷卻通道相比，最多可差到 0.3。

冷卻通道之紐賽數分佈情形，可由[圖 4-11]得知，在第一通道區(First pass)，冷卻通道內並沒有高熱傳區的出現，此區域的溫度場沒有受到擾動，因此高旋轉速對於此區域的熱傳分布效應並不顯著，在翼後緣(Trailing Surface)可些微看出紐賽數值(Nu)在某些區塊和靜止(Stationary)相比，顏色有稍微暗淡一些，表示紐賽數值有上升的趨勢，而在翼前緣(Leading Surface)的位置，冷卻通道整體的顏色幾乎為淺灰色，白色區域的分布也比靜止通道(Stationary)擴大許多，表示此區域整體紐賽數比靜止通道低了一些。進入流體轉向區域(Turn Region)後，因彎道引起流體產生分離以及二次流現象的發生，此區域的紐賽數值大幅提升，和第一通道區相比上升了 150%，並且下游區域的紐賽數值比上游區域的紐賽數值大了許多，旋轉效應對於此區域的影響，無論是翼前緣或是翼後緣皆有增加的趨勢，而在翼前緣的冷卻通道裡，高速旋轉導致高紐賽值集中在下游，此集中分佈效應和翼後緣以及靜止通道相比，此效應更顯的強烈。

冷卻通道最高熱傳區域出現在第二通道區域(Second pass)之入口處，此區域的紐賽數值顏色分布最深，以翼後緣(Trailing surface)的高紐賽數值分佈範圍最廣，因受到旋轉效應之影響，使得翼後緣之紐賽數值大於翼前緣以及靜止的冷卻通道，此區域結合了彎道以及旋轉效應，導致熱傳效果特別強烈，而越往下游處，彎道影響效果變差，所以紐賽數顏色分布也越來越淺，表示越往下游，紐賽數的值也就越低。

[圖 4-12]為平滑冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)，雷諾數(Re)為 2 萬 5，由圖中可看到，熱傳分布因高速旋轉產生集中以及偏移的現象，對於翼後緣(Trailing surface)而言，在第一通道區中的紐賽數分佈，和翼前緣以及靜止冷卻通道相比，紐賽數分佈的範圍些許大了一些，而在第二通道中，除了入口之高熱傳區以外，越往下游熱傳效果就越差，流體轉向區域中，高熱傳區域分布較廣(和靜止相比較)，表示此區域熱傳有上升之現象。另一方面，在翼前緣(Leading Surface)的部分，流體高熱傳區出現在第二通道區的入口處，並且高熱傳區較為集中(和翼後緣以及靜止相比較)，並對於第二通道區熱傳分布，整體紐賽數有些許增加，因旋轉數(Ro)比較小，故旋轉效應對於冷卻通道的影響並不顯著，雷諾數為 2 萬 5 和雷諾數為 2 萬相比較，冷卻通道整體的紐賽數值比較高，紐賽數深灰色的分布也較為廣泛，由結果圖可看出，紐賽數(Nu)隨著雷諾數(Re)增加，整體紐賽數值也有上升的趨勢。

4-4 肋條壁面冷卻雙通道之熱傳分佈現象

在內冷卻通道中，除了高速旋轉引起的渦流(Vortices)外，設置肋條(Rib)也會產生二次流的發生，對於提升冷卻通道之熱傳分佈效應有顯著的影響，本文在內冷卻通道中雙邊牆上設置肋條，和主流方向呈 45 度，雷諾數範圍:1 萬 5、2 萬以及 2 萬 5。

4-4-1 雷諾數對於肋條壁面之平均紐賽數值影響

本文在內冷卻通道雙邊牆置入肋條，並比較不同雷諾數(Re)對於溫度場的熱傳分佈影響，實驗設定諾數範圍:1 萬 5、2 萬以及 2 萬 5，由[圖 4-13]置入肋條的冷卻通道平均紐賽數比值之分佈圖(靜止實驗)可知，X 方向為無因次化後的距離 X/D_h ，Y 方向為平均紐賽數值 Nu/Nu_0 ，雷諾數為 1 萬 5 的溫度場 Nu/Nu_0 值為最大，其次為雷諾數 2 萬，最低者為雷諾數 2 萬 5，由此可知，溫度場的紐賽數比值隨著雷諾數增加，有下降的趨勢，在第一通道區(First passage)雷諾數為 1 萬 5 的條件下，紐賽數平均比值為 3.3，流體轉向區(Turn region)，紐賽數平均比值為 3.4，在第二通道區(Second passage)，紐賽數平均比值為 3.3，整體紐賽數比值平穩的上升，和平滑冷卻通道相比，曲線上升的情形趨近於平緩，最高熱傳比值出在在第二通道的入口，最大紐賽數比值可達 3.47，對於溫度場之熱傳分佈，雷諾數(Re)的影響效應也是很重要的。

4-4-2 旋轉對於肋條壁面之平均紐賽數值影響

旋轉效應對於冷卻通道所造成的影響，是本實驗關注的議題，高速旋轉產生的科氏力，對於熱傳分佈之現象有很大的關係，在旋轉實驗中，翼前緣(Leading surface)以及翼後緣(Trailing surface)的判別和旋轉方向有極大的關連，迎風面的冷卻通道牆稱為翼前緣，而背風面的牆稱為翼後緣，在靜止冷卻通道中，流體熱傳分佈效應成對出現，而在旋轉冷卻通道中，翼前緣以及翼後緣的熱傳分佈明顯不同，為了找出旋轉效應對於溫度場造成的影響，本文在肋條壁面冷卻通道中，旋轉數(Ro)分別為 0.022、0.017 以及 0.014，旋轉數越高，對於熱傳分佈造成的影響也越明顯，可由以下實驗結果得知。

[圖 4-14]雷諾數為 1 萬 5，旋轉數為 0.022，此條件為本實驗最高旋轉數(Ro)，由圖中可看到，在第一通道區(First passage)中，在翼後緣的整體紐賽數比值明顯高於其餘兩者，和靜止通道相比較，整體熱傳比值(Nu/Nu_0)上升了 10%，在翼前緣的位置整體紐賽數比值最低，整體紐賽數比值下降了 23.8%(和靜止相比)，進入流體轉向區(Turn region)中，翼前緣以及翼後緣的平均紐賽數比值幾乎重合，此時 Nu/Nu_0 為 3.6，和靜止紐賽數比值 3.4 相比，整體平均上升了 0.2，對於第二通道(Second passage)的紐賽數比值分佈，最高 Nu/Nu_0 出現在翼前緣(Leading surface)的入口處，此時 Nu/Nu_0 為 3.64，對於此區域的熱傳值分佈，翼前緣的平均紐賽數比值大於翼後緣

的平均紐賽數比值，表示在此區域提升熱傳分佈最佳的情況出在現翼前緣的位置中。

在雷諾數為 2 萬中，旋轉數(Ro)為 0.017，由[圖 4-15]可以看到，在第一通道區(First passage)中，翼後緣的紐賽數比值和靜止相比些許提升，而翼前緣的紐賽數比值下降趨勢變緩慢了，並且翼前緣(Leading)的紐賽數比值越往出口方向(Second passage)，紐賽數比值越大， Nu/Nu_0 最高為 3.4，在彎道區域(Turn region)，翼後緣的紐賽數比值和靜止相比，提升了約 13%，而翼後緣位置之紐賽數值分佈，越往出口方向(Second passage)紐賽數值也就越低。而在雷諾數為 2 萬 5[圖 4-16]，此時旋轉數(Ro)為 0.014，紐賽數值分布情形和前面兩種雷諾數相似，旋轉效應對於第一通道區，翼後緣提升熱傳效果大於翼前緣，而在流體轉向區中，因結合彎道以及旋轉的效應，此時翼後緣以及翼前緣的紐賽數值些許增加，在第二通道區，熱傳增強效果翼前緣的增強效益高於翼後緣，由實驗結果也可以看出，隨著雷諾數增加，流道整體的平均紐賽值隨之降低，並且最大紐賽數值(Nu/Nu_0)也從 3.64($Re=15000$)降至為 3.18($Re=25000$)。

4-4-3 雷諾數對於肋條壁面之熱傳分佈效應

本文在內冷卻雙通道的壁面設置 45 度肋條(RIB)，肋條所引起的二次流效應，能有效提升整體冷卻通道紐賽數(Nu)值，[圖 4-17]為肋條壁面冷卻雙通道之熱傳分佈型態，由圖中可看到，當流體通過肋條(Rib)的時候，流體會產生二次流的發生，在第一通道區(First passage)，流體流動方向由內側壁面(Inner Wall)朝向外側壁面(Outer Wall)發展，高熱傳區域出現在肋條與肋條之間，而在第二通道區(Second passage)，流體流動方向由外側壁面(Outer Wall)朝向內側壁面(Inner Wall)，在流體轉向區域(Turn region)中，因彎道的置入，引起溫度場產生分離以及二次流發生，並在角落出現渦流(Vortices)現象，此區域為流體轉向區之低熱傳分佈位置，當雷諾數越大時，肋條與肋條之間的高熱傳區域也越飽滿，整體通道的高熱傳區域覆蓋面積較為廣闊，當雷諾數越小時，此時高熱傳區域的覆蓋面積相對減少許多，由此結果可得知，熱傳增加量和雷諾數有絕對的關係，當雷諾數(Re)越高，此時熱傳效果越佳，紐賽數(Nu)值也就越大，反之，雷諾數(Re)越低的時候，此時熱傳效果也跟著變差，紐賽數(Nu)值也隨之下降，從結果可看出，通道內置入肋條(Rib)，和未置入肋條(Smooth)的冷卻通道相比，肋條的置入大幅提升了整體熱傳效應。

4-4-4 旋轉效應對於肋條壁面之熱傳分佈情形

本實驗的旋轉速度固定為 360RPM，高旋轉速度中的冷卻通道熱傳分佈現象，和靜止冷卻通道之熱傳分佈現象有差異，高速旋轉會產生科氏力以及浮力效應，對於速度場分佈以及溫度場分佈皆有影響，在第一通道區(First passage)中，熱傳方向往翼後緣(Trailing surface)傳遞，使得此區域的紐賽數(Nu)值提升，在第二通道區(Second passage)中，熱傳傳遞方向和第一通道區相反，使得翼前緣(Leading surface)有較佳的熱傳表現，[圖 4-18]為雷諾數 1 萬 5 以及旋轉數為 0.022 的情況下，由圖中可以看到，冷卻通道的高熱傳區出現在肋條與肋條之間，在第一通道區域中，旋轉造成高熱傳區域的擴散，和靜止相比較，肋條之間的高熱傳區形狀，在旋轉的狀態下外型並不完整，圖由上而下分別代表為：靜止通道，翼後緣通道以及翼前緣通道，在第一通道中發現，翼後緣整體的紐賽數和靜止相比些許上升，而翼前緣方面由圖中可發現，高熱傳區域並不明顯，此區域的熱傳效應明顯偏低，在第二通道區域，高熱傳區域的形狀不完整，因此無法由溫度分佈型態清楚辨別熱傳值的高低，但可由之前紐賽數比值(Nu/Nu_0)的結果得知，在翼後緣(Leading surface)的熱傳值分佈和靜止相比，旋轉造成熱傳效果有稍微增加的趨勢。

[圖 4-19]為雷諾數 2 萬以及旋轉數(Ro)為 0.017 的情況,由圖可以發現,紐賽數(Nu)的高熱傳區域分布和雷諾數為 1 萬 5 相比,明顯增加許多,在第一通道區中,旋轉通道的高熱傳區域形狀有被擠壓的現象,和靜止通道的高熱傳區域形狀相比較,旋轉時的熱傳分佈較靠近於內側壁面($Inner\ Wall$),在第二通道區域中,高熱傳區域的形狀也不完整,在流體轉向區($Turn\ region$)中,高熱傳區集中在中間,兩側的紐賽數值比較低,旋轉效應在此區域的影響並不顯著。

[圖 4-20]為雷諾數 2 萬 5 以及旋轉數(Ro)為 0.014 的情況,此冷卻通道中的熱傳現象最為強烈,高熱傳區域也最為廣闊,在第一通道中,靜止的冷卻通道可明顯看出熱傳傳地方向(由內側牆壁傳向外側牆壁),而在旋轉通道裡,肋條之間的高熱傳區域集中在內側牆壁,在第二通道區域裡,旋轉通道的高熱傳區型狀並不明顯,但是可以看到,在第二通道區的入口處,存在最高熱傳值,此區域的深色分布較多,表示和出口相比較,第二通道的入口處有較佳的熱傳現象,隨著雷諾數的增加,高熱傳區域的形狀也跟著變大,而旋轉數(Ro)對於內冷卻通道之溫度分佈型態影響並不顯著,因為在旋轉的冷卻通道中,高熱傳區域的分佈型態不像靜止通道那麼完整,因此只從紐賽數(Nu)分佈圖的趨勢,很難判別旋轉效應對於第一通道、流體轉向區以及第二通道的影響效益。

4-5 比較肋條壁面和平滑通道之熱傳現象

本文實驗模型有兩種：平滑壁面冷卻通道以及肋條壁面冷卻通道，[圖 4-21]為不同壁面之冷卻通道的紐賽數值比較圖，雷諾數為 2 萬 5 以及 2 萬，由圖中可以看到在第一通道區(First passage)中，肋條引起強化熱傳效應和靜止通道相比，大幅提升許多，雷諾數 2 萬的情況下，肋條(Rib)壁面的平均紐賽數比值(Nu/Nu_0)比靜止通道增加了 1.97，雷諾數 2 萬 5 的情況，平均紐賽數比值也上升了 1.66，由此可知，在通道內設置肋條能大幅改善熱傳效應，在流體轉向區域(Turn region)中，肋條強化熱傳的效果也有增加的趨勢，圖中可看到，肋條壁面雷諾數 2 萬的紐賽數比值為 3.3，平滑壁面的紐賽數比值為 2.45，此區域平均紐賽數比值只上升了 0.85，而在雷諾數 2 萬 5 的情形下，肋條壁面之紐賽數值上升了 0.78，在第二通道區域(Second passage)中，由圖中可以發現到，最高熱傳比值均出現在第二通道區的入口處，此區域的紐賽數比值相近，當雷諾數為 2 萬 5 以及 2 萬時，兩種模型的紐賽數比值重合，分別為 3.18 以及 3.32，越往下游處肋條效應也就越明顯，有助條壁面的通道，紐賽數比值緩緩下降，而在平滑通道裡，越往出口處，紐賽數比值越低，且下降幅度很明顯，在雷諾數為 2 萬以及 2 萬 5 的測試中，肋條壁面的紐賽數比值和平滑通道相比，分別提升了 1.15 以及 0.94，詳細數值可參考[圖 4-22]。

[圖 4-23]和[圖 4-24]為肋條壁面以及平滑壁面之冷卻通道紐賽數分佈圖，在第一通道區(First passage)中，平滑壁面的冷卻通道並沒有高熱傳區的出現，因通道內的流體為完全發展流(Fully development)，而置入肋條的通道，明顯可看到流體流動方向由內側壁面流至外側壁面，並在肋條與肋條之間出現橢圓形狀的高熱傳區域，因高熱傳區域的出現，使得整體熱傳效果變為強烈，在流體轉向區(Turn region)中，平滑通道的熱傳分佈和肋條壁面明顯不同，從平滑通道之紐賽數分佈圖可看到，流體高熱傳區出現在下游處(離開彎道時)，高紐賽數值分佈，越往出口處分布較廣，表示出口位置熱傳效果較佳，而肋條壁面的冷卻通道，高熱傳區反而集中在中間位置，並和平滑通道一樣，在角落位置為低熱傳區，在進入第二通道區域(Second passage)時，在入口處出現最高熱傳值(Nu)，在平滑壁面冷卻通道可清楚看到，此區域的紐賽數值和其他區域相比，明顯高了許多，並且高熱傳區域範圍也比較廣，在肋條壁面冷卻通道也出現相同情形，入口區域間的高熱傳形狀較為飽滿，高紐賽數分布也較為密集，而熱傳傳遞方向由外側壁面傳至內側壁面，由結果可得知，平滑壁面冷卻雙通道以及肋條壁面冷卻雙通道，最高熱傳區域均出現在，流過彎道區域後(第二通道區的入口)之位置。

4-6 雷諾數對於冷卻通道之紐賽數值影響

不同雷諾數下的冷卻通道，溫度場之熱傳效果以及溫度場分佈型態也不太一樣，[圖 4-25]表示雷諾數對於不同區域之影響情況，X 軸方向為雷諾數的大小，Y 軸為紐賽數比值(Nu/Nu_0)，在平滑通道區域，可以看到雷諾數的影響和肋條壁面相比較，顯得平穩許多，雷諾數 2 萬的平均紐賽數比值為 1.05，而雷諾數 2 萬 5 的紐賽數比值為 1.03，結果可看到雷諾數差異並不明顯，在肋條壁面中，可以看到紐賽數比值隨著雷諾數增加，紐賽數值有明顯下降的趨勢，在靜止以及旋轉實驗中，都可以看到一樣的趨勢，在流體轉向區(Turn region)，平滑通道之雷諾數從 2 萬上升到 2 萬 5 時，此紐賽數比值從 2.45 降至 2.23，在肋條壁面冷卻通道裡，靜止通道的紐賽數比值，隨著雷諾數增加，紐賽數比值也從 3.6 降至 3.4 最低點出現在雷諾數為 2 萬 5，此時紐賽數比值為 3.2，在此區域裡，旋轉效應使得翼後緣以及翼前緣的紐賽數比值和靜止相比都有些許增加的趨勢，在第二通道，可以看到紐賽數整體趨勢和第一通道相似，為一不同的地方為，此時翼前緣的紐賽數比值為最高，和雷諾數的關係和第一通道一樣，隨著雷諾數增加，紐賽數比值隨之下降，雷諾數和紐賽數比值的關係，可藉由此三張圖，來說明雷諾數造成的影響。

4-7 和前人研究結果比較

4-7-1 比較平滑壁面冷卻通道之熱傳值差異

本文平滑壁面冷卻通道之紐賽數結果，和 Ekkad 等人[33]之數據做比較，本實驗寬高比為 1:1.5，水力直徑(D_h)為 12mm，雷諾數為 2 萬以及 2 萬 5，Ekkad 之實驗模型寬高比為 1:1，水力直徑(D_h)為 50mm，雷諾數為 1 萬 2 以及 3 萬，對於溫度場熱傳量測使用暫態液晶量測法[表 4-1]。

[圖 4-26]為靜止平滑壁面雙通道紐賽數比值分佈圖，在第一通道區域中(First passage)，本文實驗結果和 Ekkad 紐賽數比值相近，在進入通道前有最低紐賽數值產生，第一通道區的整體紐賽數平均比值平均收斂在 1 附近，流體進入流體轉向區(Turn region)，此時紐賽數比值大幅提升，紐賽數平均比值落在 2.3 附近，表示因彎道引起的效應提升此區域的熱傳值，Ekkad 的紐賽數比值分別為 2.53($Re=12000$)以及 2.43($Re=30000$)，進入第二通道區(Second passage)之入口處，此時為冷卻通道最高熱傳區，最大可達紐賽數值 3.57，此趨勢和本實驗結果相同，最高熱傳區均出現在第二通道的入口，越往下游熱傳效果越差，隨著 X/D_h 增加，紐賽數比值隨之下滑，在此，Ekkad 的紐賽數值下滑幅度，和本文之結果有些許差異，因本實驗紐賽數值下降比較快，Ekkad 紐賽數比值分別為 2.78($Re=12000$)以及 2.47($Re=30000$)。

4-7-2 比較肋條壁面冷卻通道之熱傳值差異(靜止實驗)

本文肋條壁面冷卻通道之紐賽數結果，和 Liu 等人之數據做比較，本實驗寬高比為 1:1.5，水力直徑(D_h)為 12mm，肋條的 p/e 為 10， e/D_h 為 0.125，肋條和主流方向呈現 45° ，雷諾數為 1 萬 5、2 萬以及 2 萬 5，Liu 的寬高比為 1:2， e/D_h 為 0.094，肋條角度為 45° ， P/e 為 10，實驗模型皆為雙邊放置肋條(Rib)，而溫度量測方法和本實驗不同，Liu 使用單點熱電偶量測法，雷諾數範圍為 5000 到 40000

(表 4-2)。

[圖 4-27]為肋條壁面冷卻通道之紐賽數比值分佈圖，在第一通道區(First passage)中，Liu 的結果以雷諾數 1 萬之紐賽數比值高於雷諾數 2 萬 5 之比值，整體通道平均比值分別為 3.41($Re=10000$)以及 2.86($Re=25000$)，在通道入口處為最低點，越往彎道區流動，紐賽數比值越高，本實驗雷諾數 2 萬 5 的情況下，整體通道平均比值為 2.69，相較之下低了一些，進入彎道區後，紐賽數比值有微幅增加，增加之幅度明顯比平滑通道低了許多，Liu 在流體轉向區之紐賽數比值為 3.875($Re=10000$)以及 3.266($Re=25000$)，此區域為通道最高熱傳區，過了彎道區域後進入了第二通道(Second passage)，紐賽數比值有下降的趨勢，第二通道整體平均紐賽數值為 3.42($Re=10000$)以及 2.9($Re=25000$)，由結果可知，在第二通道區之熱傳效應，和第一通道相比較，整體熱傳值有些微增加一些。

4-7-3 比較肋條壁面冷卻通道之熱傳值差異(旋轉實驗)

本文實驗轉速固定為 360Rpm，以雷諾數 2 萬 5 以及 0.014 之旋轉數(Ro)和文獻做比較， Fu 的雷諾數為 2 萬 5 以及旋轉數為 0.042，冷卻通道雙邊壁面皆放置 45 度肋條，由結果[圖 4-28]可看到，在第一通道區(First pass)翼後緣(Trailing Surface)的紐賽數比值(Nu/Nu_0)皆大於翼前緣(Leading Surface)之紐賽數比值，因為 Fu 的旋轉數(Ro)和本文相比較來的大，因此旋轉效應對於熱傳增強之提升較為強烈， Fu 在翼後緣之第一通道整體紐賽數比值為 3.03，而在翼前緣之第一通道整體紐賽數比值為 2.71，由此可以看出，此時熱傳效果翼後緣將大於翼前緣。

進入流體轉向區(Turn region)，此區域熱傳現象較為複雜，因結合彎道以及旋轉效應所造成的熱傳效應，此區紐賽數比值和第一通道相比較，整體紐賽數比值有略微增加，在此區域中， Fu 的翼後緣紐賽數比值為 3.4，翼前緣的紐賽數比值為 3.07，彼此紐賽數比值相差了 0.33，而本實驗在此區域之結果，翼前緣以及翼後緣的紐賽數皆在 3.2 附近，而在第二通道區(Second pass)，此時翼前緣之紐賽數比值高於翼後緣，表示在第二通道裡，翼前緣的熱傳效應比翼後緣來的佳。

	Present work	Ekkad (1997)
$D_h(\text{mm})$	12	50.8
AR(H/W)	0.67	1
Channel Wall	Smooth wall	Smooth wall
Measurement techniques	Liquid Crystal	Liquid Crystal

表 4-1：熱傳之文獻比較參數對照表(平滑通道)

	Present work	Fu(2004)	Liu (2007)
$D_h(\text{mm})$	12	16.93	16.93
AR(H/W)	0.67	0.5	0.5
P/e	10	10	10
e/ D_h	0.125	0.094	0.094
Channel Wall	45°Rib	45°Rib	45°Rib
Measurement techniques	Liquid Crystal	Thermocouple	Thermocouple

表 4-2：熱傳之文獻比較參數對照表(肋條通道)

第五章 結論與建議

5-1 結論

本文最終目標以新型捕捉影像之方法(閃頻之技術)，來捕捉旋轉之冷卻通道內熱傳分佈情形，並藉由肋條以及彎道區的置入，達到提升熱傳之目的，溫度場熱傳量測以平面式暫態液晶量測法為主，對於溫度場高熱傳區域的分佈，能有效觀察並加以分析。本實驗對於冷卻雙通道做了以下幾點結論：

1. 液晶校正曲線，對於閃頻之頻率、占空比、光源微角度偏差以及光源白平衡使用，並不會大幅影響校正曲線本身趨勢，誤差值可控制在 10%內。
2. 對於第一通道區以及第二通道區之熱傳分佈現象，肋條對於紐賽數值的提升效果顯著，相較之下，在流體轉向區中，肋條對於此彎道的影響，整體熱傳增加的量比較微弱。
3. 整體紐賽數(Nu/Nu_0)的比值，隨著雷諾數增加有下降的趨勢，反之，紐賽數(Nu)隨著雷諾數上升而增加。
4. 旋轉效應對於第一通道的翼後緣(Trailing)之熱傳有提升效果，在流體轉向區中，翼後緣以及翼前緣的熱傳值都有些微增加，而在第二通道區中，對於翼前緣(Leading)之熱傳表現較佳。
5. 閃頻拍攝能有效捕捉旋轉冷卻通道之熱傳現象，並有助於分析冷卻通道之溫度場分佈。

5-2 建議

複合式冷卻技術對於提升溫度場之熱傳分佈有很大的幫助，因此本文除了使用肋條(Rib)之元件，建議再使用不同元件作組合，如：導氣葉片(NGV)以及溝槽(Groove)等。流場幾何的改變，也會產生壓力損失，冷卻通道內若壓力損失過大，將影響冷卻通道內熱傳分布情形，因此測量冷卻通道的壓力差值，也是影響熱傳分佈重要參數之一，利用壓力差值以及紐賽數值可計算出熱傳效益(Thermal performance)。



參考文獻

1. D.E. Metzger, and M.K. Sahn, 1986, "Heat Transfer Around Sharp 180 Deg Turns in Smooth Rectangular Channels" ASME J. Heat Transfer, 108, pp.500-506
2. D.E. Metzger, and C.S. Fan, 1987, "Effect of Channel Aspect Ratio on Heat Transfer in Rectangular Passage Sharp 180 Deg Turn" ASME paper No. GT1987-113
3. J.C. Han, P.R.Chandra, and S.C. Lau, 1992, "Local Heat Transfer Distributions Around Sharp 180 deg Turns in Two-pass Smooth and Rib-Roughened Channels " International Journal of Heat and Mass Transfer, 110, pp.91-98
4. M. Hirota, H. Fujita, A. Syuhada, S. Araki, T. Yoshida, and T. Tanaka, 1999, "Heat/mass transfer characteristics in two-pass smooth channels with a sharp 180-deg turn" International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, pp.3757-3770
5. D. Pape, H. Jeanmart, J. Wolfersdorf, and B. Weigand, 2004, "Influence of the 180° Bend Geometry on the Pressure Loss and Heat Transfer In A High Aspect Ratio Rectangular Smooth Channel" ASME paper No. GT2004-53753
6. S.W. Lee, H.S. Ahn, and S.C. Lau, 2007, "Heat Transfer Distribution in a Two-Pass Trapezoidal Channel With a 180 Deg Turn" International Journal of Heat and Mass Transfer, 129, pp.1529
7. T. Salameh and B. Sunden, 2010, "An Experimental Study of Heat Transfer and Pressure Drop on the Bend Surface of a U-duct" ASME paper No. GT2010-22139
8. J.C. Han, J.S.Park, and C.K. Lei, 1985, "Heat Transfer Enhancement in Channel With Turbulence Promoters" Journal of engineering for gas turbines and power, 107, pp.628-635

9. J.S. Park, J.C.Han, Y.Hang, and S. Ou, 1992, "Heat Transfer Performance Comparisons of Five Different Rectangular Channels With Parallel Angled Ribs" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35, pp.2891-2903
10. G.Rau, M.Cakan, D.Moeller, and T.Arts, 1998, "The Effect of Periodic Ribs on the Local Aerodynamic and Heat Transfer Performance of a Straight Cooling Channel" *ASME J. Turbomachinery* ,120, pp.348-375
11. M.E. Taslim, and C.M. Wadsworth, 1997, "An Experimental Investigation of the Rib Surface-Averaged Heat Transfer Coefficient in a Rib-Roughened Square Passage" *ASME J. Turbomachinery*,119, pp.381-389
12. J. C. Han, L. R. Glicksman, and W. M. Rohsenow, 1978, "An Investigation of Heat Transfer and Friction For Rib-Roughened Surfaces" *ASME J. Turbomachinery*, 21, pp.1143-1156
13. J.C. Han, Y.M.Zhang , and C.P. Lee, 1991, "Augmented Heat Transfer in Square Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs" *ASME J. Turbomachinery* ,113, pp.590-596
14. J.C. Han, 1991, "Heat Transfer and Friction Characteristics in Rectangular Channels With Ribs Turbulators" *ASME J. Turbomachinery*, 110, pp.321-328
15. J.C.Han, and C.M. P.Zhang, 1991, "Effect of Ribs-Angled Orientation on Local Mass Transfer Distribution in a Three-Pass Rib-Roughened Channel" *ASME J. Turbomachinery*, 113, pp.123-130
16. T.M.Liou, M. Y. Chen, and M. H. Tsai, 2002, "Fluid Flow and Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Duct With In-Line 90-deg Ribs" *ASME J. Turbomachinery* , 124, pp.260-266
17. J.H. Wagner, B.V. Johnson , and F.C. Kopper, 1991, "Heat Transfer in Rotating Serpentine Passage With Smooth Walls" *ASME J. Turbomachinery*, 113, pp.321-330

18. J.H. Wagner, B.V. Johnson ,and T.J. Hajek, 1991, “Heat Transfer in Rotating Passage With Smooth Walls and Radial Outward Flow” ASME J. Turbomachinery, 113, pp.42-51
19. J.C. Han, Y.M. Zhang ,and K. Kalkuehler, 1993, “Uneven Wall Temperature Effect on Local Heat Transfer in a Rotating Two-pass Channel with Smooth Walls ” International Journal of Heat and Mass Transfer,115, pp.912-920
20. K.M. Kim, Y.Y. Kim, Dong Hyun Lee, Dong Ho Rhee, and Hyung Hee Cho, 2006, “Local Heat/Mass Transfer Phenomena in Rotating Passage, Part 1: Smooth Passage” Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 20, No2
21. Y.H. Liu, M. Huh, and J. Han, 2008, “Heat Transfer in a Two-Pass Rectangular Channel (AR=1:4) Under High Rotation Numbers” International Journal of Heat and Mass Transfer, 130, pp.1701-1709
22. T.M. Liou, and C.C. Chen, 1997, “Heat Transfer in a Rotating Two Pass Smooth Passage With a 180 Deg Rectangular Turn” International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, pp.231-247
23. C.W. Park, and S.C. Lau, 1998, “Effect of Channel Orientation of Local Heat Transfer Distributions In a Rotating Two-Pass Square Channel With Smooth Wall” International Journal of Heat and Mass Transfer, 120, pp.624-632
- 24.F. Zhou, J. Lagrone, and S. Acharya, 2004, “Internal Cooling In 4:1 AR Passages At High Rotation Numbers” ASME paper No.GT2004-53501
25. W.L. Fu, L.M. Wright, and J.C. Han, 2004, “Heat Transfer in Two-Pass Rotating Rectangular Channels(AR=1:2 and AR=1:4) with 45° Angled Rib Turbulators ” ASME paper No.GT2004-53261
26. F.T. Willett, and A.E. Bergles, 2001, “Heat Transfer in Rotating Narrow Rectangular Ducts With Heated Sides Oriented at 60° to the r –z Plane” ASME J. Turbomachinery, 123, pp.288

27. T. Astarita, and G. Cardone, 2003, "Convective Heat Transfer in a Square Channel With Angled Ribs on Two Opposite Walls " Experiments in Fluids, 34, pp.625-634
28. N.Zhang, J.Chiou, S. Fann ,and J. Yang, 2005, "Local Heat Transfer Distribution in a Rotating Serpentine Rib-Roughened Flow Passage " International Journal of Heat and Mass Transfer, 115, pp.561
29. L.M. Wright, W.L. Fu, and J.C. Han, 2005, "Influence of Entrance Geometry on Heat Transfer in Rotating Rectangular Cooling Channels (AR 4:1) With Angled Ribs" ASME J. Turbomachinery, 127, pp.378
30. C.Camci, K. Kim, and S.A. Hippensteele, 1992,"New hue capturing technique for the quantitative interpretation of liquid crystal images used in convective heat transfer studies" ASME J. Turbomachinery, 114, pp.765-775
31. B.J. Syson, R.G. Pilbrow, and J.M. Owen, 1996,"Effect of Rotation on Temperature Response of Thermochromic Liquid Crystal" International Journal Heat and Fluid Flow, 17, pp.491-499
- 32.S.V. Ekkad, and J.C. Han, 1997,"Detailed Heat Transfer Distributions in Two-Pass Square Channels With Rib Turbulators" ASME J. Turbomachinery, 127, pp.175
33. G. Wagner, M. Kotulla, P. Ott, B. Weigand, and J. von Wolfersdorf, 2005,"The Transient Liquid Crystal Technique: Influence of Surface Curvature and Finite Wall Thickness" International Journal of Heat and Mass Transfer, 40, pp.2525-2537
34. G.D. Lock, Y. Yan ,P.J. Newton,M. Wilson ,and J.M. Owen, 2005, "Heat Transfer Measurements Using Liquid Crystals in a Preswirl Rotating-Disk System" ASME J. Turbomachinery, 127, pp.375
35. F.V. Veen, 1997, "The Handbook of High-Speed Photography " Massachusetts,5301-8113

36. Y.H. Liu, L.M. Wright, W.L. Fu, and J.C. Han, 2007, "Rib Spacing Effect on Heat Transfer in Rotating Two-Pass Ribbed Channel (AR=1:2)" *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 21, No.3
37. R. J. Moffat, 1988, "Describing the uncertainties in experimental results," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.1, pp.3-17.
38. S. J. Kline and F. A. McClintock, 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol.75, pp.3-8.



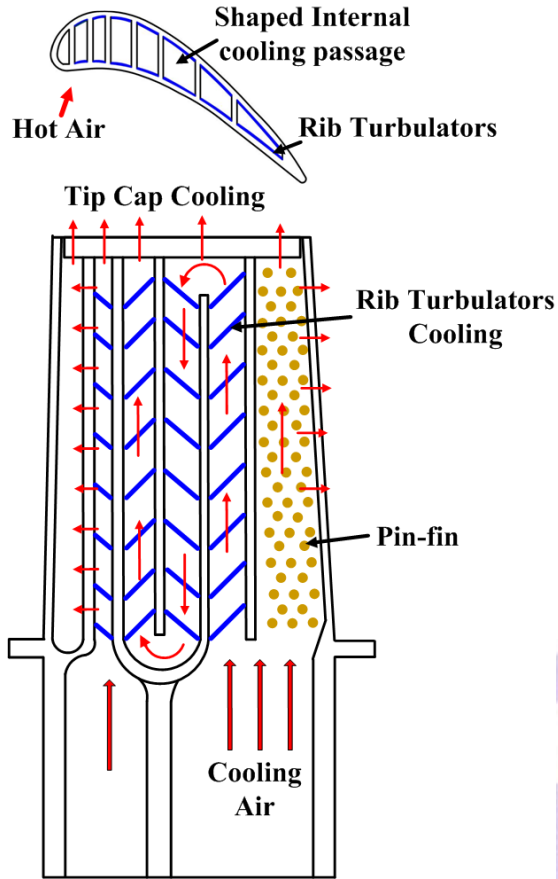


圖 1-1：渦輪葉片內部冷卻通道示意圖

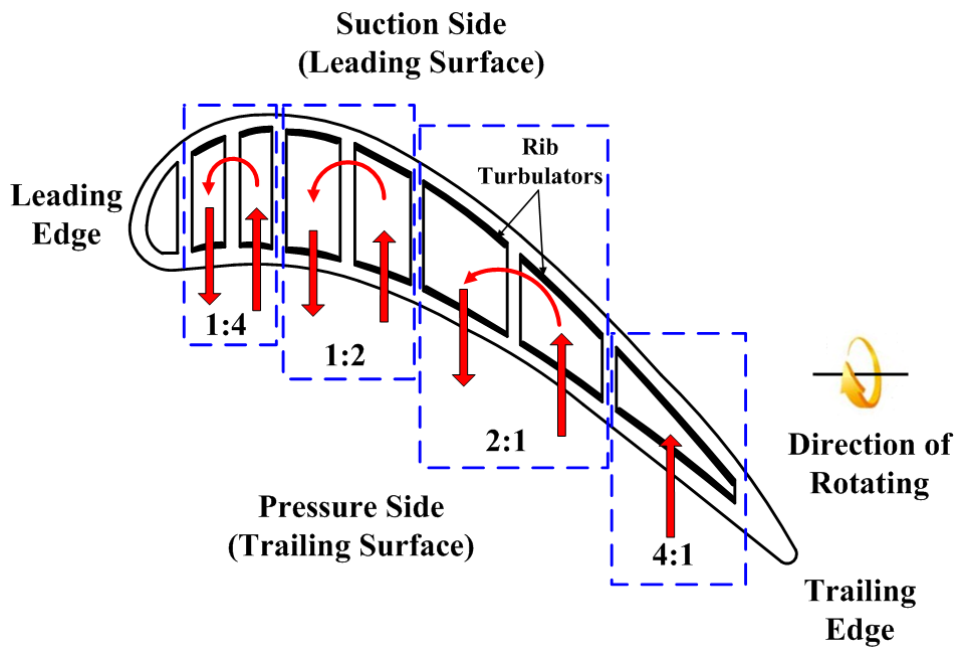


圖 1-2：渦輪葉片各部位的寬高比

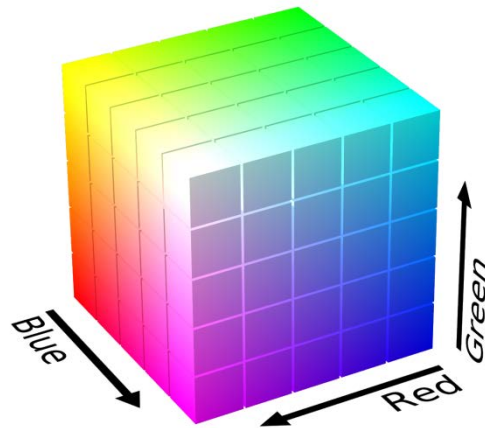


圖 2-1:RGB 色彩空間

圖片來源:(http://en.wikipedia.org/wiki/File:RGB_Cube_Show_lowgamma_cutout_a.png)

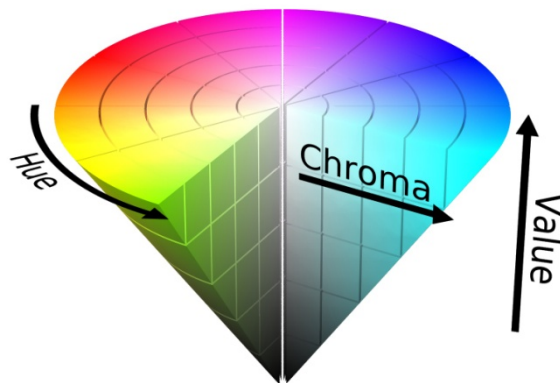


圖 2-2:HSV 色彩空間

圖片來源:(http://en.wikipedia.org/wiki/File:HSV_color_solid_cone_chroma_gray.png)

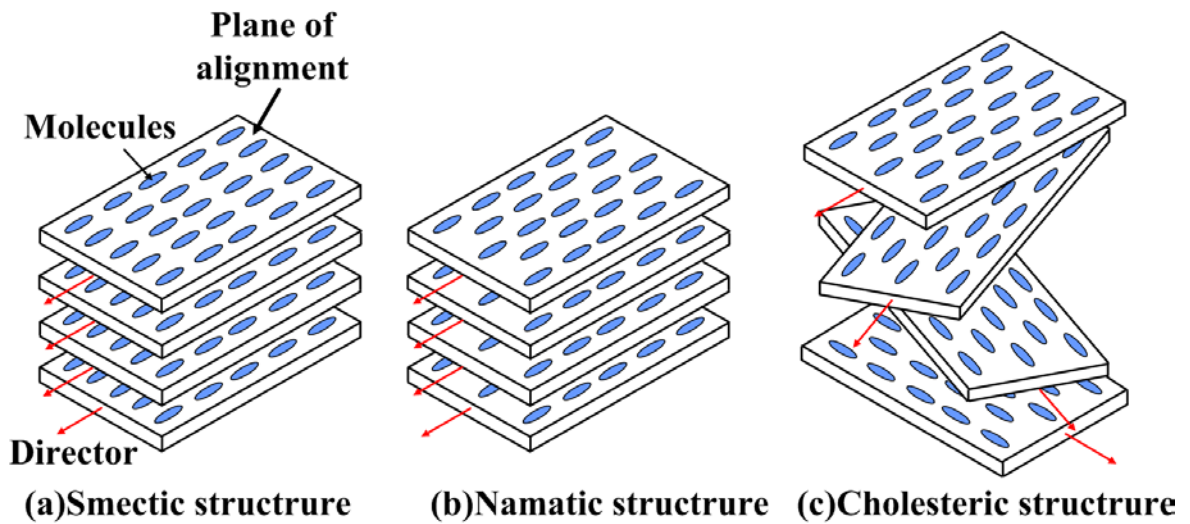


圖 2-3：三種液晶種類之結構排列方式

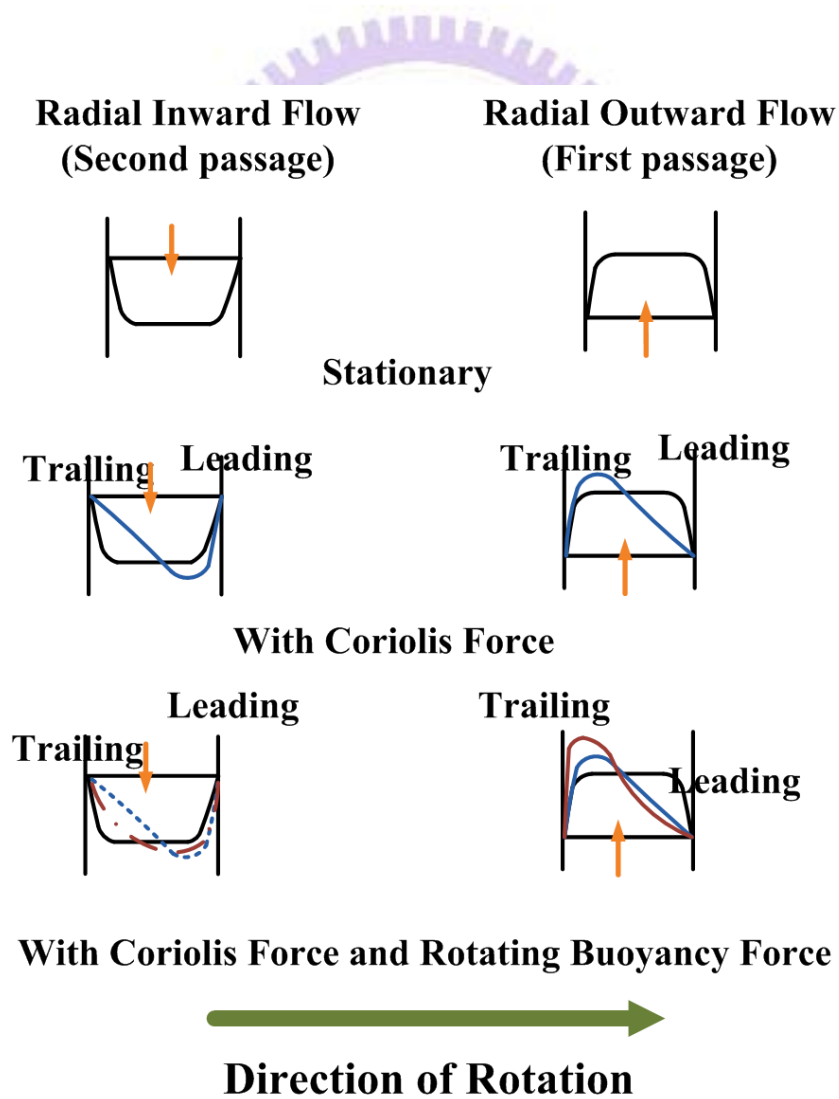


圖 2-4：內冷卻通道之旋轉效應

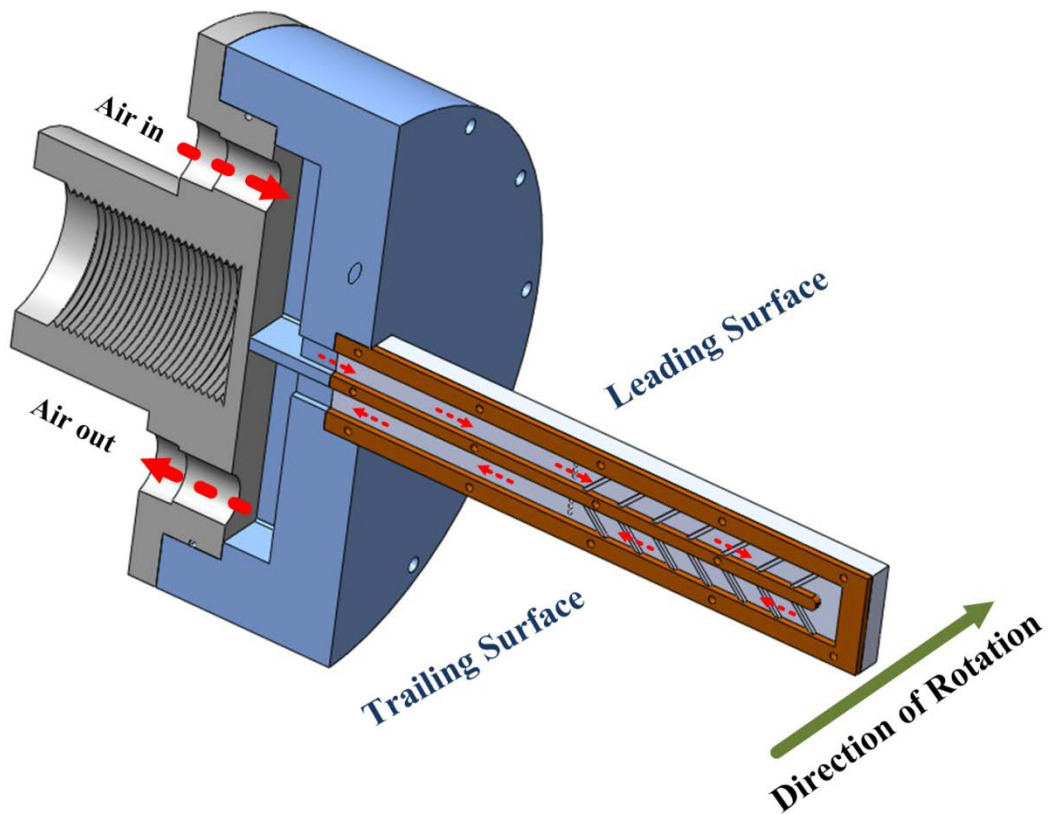


圖 2-5：冷卻通道旋轉示意圖

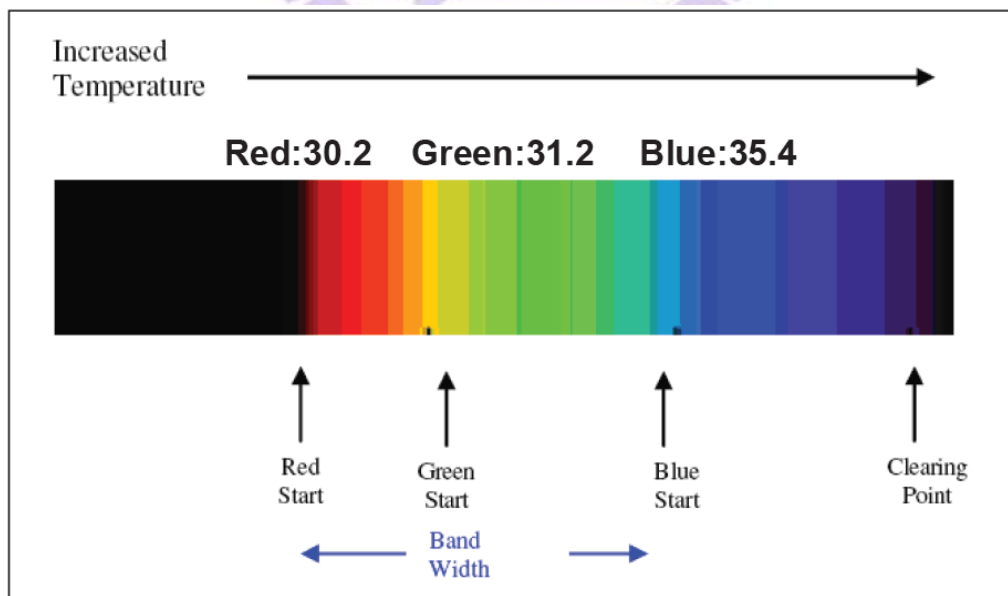


圖 3-1：感溫液晶顏色變化圖

圖片來源:(LCR Hallcrest)

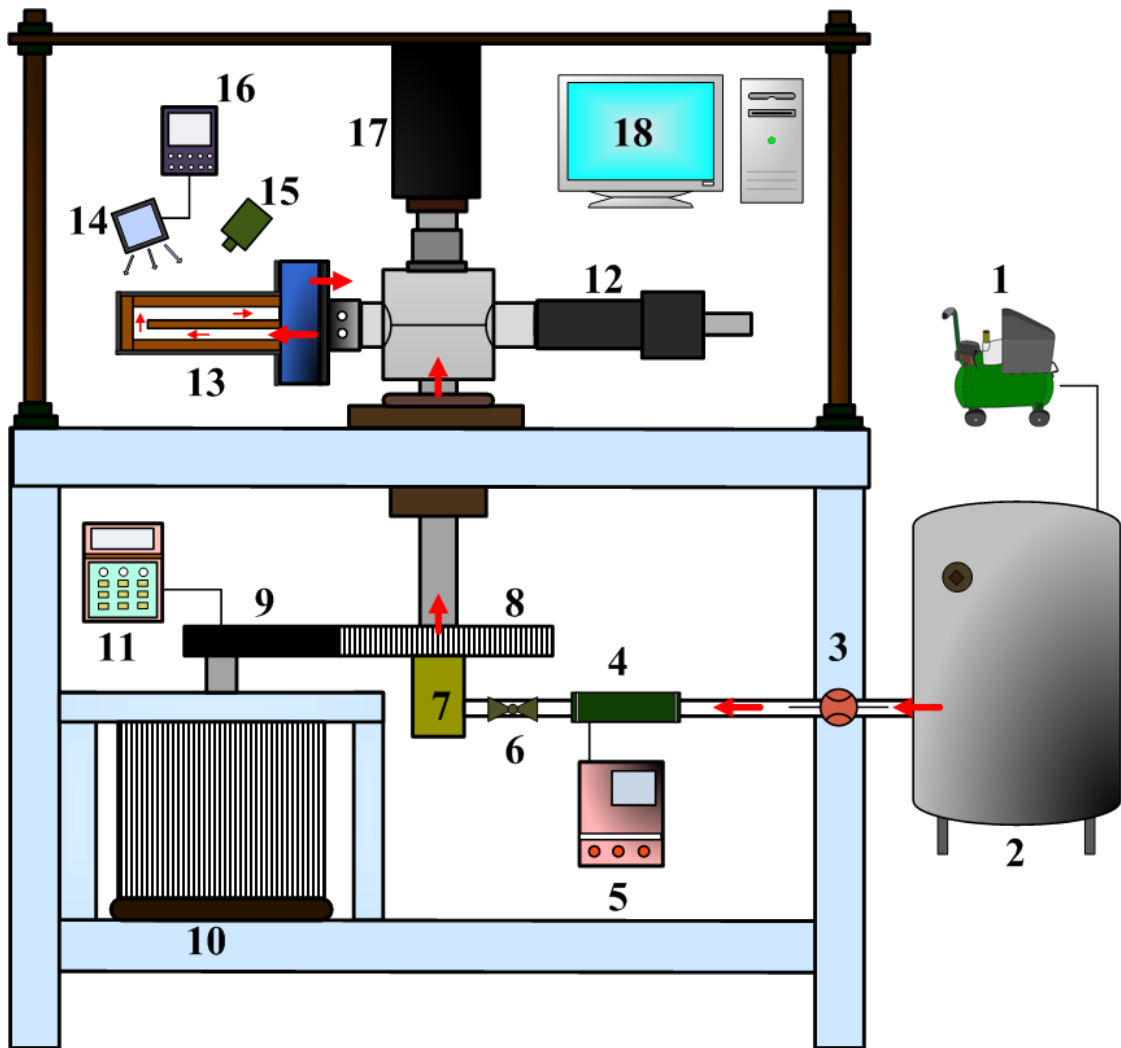


圖 3-2：旋轉機構及其它設備

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| 1. Compressor | 11. Frequency Controller |
| 2. Air Tank | 12. Balance Weight |
| 3. Flow Meter | 13. Test Section |
| 4. Pipe Heater | 14. Light Source |
| 5. Temperature Controller | 15. CCD Camera |
| 6. Needle Valve | 16. Function Generator |
| 7. Rotary Union | 17. Slip-Ring |
| 8. Rotating Shaft | 18. Computer |
| 9. Belt | |
| 10. Motor | |

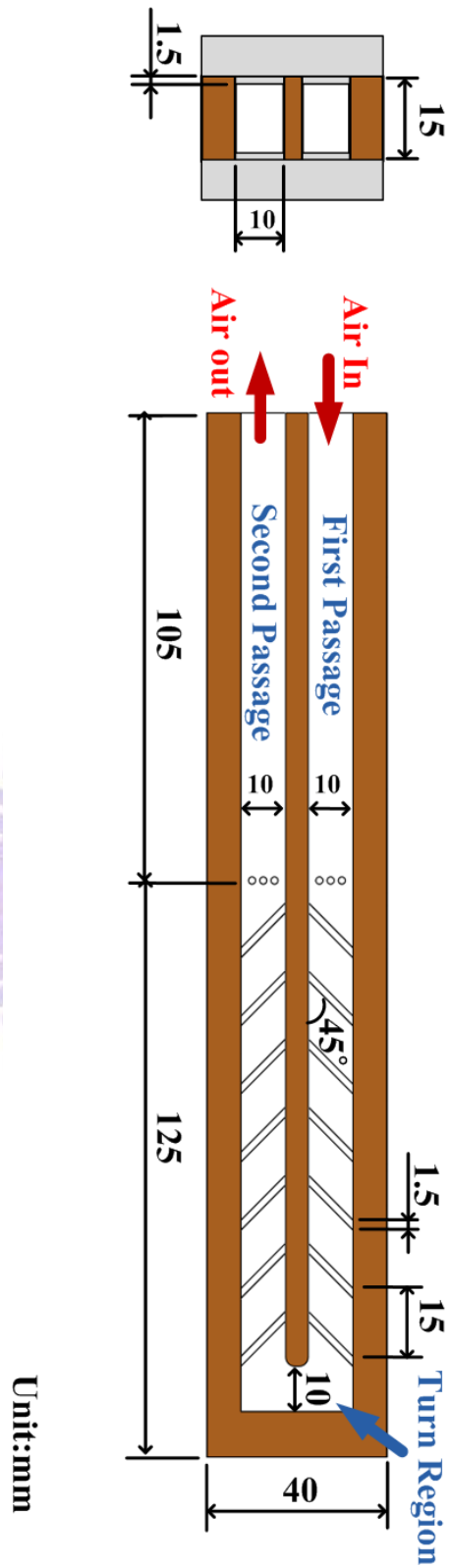


圖 3-3：實驗測試通道模型之尺寸大小

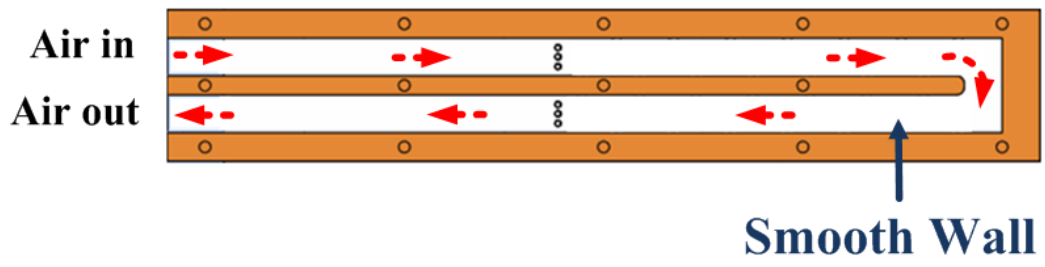


圖 3-4：實驗測試通道模型(平滑冷卻通道)

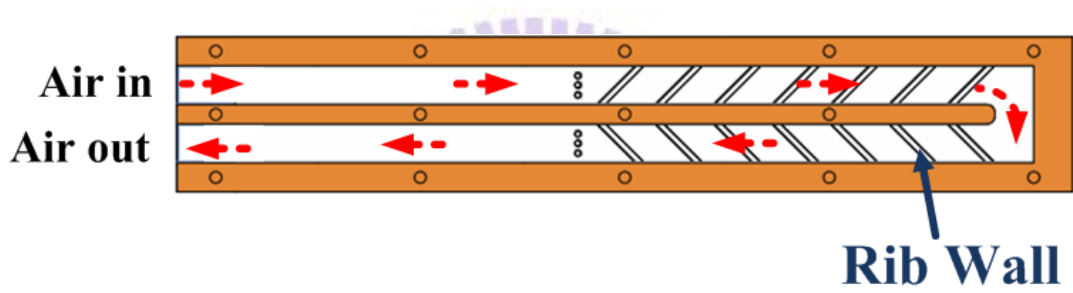


圖 3-5：實驗測試通道模型(置入肋條冷卻通道)

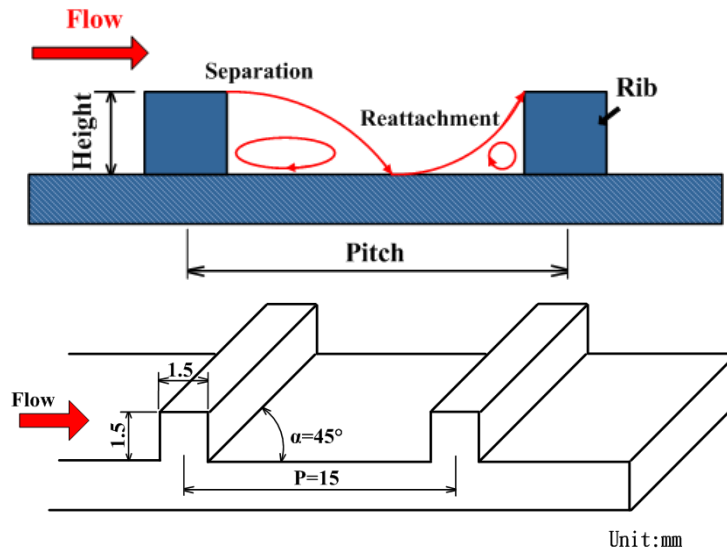


圖 3-6：肋條(Rib)幾何示意圖

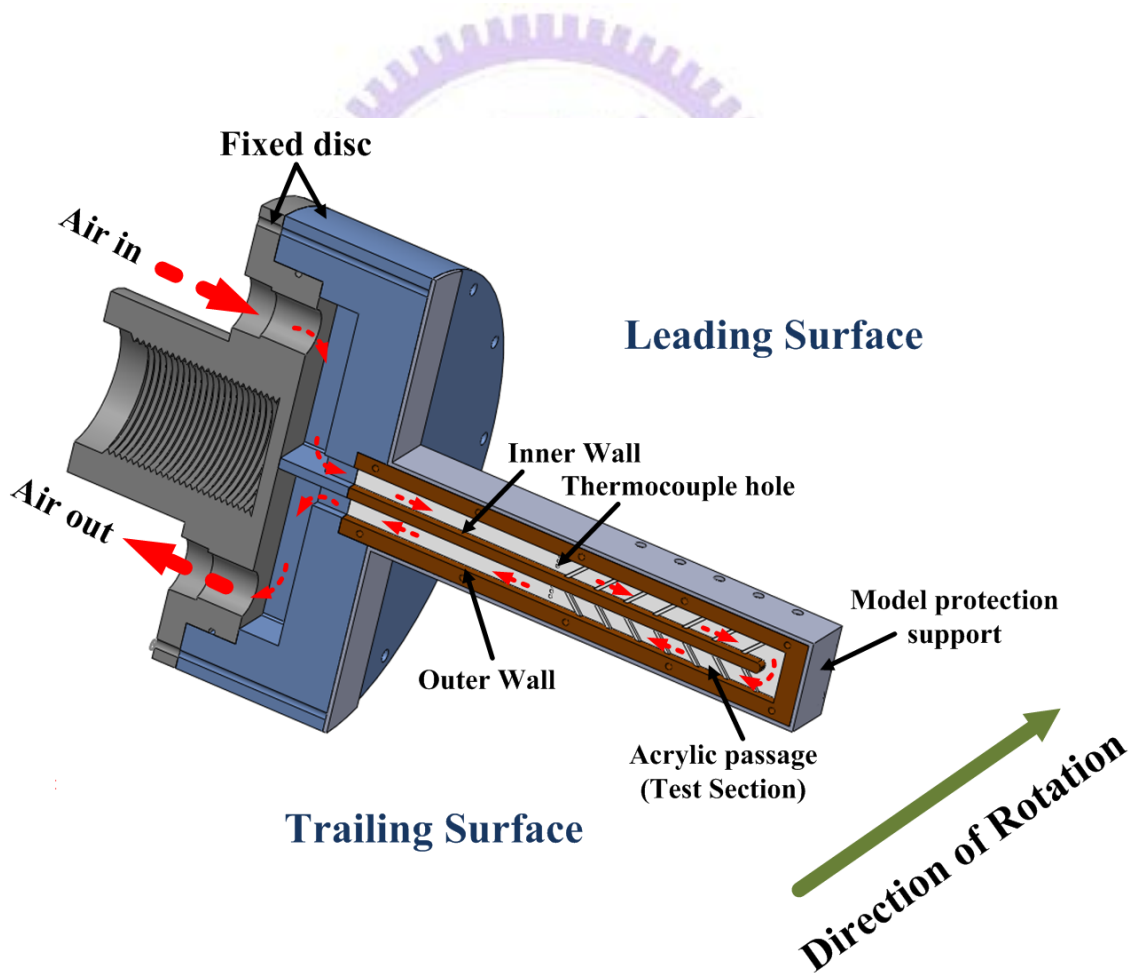


圖 3-7：實驗模型整體架構圖

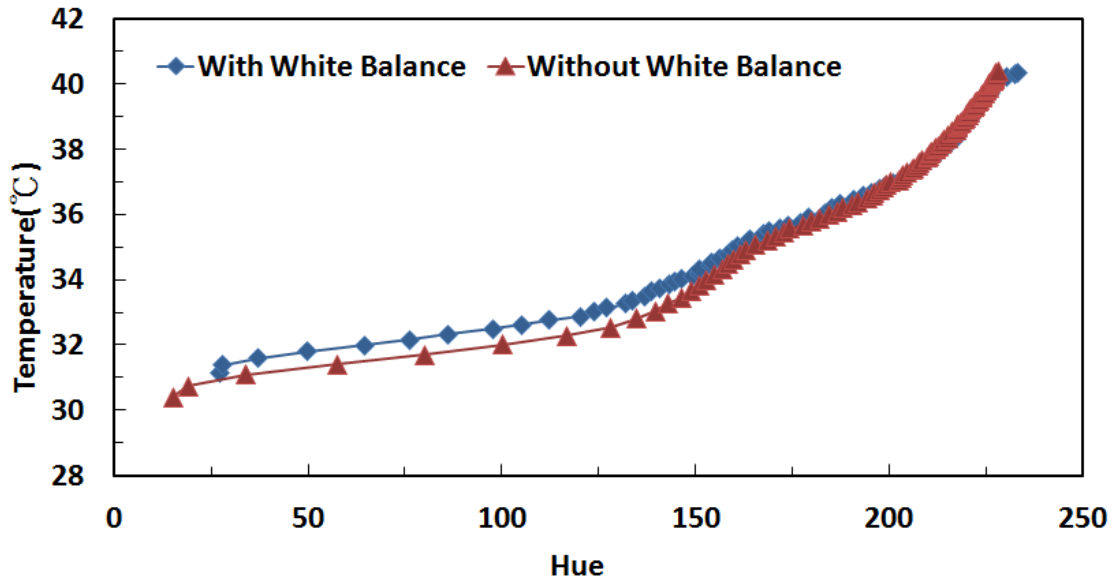


圖 4-1：液晶校正曲線(白平衡之差異)

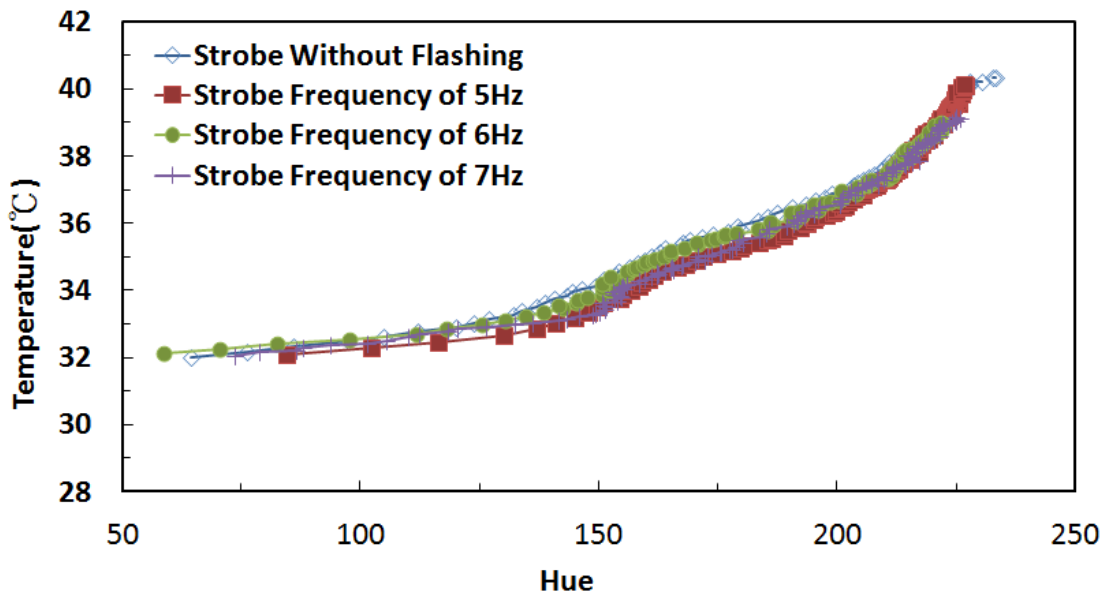


圖 4-2：液晶校正曲線(閃頻頻率之差異)

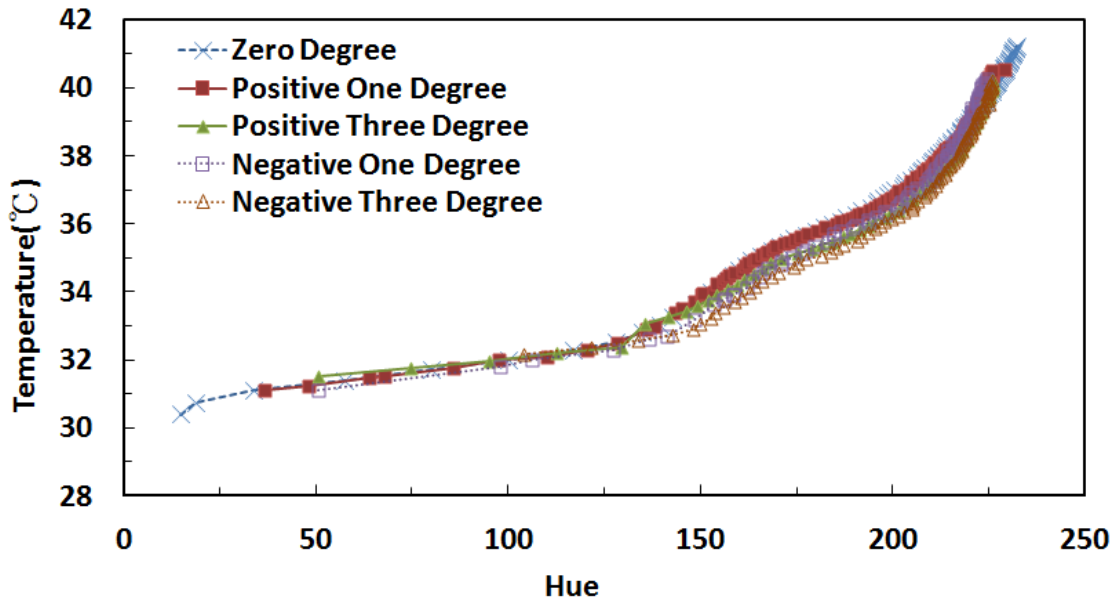


圖 4-3：液晶校正曲線(偏差角度之差異)

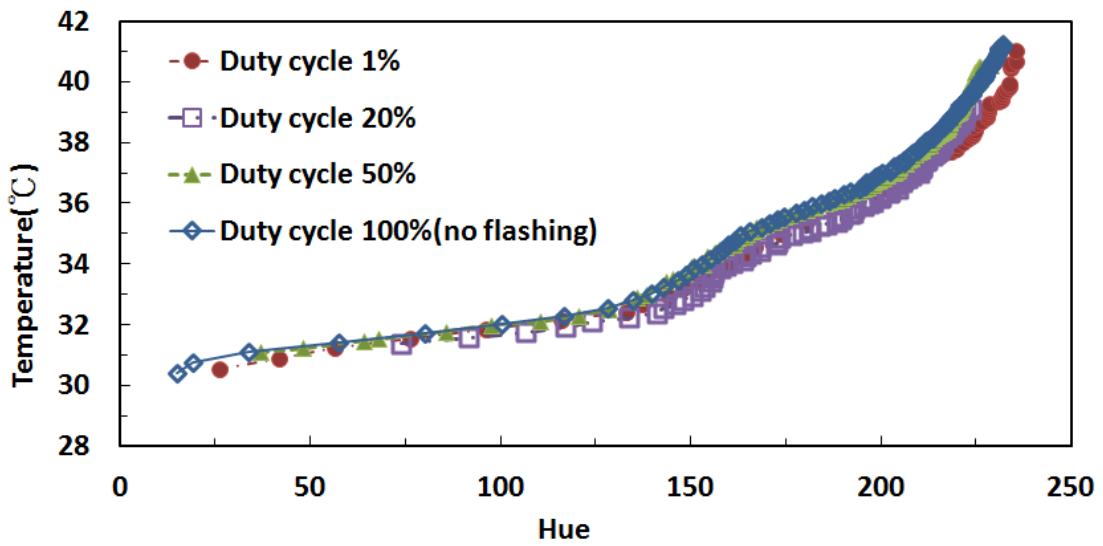


圖 4-4：液晶校正曲線(占空比之差異)

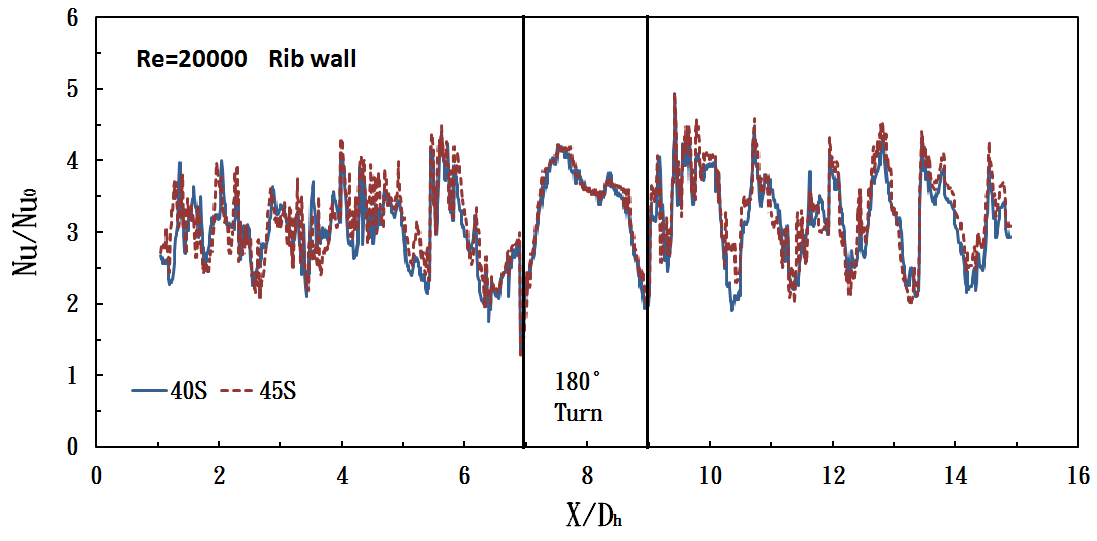


圖 4-5：橫向紐賽數平均趨勢(時間秒數選取之差異)

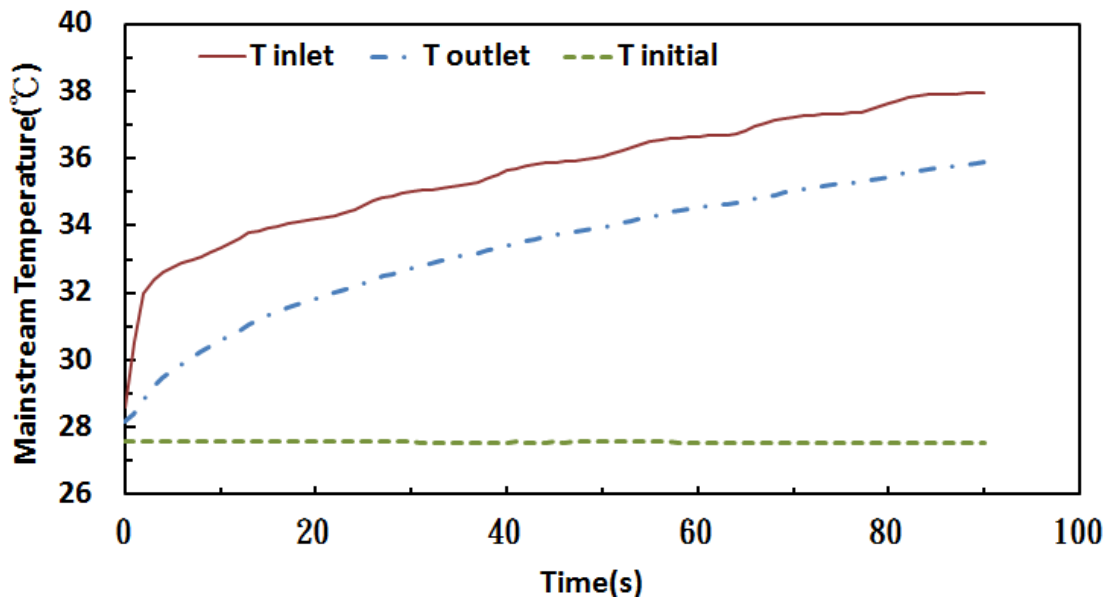


圖 4-6：主流溫度與加熱時間關係圖

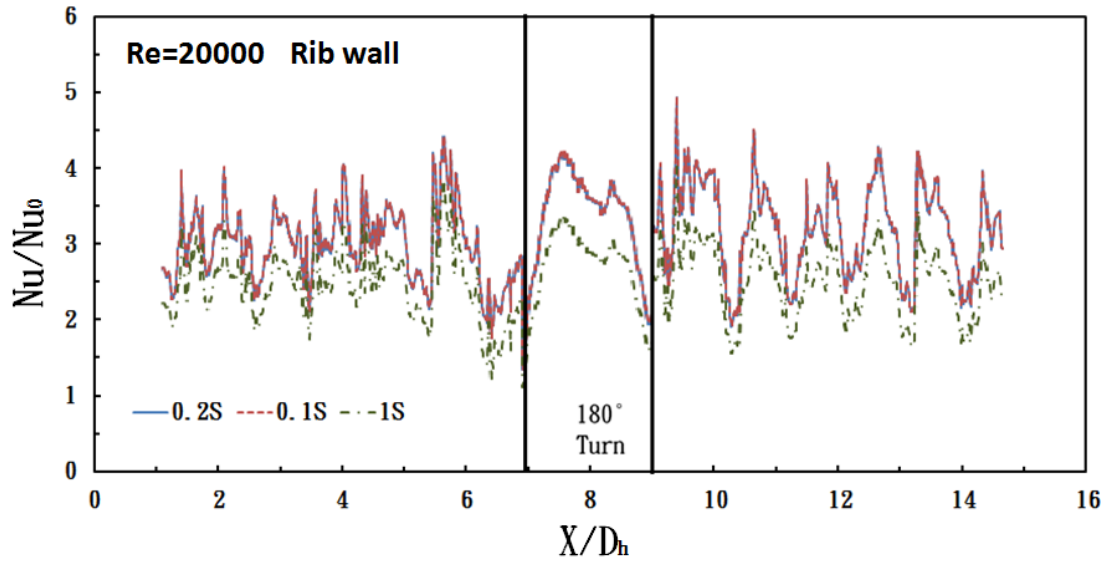


圖 4-7：時間步階與平均紐賽數關係圖

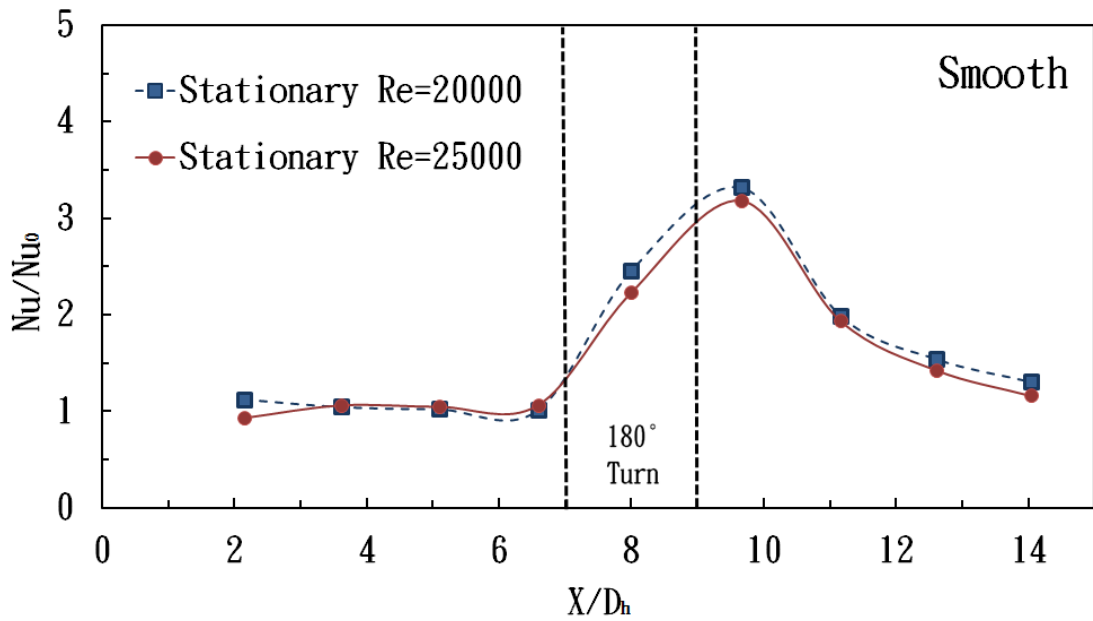
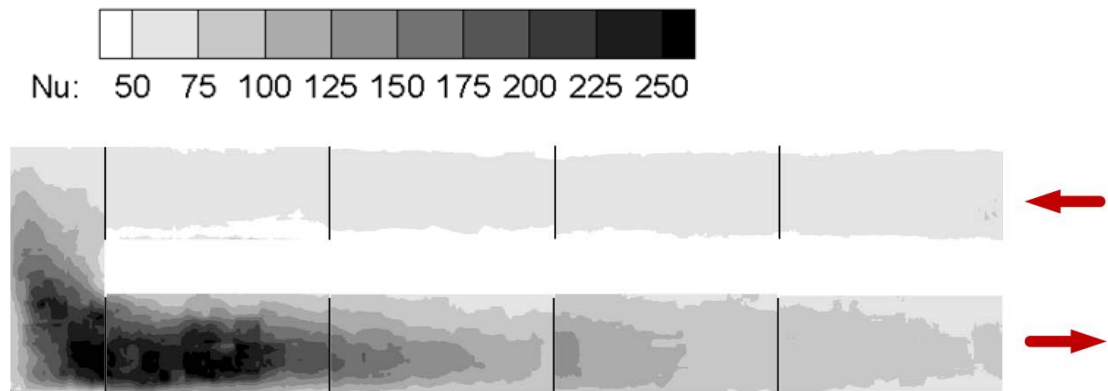
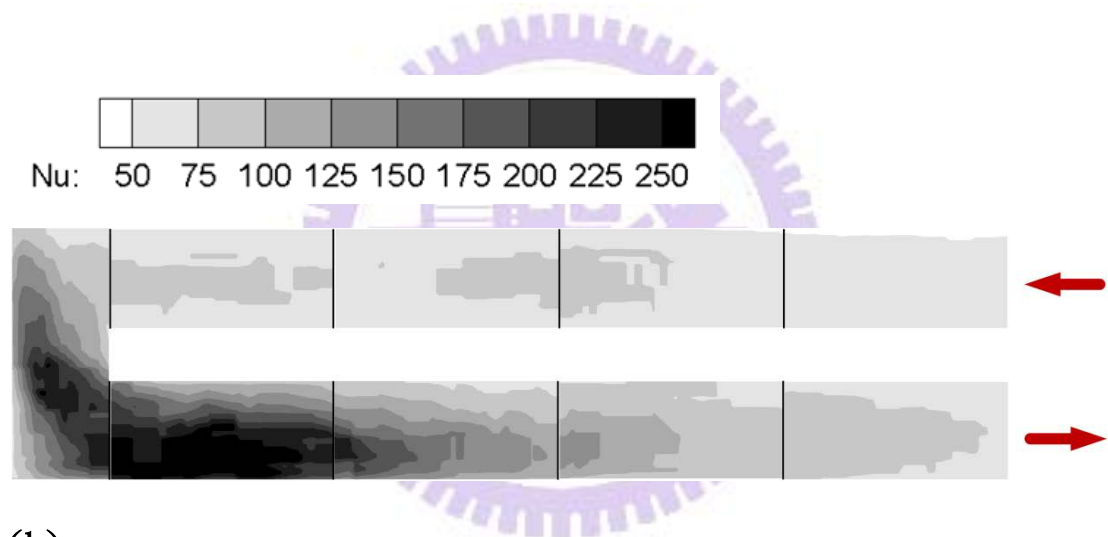


圖 4-8：平滑通道之平均紐賽數分布圖(雷諾數差異)



(a)



(b)

圖 4-9：平滑冷卻通道之紐賽數分布圖(靜止實驗)

(a) $Re=20000$ (Stationary)

(b) $Re=25000$ (Stationary)

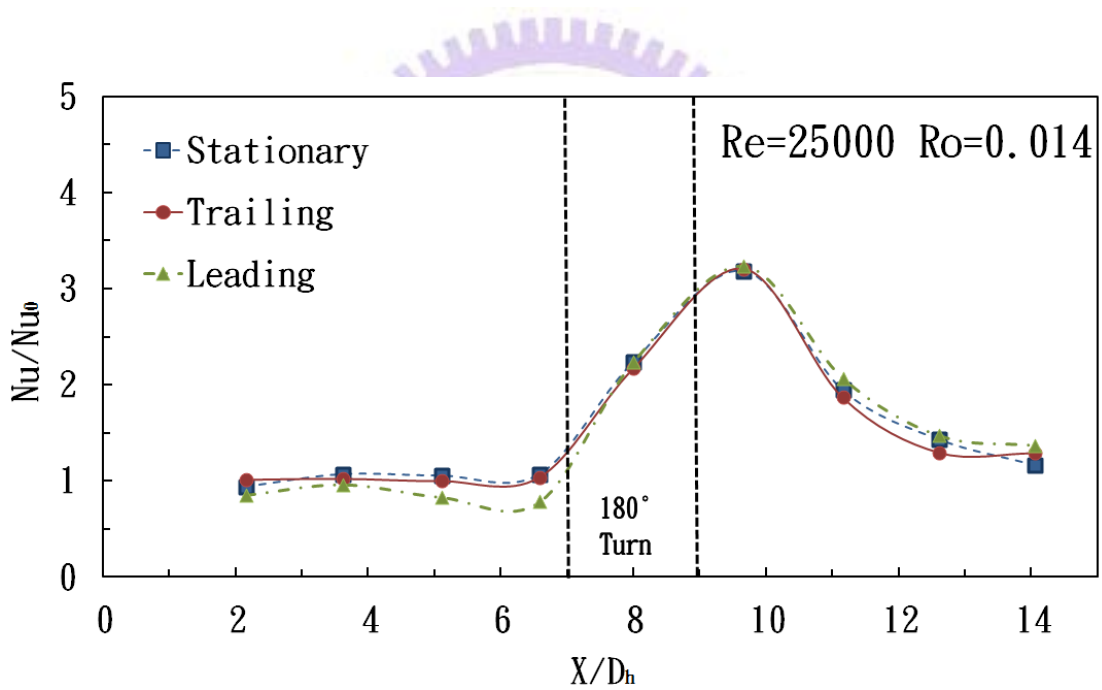
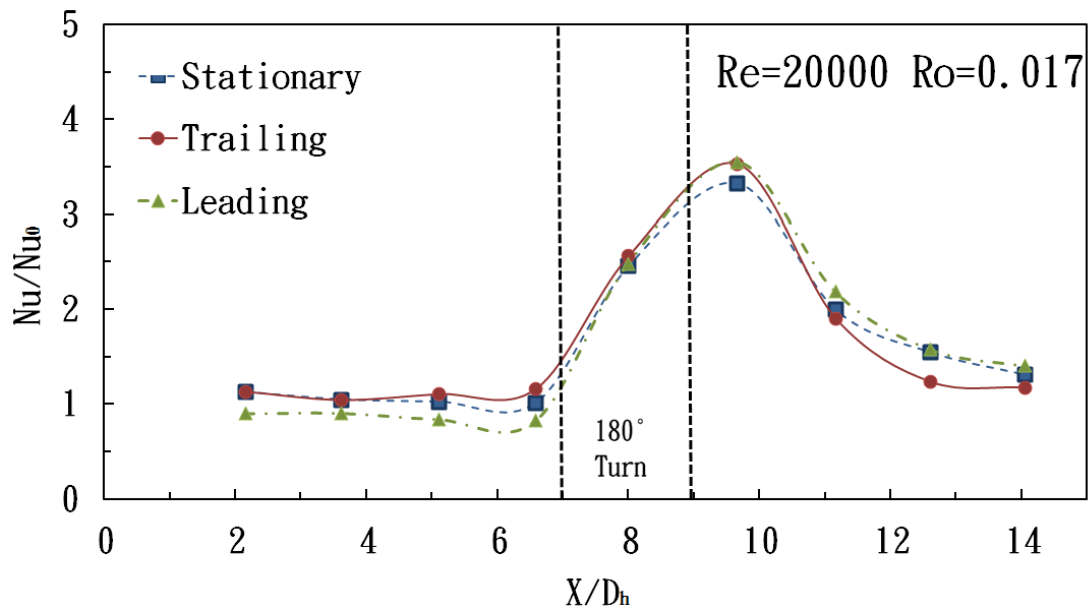


圖 4-10：平滑冷卻通道之平均紐賽數分布圖(旋轉實驗)

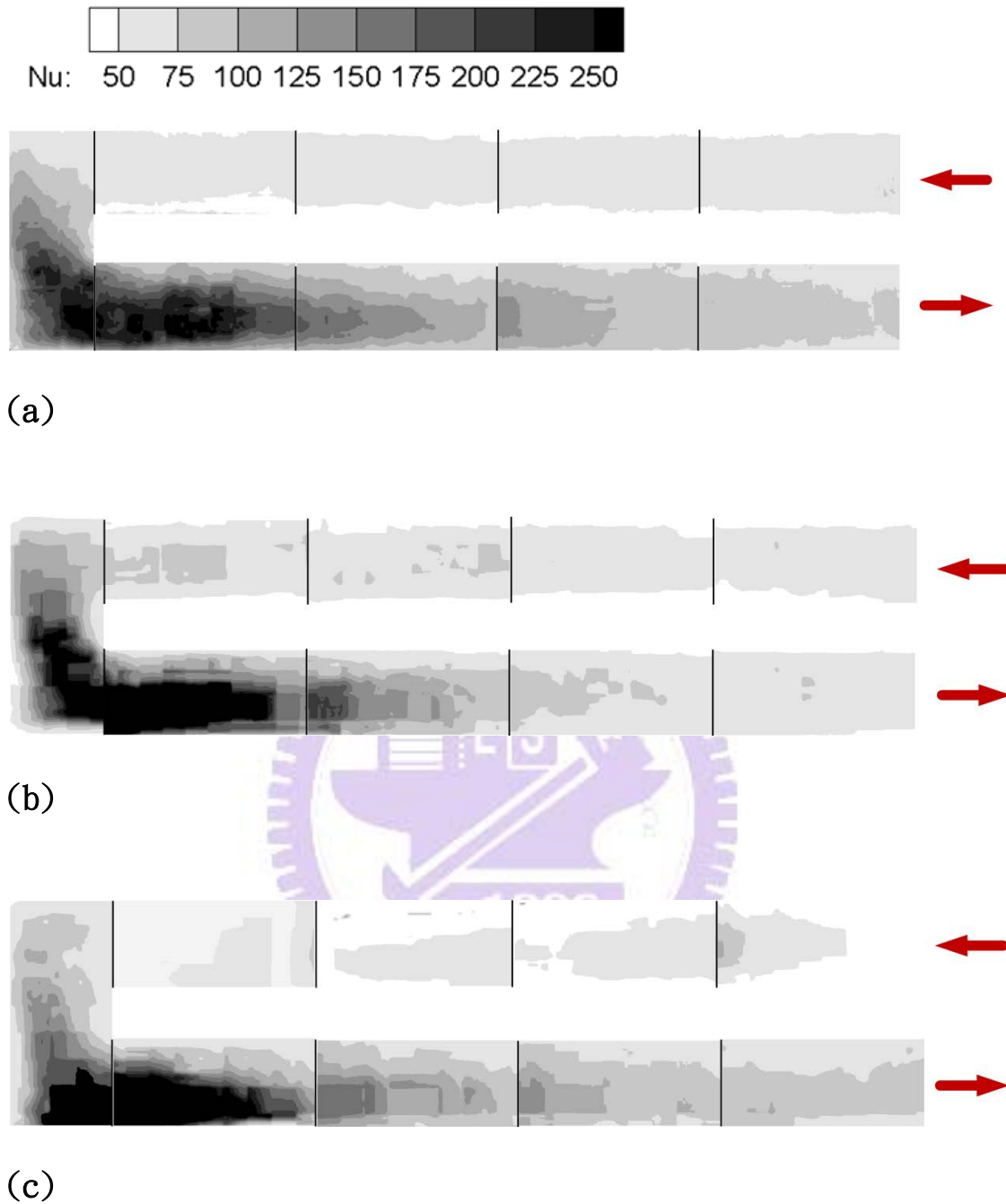


圖 4-11：平滑冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)

(a) $Re=20000$ (Stationary)

(b) $Re=20000$ (Trailing)

(c) $Re=20000$ (Leading)

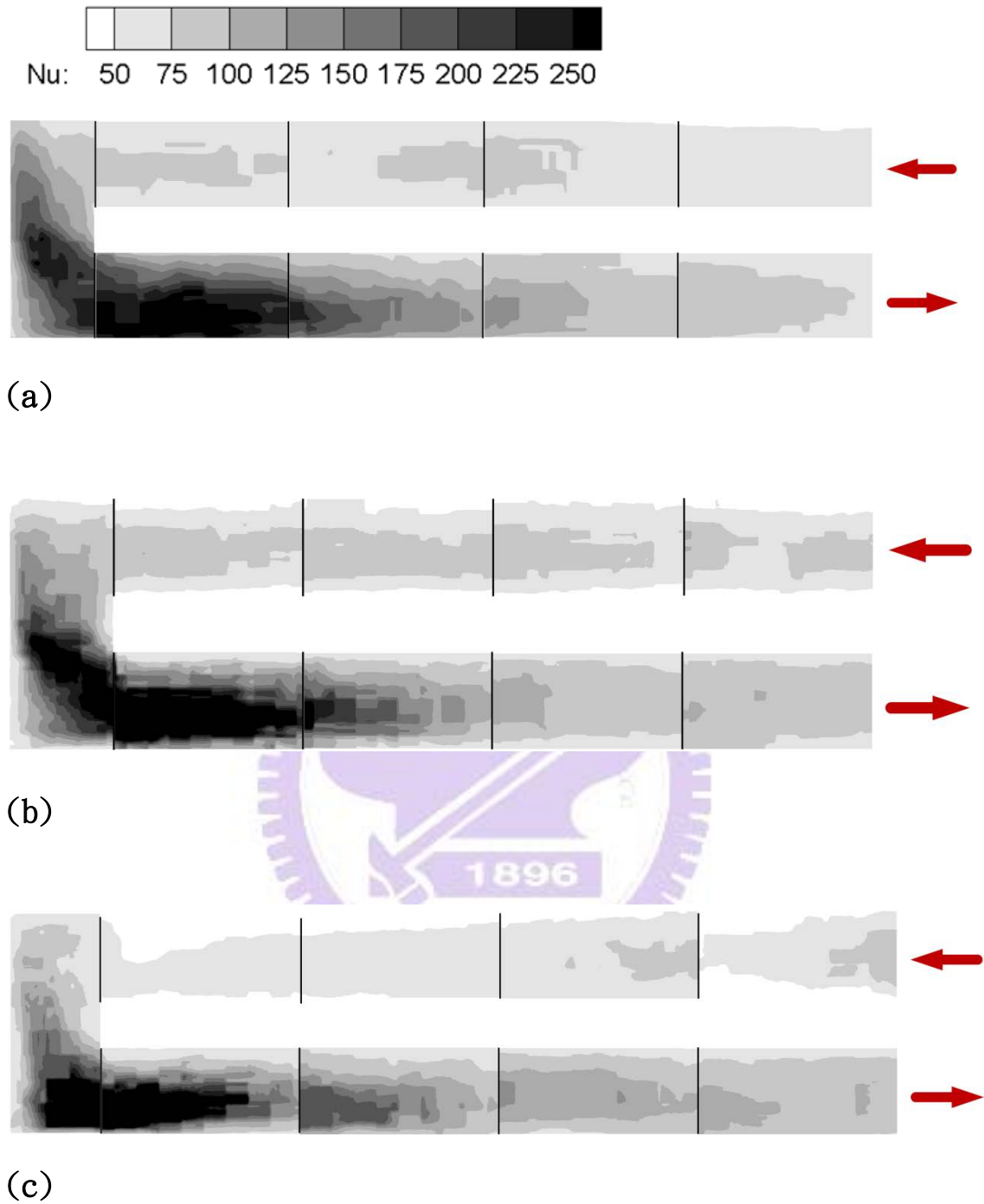


圖 4-12：平滑冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)

(a) $Re=25000$ (Stationary)

(b) $Re=25000$ (Trailing)

(c) $Re=25000$ (Leading)

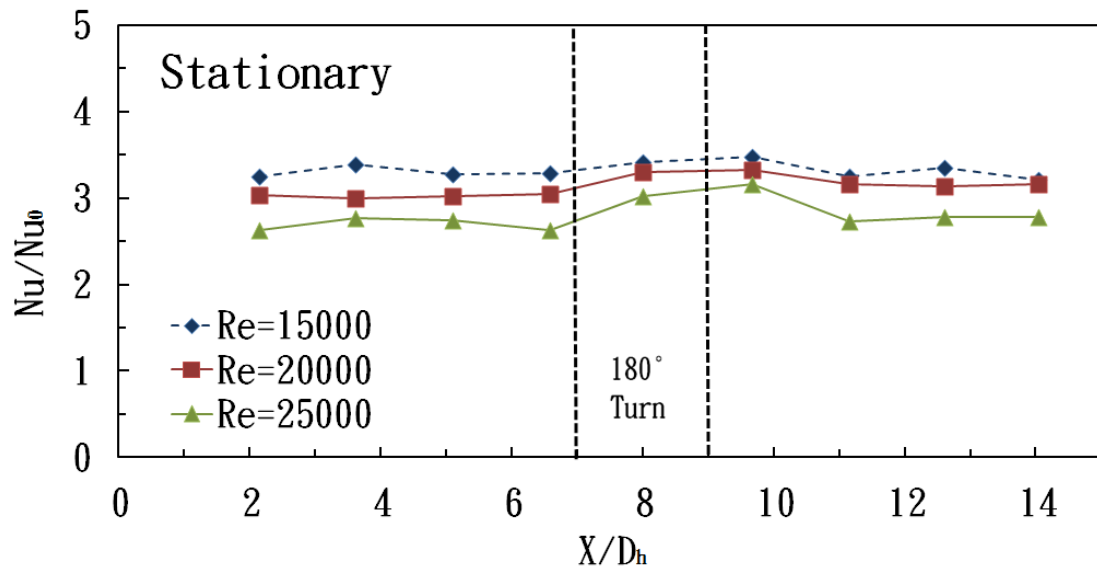


圖 4-13：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分布圖(靜止實驗)

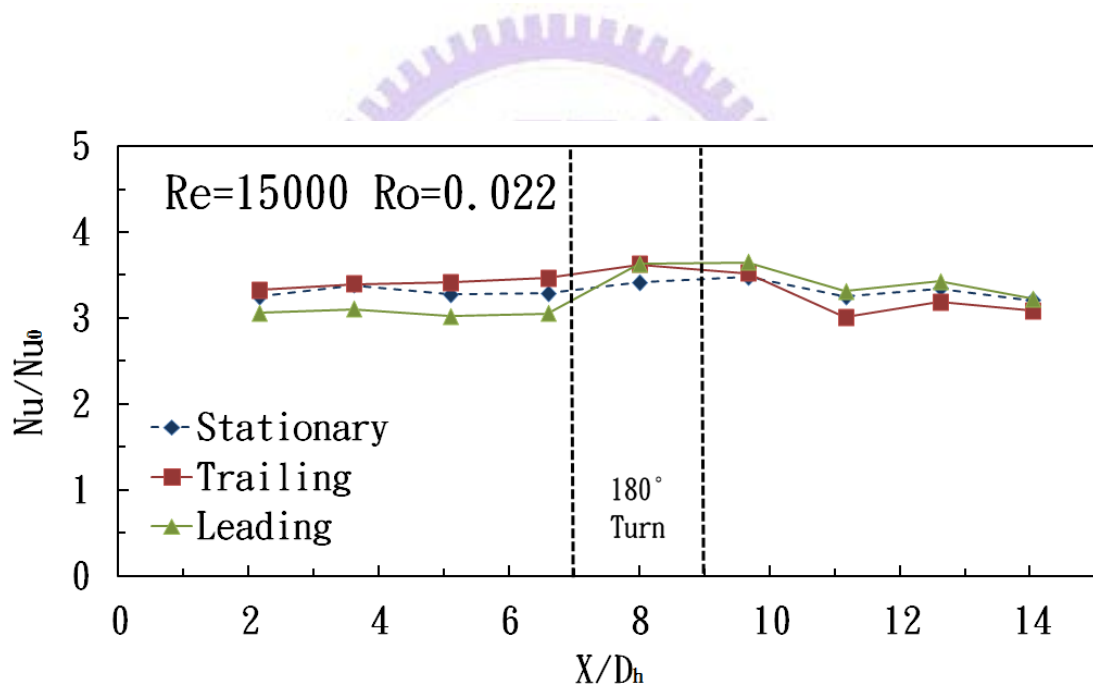


圖 4-14：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分布圖(旋轉實驗)

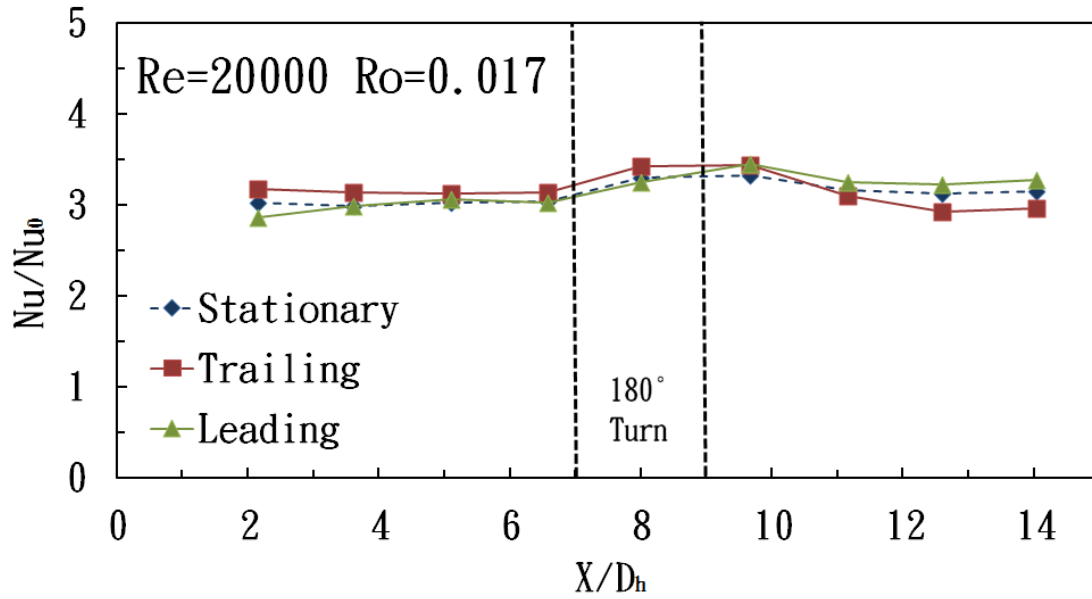


圖 4-15：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分布圖(旋轉實驗)

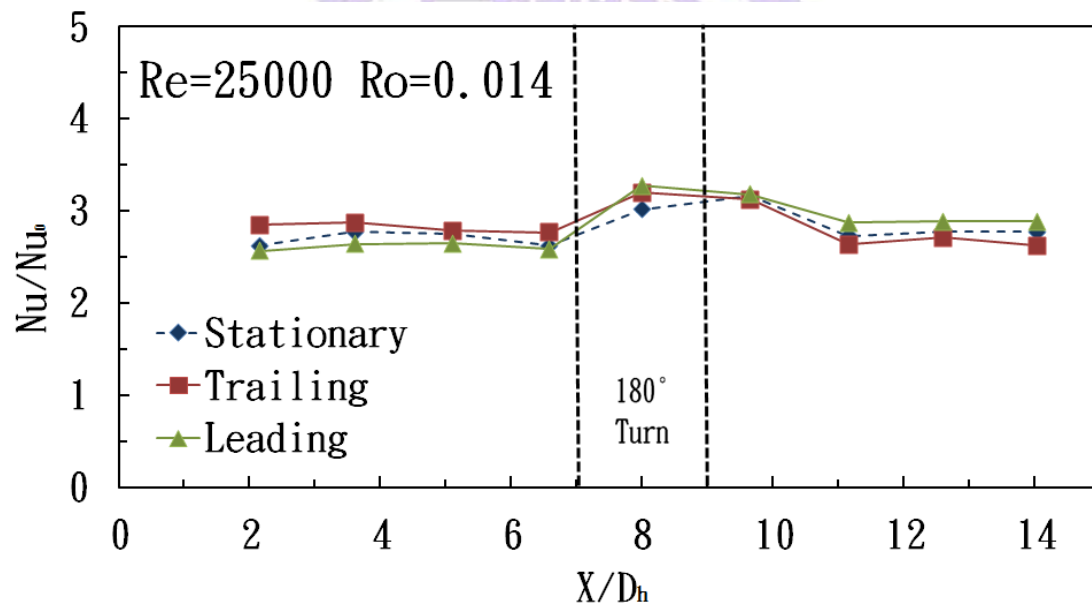


圖 4-16：置入肋條冷卻通道之平均紐賽數分布圖(旋轉實驗)

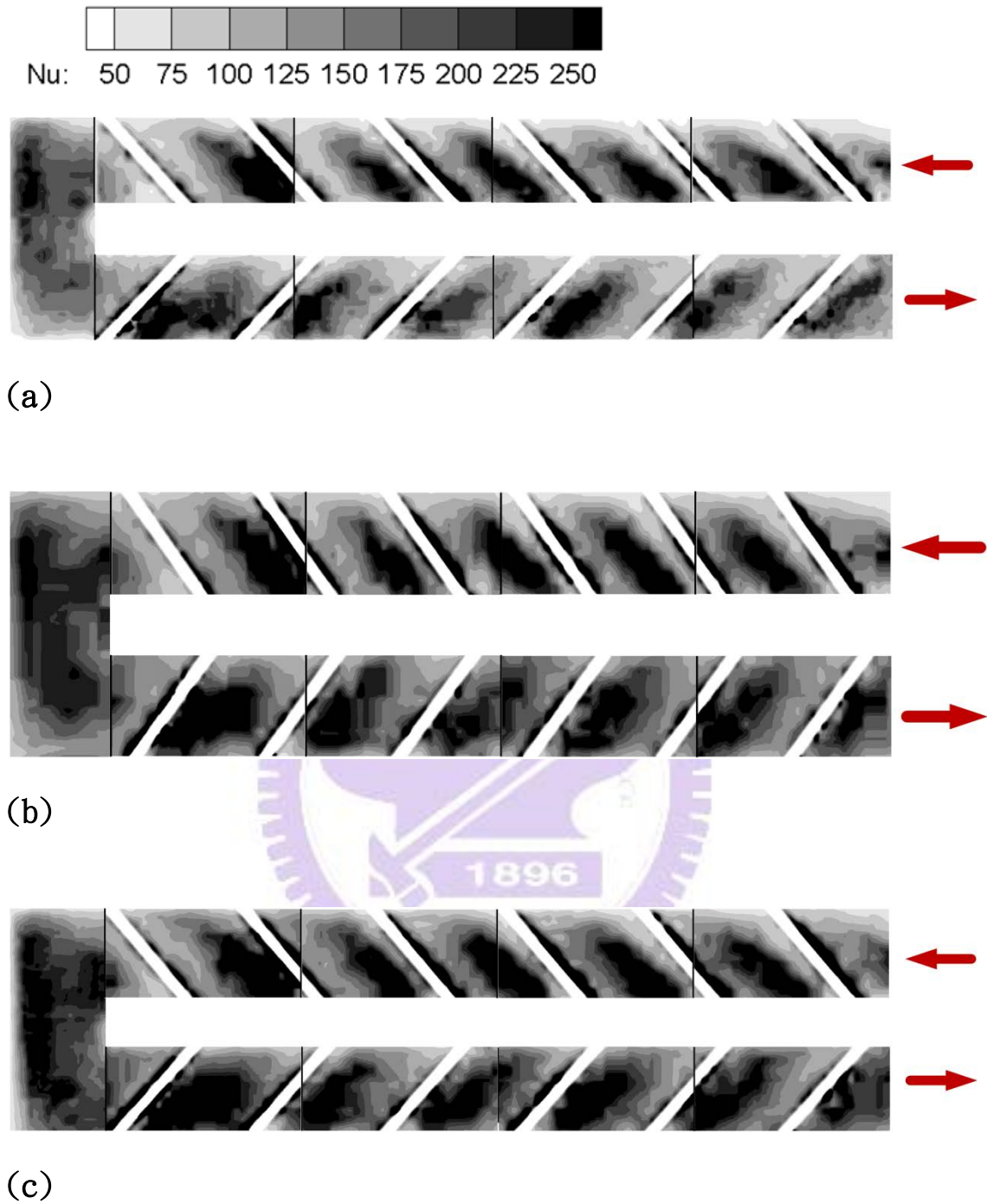


圖 4-17：肋條壁面冷卻通道之紐賽數分布圖(靜止實驗)

(a) $Re=15000$ (Stationary)

(b) $Re=20000$ (Stationary)

(c) $Re=25000$ (Stationary)

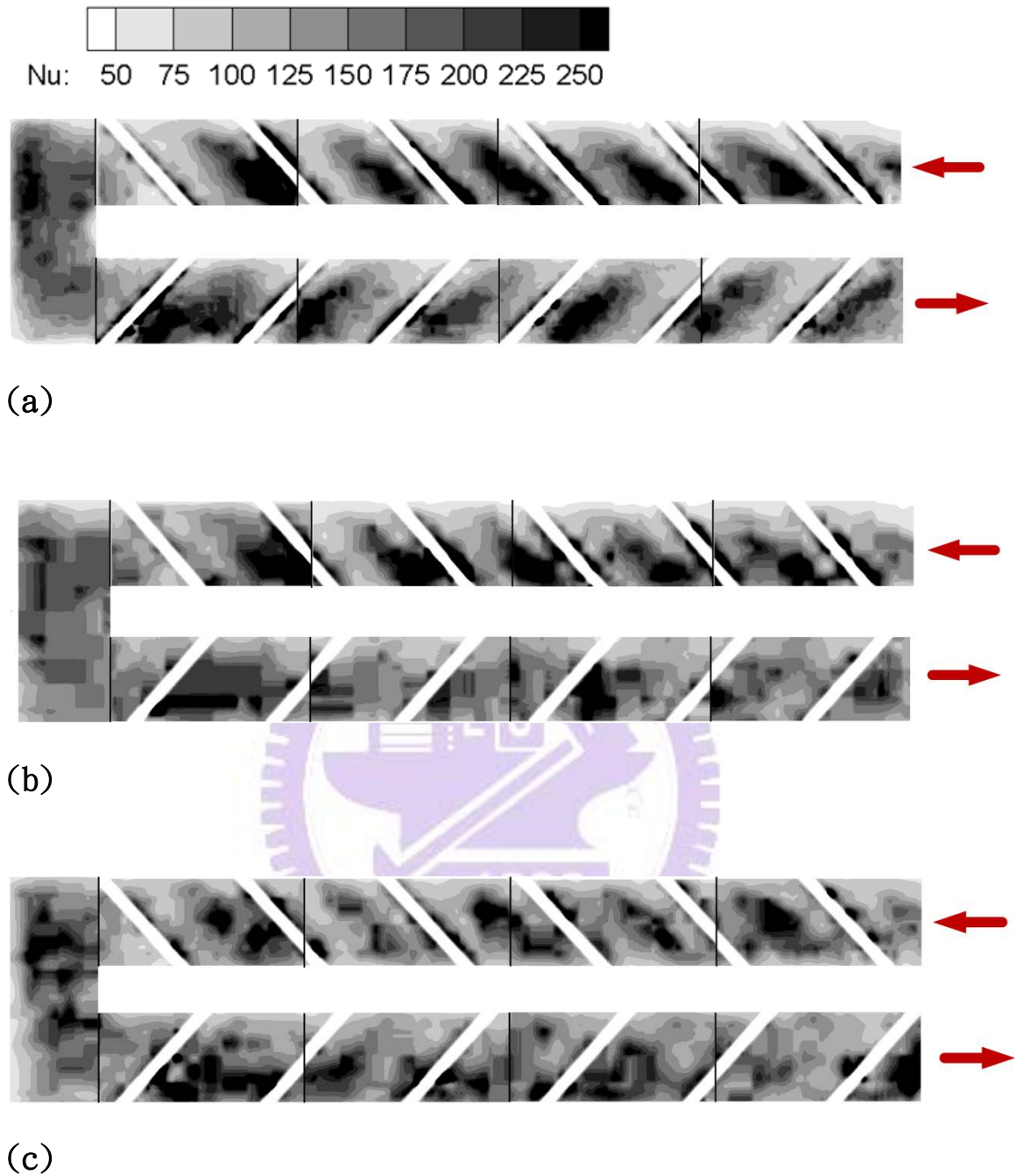


圖 4-18：肋條冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)

(a) $Re=15000$ (Stationary)

(b) $Re=15000$ (Trailing)

(c) $Re=15000$ (Leading)

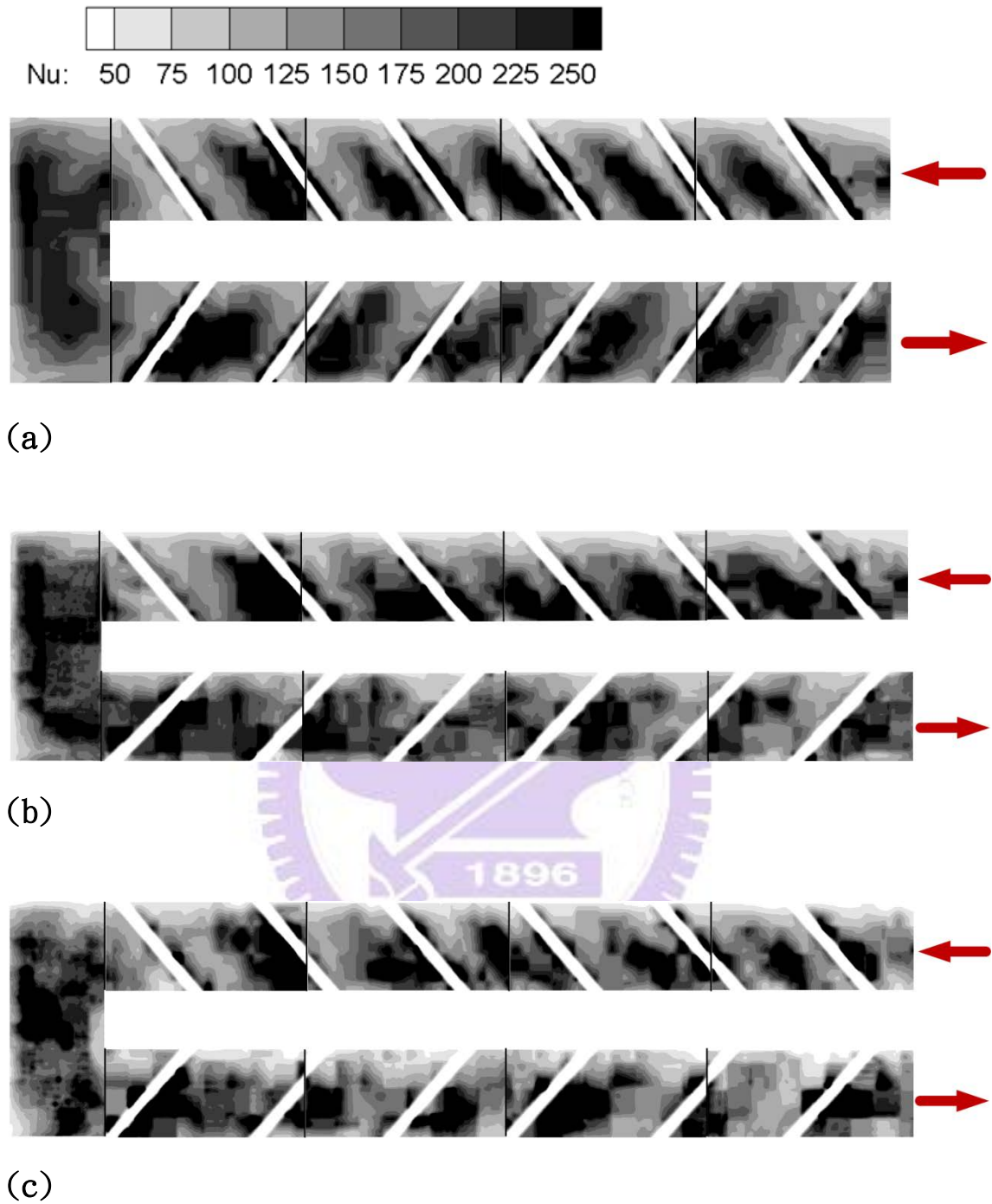


圖 4-19：肋條冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)

(a) $Re=20000$ (Stationary)

(b) $Re=20000$ (Trailing)

(c) $Re=20000$ (Leading)

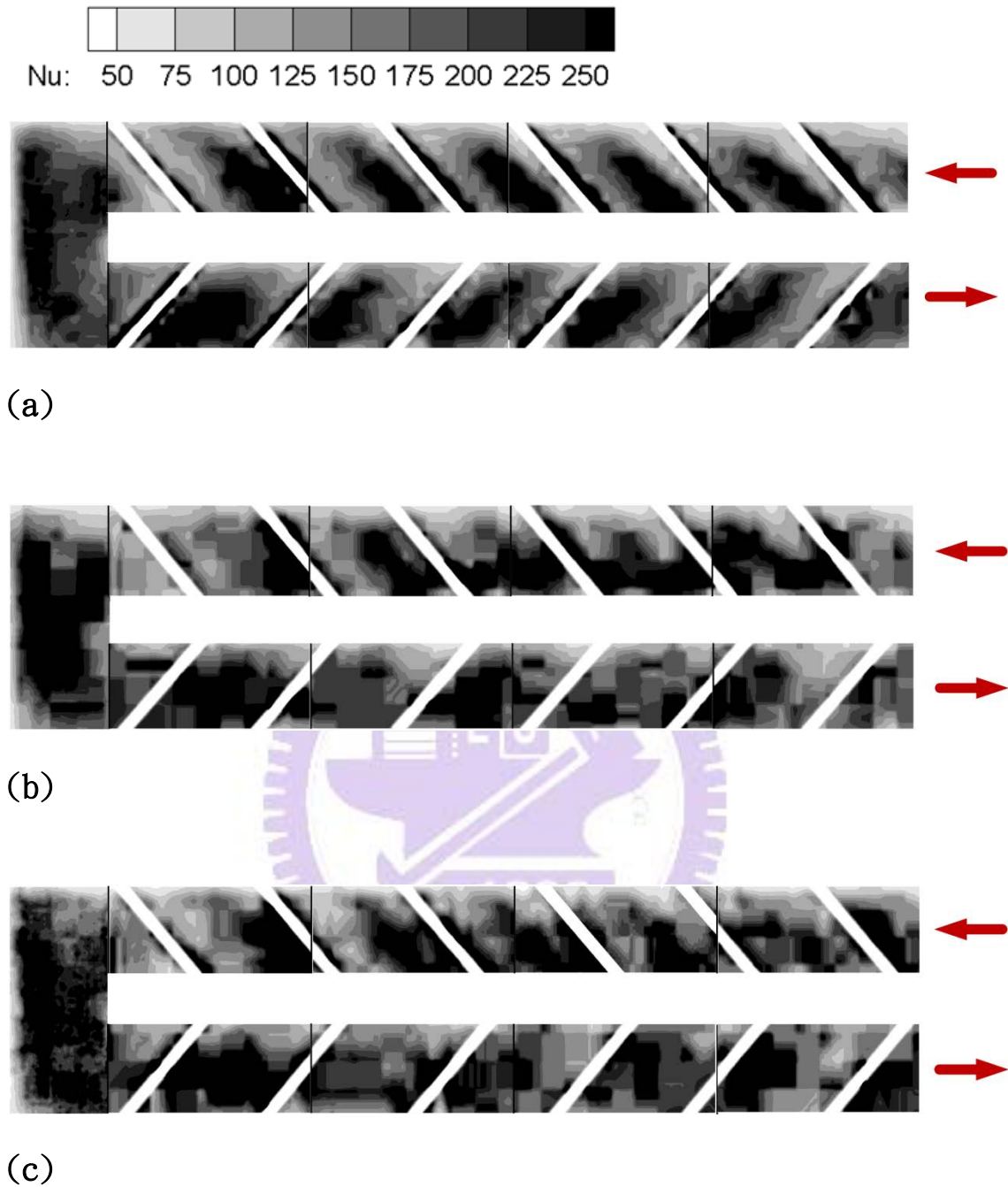


圖 4-20：肋條冷卻通道之紐賽數分布圖(旋轉實驗)

(a) $Re=25000$ (Stationary)

(b) $Re=25000$ (Trailing)

(c) $Re=25000$ (Leading)

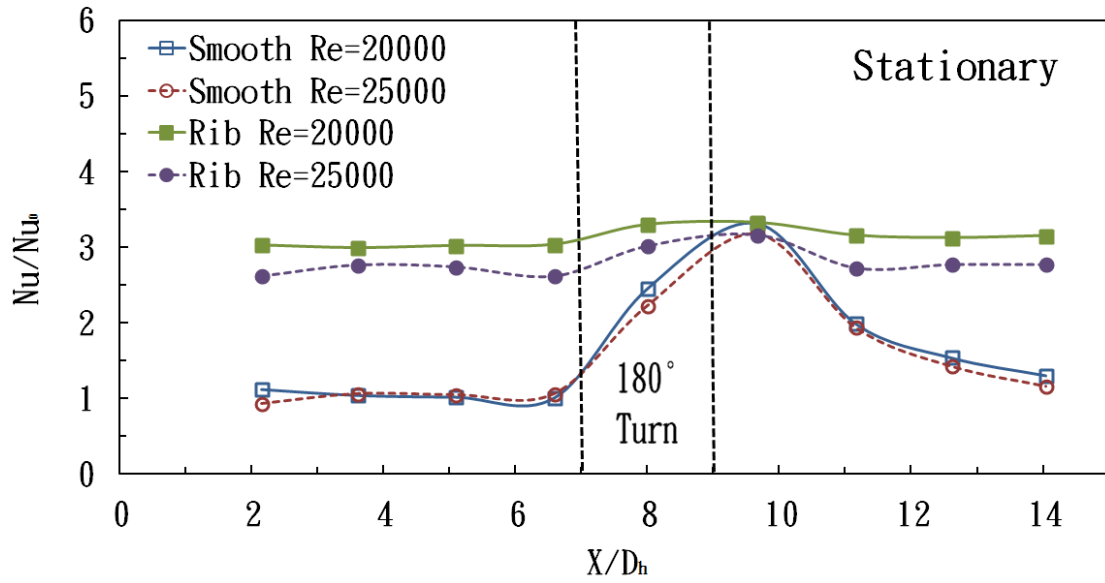


圖 4-21：比較肋條壁面和平滑通道之平均紐賽數比值(靜止實驗)

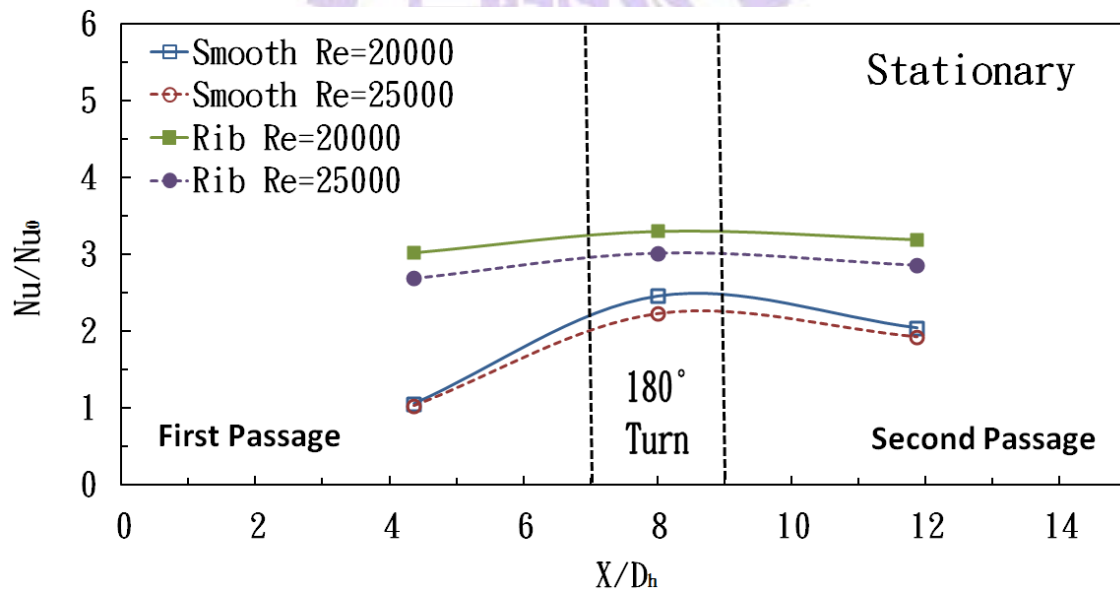
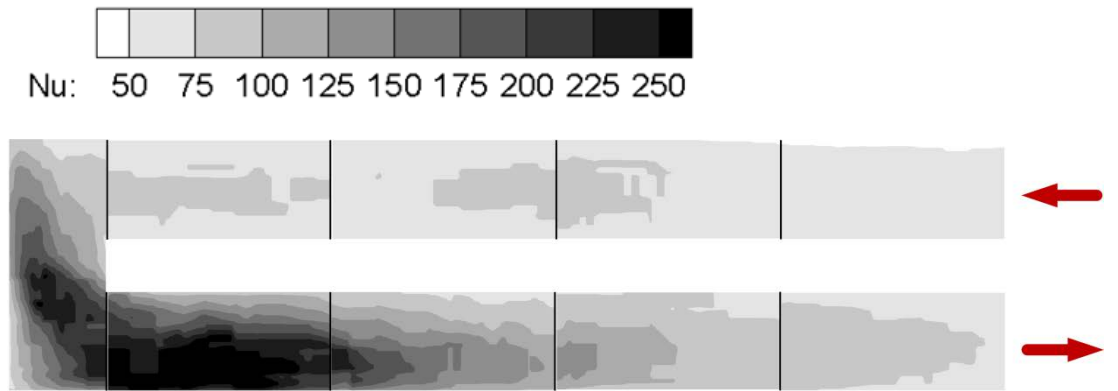
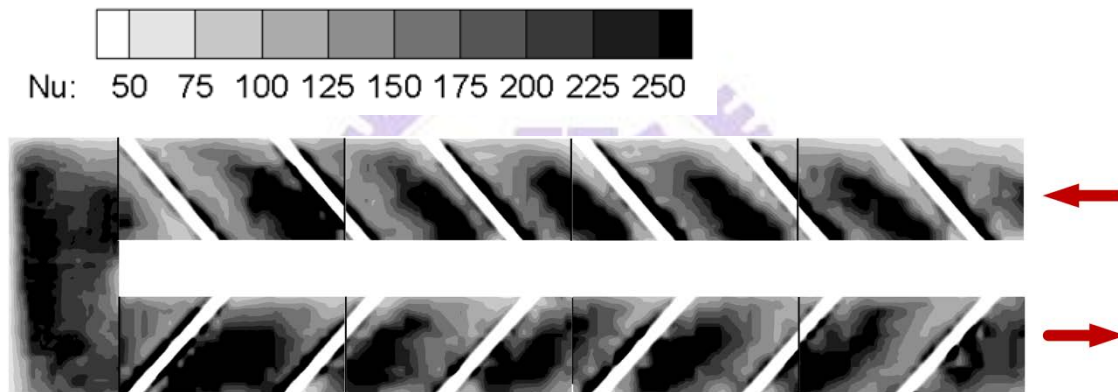


圖 4-22：肋條壁面和平滑壁面之各區域平均紐賽數比值(靜止實驗)



(a)

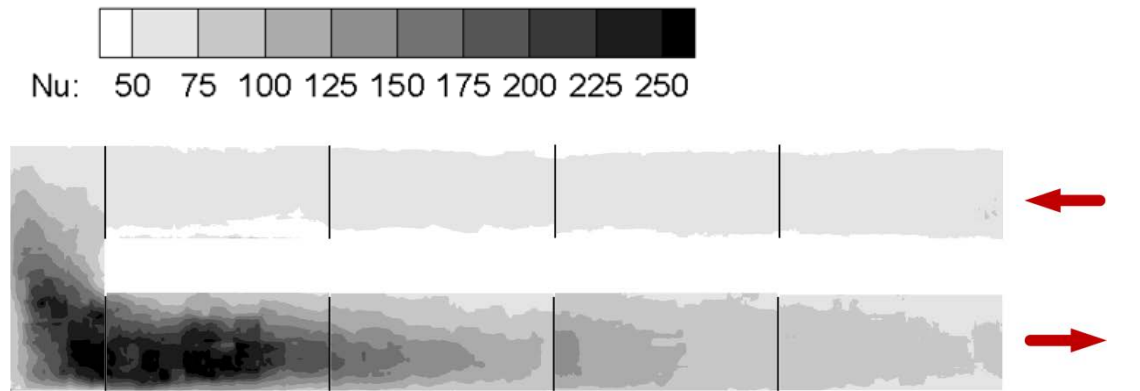


(b)

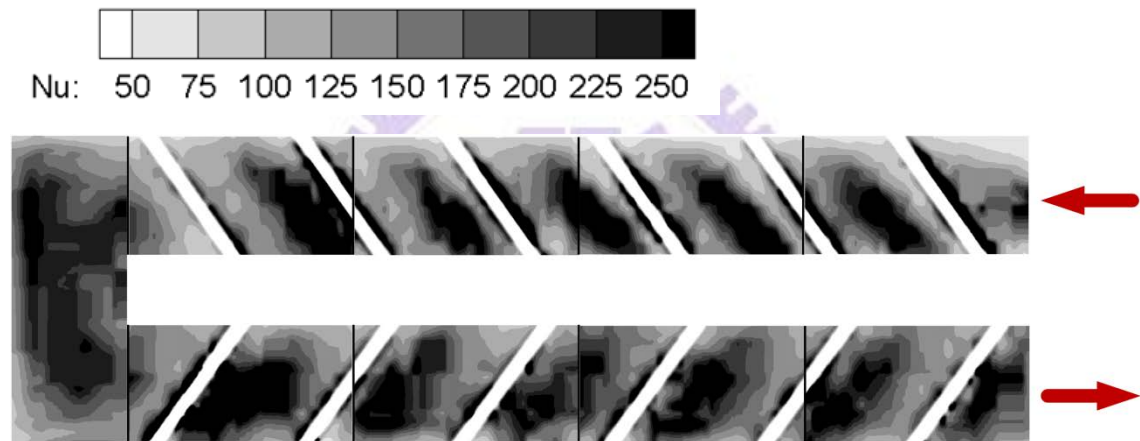
圖 4-23：肋條壁面和平滑壁面冷卻通道之紐賽數分佈圖(靜止實驗)

(a) Smooth $Re=25000$ (Stationary)

(b) Rib $Re=25000$ (Stationary)



(a)

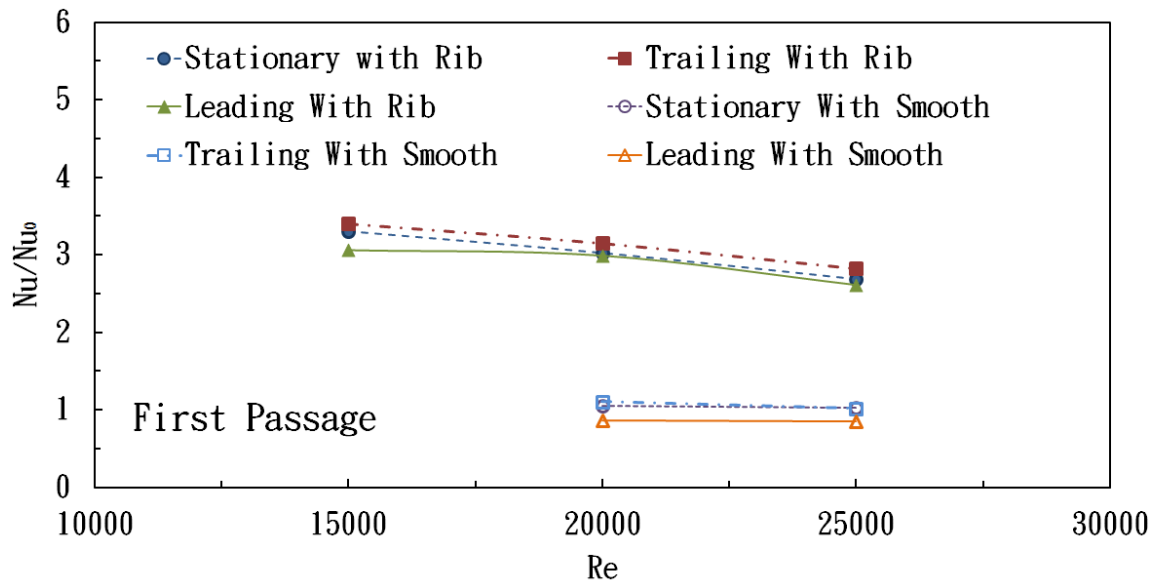


(b)

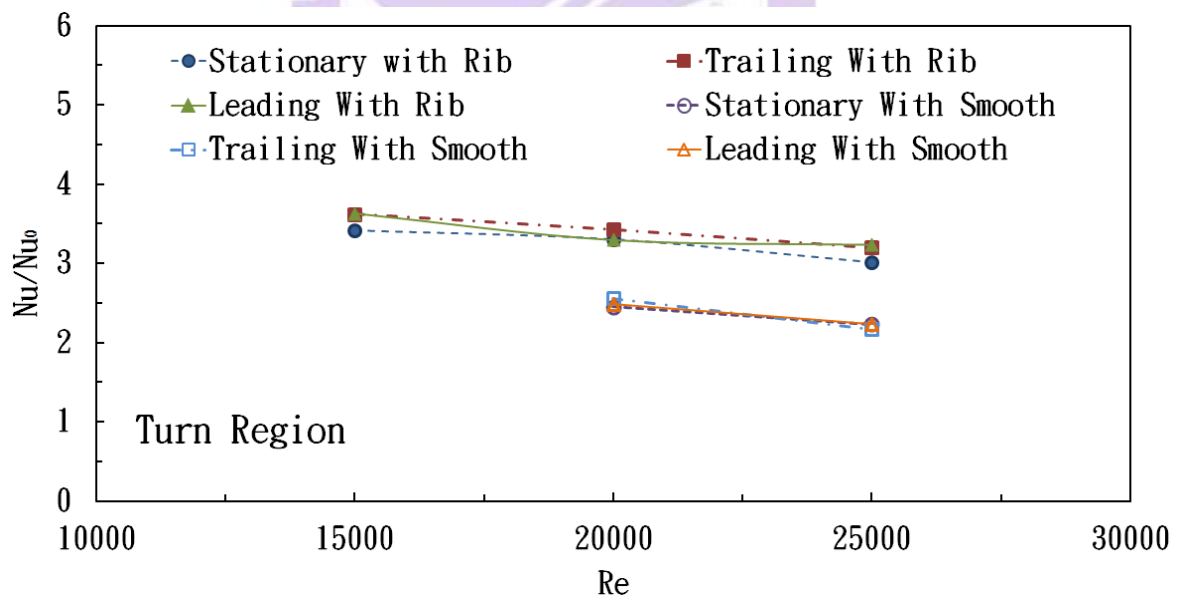
圖 4-24：肋條壁面和平滑壁面冷卻通道之紐賽數分佈圖(靜止實驗)

(a) Smooth $Re=20000$ (Stationary)

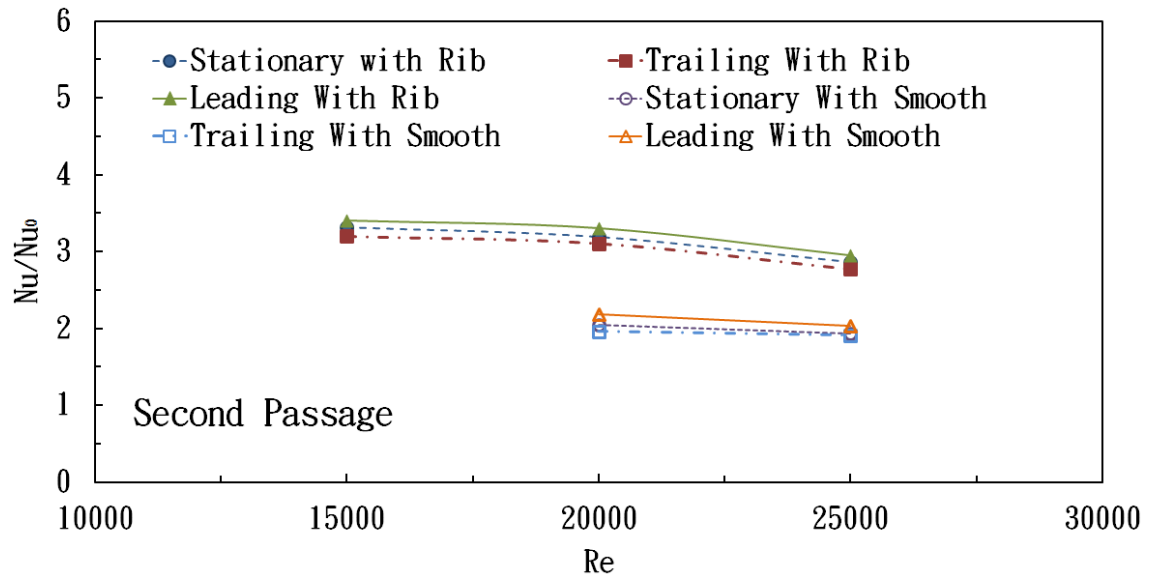
(b) Rib $Re=20000$ (Stationary)



(a)



(b)



(c)

圖 4-25：雷諾數對於冷卻通道各區域之平均紐賽數比值的影響

(a) 第一通道區 (First Passage)

(b) 流體轉向區 (Turn Region)

(c) 第二通道區 (Second Passage)

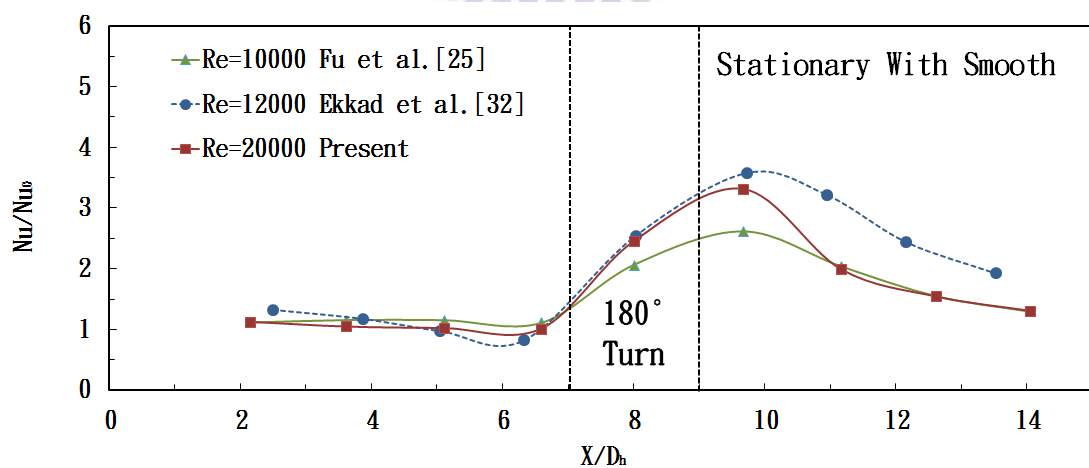


圖 4-26：參考文獻比較平滑通道之平均紐賽數比值分佈圖(靜止實驗)

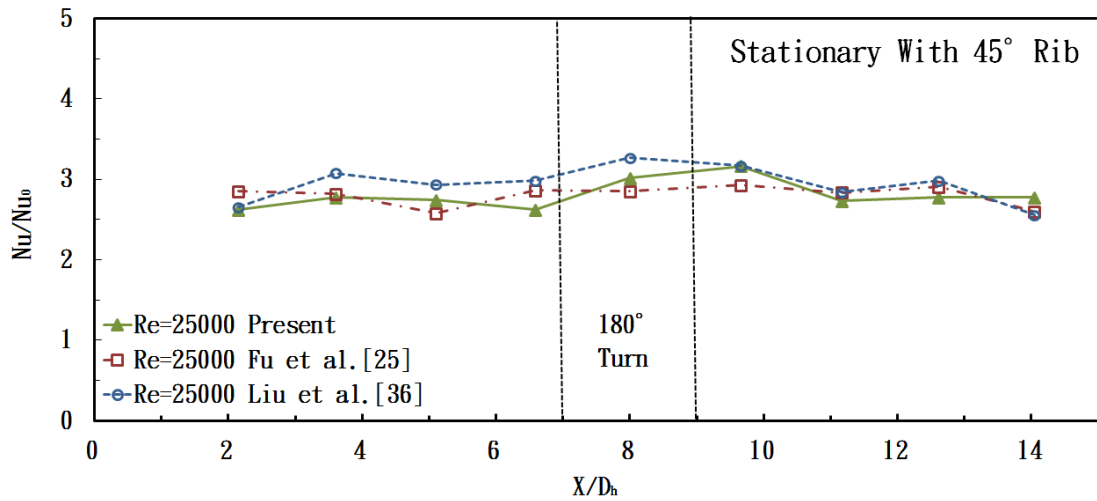


圖 4-27: 參考文獻比較肋條壁面冷卻通道之紐賽數比值分佈圖(靜止)

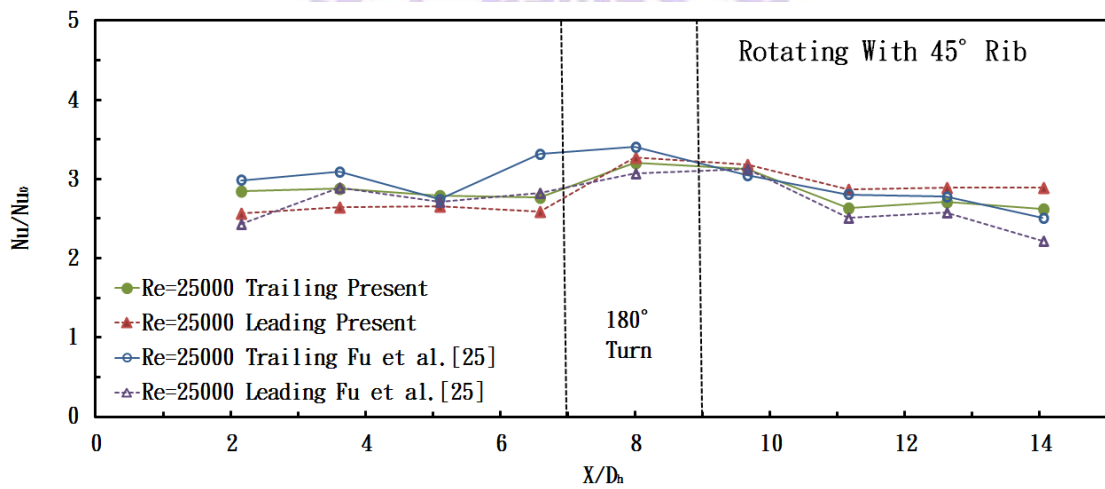


圖 4-28: 參考文獻比較肋條壁面冷卻通道之紐賽數比值分佈圖(旋轉)