

行政院原子能委員會 委託研究計畫研究報告

雷射光學量測元件熱流參數及設計分析資料庫建立

Analysis and Measurement of Thermal-Fluid Parameters for Solid
Oxide Fuel Cell

計畫編號：932001INER015

受委託機關（構）：國立中央大學

計畫主持人：施聖洋教授

聯絡電話：(03) 4267354

E-mail address：sshy@cc.ncu.edu.tw

報告日期：中華民國 93 年 11 月 30 日

目錄

目錄.....	1
中文摘要.....	2
英文摘要.....	3
壹、緣起與目的.....	4
1.1 計畫緣起.....	6
1.2 計畫目的.....	7
貳、研究方法與過程.....	10
2.1 流場觀測設備.....	10
2.2 雙極板設計與製作.....	10
2.3 影像處理方法.....	12
2.4 流率測量.....	12
2.5 實驗操作過程.....	13
參、主要發現與結論.....	15
3.1 主要發現.....	15
3.2 結論.....	19
肆、參考文獻.....	21
伍、圖表說明.....	23

中文摘要

固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)是一個乾淨的能源轉換裝置，因其不需經由燃燒過程，便可將燃料的化學能直接轉換成電能。SOFC 是由陰極板、固態氧化物電解質、陽極板以及雙極連接板等關鍵元件所組構成，其中雙極板所必須具備的主要功用是能使燃料氣體與空氣可均勻分佈，且流暢地流入連接板的兩側，以均衡發電基板的電量分佈，進而使溫度差異降低，有效提升運轉之可靠度，增加燃料的使用率，並延長燃料電池的壽命。本計畫針對平板式 SOFC 雙極板流道設計以及流道內之速度分佈等，利用染劑觀測流場分佈特性及量測分析其速度場分佈。此外，針對幾種可能改善流場均勻度之雙極板流道進行實驗，藉此找出影響流場均勻度之主要因素。實驗結果顯示，雙極板兩進氣口中間凸出的部分距流道入口的長度，對於流體在雙極板流道內的分佈影響不大。我們找到實際影響流體在雙極板流道內的分佈，主要是受進氣口扇形區域的幅度大小與流道出口處距離排氣口的距離等影響。而藉由使用導流板，可使流道流場能均勻滲透通過電極，以增加電池的整體效能。

英文摘要

Solid oxide fuel cell (SOFC) is a clean energy conversion device. It converts the chemical energy of a fuel directly into the electric energy without combustion. SOFC is mainly consisted of an anode, a cathode, an electrolyte and the bipolars. The bipolar plate is a key component of SOFCs. The major function of the bipolar plate is to distribute uniformly the gaseous fuel and the air over the active areas and thus increases the efficiency of fuel usage. This thesis simulates experimentally the flow behaviors in the channels of the bipolar plate of a planar SOFC using flow dye visualization. Focuses are on the uniformity of the flow in the channels, measurements of the mean velocity distributions, and effects of flow Reynolds number. The results show that the influence of the distance from the inlet of channels to the middle prominent part between the two inlets of the bipolar plate is insignificant for the flow uniformity in the channels. Two important factors that influence the flow distribution of the channels in the bipolar plate are formed to be the range of fan-shaped area near the inlet and the distance from the outlet of the channels to the final outlet. Moreover, using the guide vanes in the bipolar plate can make the flow distribution of the channels much more uniformly over the electrodes and thus could increase the whole efficiency of fuel cells.

壹、緣起與目的

近年來，能源短缺以及因使用化石燃料造成之環境污染等問題越來越嚴重，解決能源問題已是刻不容緩，而發展燃料電池科技將能有效紓解目前我們所面臨的能源問題。燃料電池為具效率與潔淨等優點之發電裝置，且其為能量轉換裝置，能直接將燃料之化學能轉換成電能。

以二氧化鋯(zirconia, ZrO_2)為氧離子導體最早是由 Nernst 於 1899 年所發現的。1930 年，瑞士科學家 E. Baur 和 H. Preis 則以二氧化鋯為基礎，摻雜其他金屬進行固態氧化物電解質的實驗。而到 1937 年，Baur 和 Preis 完成第一個以固態電解質運作的燃料電池，且不需考慮二氧化碳回收的問題，其運轉溫度約為 $1000^{\circ}C$ [1]。到了 1950 年代的末期，在荷蘭海牙的 Central Technical Institute、美國賓夕法尼亞州的 Consolidation Coal Company 與紐約的 General Electric 等研究機構開始加快固態氧化物電池的研究。在 1959 年的一場燃料電池討論會上，與會的專家學者注意到固態電解質的半導電特性，會使電池內部產生較高的阻抗，及發生熔化與短路現象等的問題，於是 SOFC 的發展便遇到一個窒礙難行的瓶頸了 [2]。然而，因為高溫燃料電池可以以 CO 為燃料，以及其固態電解質的性質相當穩定，所以還是有部份的專家持續對固態氧化物電池進行研究。

1962 年，US Westinghouse Electric Corporation 以二氧化鋯和氧化鈣 (calcium oxide) 為電解質持續進行 SOFC 的實驗。到了 1980 年代初期，US

Westinghouse Electric Corporation 以管狀電池的設計，克服了熱應力與內部阻抗的問題。隨後，發展出結合 CHP 的 SOFC 系統進行長時間的運轉測試，測試結果顯示，SOFC 系統輸出的電壓相當穩定，且熱循環處理能力佳。近年來，隨著能源價格不斷的攀升與材料科技的突破發展，使得 SOFC 再度賦予厚望。

SOFC 主要是由陽極(anode)與陰極(cathode)、一個固態氧化物電解質(solid oxide electrolyte)，以及雙極連接板（又名為雙極板bipolar plates或Interconnects）等四部分所構成。一般常見的SOFC 結構設計主要可分為兩種型態，一為平板(planar)結構，另一為管狀(tubular)結構。圖1.1為平板式SOFC 的設計概念圖。其組裝方式與PAFC 和PEMFC類似是採用堆疊而成的。雙極板必須支撐電極、連接雙極導電以及引導流體流動等，因此具備下列之特性[3]：

- (1) 引導燃料與空氣均勻分佈到活動反應區
- (2) 必須具有良好的熱傳導性
- (3) 必須具有良好的電傳導性
- (4) 必須防止氣體洩漏的功能且不能被腐蝕

這些因素導致雙極板在材料選擇與流道設計上有所挑戰，必須克服。本計畫主要針對雙極板之流道能否引導燃料與空氣均勻分佈到活動反應區，進行相關之分析與設計。

1.1 計畫緣起

SOFC之操作溫度較高，與其他低溫燃料電池相比較，具有可以減少活化極化(activation polarization)、可避免使用昂貴的觸媒及可結合廢熱回收發電系統來提升整體效率等優點。雙極板是高溫燃料電池重要的元件之一，又稱為Interconnects。其不但構成燃料電池主體支撐的結構外，還兼具串接單電池的功用。在實際的燃料電池運轉中，反應氣體被供給給電極的背面。流場習慣分別被用來供應和分佈燃料與氧氣給陽極和陰極進行化學反應。而理想的氣體流動通過整個電極表面，應該是要均勻的分佈，並確使每個電極均能均勻進行反應。流場允許氣體沿著電極的長度方向流動，並允許其質傳垂直通過電極表面到電解質表面進行反應。由於單燃料電池所產生的電壓相當小，約為0.7伏特，若要產生足夠的電壓，則必須將許多單電池以串聯方式連接起來，由許多單電池以串聯連接起來的電池稱為電池堆(stacks)[4]。最常見的電池串聯方式是連接每個電池陽極的邊緣到下一個電池的陰極邊緣，以此類推。此方法所面臨的問題是電子必須流過電極表面到在最上緣電流收集點的位置，此時電極必須具有良好的導電性，尤其在每個電池所輸出的電壓只有0.7伏特下，甚小的壓降(voltage drop)都是必須考慮的。因此，電池堆通常以雙極板來達到電連接的目的。

雙極板第二個功用是分離陽極與陰極的氣體。因此雙極板又稱為流場板(flow field plate)。然而因為分析燃料電池內部之流場狀態的技術尚未發展成

熟，很難分析雙極板之流道設計是否為最佳化。從能士特方程式(Nernst Equation)來看：

$$E = \frac{-\Delta G_0}{n_e F} + \frac{RT}{n_e F} \ln Q \quad (1)$$

其中， ΔG_0 為標準 Gibbs 自由能變化， T 為電化學反應的溫度， Q 為代表物種在電解質與電極間的分壓， n_e 為帶電荷數， F 為法拉第常數，而 R 則為一般氣體常數[5]。由上式可知影響陽極與陰極間電動勢大小的因素主要有下列兩項：

- (1) 電化學反應時的溫度；
- (2) 在電極與電解質間反應物與生成物的分壓。

這兩項因素主要涉及到反應氣體在流動時熱量傳遞與質量傳輸現象的變化，反應氣體是否能在流道中均勻流動將會影響發電的效率，因此雙極板流道設計及流道內之流場分析為發展燃料電池科技過程中相當重要的一項工作。

1.2 計畫目的

目前分析雙極板流道內之流場狀態主要都是利用數值模擬的方法，如 Yakabe *et al*[6]利用STAR-CD(Computational Dynamics Ltd.)數值模擬軟體，模擬簡化後具有兩個流道以電解質為支撐的單SOFC電池單位，並考慮SOFC之水轉移(water-shift)反應與氣體擴散，以及燃料分別採用內部與外部重組的方式，在燃料與空氣以同向流與反向流的模式，分析在流道內的化學濃度成

分、溫度、電壓與電流密度的分佈情形，結果是以同向流模式較佳。Recknagle *et al* 同樣利用 STAR-CD 軟體，模擬以電解質為支撐的 SOFC [7]，分析反應氣體在陽極與陰極的分佈、溫度與電流分佈的情形。Ackmann *et al* 則是利用 CFD-package FLUENT 軟體，模擬以電解質為支撐的 SOFC [8]，並採用平均傳輸細孔模式 (mean transport pore model, MTPM)，模擬在陽極與陰極的質傳與熱傳情形。而 Yuan *et al* 利用有限體積法軟體 [9]，模擬在完全發展流模式下，矩形和不同梯形角度的流道在距離流道入口處不同距離時 (aspect ratio) 的橫截面質傳與熱傳情形，並探討熱水力直徑 (thermal-hydraulic) (如摩擦因子 (fRe) 與 Nusselt 數) 對於質傳與熱傳的影響。然而利用數值分析來探討流場狀態時，往往需要利用一些假設條件來簡化模式，進而令數值程式得以順利計算，而這也導致模擬之結果與真實的流場有所差異，因此，利用數值分析方式來分析雙極板流道內之流場狀態時，需要有實驗的結果來驗證其數值模型以及假設條件之正確性。

Argonne National Laboratory 於 1984 年提出單一式 (monolithic) SOFC [10]，此 PEN 為波浪狀而並非平板式，由於波浪狀的 PEN 具有較大的有效反應面積，所以其具有高功率密度的優勢，每公斤單一式的 SOFC 約可輸出 8 KW 的電力。然而，因波浪狀 PEN 製作技術困難，所以目前仍不普遍被採用。瑞士 Sulzer Hexis 公司則開發出 PEN 為中空圓盤式的 SOFC，此種電池結構最主要的特徵是將電池與熱交換器結合為一體。燃料與空氣在流道內的

流動方式與一般平板式 SOFC 不同。燃料由電池中間通道進入，以放射方式供應陽極所需反應氣體後由圓盤外緣排出，而空氣則是由圓盤外緣由外向內供給反應氣體後，再由內向外排出，並與剩餘燃料進行混合後，供給燃燒器進行燃燒，作廢熱回收利用。此種電池的運轉溫度約介於 850°C 至 900°C，其主要的特徵是具有高發電效率、應用範圍廣、低污染、低運作成本與燃料相容性佳等優點[11]。上述兩種 SOFC 電池結構設計雖然優於一般平板式 SOFC，但本計畫主要是配合核能所 SOFC 計畫來進行，因此以核能所主要發展之雙極板模型為研究對象，在不考慮流體在流道內發生垂直滲透的情形下，量測分析雙極板流道流場之均勻度和速度分佈，並加以分析與討論。

我們建構一實驗設備平台以模擬 SOFC 雙極板之運作，以實驗的方式來觀察及量測分析雙極板流道內的流場狀態，並進一步達到建立雙極流道最佳化設計所需之研發能量。在不考慮流體在流道內發生垂直滲透的情形下，我們將流道模型放大並在流場中注入染劑以方便觀察流體運動狀態。針對(1)不同之進氣口及排氣口數目、(2)進氣口與流道入口間不同之距離以及(3)有無加設導流板等三種不同雙極板類型，以實驗量測的方法來分析雙極板流道內流體分佈之均勻度和速度場特性，並設計讓流體能均勻分布於各流道之雙極板結構。實驗所得的結果，有助於建構數值模擬模型，並驗證模型之正確性，同時本計畫之雙極板流道設計也可以提供其他從事相關研究之專家學者參考，以期提升燃料的使用率和燃料電池的發電效率。

貳、研究方法與過程

2.1 流場觀測設備

流場觀測裝置主要是藉由重力位能差來驅動流場，圖2.1為流場觀測設備示意圖。為了維持定常(steady)的狀態，我們控制壓克力水槽的水位維持在23.5 公分高，以維持固定之壓力差。染劑(dye)的流量是由染劑控制閥所控制，而雙極板內流道的流速則是由雙極板底下的流量控制閥所控制。在每次進行實驗時，染劑的水位維持在距離染劑控制閥20公分高。染劑管是使用內徑為7公釐，外徑為9公釐的塑膠軟管。染劑管是插入漏斗連接到距離雙極板入口處上方約10公分高的地方，目的是要讓染劑與水作充分混合，以便觀察染劑流體在流道內的分佈情形。實驗過程使用具有180 萬像素(pixels)，每秒擷取30 張影像的JVC GR-DVM1 數位攝影機拍攝，並將拍攝到的影像，進行後續處理分析工作。排氣閥的功用主要是在注水入雙極板時，移除氣泡用與實驗結束後排水用的控制開關。

2.2 雙極板設計與製作

在本計畫中，所採用的雙極板設計主要分為兩種，一為參考Yakabe *et al* 於2001年所模擬平板式SOFC時的設計概念，如圖2.2所示，此設計只有一個進氣口及一個排氣口；另一則為參考核能所擬研究之設計概念，採用兩個進氣口及一個排氣口，如圖2.3所示。流道採用平行的設計，此平行流道設計與PEMFC所常見的蜿蜒(serpentine)流道設計相較後，其不同處如下：

(1) 平行流道的流場阻力小，且 SOFC 所生成的產物皆為氣態的，沒有水阻塞流道的問題，所以平板式 SOFC 一般採用平行流道設計。

(2) 蜿蜒流道流場阻力大，但藉由加壓可改善 PEMFC 水處理的問題，所以 PEMFC 一般採用蜿蜒流道設計。

本研究使用壓克力材料來製作雙極板，為了方便觀察流體在雙極板流道中的流動現象，所以將雙極板放大。考量結構的密封性，將雙極板設計為由底板、外板、內板、上板與 Ribs 等五部分所構成。我們分別使用四種雙極板來進行相關雙極板流道流場分佈現象的分析與研究。第一種為具單一進氣口及排氣口的雙極板(Case A)，圖2.4為其實體圖與規格示意圖；第二、三、四種皆為雙進氣口及單一排氣口的雙極板(Case B、C 與D)，此三種設計的差異在於雙極板兩進氣口中間凸出的部分距流道入口的長度不同。Case B 為距離流道入口處30 公分，Case C 為距離流道入口處15 公分，而Case D 則完全與流道入口接合。圖2.5、圖2.6及圖2.7分別為Case B、C 與D 之實體圖與規格示意圖。最後我們考慮考慮加裝導流板所產生的效應，導流板的設計主要是參考未加入導流板時流體在流道內的速度分佈來加以調整導流板的流量入口面積。圖2.8為Case C 加入導流板後的實體圖。

為了考量密封性、水壓與壓克力材料規格的限制等問題，所以底板與上板是採用8公釐厚的透明壓克力材料，外板是採用10公釐厚的透明壓克力材料，內板則是採用5公釐厚的透明壓克力材料，而 Ribs 是利用10 公釐厚的

透明壓克力材料切割為5公釐厚的長方形條狀。

2.3 影像處理方法

實驗過程經由數位攝影機拍攝後，必須再進一步作影像後續處理，才能進行分析工作。後續處理的工作包含影片轉檔、影像擷取與雜訊移除，以及流道速度分析工作等。影片轉檔的工作主要是利用亞邁多媒體公司的V-Gear My VCD TV Plus 影像擷取卡，進行DV 影像檔轉成VCD 檔。接著利用訊連科技公司所研發的威力導演3-影片製作軟體，進行影像的擷取工作，並利用Photoshop 繪圖軟體進行影像的雜訊處理。最後，在影像中找出在每個流道隨時間變化的相對位移，將這些資料予以整理後，進行速度分析，即完成整個影像處理的過程了。由於流道的平均速度不好判別，所以在進行流道速度分析時，是以流道的中心線速度為主。

2.4 流率測量

就質量守恆方程式而言，在控制體積內，其質量變化率會與流經控制表面的質量淨通量變化率之和為零。換言之，在一個定常狀態的流場，進出容積的體積流率要相等，否則無法達到質量守恆。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cv} \rho \mathbf{V} \cdot \hat{n} dA = 0 \quad (2)$$

假設每個流道的截面積為a，則雙極板內流道的總截面積為 $A=12 \times a$ 。

且假設流體在每個流道的速度呈均勻分佈，則速度平均值V 會等於垂直面

積 a 的速度分量 V 。方程式(3)為質量流率 m 的表示式，式中的 ρ 為流體密度， Q 為體積流率。由方程式(3)可推導出 Q 的方程式(4)，所以經由量測板底下流量控制閥的體積流率，即可推估出在流道內的流道平均速度，並可進一步求出流道內流體流動的雷諾數。

$$\dot{m} = \rho Q = \rho AV \quad (3)$$

$$Q = AV \quad (4)$$

四種不同設計的雙極板皆是使用12個每個截面積為0.5平方公分的流道，所以流道的總截積為6平方公分。而流道的水力直徑(Hydraulic diameter)為0.667公分，水的黏滯係數 ν 為0.00864 cm²/s (25)。在未插入染劑管的情形下，將四種雙極板分別量測三種不同的體積流率十次，再經由統計平均法換算出其體積流率、流道平均速度與雷諾數。

2.5 實驗操作過程

在實驗開始階段，先將雙極板放置傾斜約20度，利用與流量控制閥管徑相同的水管，從流量控制閥將水緩慢由下往上注入雙極板內。待水位快到由令接頭時，停止加水並將雙極板放置水平，同時確認流道內是否有氣泡殘存，如果尚存有氣泡，則需重複此步驟，直到流道內無氣泡殘留在其內。待流道內氣泡完全移除後，將上下兩端之由令接頭予以接合後，利用水平儀量測雙極板是否水平，如沒有水平再利用華司予以校正。水平校正完後，則持續由下往上緩慢加水至水槽的水由溢水孔排出。此時，水槽的水並不是從流

量控制閥由下往上灌注，而是由水管直接加水入水槽，將水管的流量控制在使水位維持在距水槽底部 23.5 公分處，並計時一分鐘，看水位是否不再變化，以確認流場達定常的狀態，多餘的水則由溢水孔排出。

流道的流速是由流量控制閥所控制的。在量測十次相同的流量後，利用統計平均的方法求出流量 Q 後，除以十二個流道的總截面積 A ，經計算後可得一流速 u ，再經由方程式(5)，即可求出此次實驗的雷諾數。

$$\text{Re} = \frac{u \times D_h}{\nu} \quad (5)$$

其中 ν 為水的動黏滯係數。

到了實驗中期，則進行染劑的調配與數位攝影機架設的工作。實驗所用的染料是使用總體密度(bulk density)約為 0.98 g/cm^3 的藍色染料(dye)，此密度與水相近，所以適合用來觀測液態流場用。染劑的調配是每 1800 毫升水添加 1.0 公克經高溫(150)烘乾過後的染料，均勻攪拌後而成的。染料的添加量是經由多次實驗後，所找出觀測流道流場分佈情形的最佳值。因為添加過量染料，即染劑濃度濃時，則染料會在流道內沈澱；反之，添加過少，即染劑濃度淡時，則染劑流到流道時會快速擴散，無法觀察。染劑調好倒入染劑槽後，接著就調整數位攝影機的位置。最後，再進行確認流道內是否有氣泡生成，如果流道內有氣泡存留，則上述過程必須重來；反之，則將染劑管插入漏斗直到距離雙極板入口處上方約 10 公分高的地方後，打開染劑控制閥，待染劑經由流道流出流量控制閥後，即完成一次實驗。

參、主要發現與結論

針對雙極板在不考慮流體發生垂直滲透的情形下，經由數位攝影機所拍攝之結果作一綜合性的討論。主要的結果與討論，包含(1)不同雙極板之流道流場分佈情形；(2)流道入口前緣之幾何形狀的影響；(3)加入導流板後的雙極板流道流場分佈情形之探討。

3.1 主要發現

(1) 不同雙極板之流道流場分佈情形

針對四種不同設計的雙極板各自在不同雷諾數下之流場分佈，其結果討論如下：

圖 3.1、3.2 與 3.3 分別為在 $Re = 320, 174$ 與 118 時，Case A 雙極板的流場分佈情形。為了分析流道內染劑之流動情形，於是分別取圖 3.1 至圖 3.3 的 (9)至(16)來做各流道之速度曲線與時間之相對位移關係。而流道的編號由左至右，分別為 ch1, ch2, ..., ch12，位移的參考座標是 Ribs 上的方格紙。由於利用染劑來觀測流場，無法取得流場的三維速度資訊，加上雙極板內流道的高度只有 5 公釐，可視為一二維的流場，所以在進行速度分析時，是採計雙極板平面的二維速度資訊。

由圖 3.1 至圖 3.3 可以發現，除了 ch1 與 ch2 流道外，其餘在流道入口處皆會發生短暫迴流現象。圖 3.4 為在 Case A 雙極板發生短暫迴流現象示意圖。此現象對於流場的穩定性並不是很好。而從圖 3.5 可知，速度曲線與

時間之相對位移關係是呈線性關係，所以可以知道在流道內的流體運動皆是屬於層流的狀態。此外，由圖 3.6 的速度分佈圖來看，流道內流速會隨雷諾數的增加而增加，而在三種不同雷諾數下的流場分佈皆不是很均勻，流速分佈是呈倒拋物線形，其中皆以靠近 ch1 的流道流速較大，此是因為 ch1 與進氣口的距離較近所致。因此，此設計模式並不是很好。

圖 3.7、3.8 與 3.9 分別為在 $Re = 319, 173$ 與 118 時，Case B 雙極板的流場分佈情形。為了分析流道內染劑之流動情形，於是分別取圖 3.7、3.8 與 3.9 (9)至(16)來做各流道之速度曲線與時間之相對位移關係。而圖 3.10 為 Case B 各流道速度曲線隨時間之位移圖。圖 3.11 為 Case B 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

由圖 3.7 至圖 3.9 可以發現，此流場並無迴流現象產生，且其流場大致是呈對稱性分佈。而由圖 3.10 可以知道，此三種不同雷諾數的流場皆屬於層流狀態。此外，由圖 3.11 來看，其流速分佈皆是呈拋物形的，且左右近似對稱，而流道內流速會隨雷諾數的增加而增加。在不同的雷諾數下，在雙極板兩側的流速皆較低，與中間流道的流速有極大差異。這是因為中間流道除了與排氣口的距離較短，造成其流速加快外，另外的原因是其受兩邊進氣口的雙重影響，使其流速會較快。而兩側的流道由於距離排氣口較遠，以及雙極板結構設計的問題，所以流速會較慢。

圖 3.12、3.13 與 3.14 分別為在 $Re = 314, 173$ 與 118 時，Case C 雙極板

的流場分佈情形。為了分析流道內染劑之流動情形，於是分別取圖 3.12、3.13 與 3.14 (9)至(16)來做各流道之速度曲線與時間之相對位移關係。而圖 3.15 為 Case C 各流道速度曲線隨時間之位移圖。圖 3.16 為 Case C 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

由於此 Case C 與 Case B 雙極板結構設計相近，經分析後的結果，大致與 Case B 的流道流場分佈情形相同。圖 3.17、3.18 與 3.19 分別為在 $Re = 317, 174$ 與 118 時，Case D 雙極板的流場分佈情形。為了分析流道內染劑之流動情形，於是分別取圖 3.17、3.18 與 3.19 (9)至(16)來做各流道之速度曲線與時間之相對位移關係。而圖 3.20 為 Case D 各流道速度曲線隨時間之位移圖。圖 3.21 為 Case D 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

此 Case 的特徵是兩進氣口，不會互相干擾提供流體到中間部分的流道，但由圖 3.17、3.18 與 3.19 可以發現，ch7 至 ch12 的流道內，其流速明顯快於 ch1 至 ch6 的流速。在實驗過程中，兩個染劑控制閥是控制同時開的。會造成一邊流速較快的原因，可能是結構設計上的問題，造成雙極板內的兩邊有壓力差存在。否則，此 Case 的理想分佈情形應該和 Case B 與 C 的分佈情形相似，只是中間流道的速度較低一點，所以此設計模式並不是很好。

此外，在本研究中並未針對水力直徑為 0.667 公分的矩形流道，進一步探討紊流的過渡區(transition)是從何時開始的。然而，在實際的燃料電池運轉中，皆是使用層流的流速。除非燃料電池是使用高化學計量比的燃料來運

轉，否則不會使用紊流的流速，以增加燃料的利用率。而層流的雷諾數大約介於 50~400 之間，實際的雷諾數視其所設計之流道的水力直徑大小而異。

(2) 不同入口幾何形狀之影響

在本節，分別就 Re 約在 320, 174 與 118 時，四種雙極板的分佈情形來作比較。首先，在 $Re = 320$ 左右，分佈情形以 Case A 最差，其餘三者皆相近。在 $Re = 174$ 左右時，以 Case B 與 C 較好，其次為 Case D，最差的是 Case A。而在 $Re = 118$ 附近時，以 Case B 較好，其餘依序為 Case C、Case D 與 Case A。經由相互比較其流場分佈後，可以很明確的證明 Case A 的設計無法使流體均勻分佈在各個流道，而 Case D 則除了在較高雷諾數下的分佈情形較好外，其餘在低雷諾數下的分佈情形並不是很好。在經過綜合比較後，以 Case B 與 C 的分佈情形較佳，但仍存有改善的空間，所以在下一節將針對 Case C 雙極板加入導流板後，來探討導流板對於其流場之影響為何。

經由比較 Case B、C 與 D 的流場分佈情形，可以發現雙極板兩進氣口中間凸出的部分距流道入口的長度，對於流體在雙極板流道內的分佈影響不大。綜合而論，實際影響流體在雙極板流道內的分佈主要有兩個因素，一為進氣口的扇形區域的幅度，另一為流道出口處距離排氣口的距離。由 Case A 之單孔燃料進氣口流場觀測，可知此一設計(Yakabe *et al.* 2001)無法提供中間部分的流道充足的流體。而流道出口距排氣口的距離越近，則其流道的流速也會較快。此外，影響流體在流道內的流速還有其他因素，如流道內的摩

擦係數、流體的性質、水力直徑的大小與流道的設計等，這些因素在未來，將繼續作深入的探討與研究，以使雙極板在未來設計上能藉由分析這些參數來達到最佳化。

(3) 加入導流板之流場改善情形

圖 3.22 為在 $Re = 174$ 時，Case C 雙極板加入導流板的流場分佈情形。為了分析流道內染劑之流動情形，於是取圖 3.23 (5)至(8)來做各流道之速度曲線與時間之相對位移關係。而圖 3.23 為其各流道速度曲線隨時間之位移圖。圖 3.24 為其各流道速度與綜合平均速度關係圖。

與圖 3.13 相較後，可以發現圖 3.22 的分佈情形較其原來改善許多。另外，從圖 3.16 與圖 3.24 可以明顯發現，圖 3.24 各流道速度較接近其綜合平均速度值。因此，加入導流板後的雙極板，可以改善原來流體無法均勻分配到各流道的缺點，進而使流道流場能夠均勻分佈。

3.2 結論

藉由染劑的使用，的確可以幫助觀察 SOFC 雙極板內流體流動的分佈情形。由實驗的分析結果可以得知下列幾點：

- (1) 採用核能所擬研究之設計概念，在未加入導流板前，染劑在雙極板內的分佈情形確實比 Yakabe et al.於 2001 年所模擬的 SOFC 流道設計概念來得好，所以核能所針對雙極板的設計理念方向是正確的。
- (2) 經由比較 Case B、C 與 D 的流場分佈情形，可以發現雙極板兩進氣口

中間凸出的部分距流道入口的長度，對於流體在雙極板流道內的分佈影響不大。反觀，實際影響流體在雙極板流道內的分佈，主要是受進氣口扇形區域的幅度大小與流道出口處距離排氣口的距離等影響。

- (3) Case C 雙極板在加入導流板後，與未加入導流板前的分佈情形相較下，可以發現導流板的確可以使流道流場呈均勻分佈。因此，在實際的流道設計應用上，可以藉由使用導流板，來使流道流場能均勻滲透通過電極，以增加電池的整體效能與增加燃料利用率。

肆、參考文獻

- [1] Vielstich, W., Lamm, A., and Gasteiger, H. A., *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals Technology and Applications*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England (2003).
- [2] Stambouli, A. B., and Traversa, E., “Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs): a Review of an Environmentally Clean and Efficient Source of Energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. **6**, pp. 433-455 (2002).
- [3] 顏正和， “平板式固態氧化物燃料電池雙極板之流道設計與流場觀測”， 國立中央大學機械工程研究所碩士論文（2004）。
- [4] Larminie, J., and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England (2000).
- [5] Hoogers, G., *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, New York (2003).
- [6] Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinuma, M., and Yasuda, I., “3-D Model Calculation for Planar SOFC”, *Journal of Power Sources*, Vol. **102**, pp. 144-154 (2001).
- [7] Recknagle, K. P., Williford, R. E., Chick, L. A., Rector, D. R., and Khaleel, M. A., “Three-Dimensional Thermo-Fluid Electrochemical Modeling of Planar SOFC Stacks”, *Journal of Power Sources*, Vol. **113**, pp. 109-114 (2003).
- [8] Ackmann, T., Haart, L. G. J. de, Lehnert, W., and Stolten, D., “Modeling of Mass and Heat Transport in Planar Substrate Type SOFCs”, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. **150**, A783-A789 (2003).
- [9] Yuan, J., Rokni, M., and Sundén, B., “Combined Mass Suction and

Buoyancy Effects on Heat Transfer and Gas Flow in a Fuel Cell Duct”,
Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. **43**, pp. 341-366 (2003).

[10] Yamamoto, O., “Solid Oxide Fuel Cells: Fundamental Aspects and
Prospects”, *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 2423-2435 (2000).

[11] Sulzer Hexis Ltd, <http://www.hexis.com/>.

伍、圖表說明

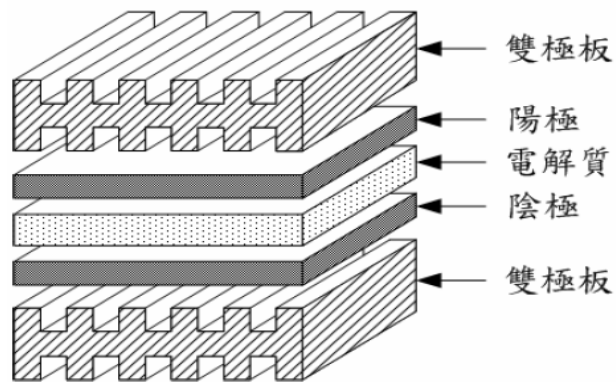


圖1.1、平板式SOFC 的設計概念圖。

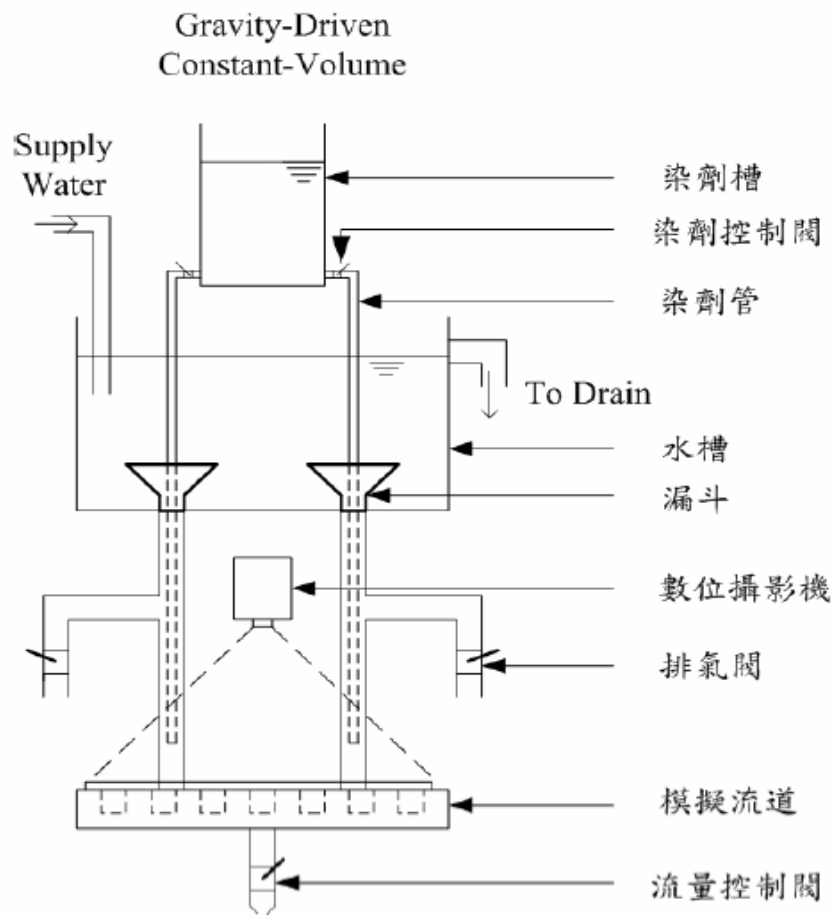


圖2.1、流場觀測設備示意圖。

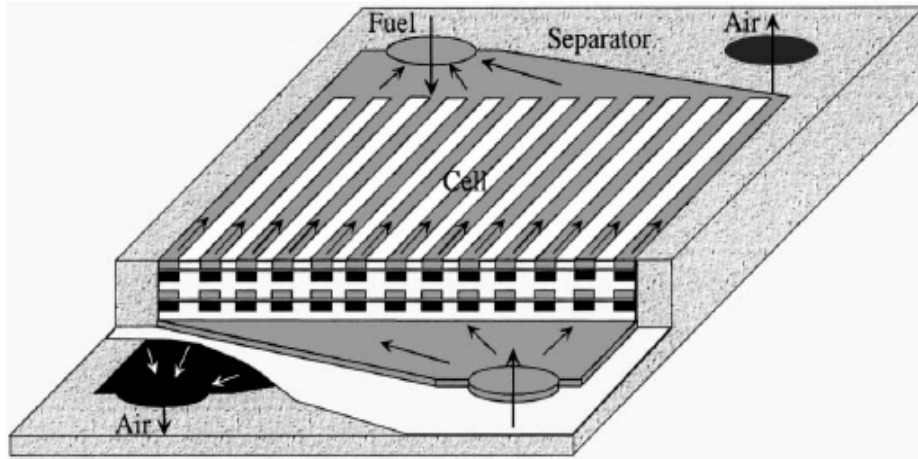


圖2.2、Yakabe *et al* 於2001年所模擬設計的平板式SOFC概念圖。

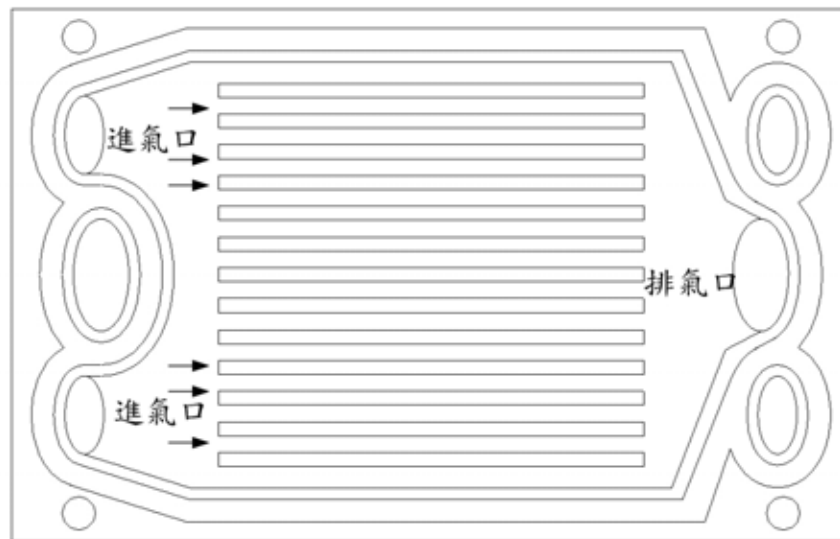


圖 2.3、核能所擬研究之平板式 SOFC 雙極板設計概念圖。

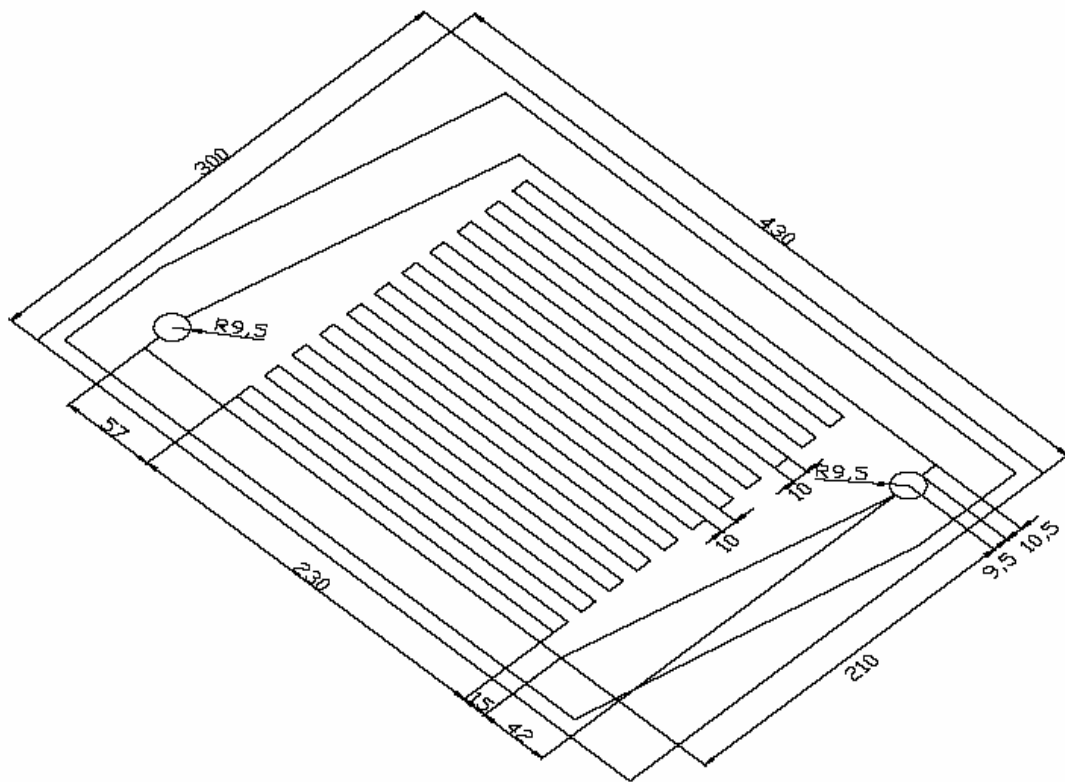
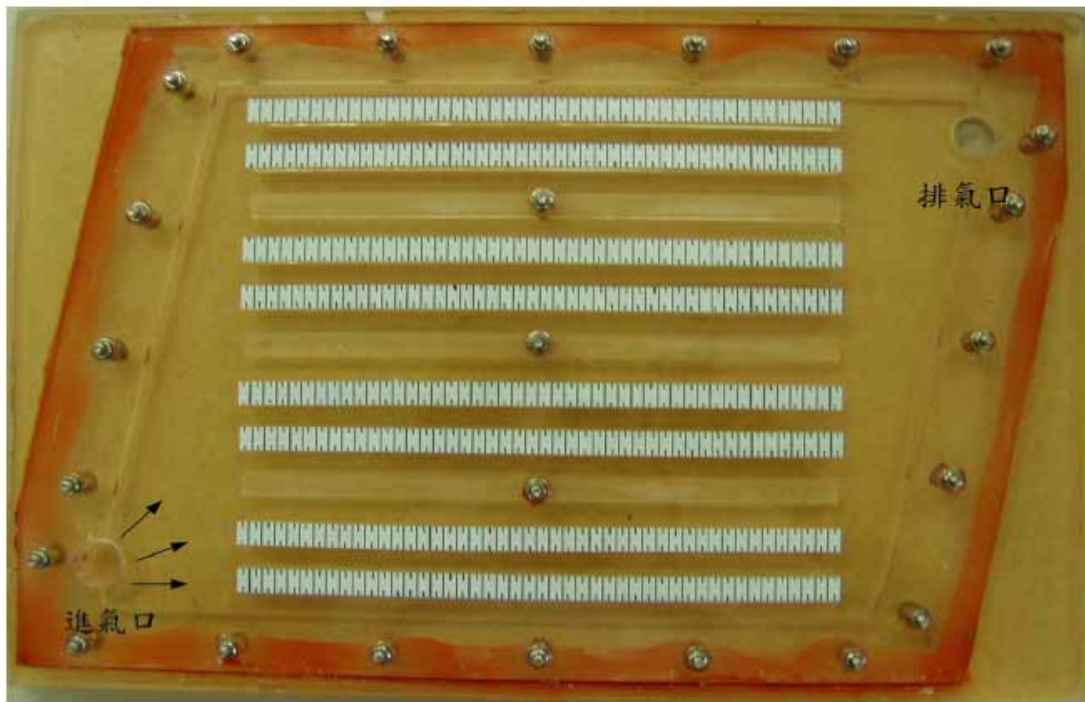


圖2.4、Case A；具單一進氣口及排氣口的雙極板實體圖與規格示意圖。

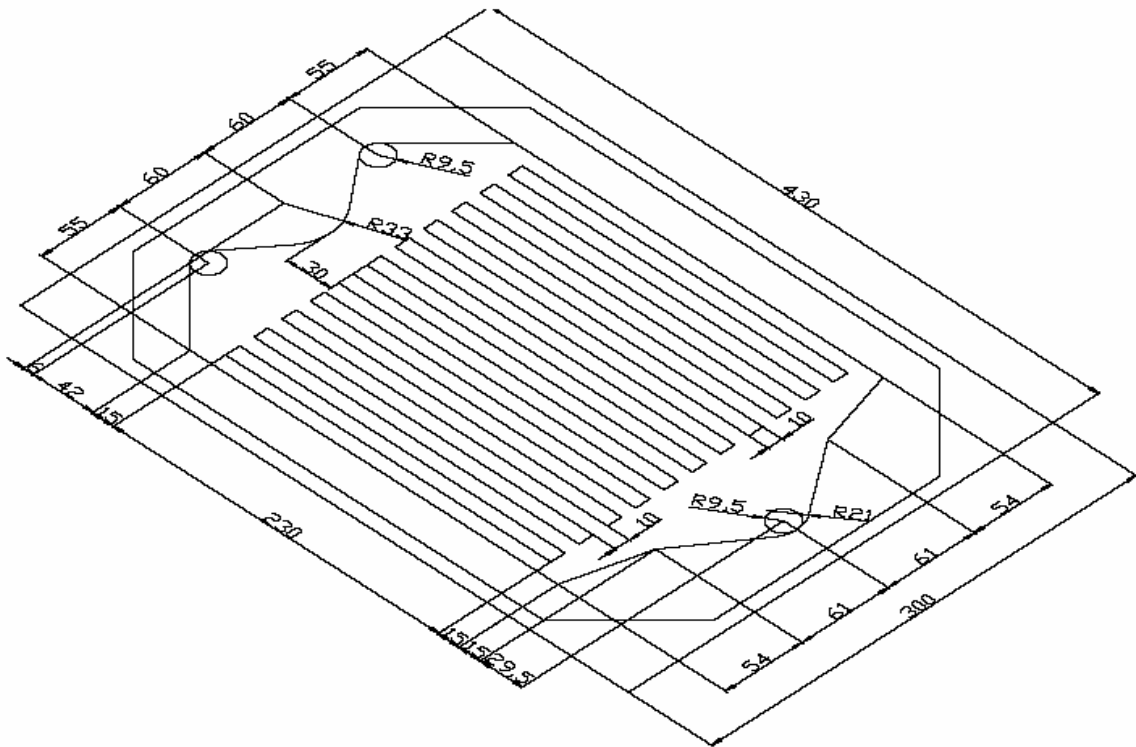
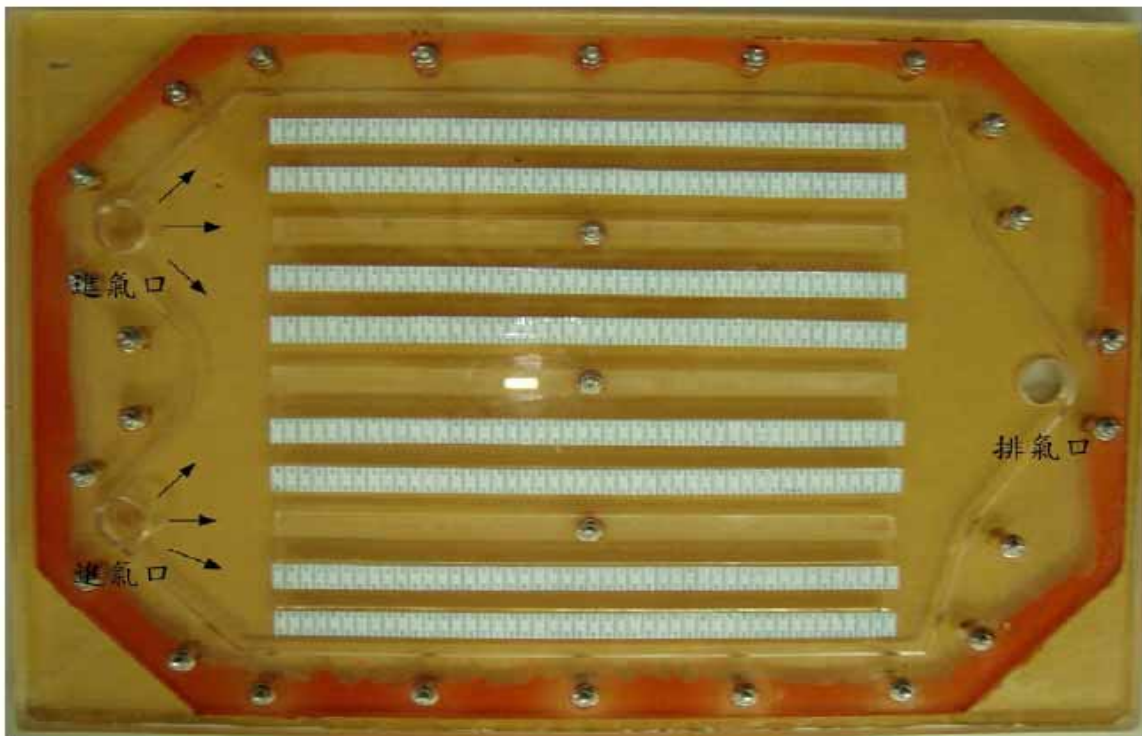


圖2.5、Case B；具雙進氣口及單一排氣口的雙極板實體圖與規格示意圖

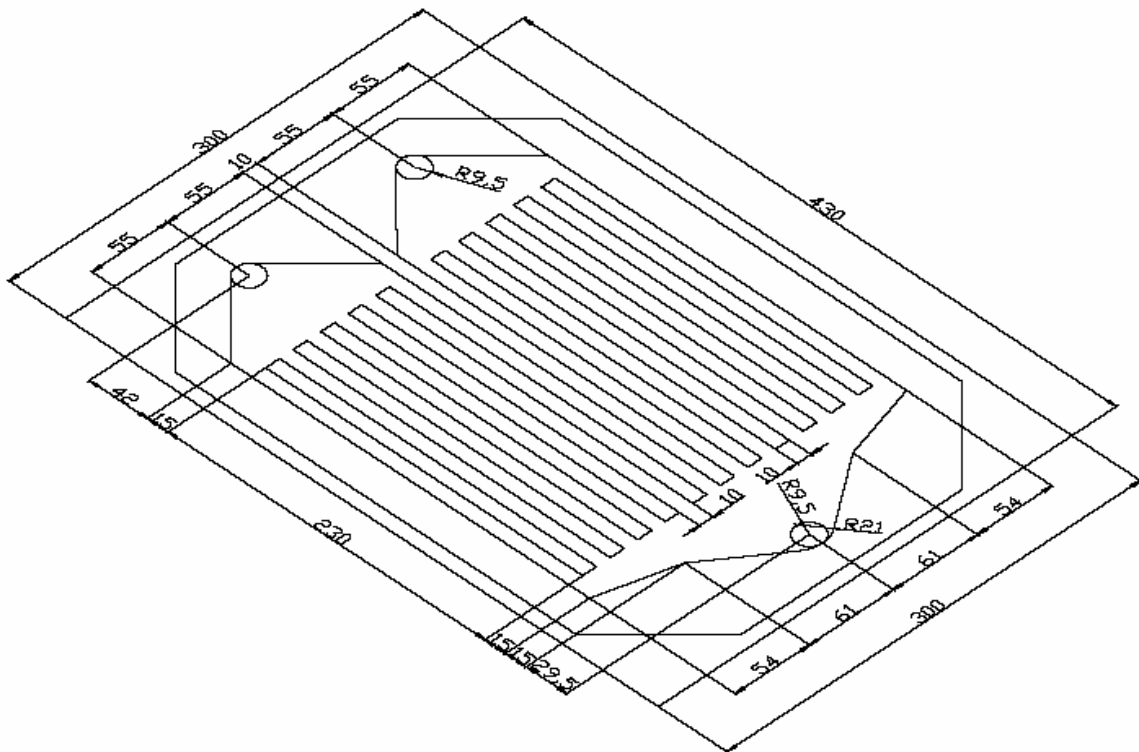
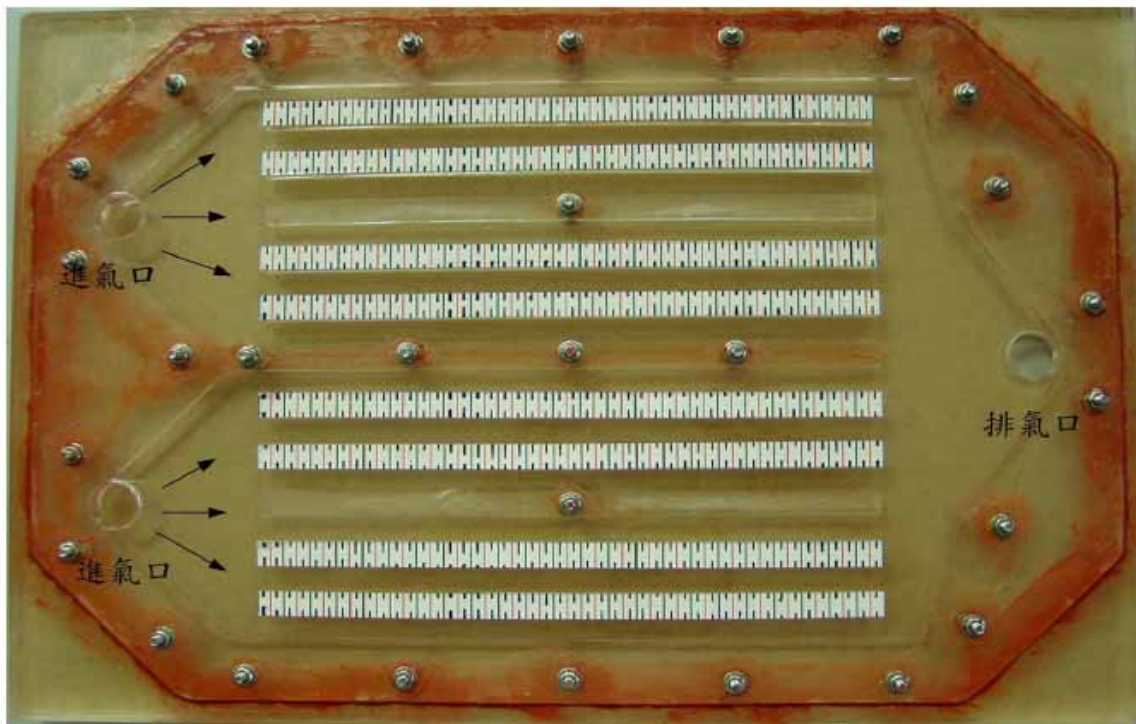


圖2.7、Case D; 具雙進氣口及單一排氣口的雙極板實體圖與規格示意圖

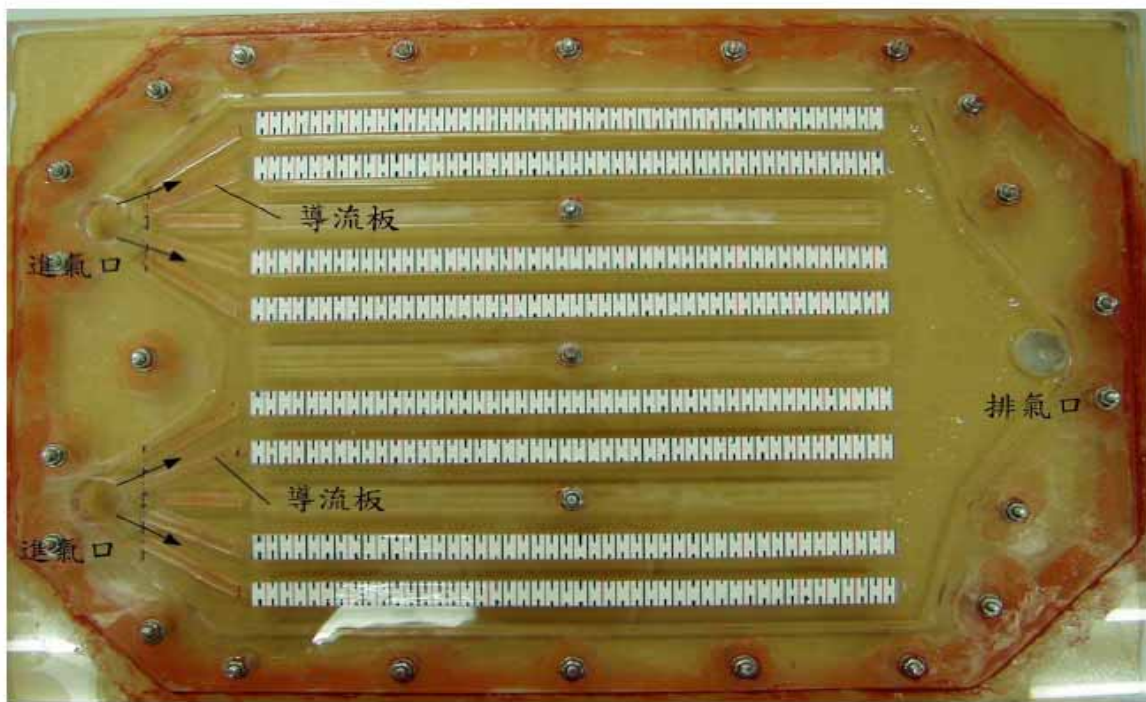


圖2.8、 Case C 加導流板後之實體圖



圖 3.1、Case A 雙極板在 $Re = 320$ 時，其流場分佈情形。

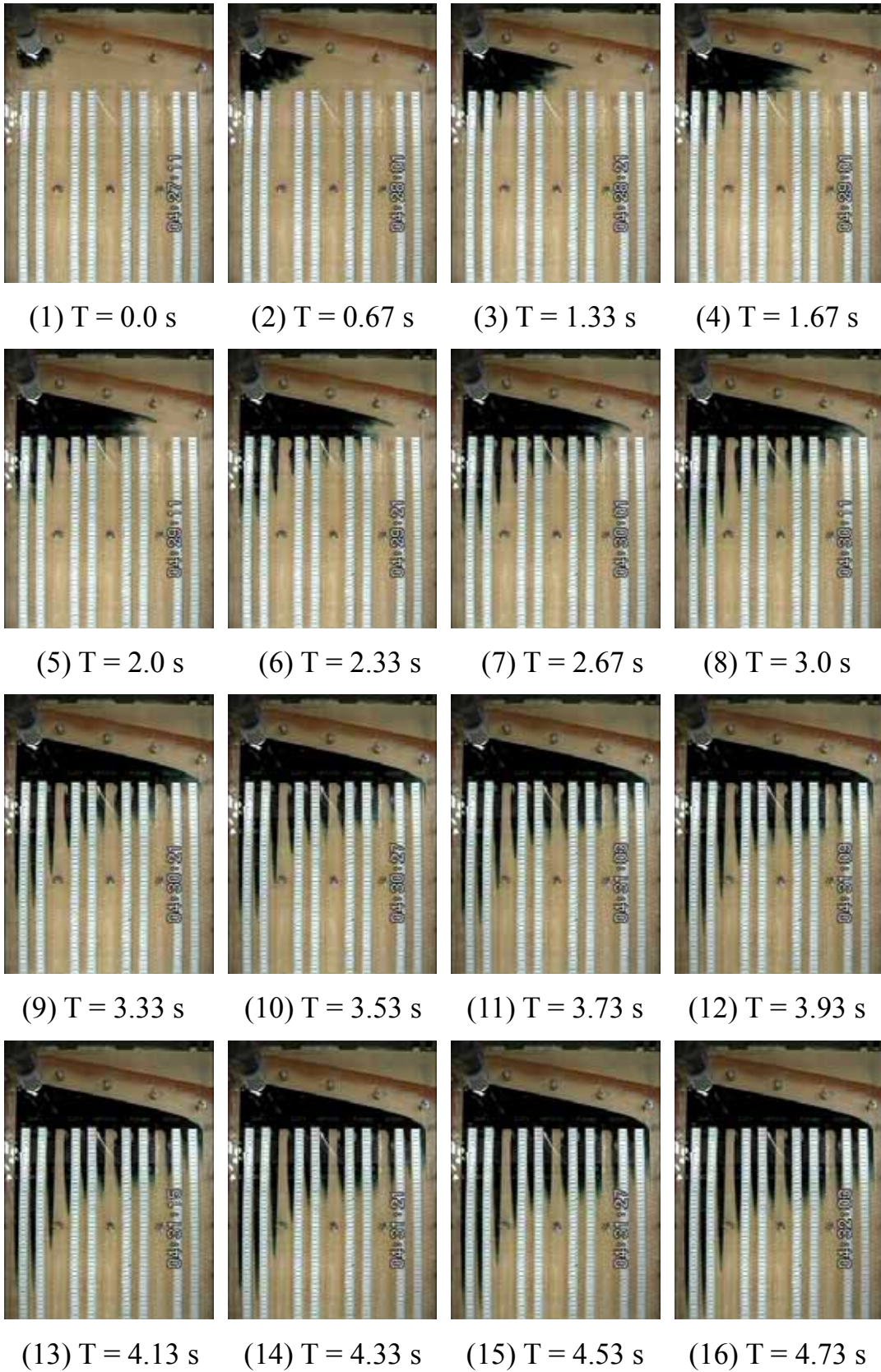


圖 3.2、Case A 雙極板在 $Re = 174$ 時，其流場分佈情形。



圖 3.3、Case A 雙極板在 $Re = 118$ 時，其流場分佈情形。

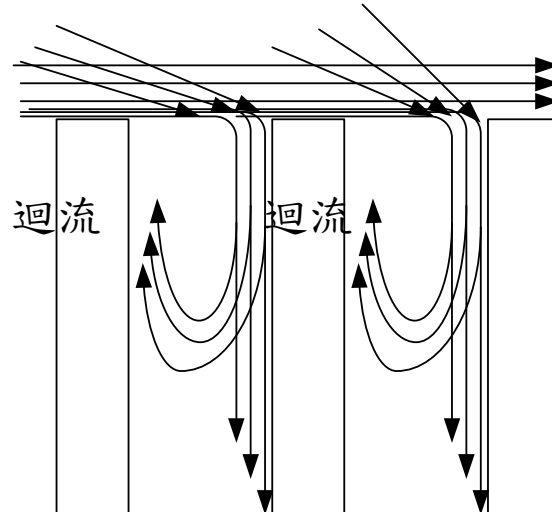


圖3.4、在Case A雙極板發生短暫迴流現象示意圖。左圖為圖10(6)放大的影像；右圖中長方形為Ribs。

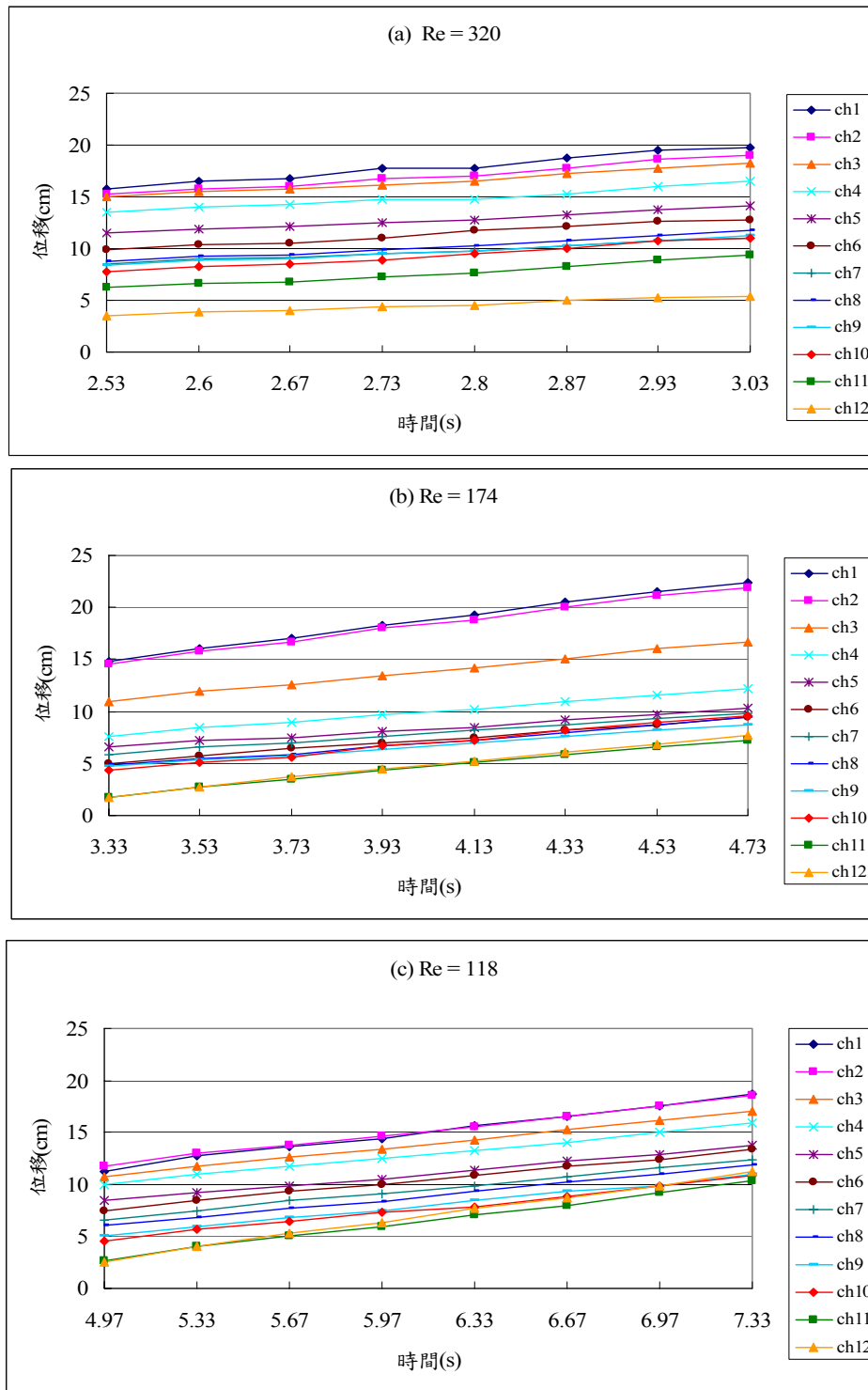


圖 3.5、Case A 各流道速度曲線隨時間之位移關係圖。

(a) $Re = 320$; (b) $Re = 174$; (c) $Re = 118$ 。

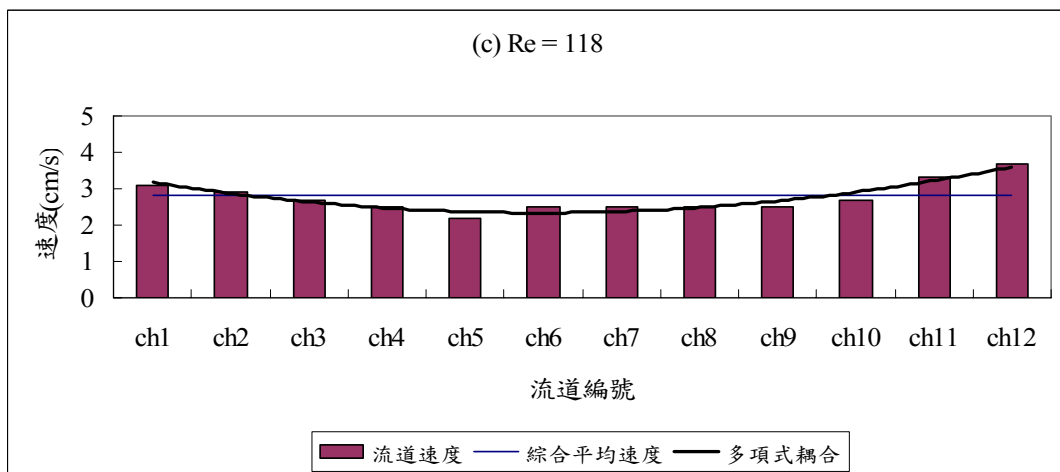
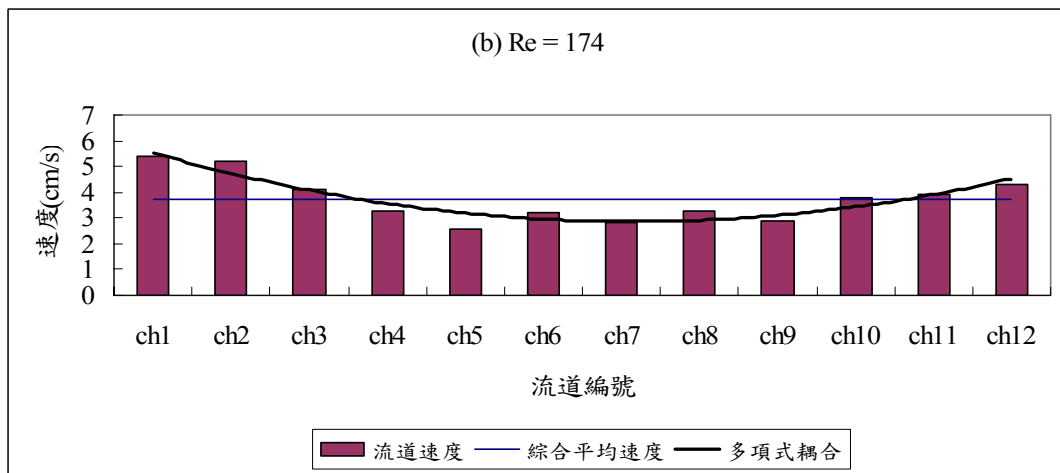
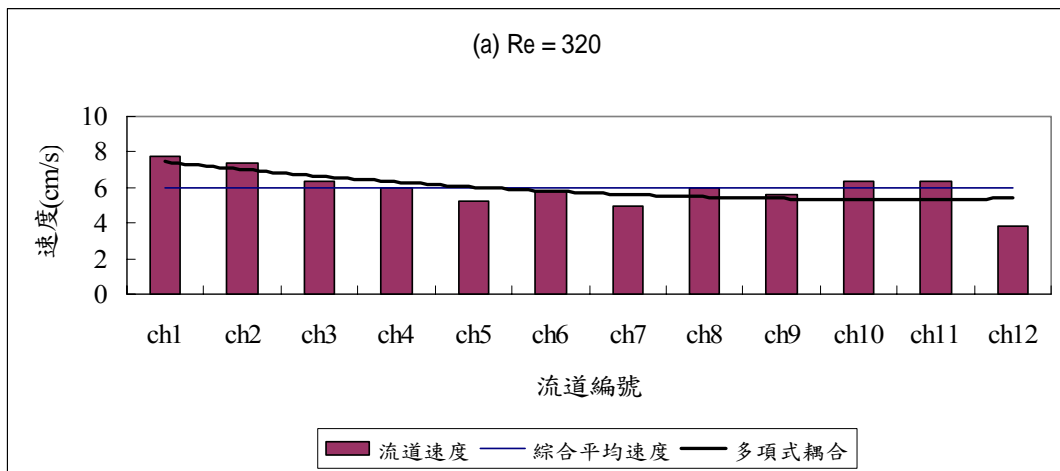


圖 3.6、Case A 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

(a) Re = 320 ; (b) Re = 174 ; (c) Re = 118 。

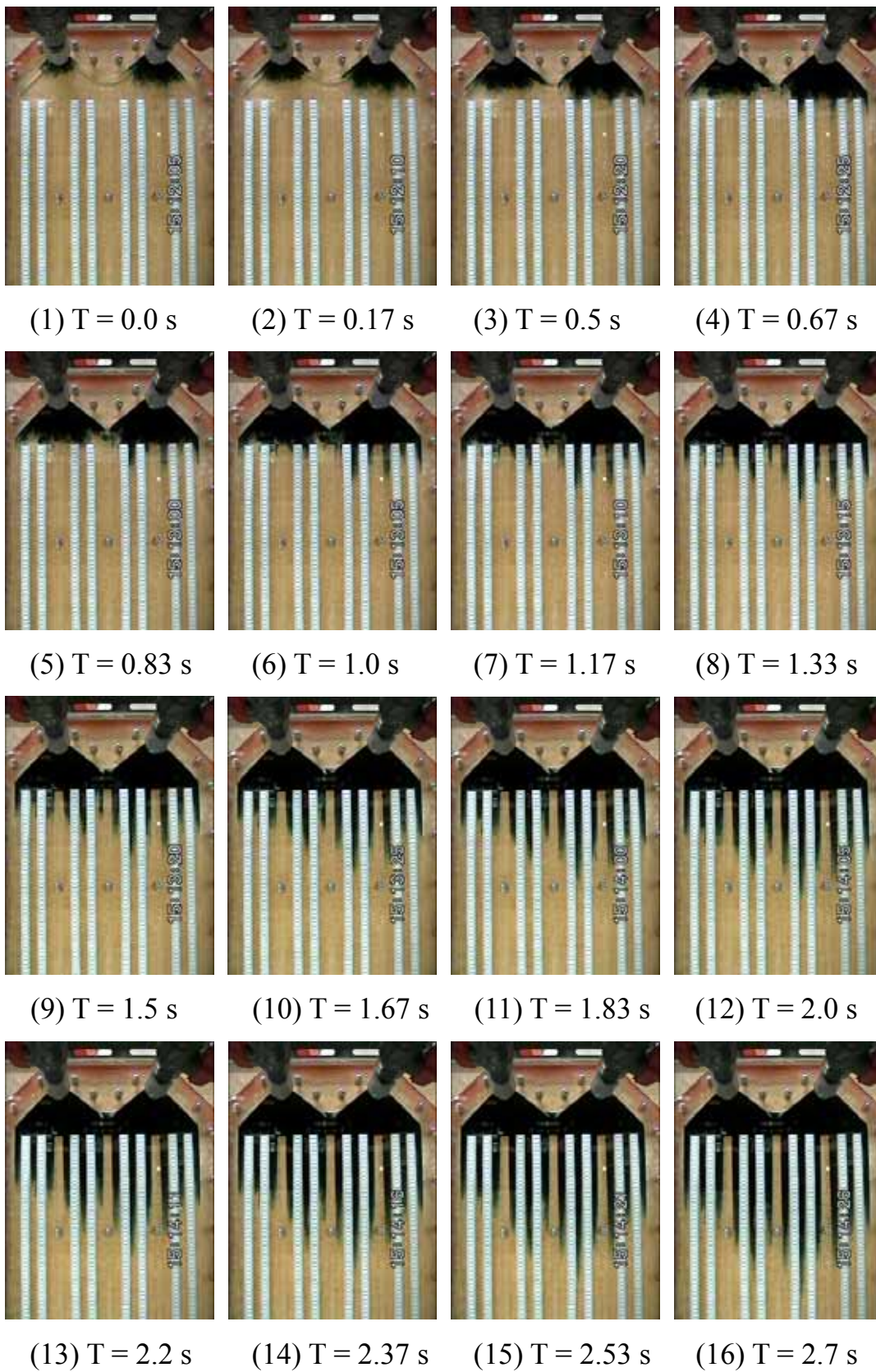


圖 3.7、Case B 雙極板在 $Re = 319$ 時，其流場分佈情形。

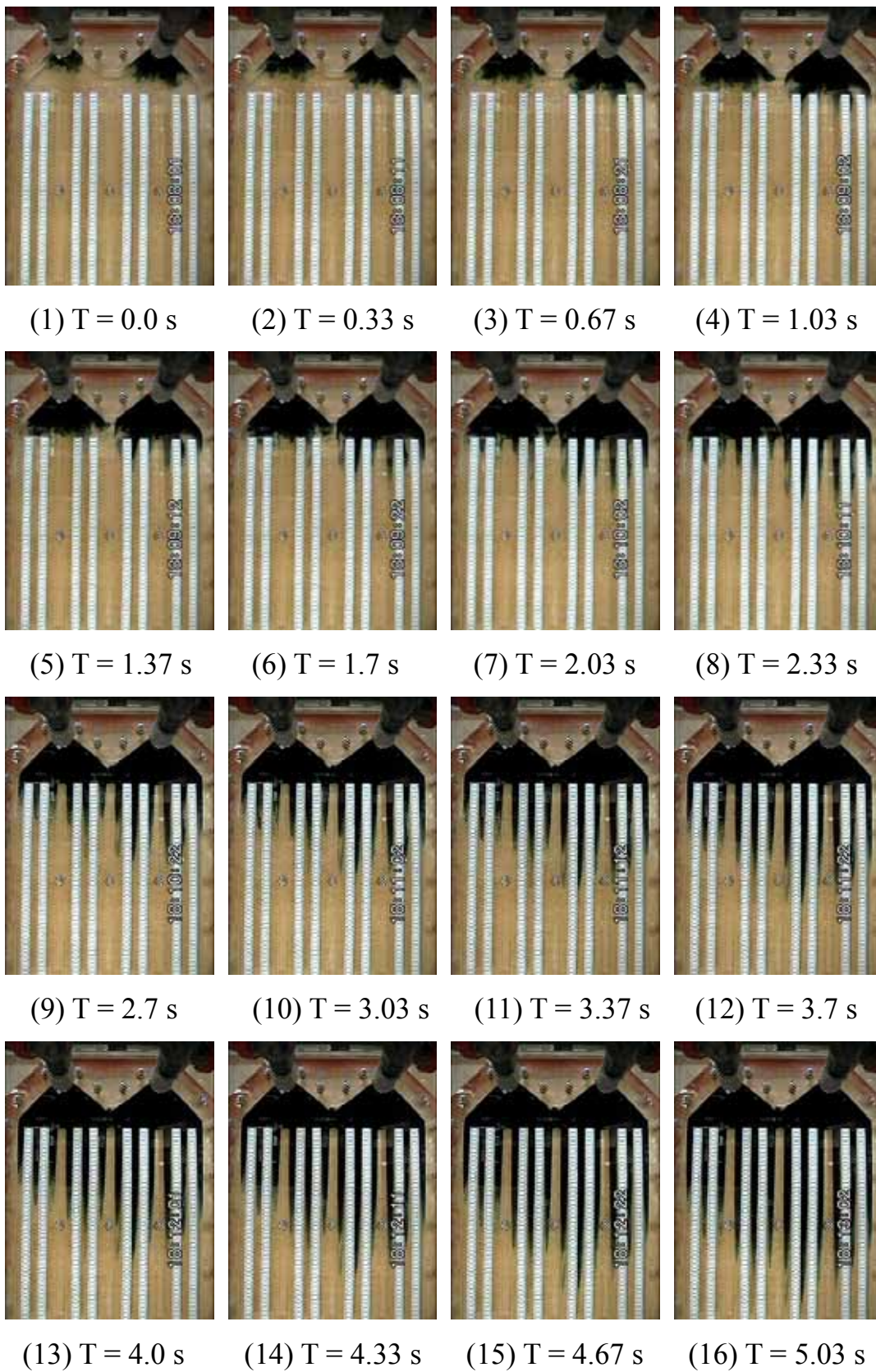


圖 3.8、Case B 雙極板在 $Re = 173$ 時，其流場分佈情形。

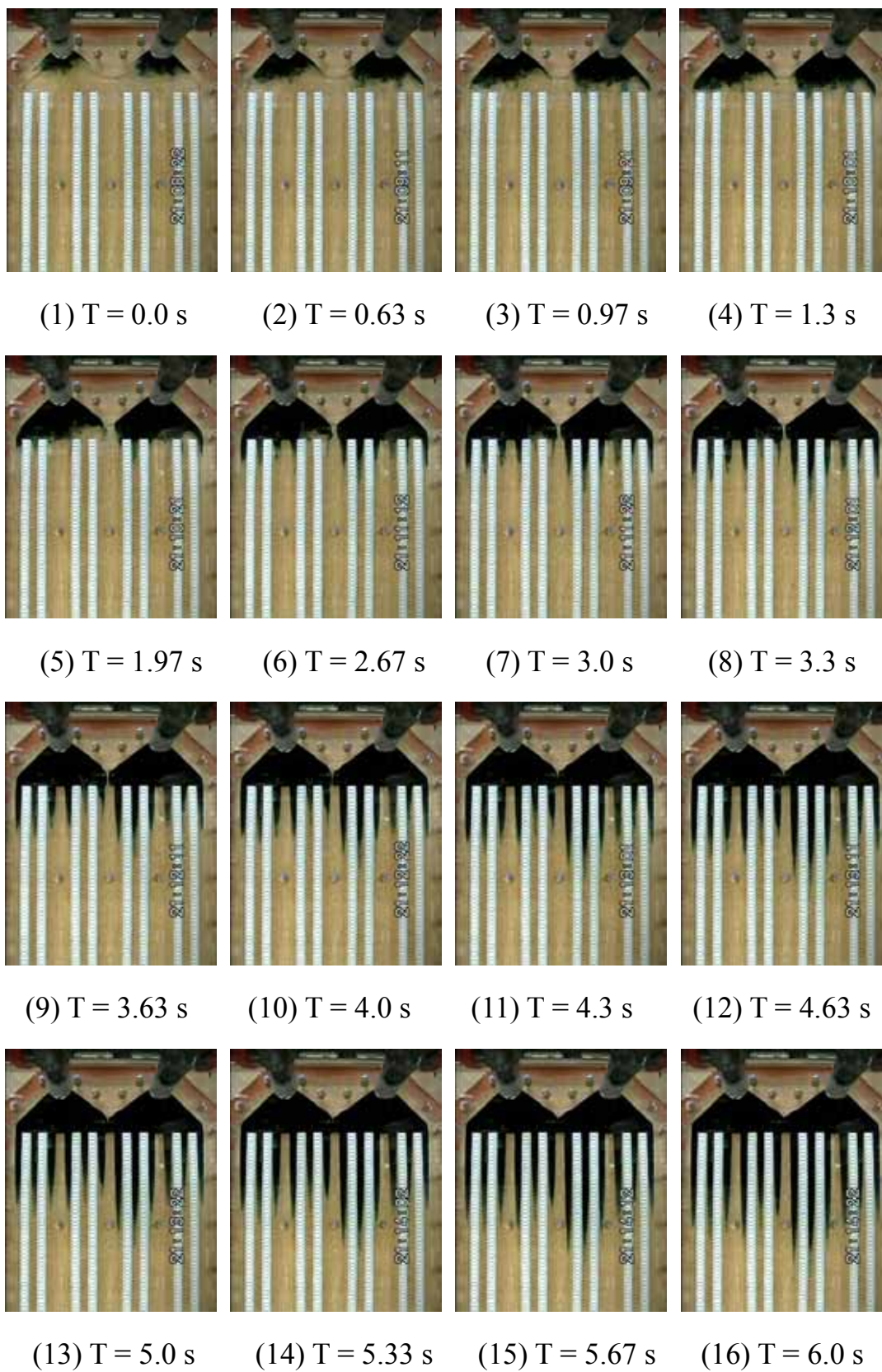


圖 3.9、Case B 雙極板在 $Re = 118$ 時，其流場分佈情形。

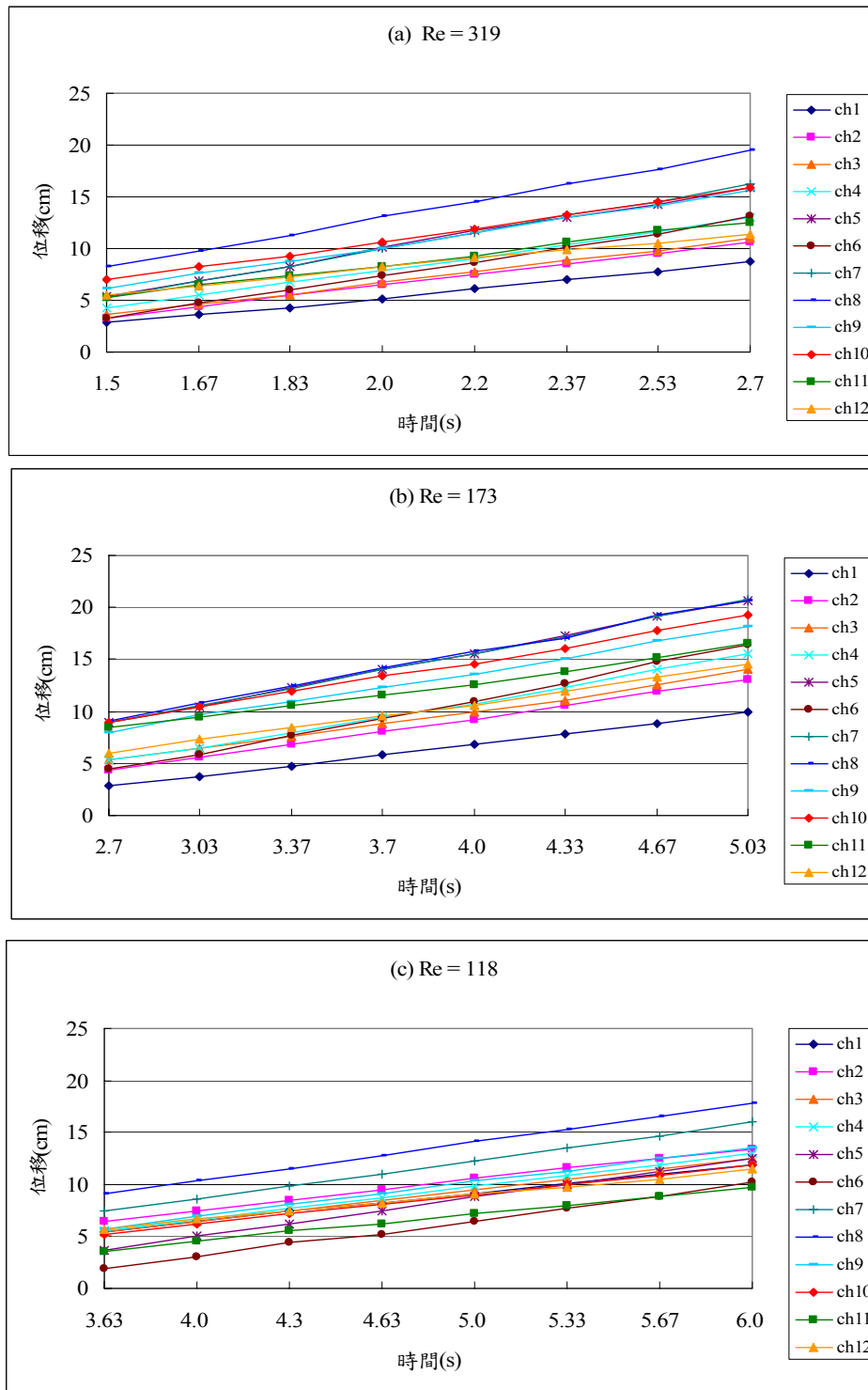


圖 3.10、Case B 各流道速度曲線隨時間之位移關係圖。

(a) $Re = 319$; (b) $Re = 173$; (c) $Re = 118$ 。

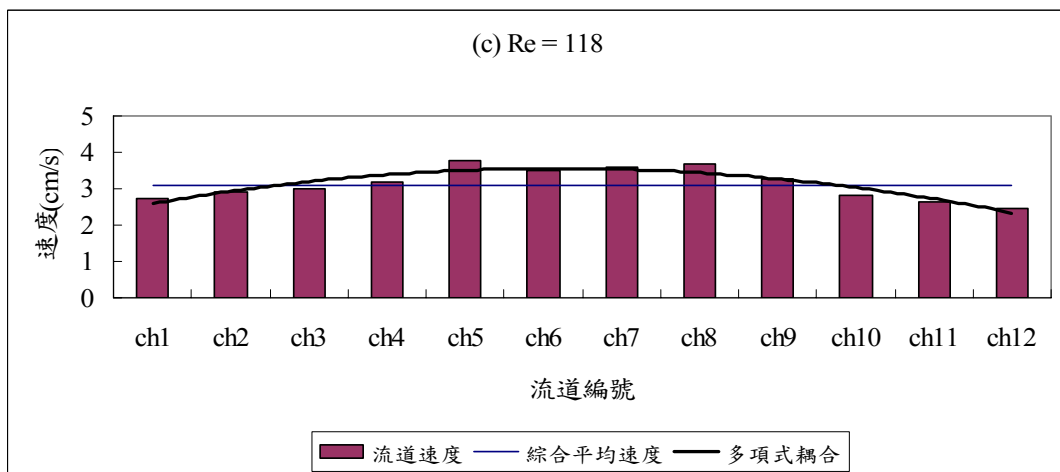
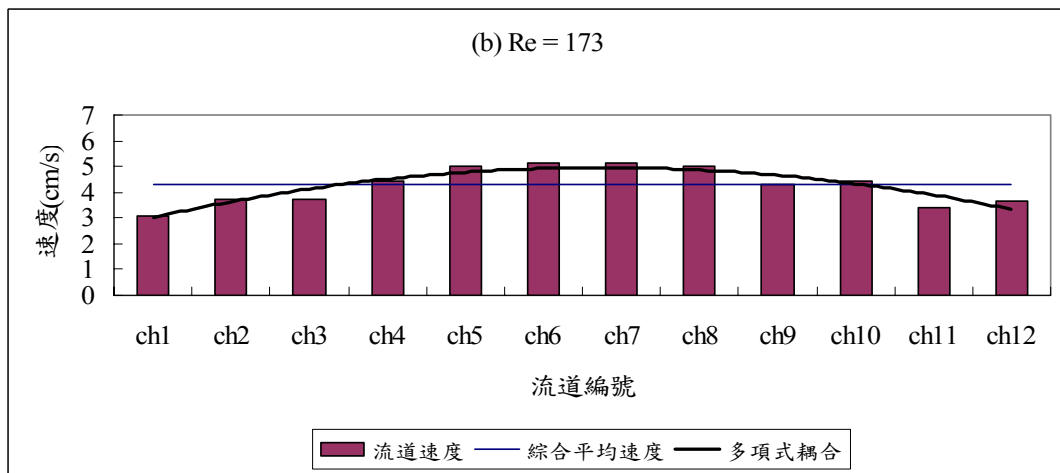
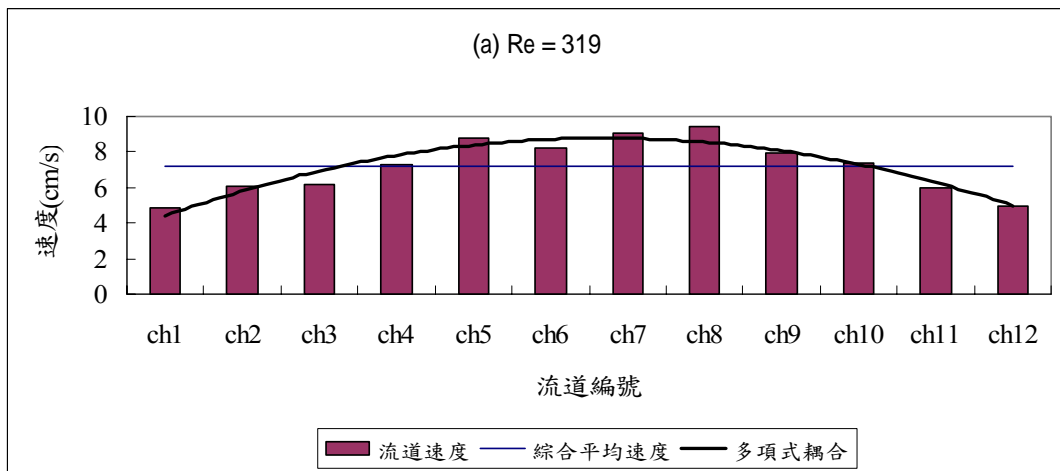


圖 3.11、Case B 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

(a) $Re = 319$; (b) $Re = 173$; (c) $Re = 118$ 。

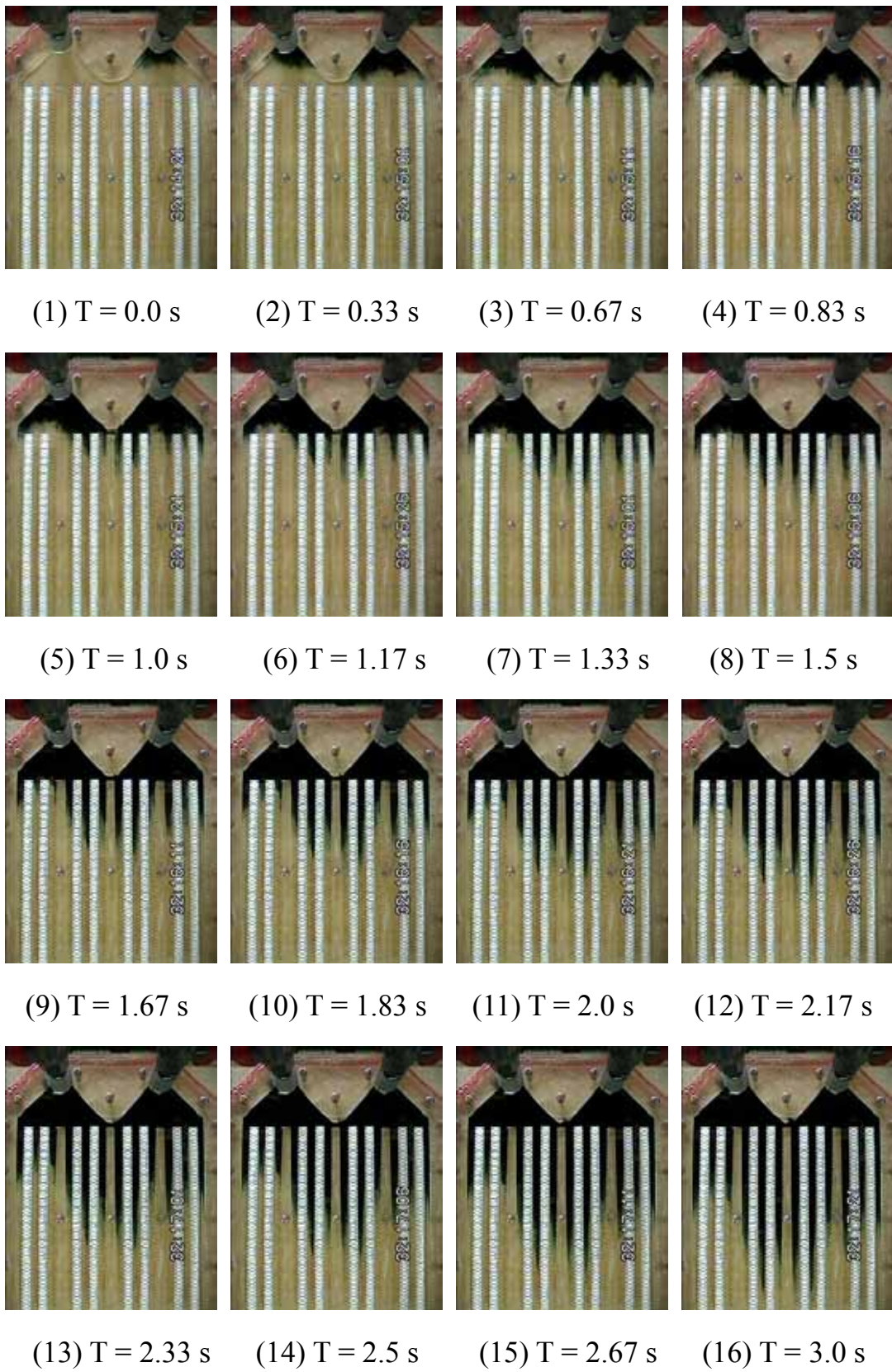


圖 3.12、Case C 雙極板在 $Re = 314$ 時，其流場分佈情形。

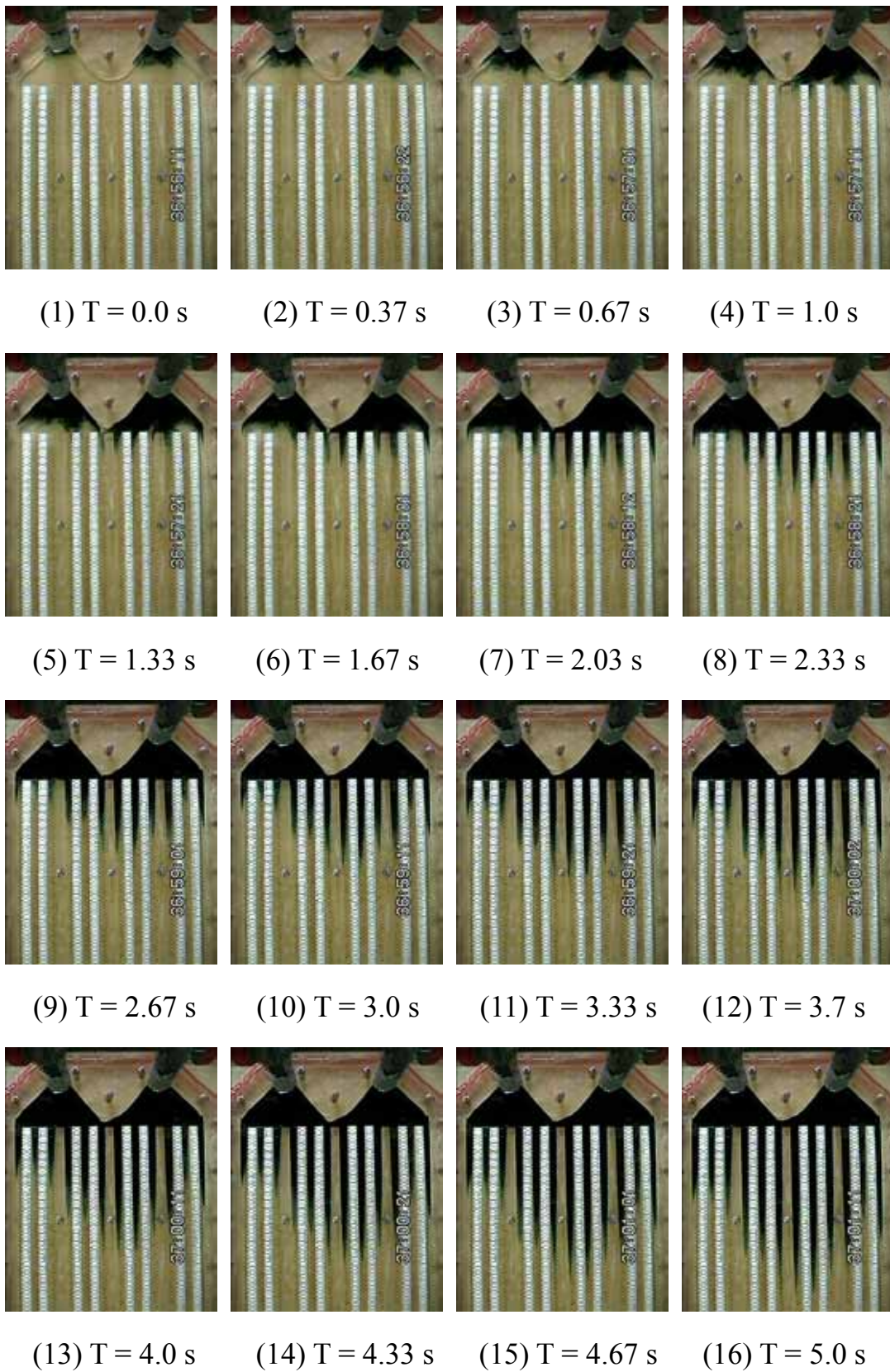


圖 3.13、Case C 雙極板在 $Re = 173$ 時，其流場分佈情形。

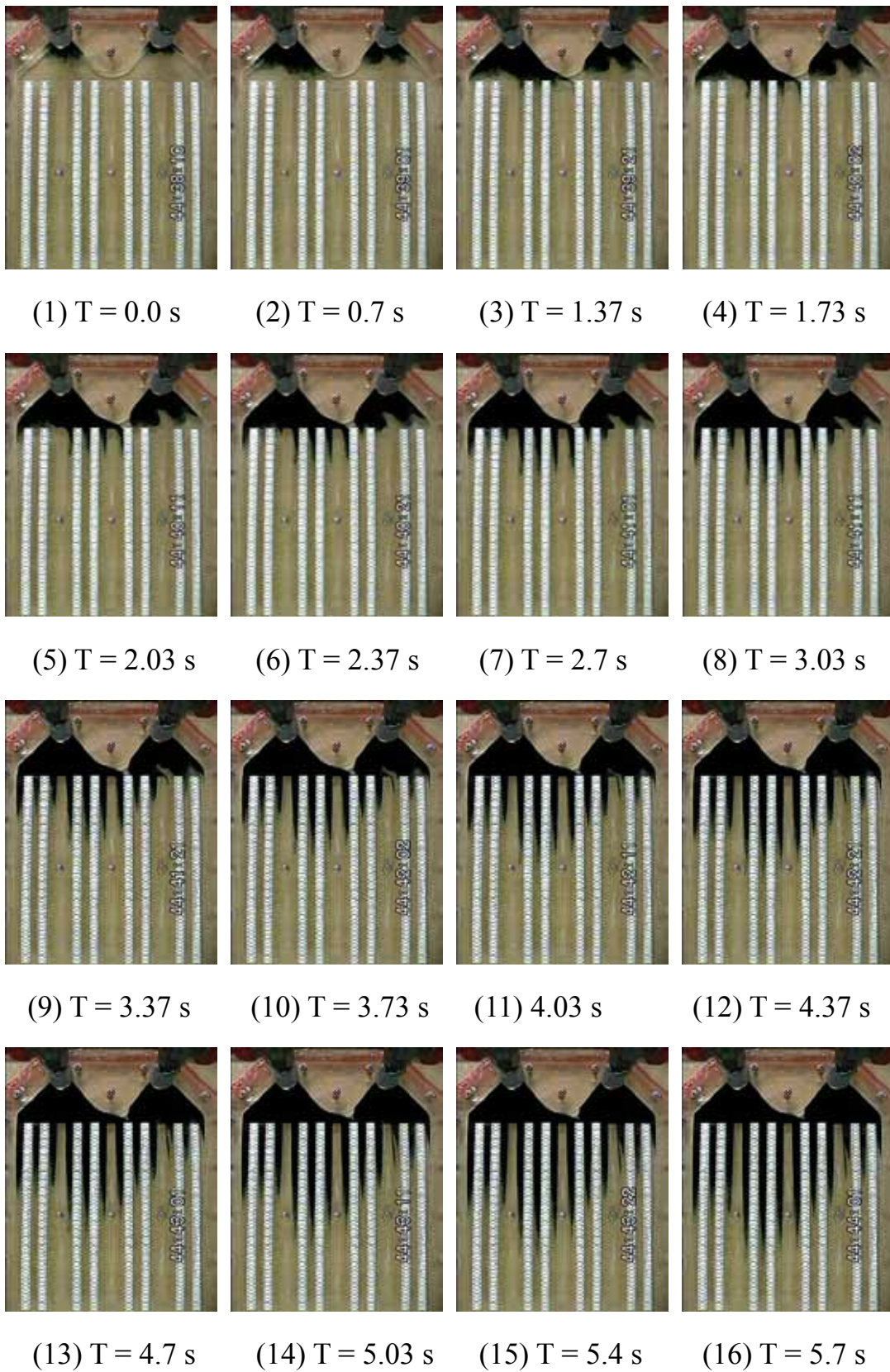


圖 3.14、Case C 雙極板在 $Re = 118$ 時，其流場分佈情形。

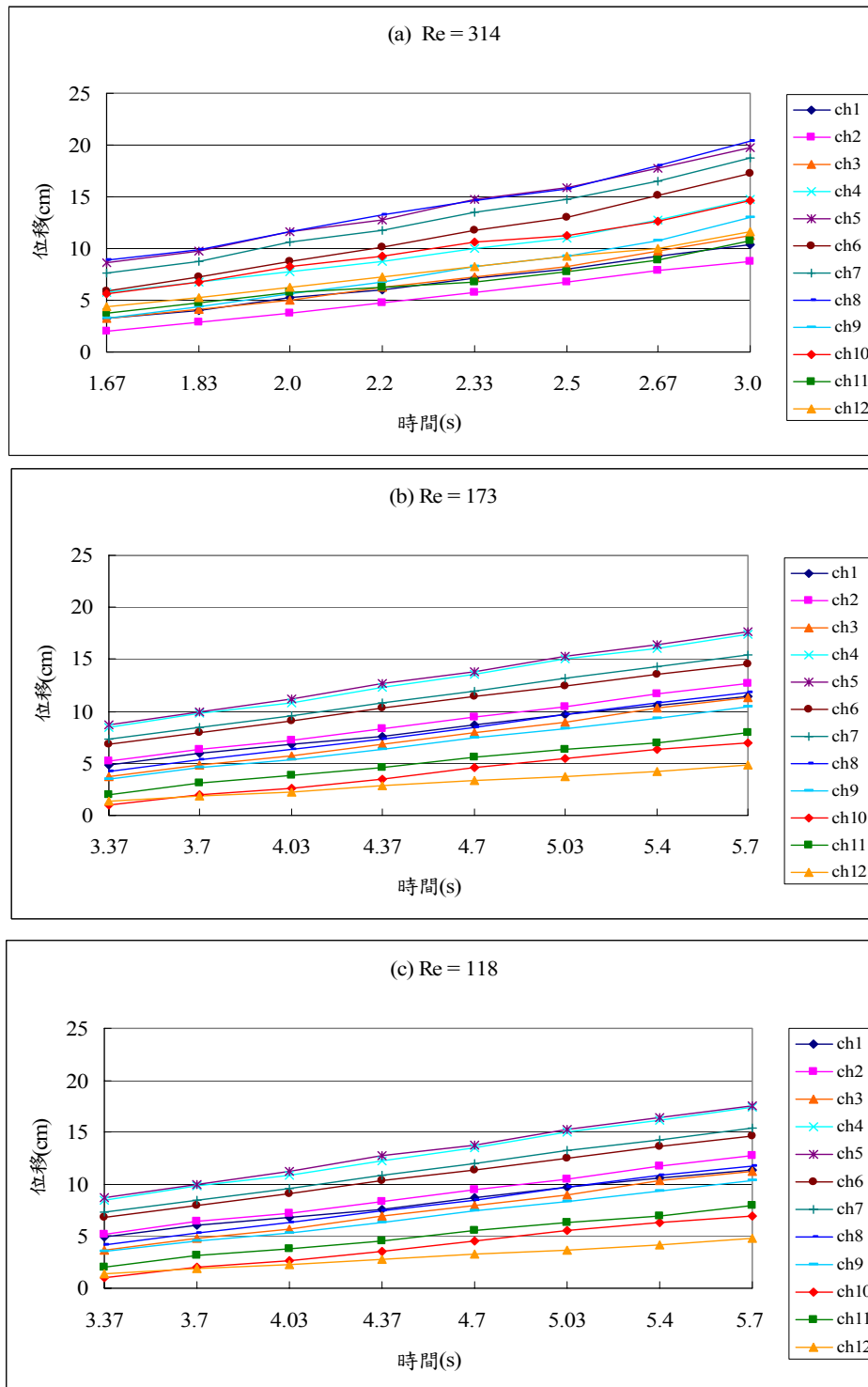


圖 3.15、Case C 各流道速度曲線隨時間之位移關係圖。

(a) $Re = 314$; (b) $Re = 173$; (c) $Re = 118$ 。

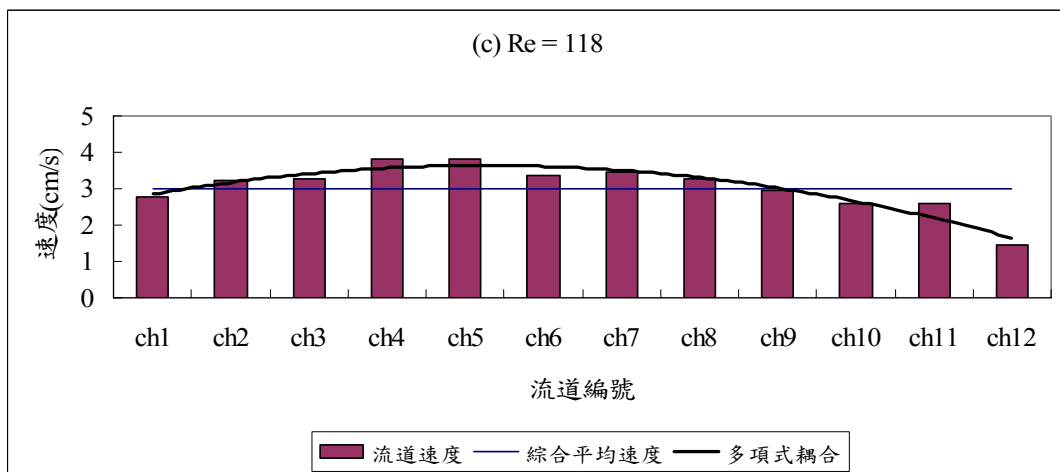
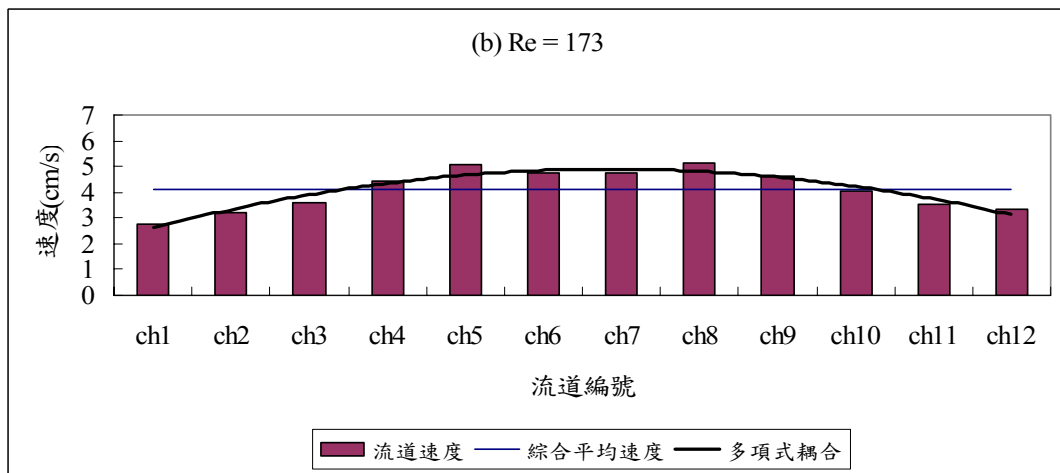
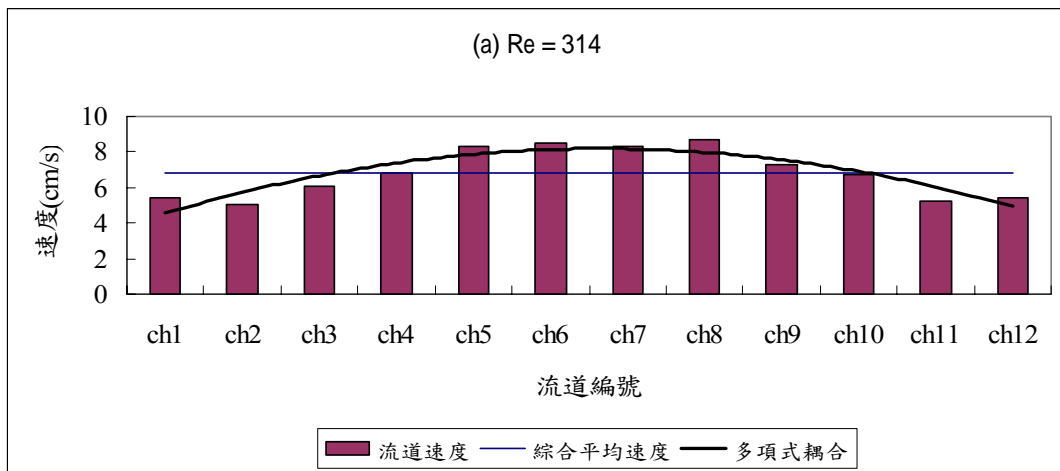


圖 3.16、Case C 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

(a) $Re = 314$; (b) $Re = 173$; (c) $Re = 118$ 。

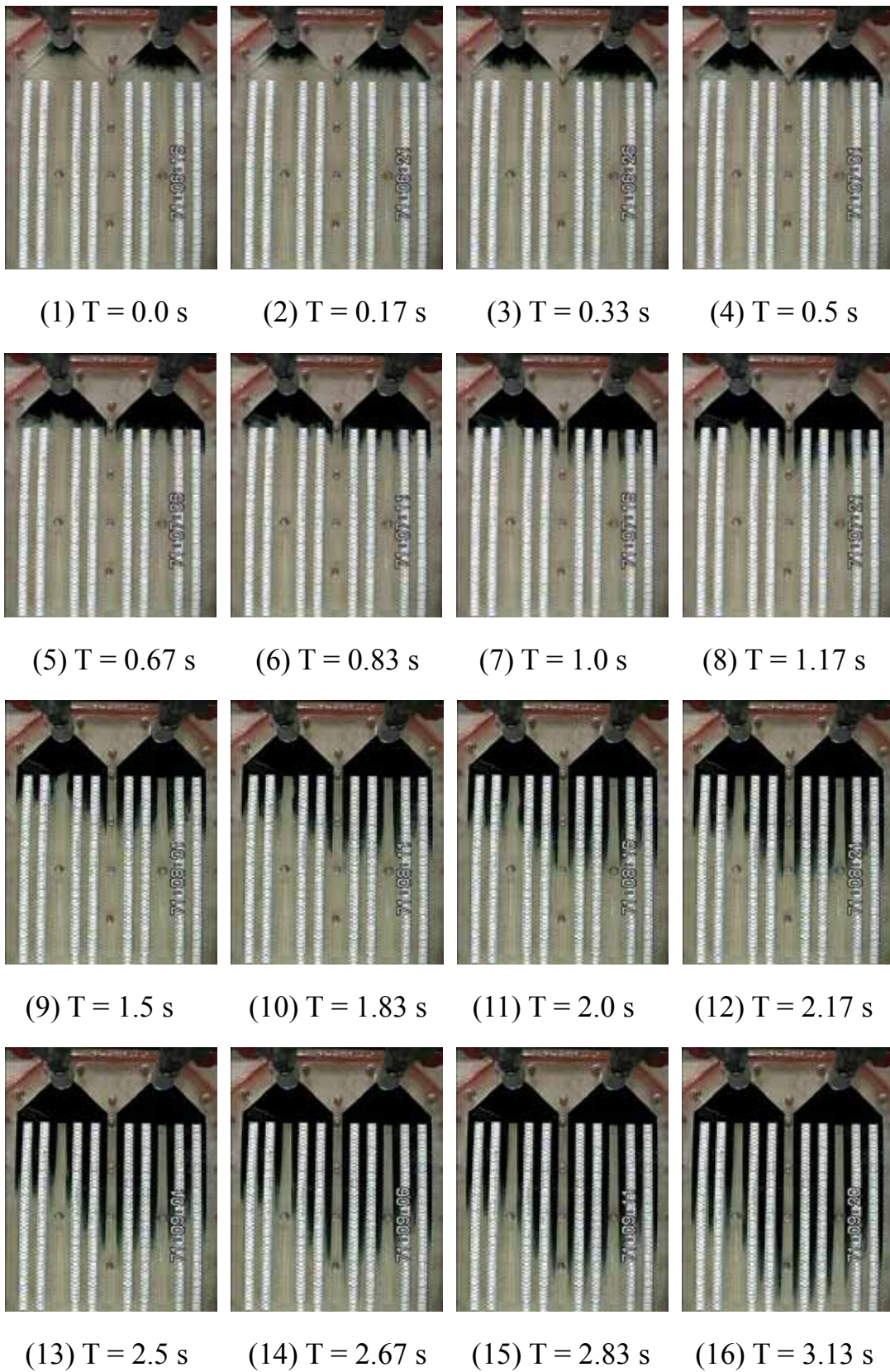


圖 3.17、Case D 雙極板在 $Re = 317$ 時，其流場分佈情形。

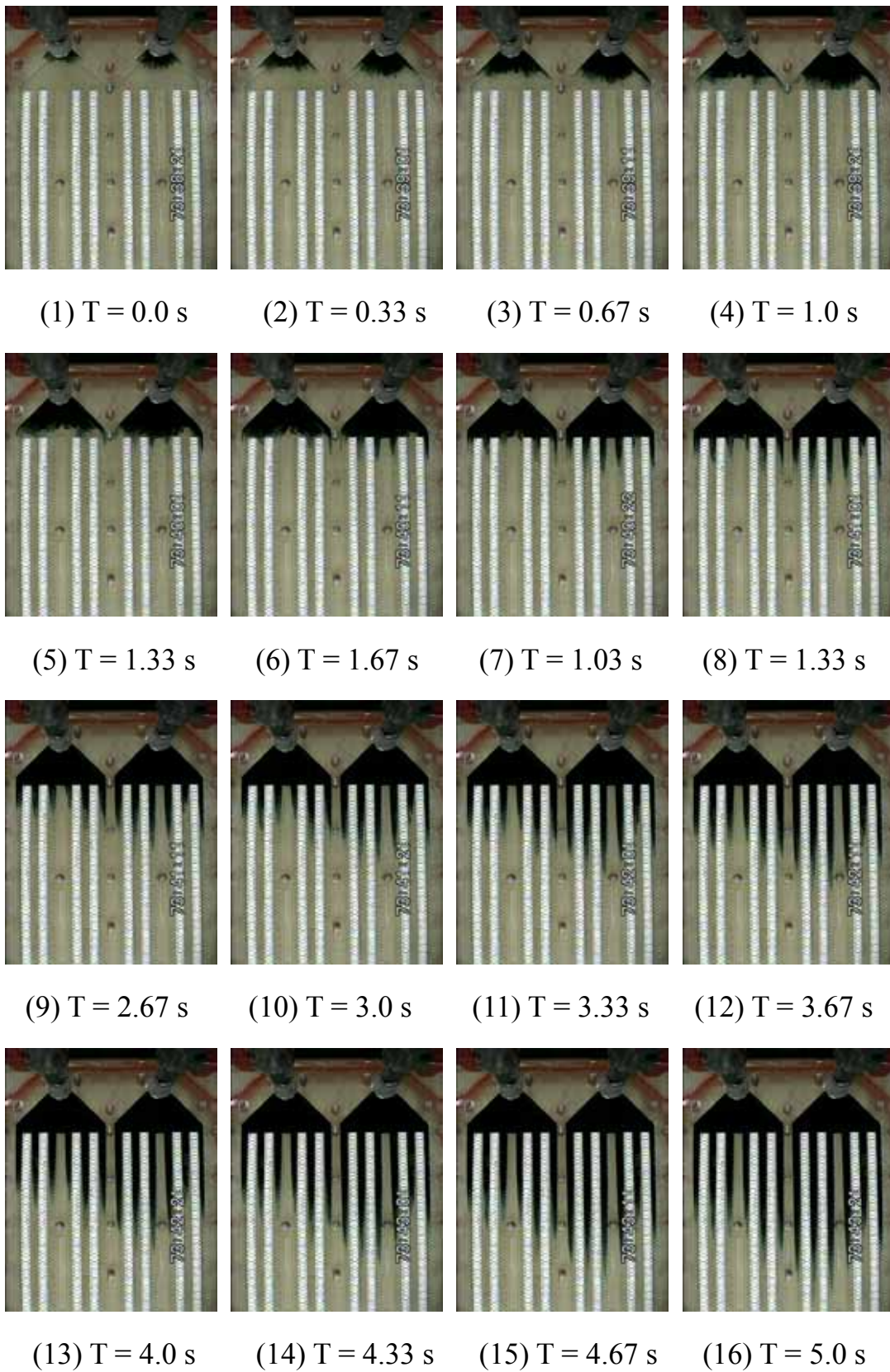


圖 3.18、Case D 雙極板在 $Re = 174$ 時，其流場分佈情形。

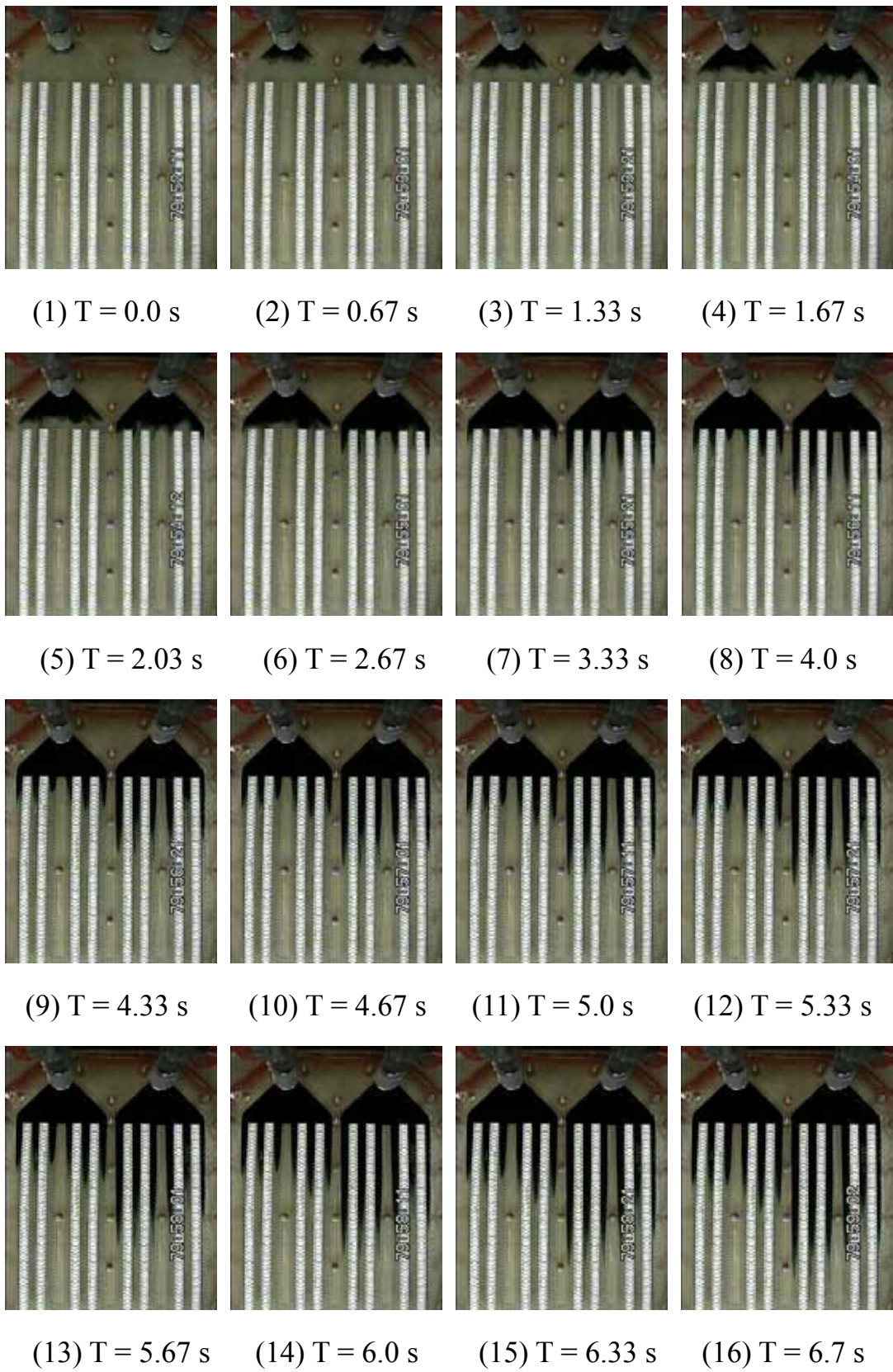


圖 3.19、Case D 雙極板在 $Re = 118$ 時，其流場分佈情形。

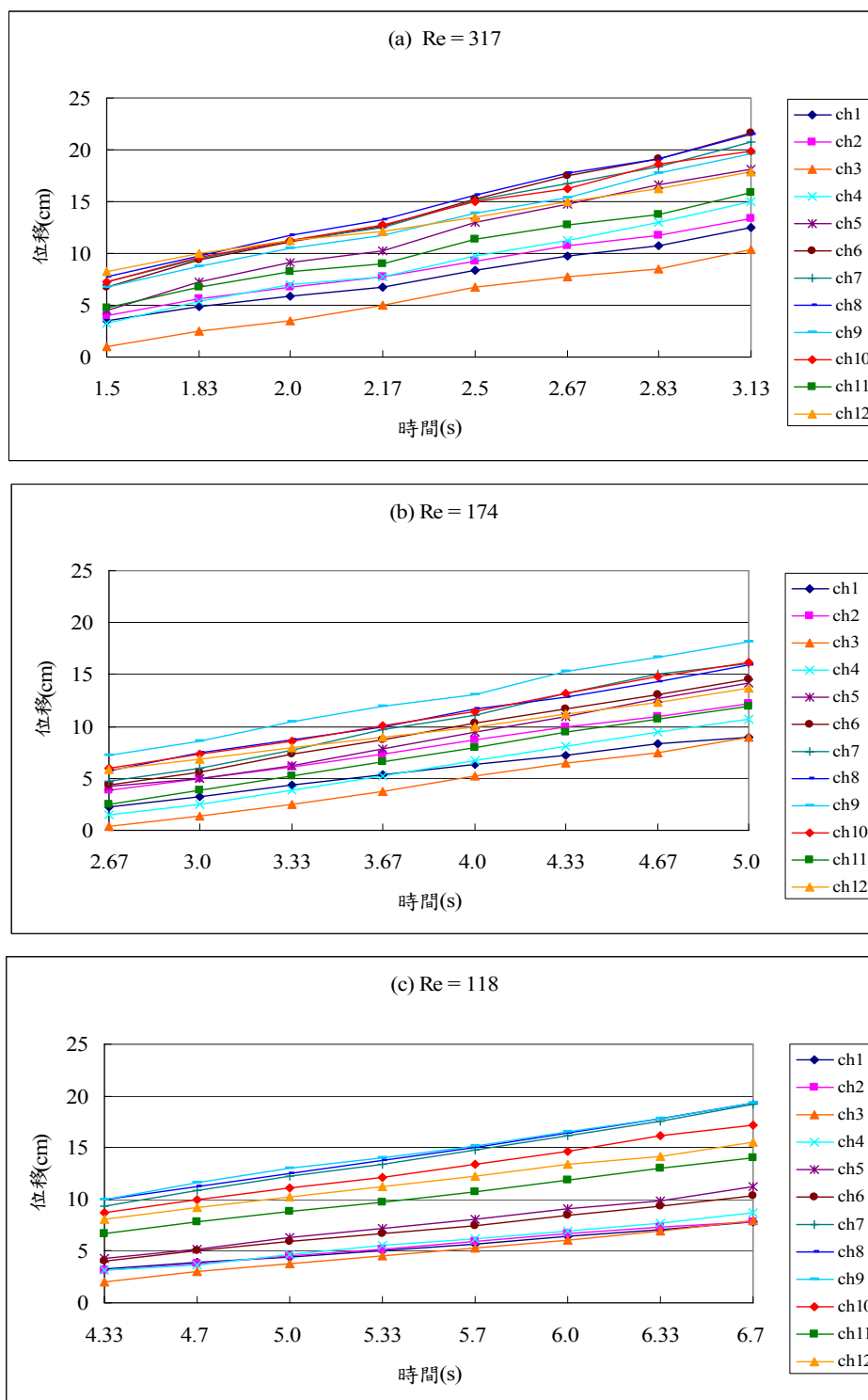


圖 3.20、Case D 各流道速度曲線隨時間之位移關係圖。

(a) $Re = 317$; (b) $Re = 174$; (c) $Re = 118$ 。

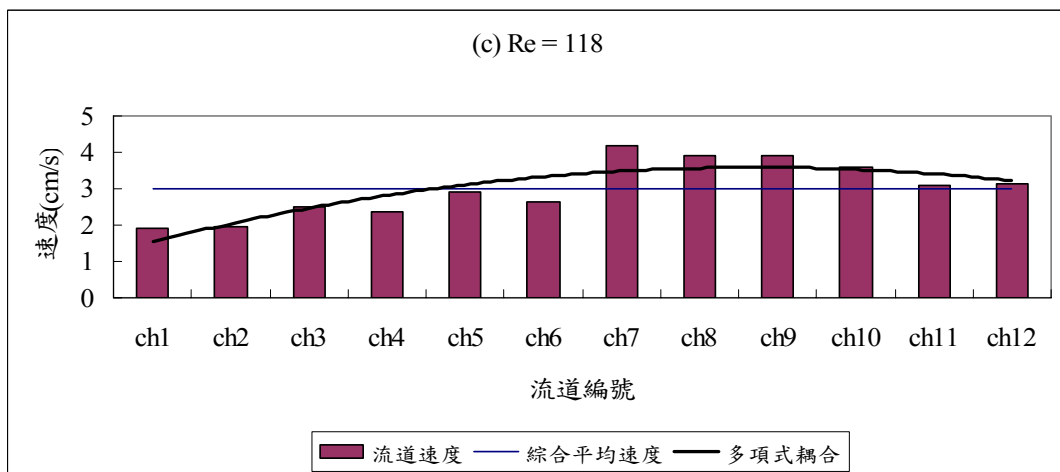
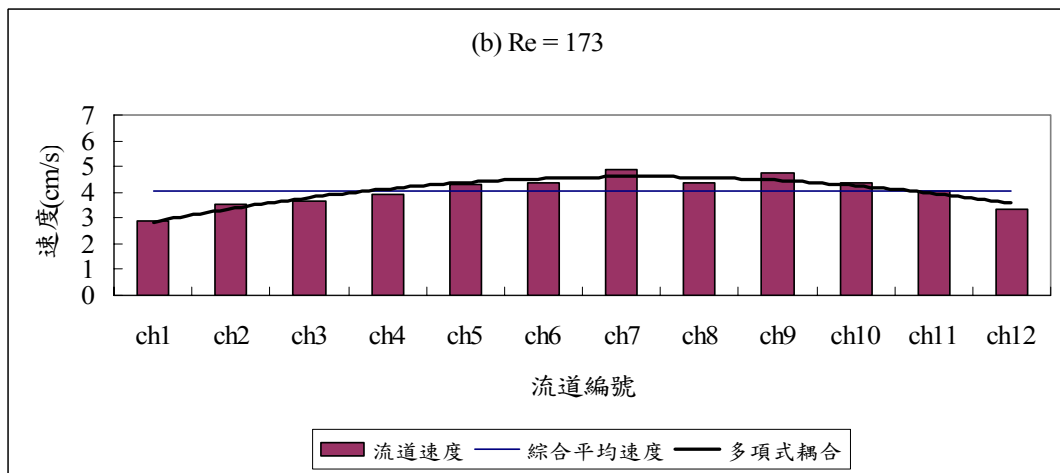
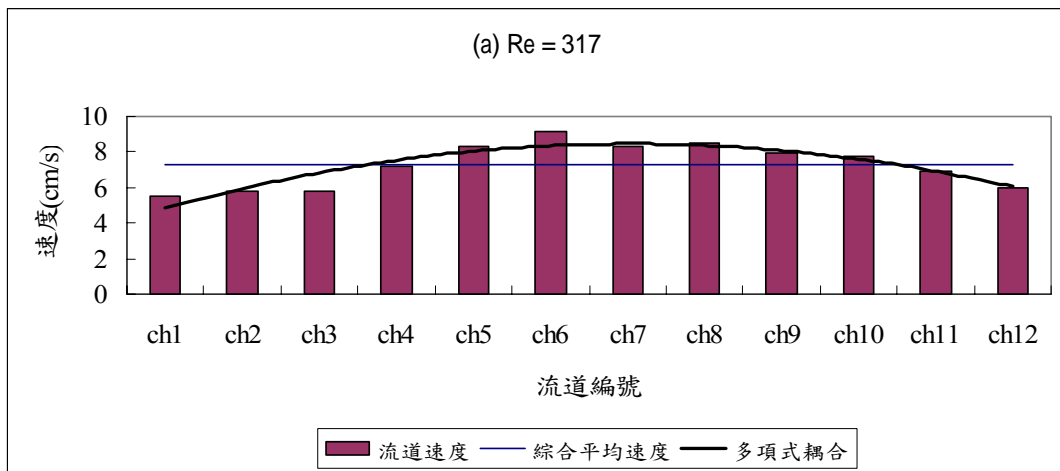


圖 3.21、Case D 各流道速度與綜合平均速度關係圖。

(a) $Re = 314$; (b) $Re = 173$; (c) $Re = 118$ 。

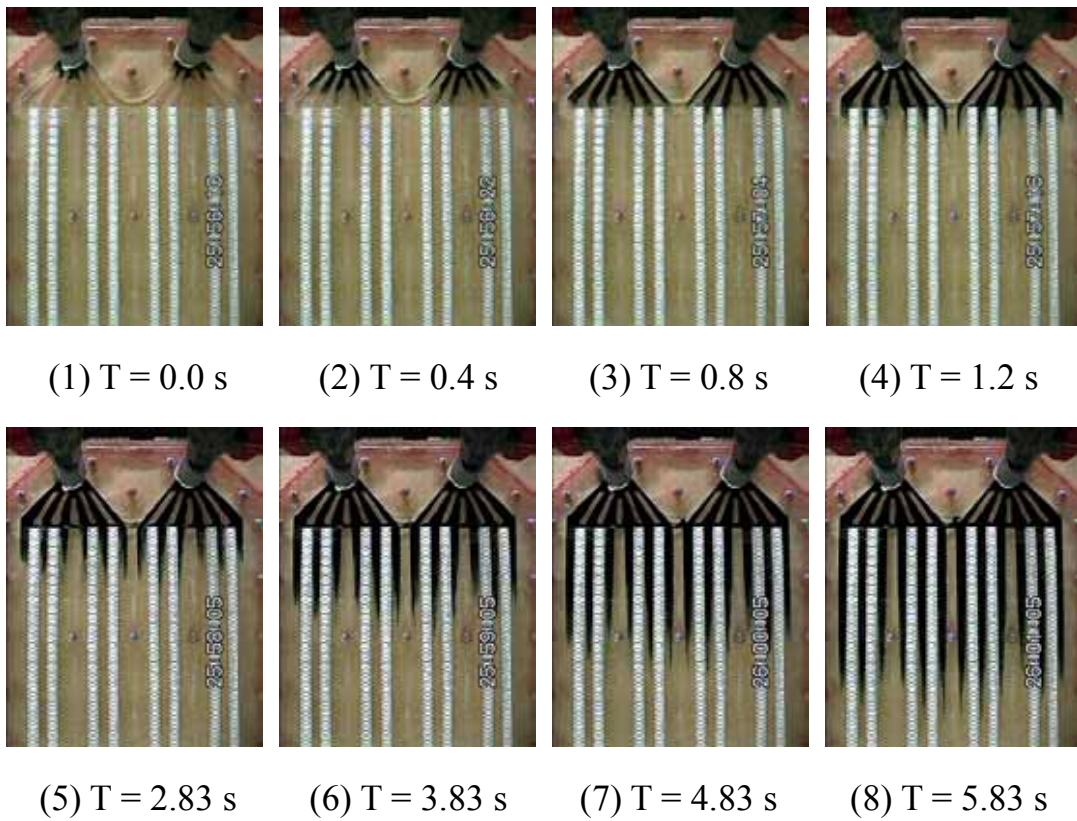


圖 3.22、Case C 雙極板加入導流板後，在 $Re = 174$ 時，其流場分佈情形。

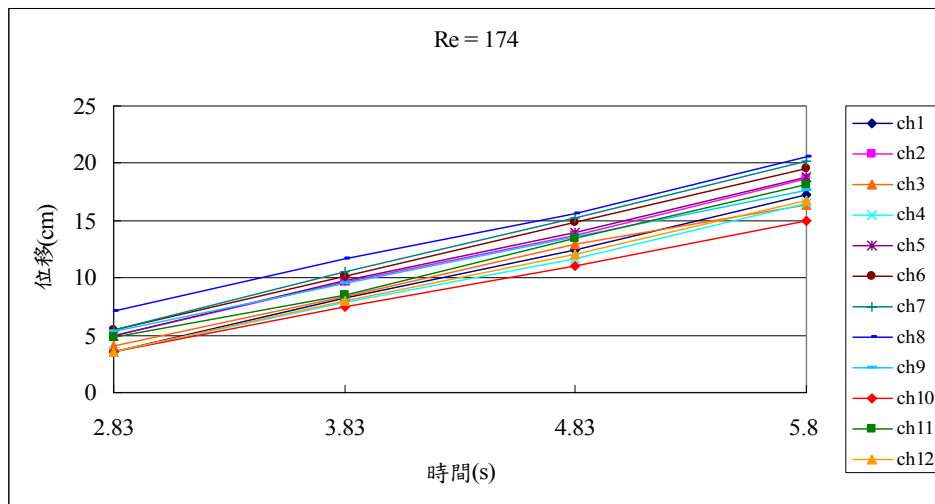


圖 3.23、Case C 雙極板加入導流板後，在 $Re = 174$ 時，各流道速度曲線隨時間之位移關係圖。

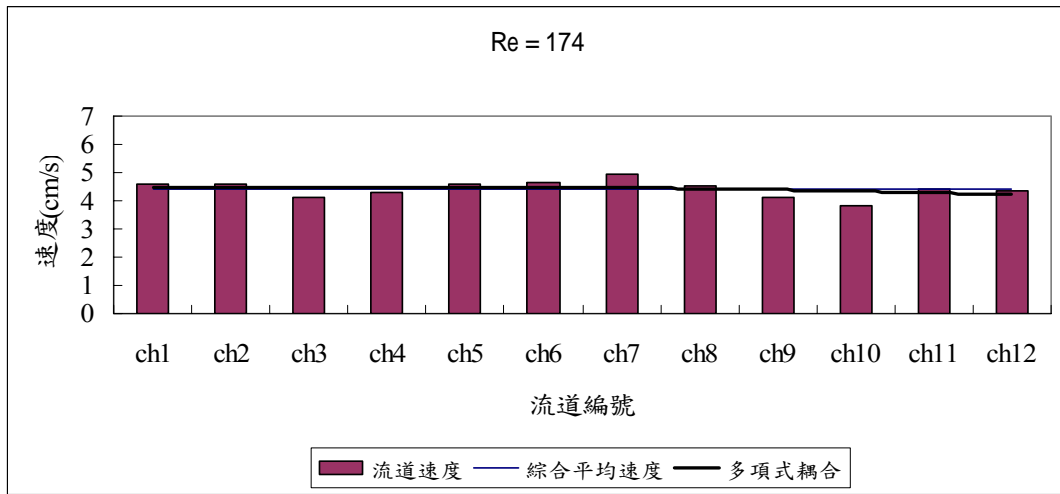


圖 3.24、Case C 雙極板加入導流板後，在 $Re = 174$ 時，各流道速度與綜合平均速度關係圖。