



國立中山大學 機械與機電工程學系

碩士論文

數值模擬及微粒子影像速度儀於微混合器效能分析之應用

Mixing Performance Evaluation of a Micromixer Utilizing CFD and
micro PIV system

研究生：蔡明峰 撰

指導教授：游明輝、林哲信 博士

中華民國 94 年 7 月

中文摘要

本文以數值模擬及實驗操作探討 T 型微流體混合器中不同阻塊設計對其操作效能之影響，論文首先使用商業軟體 CFD-ACE 模擬流體，以 Navier-Stokes 統御方程式為基礎，建立該混合器模型，以分析不同 Re 數之操作條件下的混合效率，及在該操作條件下所產生的壓力降，並進而獲得微流道內阻塊之最佳設計參數，以設計出一低壓力降高混合效率之高效能微流體混合器。研究中並使用微機電製程技術，於低成本之鈉玻璃中製作該微混合器晶片，並利用自行架設之微粒子影像測速儀（Micro-Particle Image Velocimetry, Micro-PIV）及雷射誘導螢光系統（Laser-induced-fluorescence system, LIF system）對該混合器進行實驗測試。本研究採用直徑為 $3.3\ \mu\text{m}$ 之紅色螢光塑膠球進行 Micro-PIV 測試，以求得樣本流體於微流道中之實際流線。並以 LIF 系統所擷取之影像，利用影像分析技術以評估該混合器之混合效能。結果發現，流體於微流道流動時，將因傾斜不同角度之阻塊作用，而產生橫向對流效應，並因此增加流體接觸面積，進而提高其混合效率。實驗及模擬結果顯示，該微流體混器於 $\text{Re}=0.75$ 時，可以提供高達 95% 以上之混合效率，且其壓力降僅有 1426 Pa。研究中並發現，當微混合器中之阻塊傾斜角度愈大、管道愈深及阻塊

寬度愈窄的設計參數下，其壓力降愈小，且不明顯影響該混合器之混合效率。本研究之成果，不僅發展出一低成本且高效能之 Micro-PIV 系統，其分析結果亦可以做為未來被動式微混合器設計之參考。

關鍵字：微混合器、微粒子影像測速儀、雷射誘導螢光、計算流體力學、混合效率。



ABSTRACT

This study proposed a novel design of the passive micromixer which employed several quadrilateral shaped blocks in the micro channel to enhance mixing. Both numerical and experimental investigations have been carry out. Commercial software CFD-ACE was used to simulate the flows. The simulation results showed great agreement with the measured results, implying that Navier–Stokes’ equations still effectively governs the micro-scope flows in this scale. It is effective to enhance mixing efficiency over wide flow rate ranges. Mixing performance was characterized by Laser-induced-fluorescence system (LIF system) to quantity the concentration distribution in the micro channel .

In addition, Microscopic flow visualization was also setup to visualize the flow field in the micro mixer. Micro-particle image velocimetry (Micro-PIV) was used to measure the flow fields in microchannel filled with deionized water (DI water) . The system utilizes an epifluorescent microscope, 3.3 μm diameter seed particles, and an high speed CCD camera to record particle-image fields. The vector fields are analyzed using a double-frame cross-correlation algorithm. The stochastic influence of Brownian motion plays

a significant role in the accuracy of instantaneous velocity measurements.

Keywords : Micromixer, micro-particle image velocimetry, Laser induced fluorescence, computational fluid dynamics, particle.

目 錄

中文摘要.....	i
ABSTRACT.....	iii
目 錄.....	v
圖目錄.....	viii
符號說明.....	xiii
名詞介紹.....	xiii
第 1 章 諸論.....	1
1.1 微機電系統.....	1
1.2 研究背景及動機.....	1
1.3 擴散過程及混沌流場.....	3
1.4 文獻回顧.....	5
1.4.1 被動式混合器 (passive mixer)	5
1.4.2 主動式混合器 (active mixer)	7
1.4.3 微粒子影像測速儀 Micro-PIV SYSTEM.....	8
1.4.4 混合效率指數.....	10
第 2 章 數值方法.....	26
2.1 肯德深數(Knudsen Number)	26

2.2 基本假設及統御方程式.....	27
2.3 模擬軟體簡介.....	29
2.4 模擬步驟.....	30
第 3 章 實驗架設.....	33
3.1 微粒子影像速度儀.....	33
3.1.1 PIV 理論分析	34
3.1.2 實驗步驟.....	36
3.2 螢光粒子.....	36
3.3 模擬晶片設計.....	37
3.4 晶片製造.....	38
3.5 實驗晶片計設.....	40
第 4 章 結果與討論.....	48
4.1 混合結果分析.....	48
4.1.1 實驗結果及數值分析	48
4.2 流場結果分析.....	53
4.2.1 實驗結果及數值分析	53
第 5 章 晶片之影響因子.....	71
5.1 阻塊斜率之影響.....	71
5.2 晶片深度之影響.....	72

5.3 阻塊厚度晶片之影響.....	73
5.4 最佳化晶片.....	73
第 6 章 結論與未來展望.....	84
參考文獻.....	88

圖目錄

圖 1-1 擴散過程。.....	13
圖 1-2 混沌流場示意圖。.....	13
圖 1-3 以上下左右混合概念之被動式混合器[2]。.....	14
圖 1-4 四個注射入口之被動式混合器[3]。.....	14
圖 1-5 由上下二層晶片構成之被動式混合器[4]。.....	15
圖 1-6 內置圓柱之被動式混合器[5]。.....	15
圖 1-7 類 Z 字型混合器幾何圖[6]。.....	16
圖 1-8 由類似菱形阻塊組成的三維微混合器[7]。.....	16
圖 1-9 拓撲混合器幾何結構[8]。.....	17
圖 1-10 三維 L 型微混器幾何圖[9]。.....	17
圖 1-11 三個混合器之比較(a)三維 C 型微混合器幾何圖(b)蜿蜒型混合器(c) 直線型管道[10]。.....	18
圖 1-12 使用雷射在管道中劃出傾斜凹槽(a)傾斜凹槽混合器尺寸(b)(c)斜 凹槽混合器分別在流速 0.06 和 0.81 cm/s 之混合情形(d)傳統 T 型混合 器(e)(f) T 型混合器分別在流速 0.06 和 0.81 cm/s 之混合情形[11]。.....	19
圖 1-13 三種被動式微混合器之上視圖(a)傾斜凹槽混合器(b)鯡魚式溝槽 混合器(c)插入障礙物混合器三者之上視圖[13]。.....	19
圖 1-14 再循環微混合器的單位元件[14]。.....	20
圖 1-15 渦流型混合器的幾何圖[15]。.....	20
圖 1-16 內置電極於混合通道之主動式混合器 (a)(b)為再 5 秒和 50 秒中的 混合情形[16]。.....	21
圖 1-17 利用外加壓力於測管中之主要微混合器 [18]。.....	21
圖 1-18 微混合攪拌器結構圖[19]。.....	22
圖 1-19 利用 Function Generator 產生變動波紋[20]。.....	22
圖 1-20 流體流經圓柱狀況(a)為瞬時流場圖，範圍為 $120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$ ， 圓柱直徑為 $30\ \mu\text{m}$ ，向量總量為 900 個 (b)為平均速度場[22]。.....	23

圖 1-21 為不同聚焦深度情形，(d)為完全聚焦 (c)(e)分別為完全聚焦向上 0.88 μm 和向下 0.88 μm 位置 (b)(f)則為完全聚焦向上 1.75 μm 和向下 1.75 μm 位置，但是已經無法辨識出向量圖 (a)(g)兩圖失焦的更為嚴重 [24] 。	23
圖 1-22 Micro-PIV 量測(a)為瞬間粒子的影像，(b)為經由計算後的向量圖分佈，(c)為粒子濃度分佈[25] 。	24
圖 1-23 為 Y 型注入口晶片之流場，範圍為 250 μm \times 275 μm ，圖中向量圖為兩注入口的交會情形 [26] 。	25
圖 2-1 左圖為微混合器網格設計。右圖為左圖框內局部放大圖。網格設計分二種，左下為結構網格性網格，右上為非結構性網格。	32
圖 2-2 CFD-ACE 主畫面，選擇模擬所需要的模式如圖中 Flow、chemistry。	32
圖 3-1 微粒子顫像測速儀的架構。	42
圖 3-2 統計學上的相關性之過程步驟。	43
圖 3-3 微粒子顫像測速儀實驗過程之流程步驟。	44
圖 3-4 三種混合器設計(a) 單層平行條紋、(b)上下層平行條紋、(c)正反向上下層條紋、(d)注入口口徑結構。	44
圖 3-5 當 $Re = 0.75$ 時，單層平行條紋、上下層平行條紋、正反向上下層條紋，三者的混合效率。Type 1 為正反向上下層條紋、Type 2 為上下層平行條紋、Type 3 為單層平行條紋。	45
圖 3-6 當 $Re = 7.5$ 時，單層平行條紋、上下層平行條紋、正反向上下層條紋，三者的混合效率。Type 1 為正反向上下層條紋、Type 2 為上下層平行條紋、Type 3 為單層平行條紋。	45
圖 3-7 晶片製作流程圖。	46
圖 3-8 微混合器之外觀。上圖藍色部分為填入染料的微管道結構，整個管道長度為 2.5 cm。下圖由顯微鏡下拍攝微混合器的阻塊結構。	47
圖 3-9 微混合器上視圖及單位阻塊截面圖。將一單位阻塊分成 8 個截面，前 4 個截面時，阻塊位於微管道上方，而後 4 個截面時，阻塊則位於微管道下方。	47

圖 4-1	入口交會處及流經阻塊之灰階影像。.....	56
圖 4-2	當 $Re=0.75$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。.....	57
圖 4-3	微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 0.75$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。.....	58
圖 4-4	在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 0.75$)。.....	58
圖 4-5	當 $Re = 2.25$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。.....	59
圖 4-6	微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 2.25$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。.....	60
圖 4-7	在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 2.25$)。.....	60
圖 4-8	當 $Re = 3$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。.....	61
圖 4-9	微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 3$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。.....	62
圖 4-10	在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 3$)。.....	62
圖 4-11	當 $Re = 3.75$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。.....	63
圖 4-12	微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 3.75$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。.....	64
圖 4-13	在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 3.75$)。.....	64
圖 4-14	當 $Re = 7.5$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。.....	65

圖 4-15 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 7.5$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。	66
圖 4-16 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 7.5$)。	66
圖 4-17 微混合器於 $Re = 0.75$ 、 2.25 、 3 、 3.75 、 7.5 的混合效率。	67
圖 4-18 微混合器於 $Re = 0.75 \sim 7.5$ 時微混合器之壓力降。	67
圖 4-19 當流速為 $200 \mu\text{m/s}$ 之流體交會處之流場分佈(a)流體交會處示意圖，藍色區域為量測位置(b)實驗量測結果(c)模擬結果 (D 為 $300 \mu\text{m}$)。	68
圖 4-20 流體交會處粒子流線圖(a)顯微鏡下拍攝(b)模擬結果。	68
圖 4-21 當流速為 $200 \mu\text{m/s}$ 之流體流經阻塊之流場分佈，量測位置如框內所示(a)實驗量測速度(b) 模擬結果。	69
圖 4-22 粒子流經阻塊之流線圖(a)顯微鏡下拍攝(c)模擬結果。	70
圖 4-23 粒子流經第一個阻塊的情形將產生 $50 \mu\text{m}$ 的橫向位移。	70
圖 5-1 比較三種不同單位長度的晶片圖形，分別為 $540 \mu\text{m}$ 、 $740 \mu\text{m}$ 、 $940 \mu\text{m}$ 。	76
圖 5-2 三種不同阻塊斜率之濃度分佈。	76
圖 5-3 比較三種不同單位長度的混合效率，分別為 $540 \mu\text{m}$ 、 $740 \mu\text{m}$ 、 $940 \mu\text{m}$ 。	77
圖 5-4 三種不同單位長度晶片之壓力降。	77
圖 5-5 比較三種晶片深度分別為 $40 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $80 \mu\text{m}$ 的圖形。	78
圖 5-6 三種不同晶片深度之濃度分佈圖。	78
圖 5-7 比較三種晶片深度分別為 $20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 的混合效率。 ..	79
圖 5-8 三種不同晶片深度之壓力降。	79
圖 5-9 比較三種不同阻塊寬度之圖形，分別為 $120 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $180 \mu\text{m}$ 。	80
圖 5-10 三種不同阻塊寬度之濃度分佈。	80
圖 5-11 比較三種不同阻塊寬度之混合效率，分別為 $120 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、 $180 \mu\text{m}$ 。	81
圖 5-12 三種不同阻塊寬度之壓力降。	81

圖 5-13 改良型低壓力降微混合器晶片上視圖，包括 8 個阻塊結構及一個 橢圓形管道，晶片總深度 80 μm 。	82
圖 5-14 為模擬微管道內的濃度分佈圖(上視圖)。	82
圖 5-15 為模擬微管道內的濃度分佈圖(前視圖)，由於尺寸長寬比過大，分 成三段。	82
圖 5-16 改良型低壓力降微混合器之混合效率($V=0.0001\text{ m/s}$)。	83

符號說明

符 號

A	面積(m^2)。
C	分析相對的位移之相關性。
C_0	表示未混合的濃度其值為 1 或 0。
C_m	莫耳濃度($kmol/m^3$)。
C_∞	表示為最佳的混合濃度其值為 0.5。
$C_{n_{max}}$	分析相對的位移之最大相關性。
D	擴散係數($g/s \cdot m^2$)。
D_h	水利直徑(m)。
I_1, I_2	兩張瞬時影像之數位化資料。
I_{1P}, I_{2P}	次要區塊之數位化資料。
$M \times N$	影像總畫數。
$m \times n$	次要區塊總畫素。
M'	鏡頭的放大率。
P	壓力(N/m^2)。
Q	流量(ml/min)。
Schmit number ($Sc=\mu/\rho D_h$)	史密特數。
Renold number ($Re=\rho V_m D_h/\mu$)	雷諾數。
V	速度向量(m/s)。
V_m	速度量值(m/s)。
$\Delta S(\Delta x, \Delta y)$	質點的位移。

Δt	CCD 拍攝兩影像之瞬時間距。
Δx	x 方向質點的位移
Δy	y 方向質點的位移
ρ	密度(kg/m^3)。
μ	黏滯係數($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)。
Γ	周長(m)。

名詞介紹

Active mixer	主動式混合器。
AutoCAD	繪製軟體。
AZ400K	正光阻型號。
Barrier embedded micromixer, BEM	插入障礙物混合器。
Brownian motion	布朗運動。
Chaotic flow field	混沌流場。
Computational fluid dynamics	計算流體力學。
Cross-correlation function	相關函數。
Charge-coupled device, CCD	電子攝合攝影機。
C-Mount	轉接環。
Deionized water , DI water	去離子水。
Diffusion	擴散過程。
Finite volume method	有限體積法。
Hexamethyldisilazane, HMDS	六甲基雙氧矽甲烷。
Interrogation	解析區域。
Laminar	層流。
Laser-Doppler Velocimetry, LDV	雷射都卜勒測速儀。
Micro-Electro-Mechanical System, MEMS	微機電系統。
Micro-total-analysis-system, μ -TAS	微型全分析系統。
Micro-particle image velocimetry, Micro-PIV	微粒子影像測速儀原理。
Numerical Aperture, N.A.	數值光圈。
Passive mixer	被動式混合器。

Particle tracking velocimetry, PTV	粒子軌跡測速儀。
Photolithography	光微影技術。
Refractive index	折射率。
Slanted groove micromixer, SGM	傾斜凹槽混合器。
Staggered herringbone micromixer, SHM	鯡魚式溝槽混合器。
Syringe pump	幫浦。
Turbulence	紊流。

第1章 諸論

1.1 微機電系統

微機電系統 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)，指利用傳統半導體製程技術，結合高科技整合的技術，在矽、玻璃或高分子材料上加工出名式名樣微結構之科技，其可應用的範圍十分廣泛，例如農林業、水植業、國防工業、醫療保健、通訊、電子等等。微機電技術之最大特色，除了能將機械、電子元件整合於同一晶片上並微小化外，更能同時利用半導體加工技術量產化的特色，大量製作出便宜且效能優良之微型化結構。由於它的機械元件可以整合於同一個晶片上，所以它有一些優點包括(1)可大量製造：使成本價格降低。(2)系統微小化：在於節省空間、節省材料、節省成本、低污染及節約能源，更重要的是利用微小化結構，達到許多傳統系統無法進行之微環境。其用途包含：可攜帶式醫療檢測器、DNA 分析檢測、藥物偵測等等，而此對於微觀世界的探討，在生醫應用上具有顯著的貢獻。微機電系統包含許多學門如：生物、藥學、光學、航空、物理、化學、機電、電機、醫療等等，其中微流場的觀察佔極重的一部份。

1.2 研究背景及動機

微型全分析系統(Micro-total-analysis-system, μ -TAS)指單一晶片上發展

出包含化學反應、分離和感測的多種分析程序。在近年來，對生物化學分析之微小化與整合之特性，已經有相當大的進展。在微小化系統的整合中，微流體處理技術包括：微流體輸送、計量與混合，其中混合為一相當重要的課題。對微流體系統而言，最重要的即是必須達成快速且有效的混合，所以微流體混合器的設計，除了考慮整合性同時也必需達到迅速混合的目的。一般在巨觀的管流場中，主要是藉由紊流(turbulence)達到混合，所需的雷諾數 Re (Reynolds Numbers) 約 2100 以上，但是在尺寸縮小到微米以下時，雷諾數也將相對縮小至 0.1~10 之間，流體之表面積與體積的比值相差極大，表面效應的影響，使得微流體不適用於傳統流體力學，而流體主要靠層流的方式流動，因此微流體混合是非常困難的。

在傳統的巨觀環境中，液體的混合主要憑藉著分子間的擴散作用，高濃度的分子將往低濃度的分子移動達成均勻化的過程，其中的最關鍵之影響為液體的接觸面積，因此常常需要一些外外界入，如使用攪拌器攪拌或工業上使用螺旋形混合器產生渦流等等，增加液體的交界面以加速分子間的擴散作用，加強混合的效果。然而在微小尺寸中不可能如巨觀環境，同樣使用攪拌器，或是使用工業上過度複雜模式的混合器，卻可把這些概念使用於微尺寸的流場中達成混合效果的方式。因此有些微混合器被設計出來，如微混合攪拌器，使用了一個微形的機械元件，這個元件將隨著外加的磁場而產生旋轉。

液體混合在生物化學領域是個相當重要，而在大部分微感測器設計中最令人感興趣的即是利用生物化學反應，分析偵測未知物，因此在未來微生醫機械發展方向中，如何在短時間內，達成簡單又有效率的混合是非常重要的。因此微混合器的優點必須包括尺寸小、需要的樣本數少、反應快、及減少檢測時間。

本研究以數值模擬的方式，探討微管道中的流場，一為針對流場中之壓力分佈問題進行探討，二為針對流場中之混合機制進行探討。在微流體晶片上，因尺寸限制條件下，使的雷諾數亦相對較小，以致於流體所產生慣性力極弱而無法達到紊流的狀態，所以本研究以數值模擬之最佳化結果來設計微混合器，與實際製作晶片進行實驗測試相互比較。流場速度分佈方面使用微粒子影像測速儀量測，儘管微粒子影像測速儀原理(micro-particle image velocimetry, Micro-PIV)與粒子影像測速儀(PIV)相同，但是由於在微觀下，粒子會有較明顯布朗運動(Brownian motion)，因此量測難易程度相對提高。

1.3 擴散過程及混沌流場

混合的目的在於使兩種或兩種以上之液體達到均勻化，因此如何使流體達到迅速且快速的混合是一個重要的課題。以下為影響微混合器的二大因素：

1.擴散過程(diffusion)

在一個相內因為分子或原子的運動，導致成份的混合或均勻化的過程，(圖 1-1)為擴散過程。擴散反應可說是使液體達到混合的最基本的因素，當二液體的濃度有差異時，流體將產生混合作用，發生擴散反應。擴散反應剛開始在二液體的交界面處發生，慢慢由交界面向外發展，一直到二液體濃度完全相同為止。流體混合中，影響擴散的因素包括擴散原子及溫度，由於二者皆環境因素而不能改變，所以可視擴散係數為定值。在設計微混合器時，因為擴散係數為定值，不能更進一步的改進，所以本研究在微混合器的概念上，則是以增加二流體的接觸面積為主。

2.混沌流場(chaotic flow field)

混沌代表一片混亂，毫無秩序，混沌系統物理上的涵義為不是週期性的，又不會演化至穩定的狀態。而混沌流的涵義為流體流動的路徑及最後的位置，無法預測。例如在流場中觀察一粒子移動路徑，初始位置相同的粒子流經一固定管道，但每次到達出口的位置卻不相同，且無法預測，則稱為混沌流場(圖 1-2)[1]。因此在微流體中，流體以層流(Laminar)方式沿著管道流動，如能將管道中混沌流場加強，表示在管道內將有良好的混合。微管道中常用於產生混沌流場的方式，即加入特定圖形的阻塊。因此在本微混合器的設計使用了三維的結構，分別在管道中加入設計的阻塊形狀，產生側向運動，再加上本微混合器由二層晶片構成，使流場由簡單的一維軌跡路徑變成為三維的移動方式，所以流體流動的路徑和最後位置比較初

始位置能看出明顯的差異。

1.4 文獻回顧

文獻參考主要分為三個部分，首先為微型混合器的混合機制及操作概念，其次為歷年來微粒子影像測速儀的發展及相關研究，最後為混合效率分析方法的相關文獻說明。

1.4.1 被動式混合器 (passive mixer)

被動式的混合器：單純利用幾何形狀或是流體特性來產生混合效果，依靠流體之間的分子擴散或混沌對流混合。

Schwesinger 等人[2]以上下左右的微管道設計方式提升混合，方法為把兩種液體個別由左右兩端注入，匯合一股後再分成上下兩股，觀察兩種不同溶液的混合情形，得到的結論是雷諾數必須達到 70 以上才足以達到較均勻的混合，因此在雷諾數極低的流體中，樣品要藉由幾何形狀複雜的微管道進行混合仍是非常困難地(圖 1-3)。Koch 等人[3]增加平行注入口，由一般的兩個注射口，增加到數個注射口，實驗的注射口有 14 個和 13 個，以加大流體接觸面面積(圖 1-4)。Munson 等人[4]的晶片設計分成上下兩部份，再把上下二層接合，兩流體注入口分別由上層晶片和下層晶片注入，不同以往單層平面注入，以利於接觸面積的增加(圖 1-5)。Lin 等人[5]使用圓柱障礙物在狹窄的路徑上，使通道由 40 μm 到 50 μm 再到 10 μm 交替循環提高混合(圖 1-6)。Mengeaud 等人[6]利用數值模擬，模擬 Z 字型的混合

器，分別探討不同外形比例及不同速度下的混合效能，發現當雷諾數在 80 以上，可以明顯提升混合效率(圖 1-7)。Park 等人[7]發展 3D 被動式的微混合器，藉由混沌達到混合成效。(圖 1-8)為單一元件之結構，Park 把數個單一元件堆積成等比級數的樹枝狀晶片，之後由不同流速大小觀察混合結果。Chen 和 Meiners[8]研究三維結構的拓撲混合器(Topologic mixing)，把微流管道由單一流道分成二的支流，再由二個支流匯合成一個流道，反覆此流程，至混合為止(圖 1-9)。Vijayendran[9]等人使用三維的 L 型結構，由上下二層晶片組合而成，使流體流動由向前到向左到向上到向前到向右，經過數週期後，觀察成效(圖 1-10)。Liu 等人[10]使用了 C 字型的結構，在跟二維相似的微混合器及直線型的流道比較，測試範圍從雷諾數 6~70，結果混合能隨著雷諾數的增加而提升，主要仍以擴散為主(圖 1-11)。Johnson 等人[11]率先使用準分子雷射在 T 型的管道上刻出一串傾斜的凹槽，使流體在到達凹槽時產生混沌現象，並研究不同速率下的情形。如(圖 1-12)為 4 個傾斜的凹槽，Johnson 由實驗知 4 個傾斜凹槽的混合效率比 3 個凹槽的好，且隨著速度的增加，混合效率只有些微下降。Stroock 等人[12]亦使用不同形狀的溝槽如鯡魚式溝槽混合器(Staggered herringbone micromixer, SHM)提高混合，而 Kang 和 Kwon[13]則使用數值方法模擬傾斜凹槽混合器(Slanted groove micromixer, SGM)、鯡魚式溝槽混合器、插入障礙物混合器(Barrier embedded micromixer, BEM) (圖 1-13)，利用溝槽產生混沌現象並

觀察其中的流場，由 SGM 的流場可看到一個渦旋的流動，而 SHM 則可觀察到二個渦旋的流動，至於 BEM 則是二個方向相反的渦旋。Jeon 等人[14]設計再循環微混合器，由特殊的幾何外觀，使流體能進行再循環，增加混合效率。如(圖 1-14)入口端有三個，中間為一流體，左右邊為另一流體，由流量大小控制質量流率，此圖為單一元件，實驗時由數個單一元件組成。混合成效可由流速的增加而提升。Bohm 等人[15]設計了一個渦流型混合器，當雷諾數加大到可以使流體產生渦流時，其混合成效將大大的提升(圖 1-15)。

1.4.2 主動式混合器 (active mixer)

主動式的混合器：用外加的能量如電場、聲波、熱能或改變壓力分佈達成液體混合之目的。

Hau 等人[16]安排幾組電極，利用在穩定的電場下，不均勻的表面電荷，當二個相異的流體到混合區域時，流場產生漩渦以提高混合效率(圖 1-16)。Deshmukh 等人[17]報告了一個使用變動壓力的 T 字型混合器，使用外接的微泵造成壓力改變。Niu 和 Lee[18]提出了類似的方法，發展一個主動式混合器去改善一個微管道兩種流體的混合。混合器流過主要管道由三個次要流道位置，施加施加壓力分佈造成不穩定的擾動，藉以促進混合，造成混沌現象(圖 1-17)。Lu 等人[19]靈感始於巨觀下的磁力棒混合器，而發展微混合攪拌器，攪拌器的轉速度為 100~600rpm。由磁力棒的旋轉產生

紊流，使流場結構產生擾動，達到混合如 (圖 1-18)。Tang 等人[20]在入口端由波形產生器，產生變動波形以提高混合效率(圖 1-19)。

主動式混合可以產生良好的混合，但是相對的較難整合於系統內且製勻作亦較困難。因此以往的文獻可以知道，被動式微型混合器有其發展的必要，並且較適合使用在生醫微機電系統的應用上。因此本研究以增加微流道對流效應的方法，設計一被動式微流體混合器元件，並採用比較簡單的製程技術，提升與其他元件整合的可行性。

1.4.3 微粒子影像測速儀

常見的流場測速儀有雷射都卜勒測速儀和微粒子影像測速儀。

1.雷射都卜勒測速儀：雷射都卜勒測速儀(Laser-Doppler Velocimetry, LDV)功用為量測流場中單一位置的瞬時速度或紊流強度(turbulence intensity)，原理就是粒子透過量測體積時，隨速度之不同散射光頻率將發生變化，其變化與粒子速度成一相關函數，藉由收集流體中微粒散射光所產生之訊號，進而求出粒子移動的速度及方向，當粒子跟隨性良好時，此粒子速度即代表流體流動之速度，進而量得瞬時流速。

2.粒子影像測速儀：近幾年來，粒子影像測速儀在巨觀流場中之定量分析已經發展成熟了，且由於雷射技術快速發展，以雙脈衝雷射作為粒子影像測速儀之照明光源，將可使脈衝間隔時間可以控制在微秒以下。量測方法則是在流場中置入粒子，以兩道雷射光源在不同時間點之底片上使其

顯影，再將此影像分割成數個解析區域(interrogation)，對各個解析區域中的粒子以相關函數(cross-correlation function)之統計方法解析其粒子之位移量，再除以兩脈衝雷射之間的已知間隔時間及換算鏡組之放大倍率，即可得到流場之流速。

在 1997 年 Lanzilloto 等人[21]使用 1~20 μm 感光乳劑(emulsion droplets)以 X 光(x-rays)使 500~1000 μm 微毛細管顯像，並計算微毛細管內之平均流速，但其尺寸對於微毛細管而言，過於龐大，故流場之情況仍難以確定，同時其所得之值亦僅是平均流速，故只有影像之效果，並無法做有效的細部定量分析。在 1998 年 Santiago 等人[22]以汞燈之連續光源，輔以機械式遮斷器，使其有如脈衝雷射一般，將單張之顯像影片之取像時間更趨近瞬時影像，植入 0.1~0.3 μm 之螢光粒子後，將微管流以顯微鏡放大，再用數位相機將其顯像，並以軟體利用交錯相關函數法做定量分析，並分析最簡單之流場現象，以證實微觀粒子影像測速儀之實用性(圖 1-20)。在 1999 年 Koutsiaris 等人[23]將微觀粒子影像測速儀應用於充滿甘油之微毛細管中，以懸浮物當追蹤粒子，其中微毛細管管徑為 200 μm ，粒子的平均直徑為 10 μm ，以模擬人體血管內紅血球之運動，並預期微觀粒子影像測速儀之發展潛力，且利用壓力改變方式，改變其流量以確定其流速分佈圖，並與其實驗之結果做一比較，以分析其誤差。在 1999 年 Meinhart 等人[24]更進一步使用雙脈衝雷射(double pulse laser)為光源，且兩道雷射觸發之時

間差(Pulse Separation Time)也可以精準控制長短，其時間差甚至可以小到微秒以下，使得可量測之流場流速更進一步發展至較高流速流場，利用其景深之長短與實驗值相比較，適用於微管流中穩定流場之定量分析，提出影響影像解析度的因素，及最佳的數值光圈(Numerical Aperture, N.A.) (圖 1-21)。在 2003 年 Sato 等人[25]亦研究關於在 T 型管道在兩流體交會處的情形，一邊使用帶有粒子的溶液，另一邊則不帶粒子，其中粒子的直徑為 1 μm ，觀察管道中的熱通量現象和流場分佈(圖 1-22)。在 2004 年 Shinohara 等人[26]研究在微流裝置中 Y 型管道中的化學反應(pH 分佈)，把乙酸(acetic acid)和氫氧化銨(ammonia hydroxide)分別加入在不同的注入口，再以 syringe 推動流體，當兩流體接觸時，將產生化學反應以觀察其 pH 分佈，當要量測流場的分佈時，則在兩流體中加入微粒子，及可觀察流場速度分佈 (圖 1-23)。

由電滲流驅動的有 Devasenathipathy 等人[27]在 2003 年，用電滲流的方式使粒子流動，所用的電壓為 100 V/cm，粒子直徑為 0.5 μm ，時間間隔為 100 ms 用 PIV 和 PTV(particle tracking velocimetry)驗證流場分佈和粒子軌跡。

1.4.4 混合效率指數

在微混合器的研究中，對於如何進行混合效率的評估是相當重要的。常用的方法是利用電子耦合攝影機(Charge-coupled device, CCD) ，觀測晶

片管道上的微流體影像，再藉由染色程度或螢光強度來評估混合效率。所用方法如下：

1. 利用酸鹼指示劑判斷

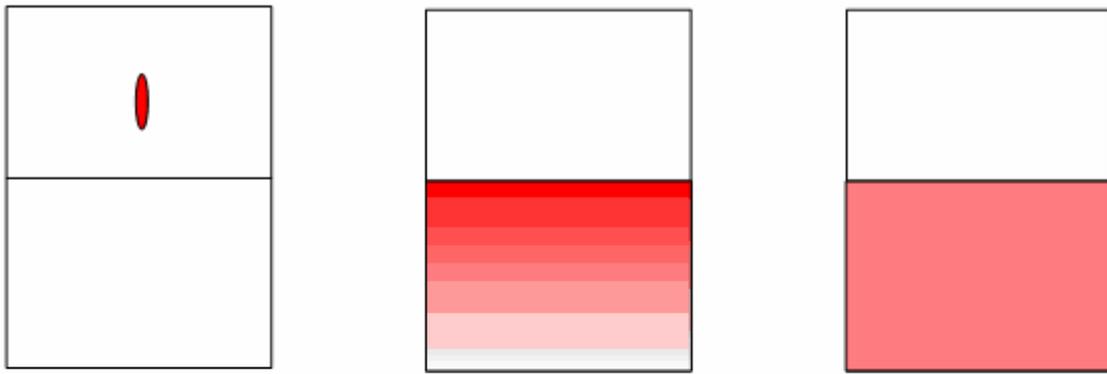
將要混合的兩流體中，於一方放置酸性或鹼性的溶液，而另一方為水，利用兩者酸鹼度的不同，因而發生酸鹼度的改變，使原本 pH 值低的酸性溶液發生 pH 值上升，而 pH 值高的鹼性溶液發生 pH 值下降的反應，pH 值的改變於肉眼上是無法去判斷地，因此須加入酸鹼指示劑，由於酸鹼指示劑的種類有各種不同範圍的區間，必須選擇所須範圍的酸鹼指示劑，酸鹼指示劑的使用目的為某 pH 區間時將產生顏色的變化，因此由顏色的改變可以知道混合成效。Liu 等人[10]採用氫氧化鈉和酚酞個別與酒精調和，由所產生的紅色判別混合的指標。

2. 利用螢光染料判斷

將要混合的兩流體中，於一方放置螢光染料，而另一方為水，利用螢光的染料發光的特性，當兩種液體接觸時螢光染料將開始擴散反應，因此螢光染料的亮度開始變淡，由螢光染料變淡的情形或由水那一方因為螢光的擴散而產生發光的情形，觀察混合效率。Stroock 等人[12]利用螢光染料和水混合當兩種流體混合時，由顯微鏡觀察螢光強度的大小，量化出混合成效。

3. 色度分析

此種方法像使用水彩調色一樣，把兩種顏料進行調色，由於為兩種不同的顏色，因此產生混合，如果均勻的混合將可看出另一個兩者混合的顏色，如果沒有則仍可看出原本的顏料色，把這個方法應用於量測混合上。將兩種液體分別用不同顏色染色，選擇顏色時宜採用對比大的染料，例如用藍色和橘色兩者有較大的對比。當兩種液體混合時，由混合時所呈現的不同顏色差異辨別混合成效。用數位相機將晶片上的影像拍攝下來，由影像處理軟體將影像轉成灰階模式，再將晶片上混合區域的亮點資料匯出，並帶入混合效率公式運算。



1. 在容器內加入染料

2. 初步混合

3. 經過一段時間後，完全混合

圖 1-1 擴散過程。

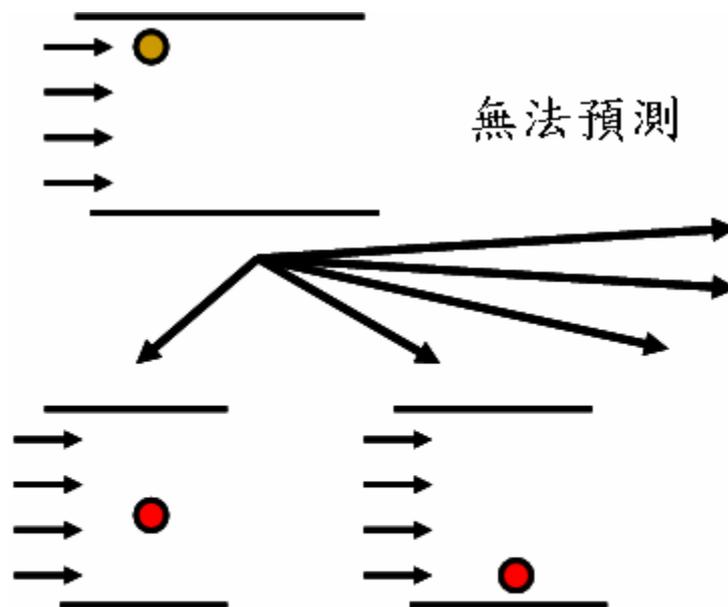


圖 1-2 混沌流場示意圖。

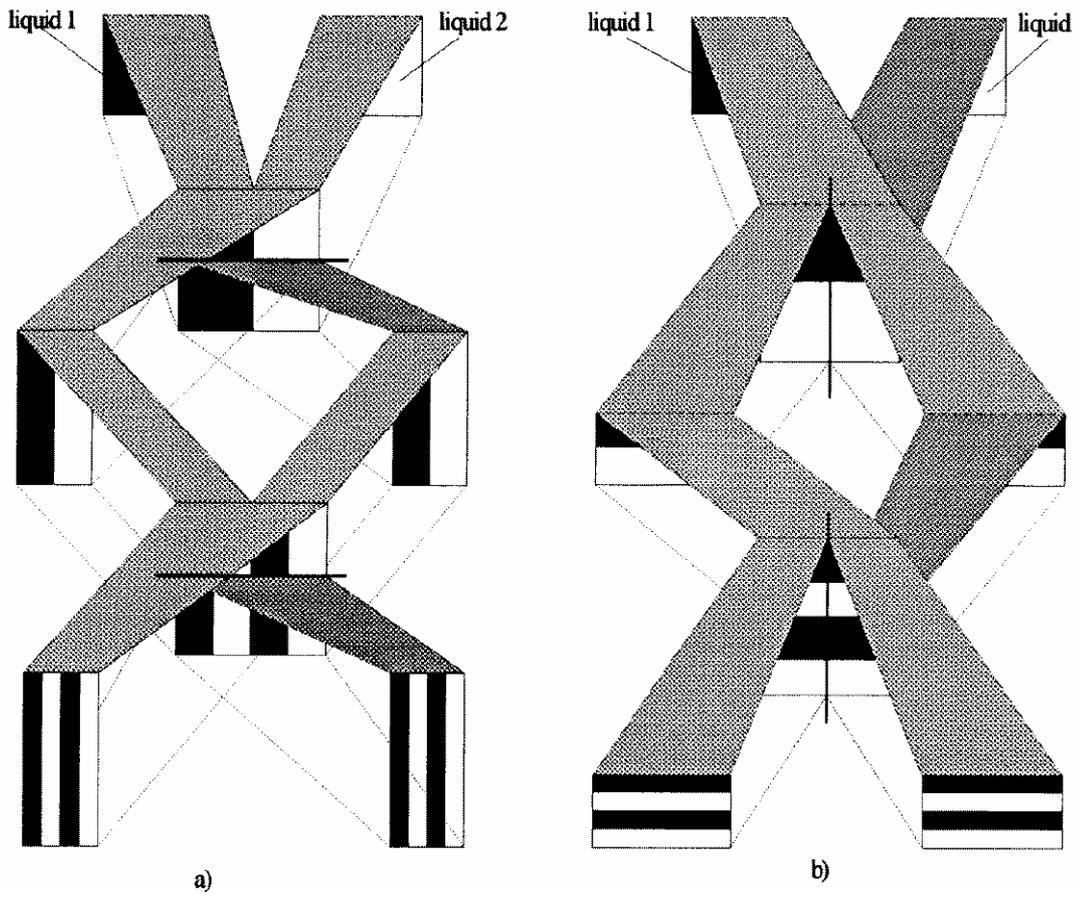


圖 1-3 以上下左右混合概念之被動式混合器[2]。

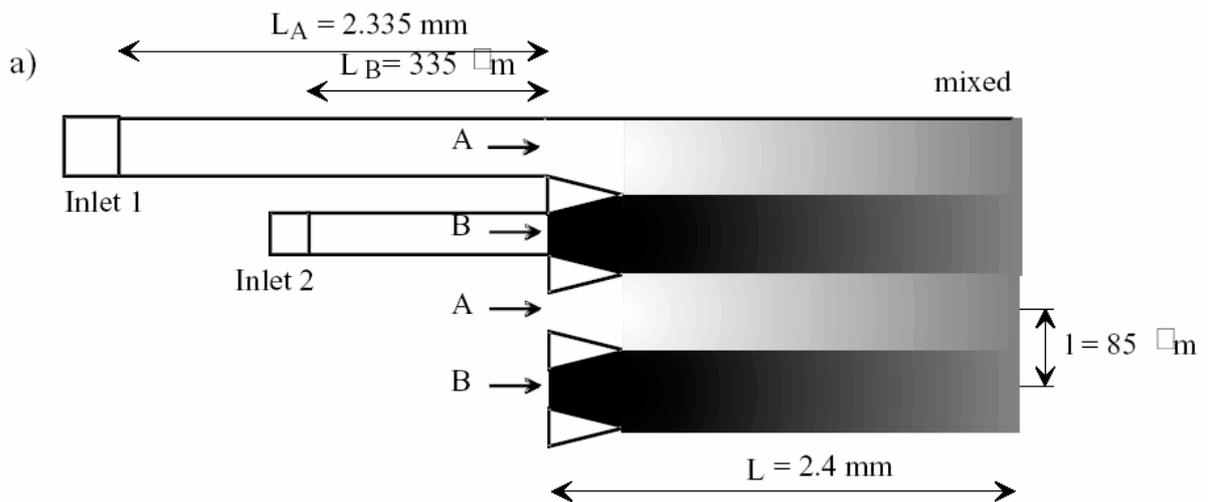


圖 1-4 四個注射入口之被動式混合器[3]。

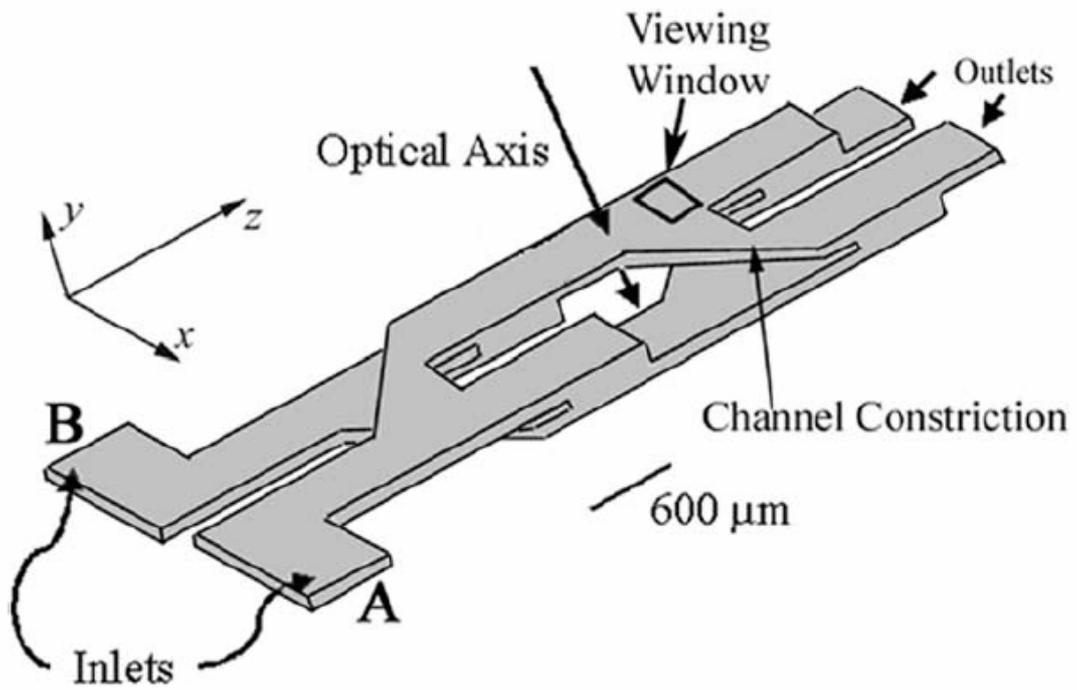


圖 1-5 由上下二層晶片構成之被動式混合器[4]。

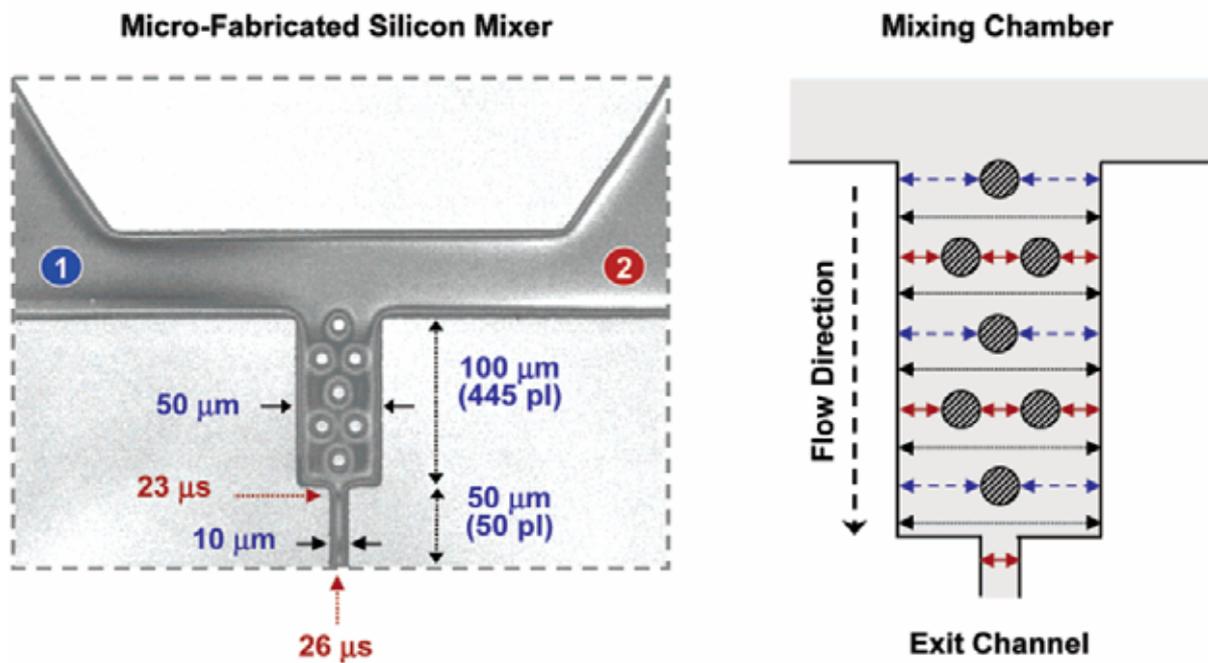


圖 1-6 內置圓柱之被動式混合器[5]。

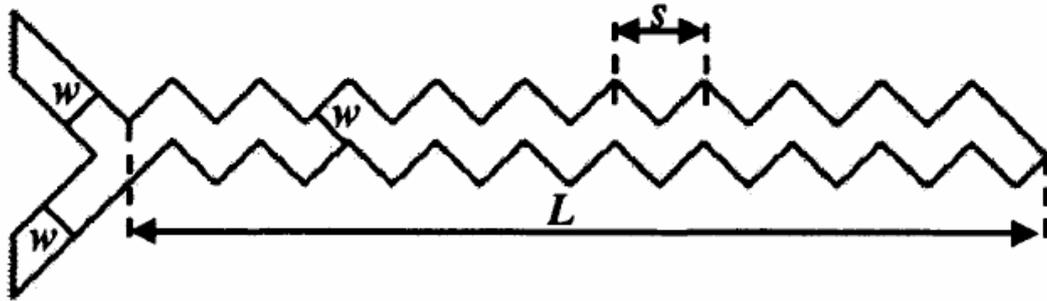


圖 1-7 類 Z 字型混合器幾何圖[6]。

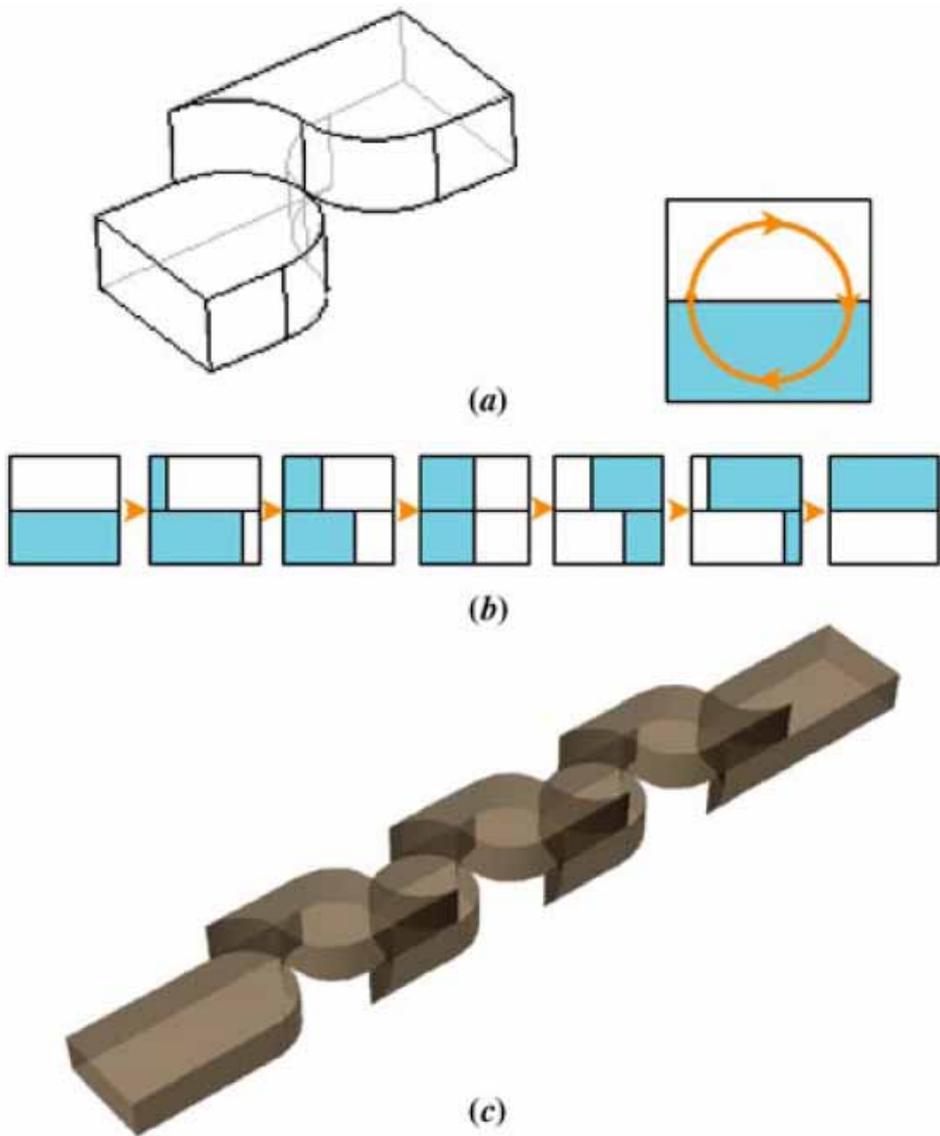


圖 1-8 由類似菱形阻塊組成的三維微混合器[7]。

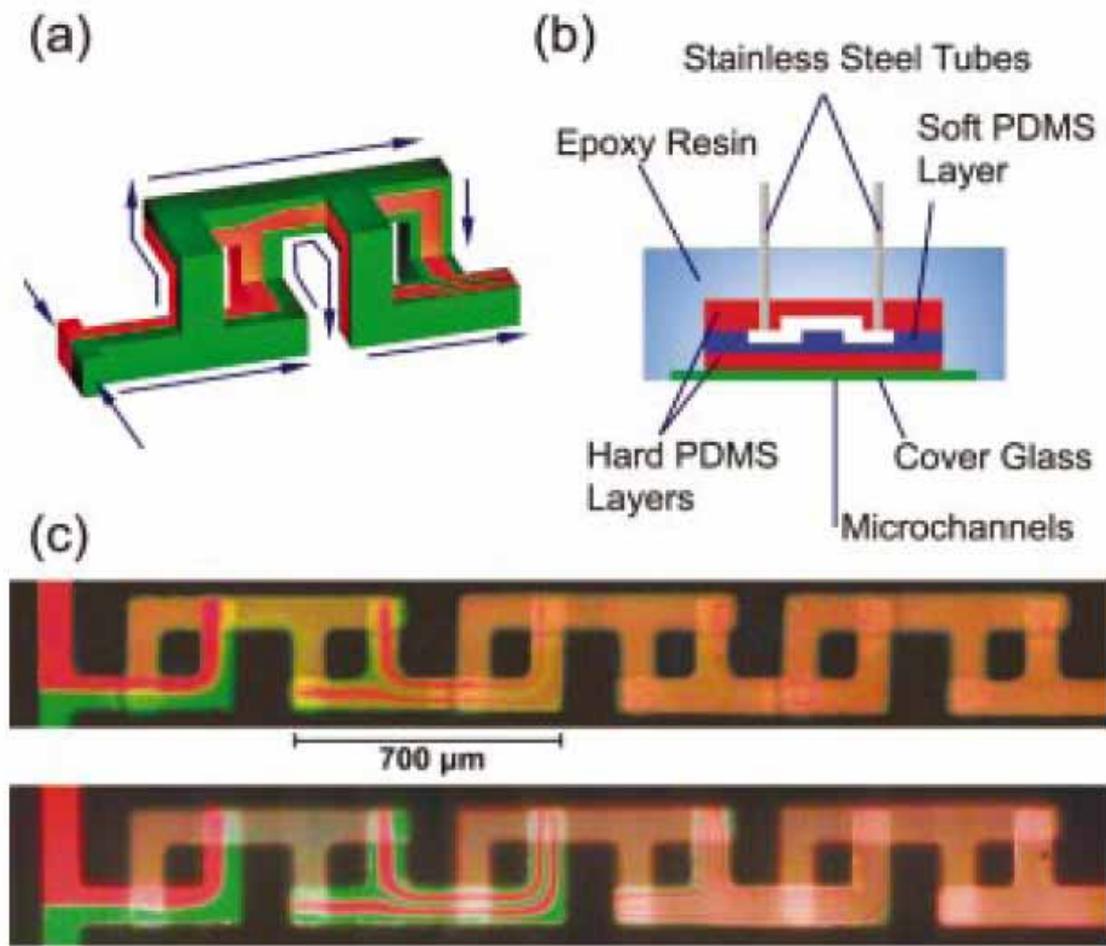


圖 1-9 拓撲混合器幾何結構[8]。

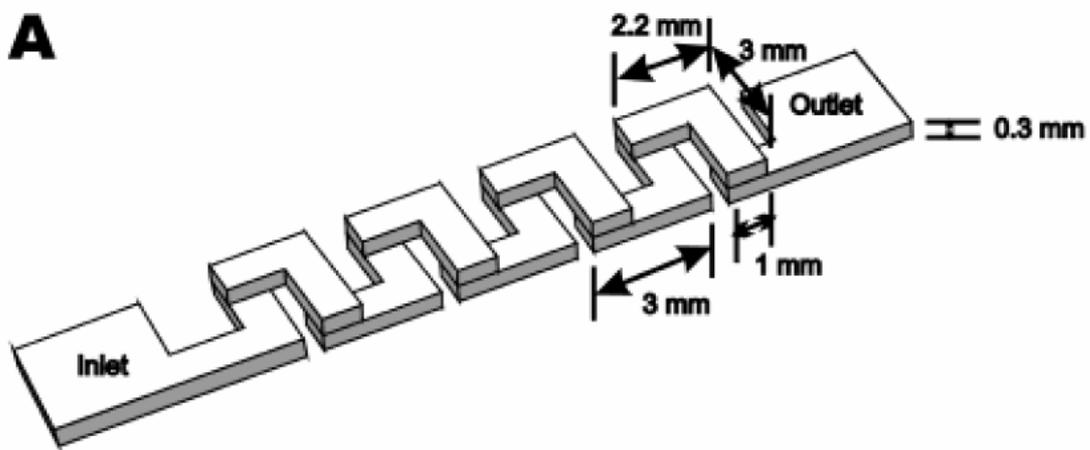


圖 1-10 三維 L 型微混器幾何圖[9]。

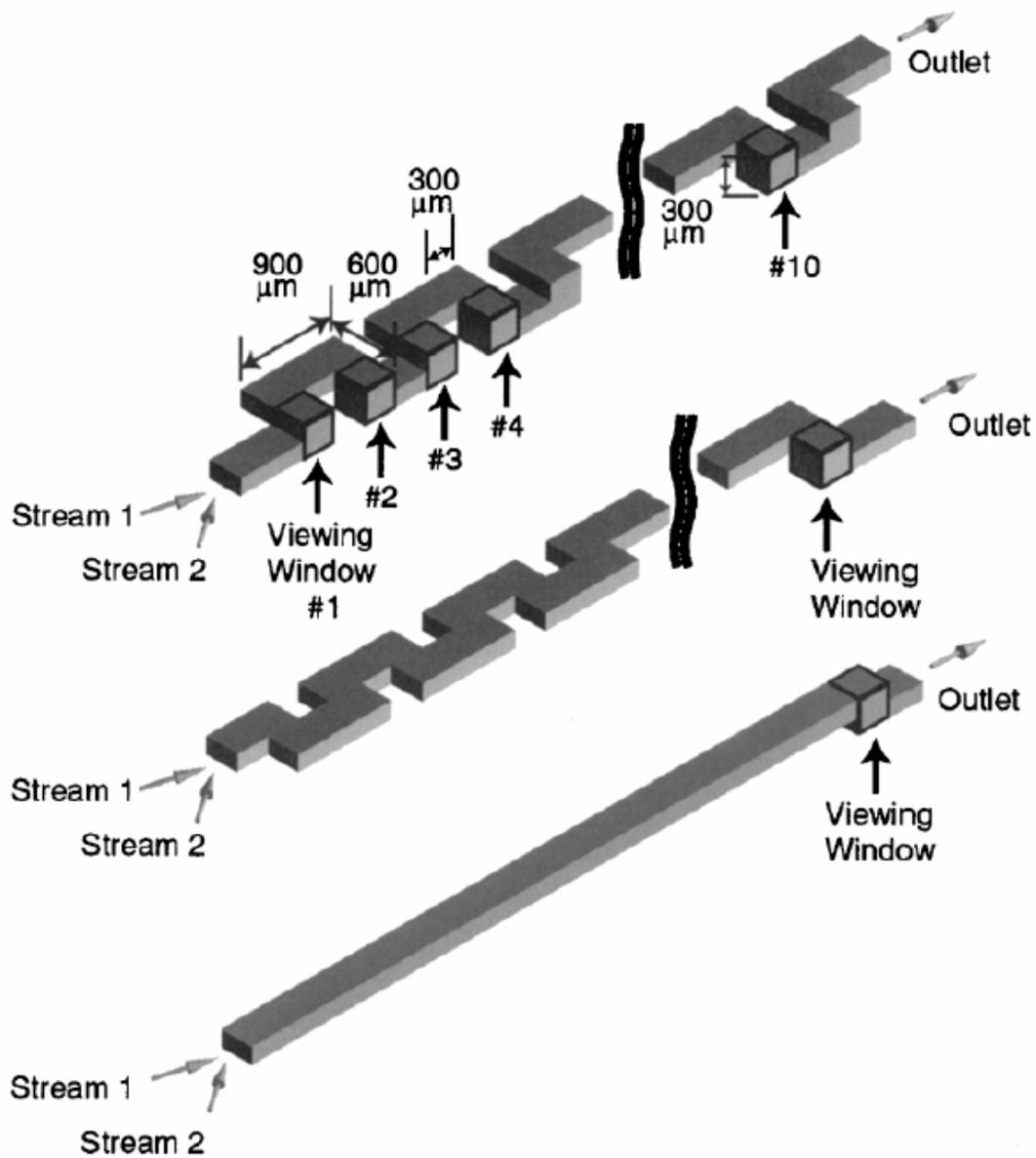


圖 1-11 三個混合器之比較(a)三維 C 型微混合器幾何圖(b)蜿蜒型混合器(c)直線型管道[10]。

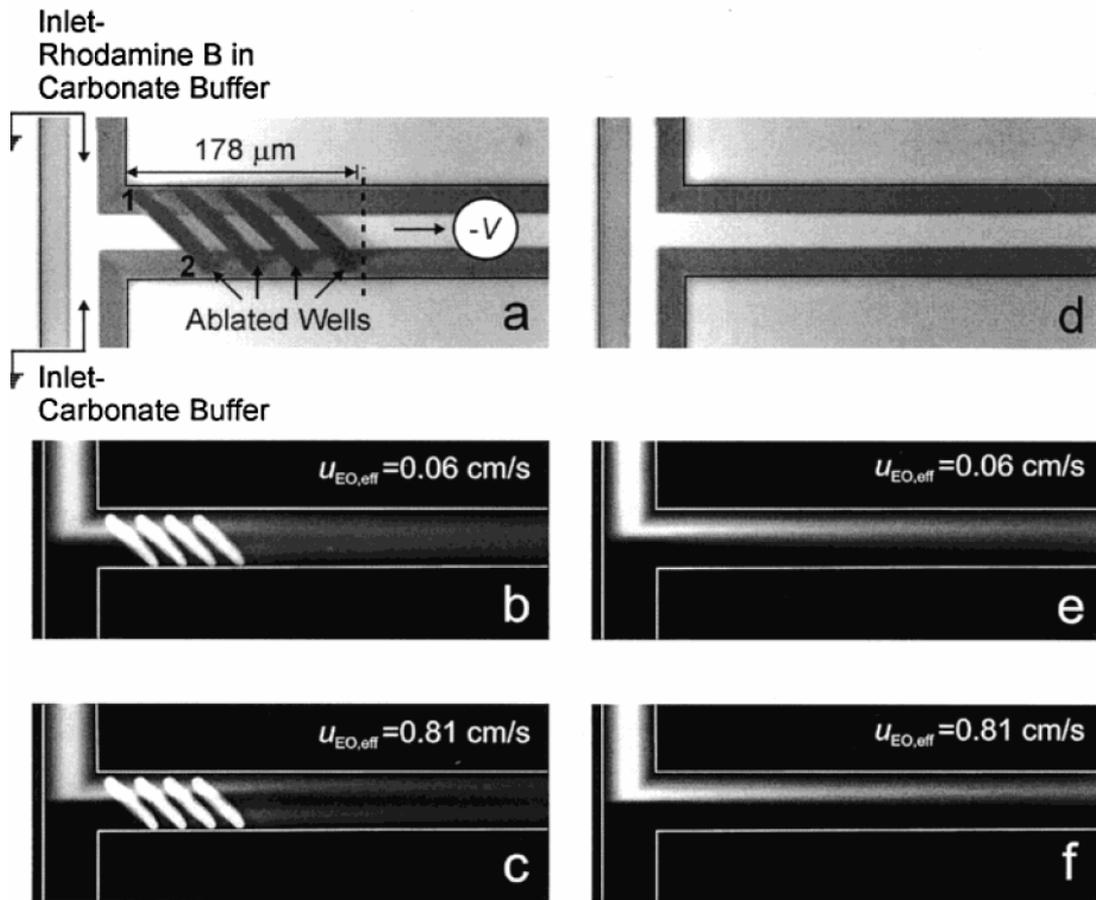


圖 1-12 使用雷射在管道中劃出傾斜凹槽(a)傾斜凹槽混合器尺寸(b)(c) 斜凹槽混合器分別在流速 0.06 和 0.81 cm/s 之混合情形(d)傳統 T 型混合器 (e)(f) T 型混合器分別在流速 0.06 和 0.81 cm/s 之混合情形[11]。

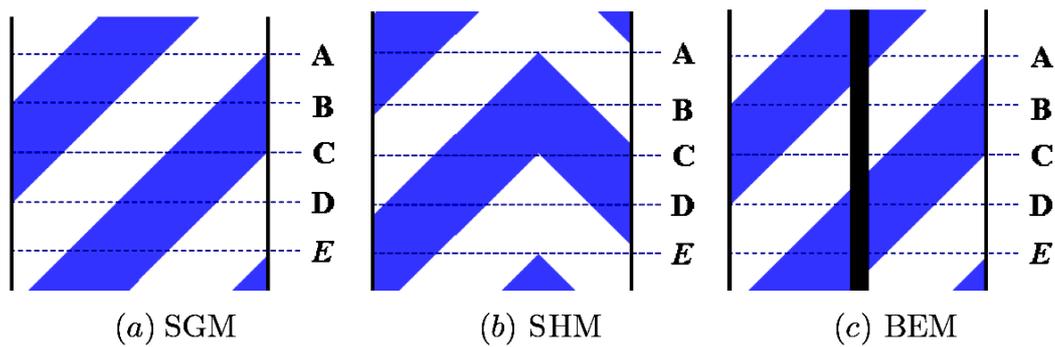


圖 1-13 三種被動式微混合器之上視圖(a)傾斜凹槽混合器(b)鯡魚式溝槽混合器(c)插入障礙物混合器三者之上視圖[13]。

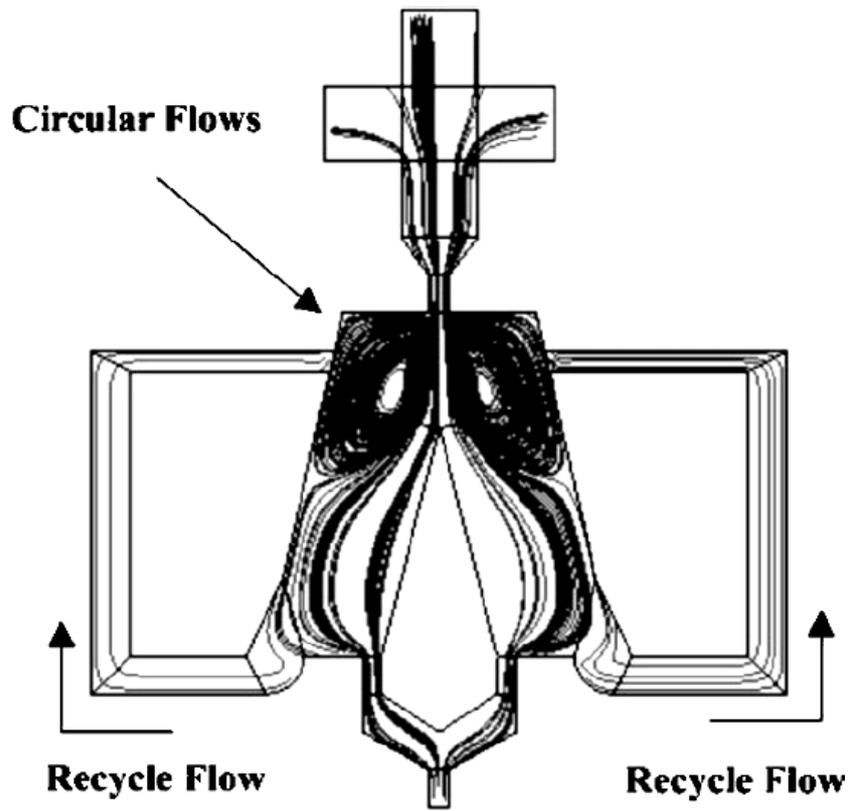


圖 1-14 再循環微混合器的單位元件[14]。

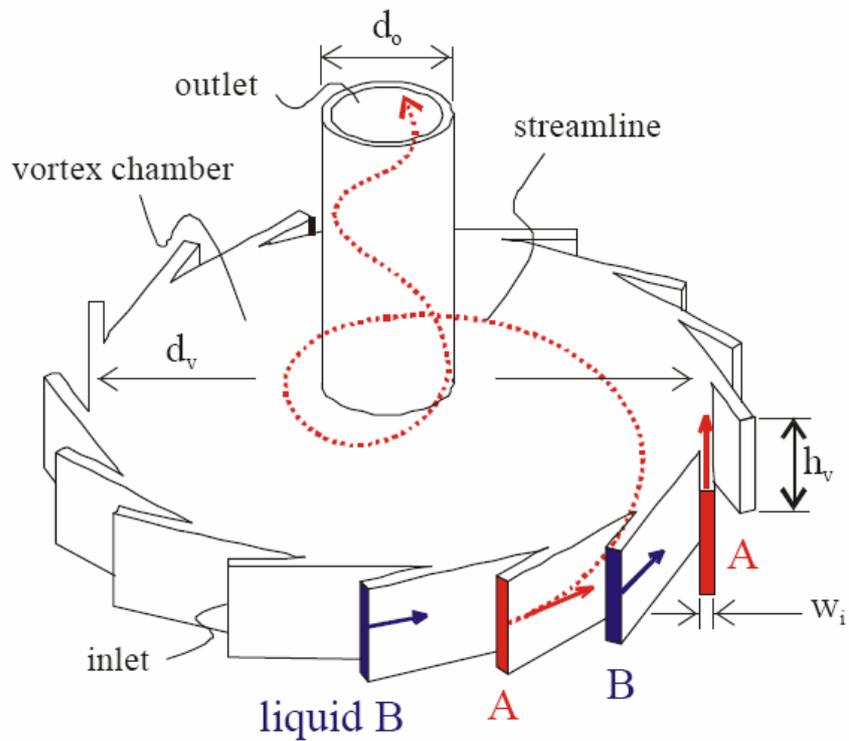


圖 1-15 渦流型混合器的幾何圖[15]。

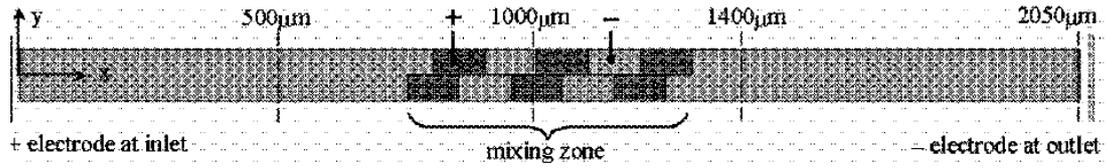


Figure 1. The surface charge distribution on the microchannel top and bottom surfaces.

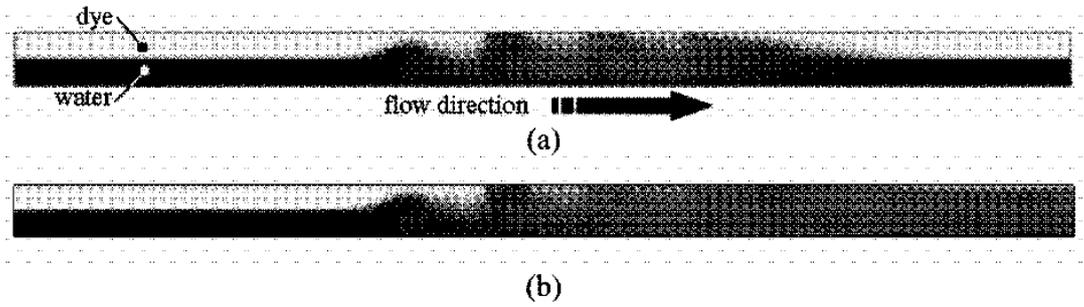


圖 1-16 內置電極於混合通道之主動式混合器 (a)(b)為再 5 秒和 50 秒中的混合情形[16]。

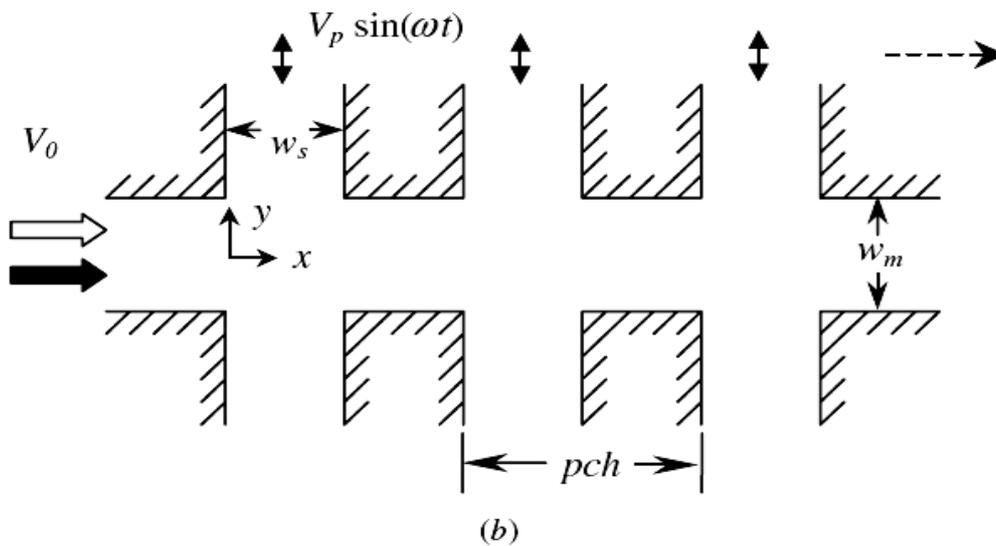
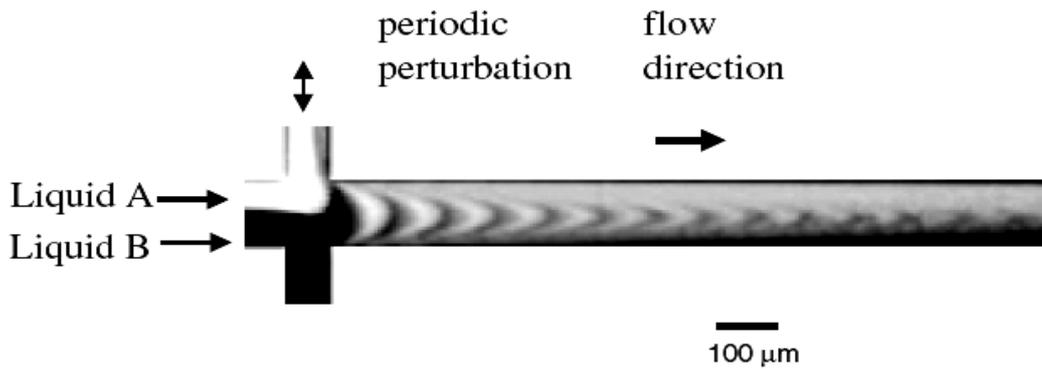


圖 1-17 利用外加壓力於測管中之主要微混合器 [18]。

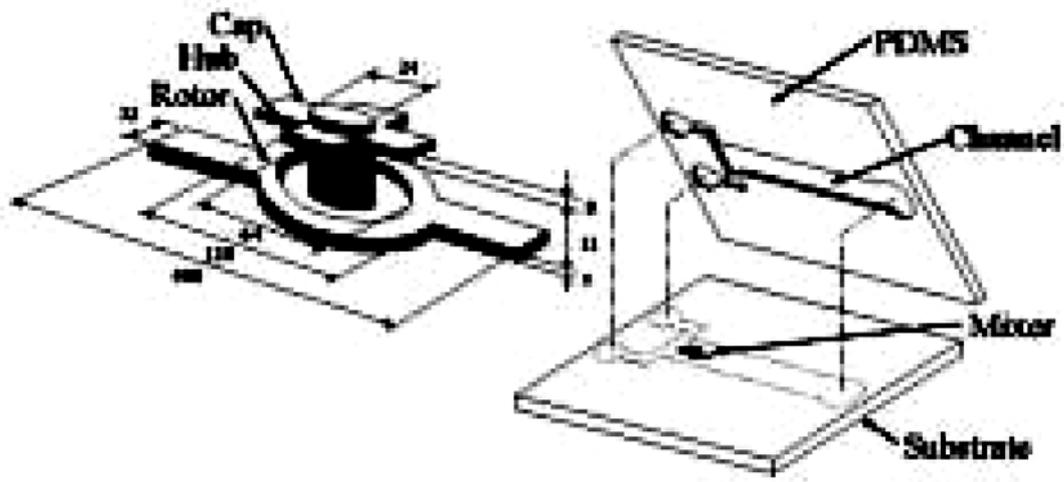


圖 1-18 微混合攪拌器結構圖[19]。

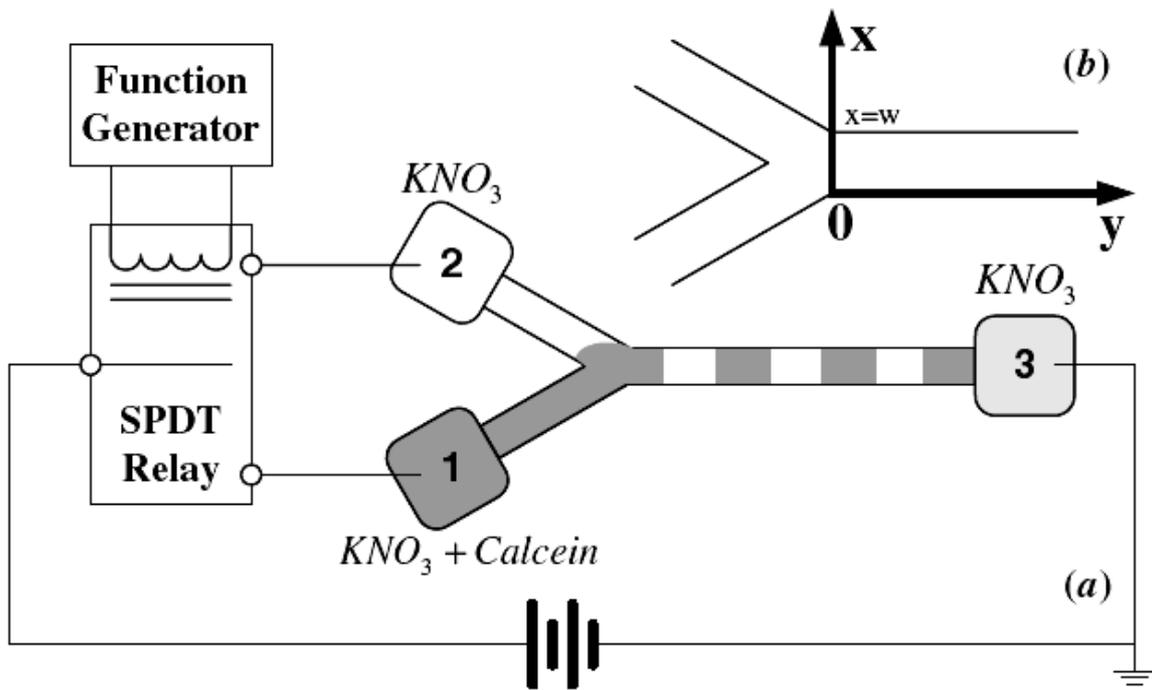


圖 1-19 利用 Function Generator 產生變動波紋[20]。

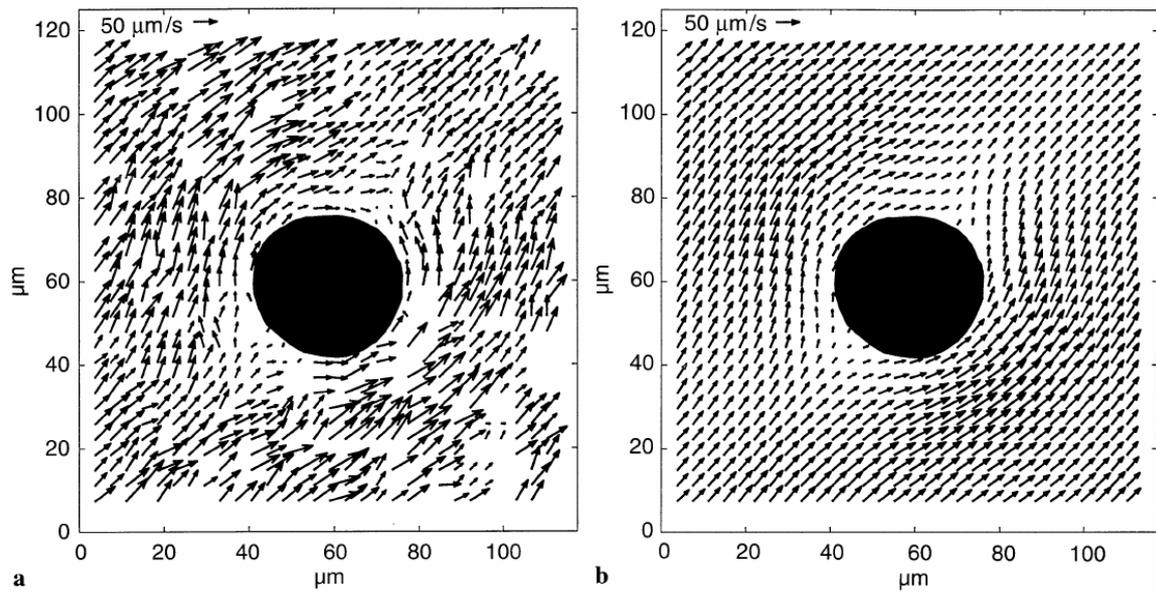


圖 1-20 流體流經圓柱狀況(a)為瞬時流場圖，範圍為 $120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$ ，圓柱直徑為 $30\ \mu\text{m}$ ，向量總量為 900 個 (b)為平均速度場[22]。

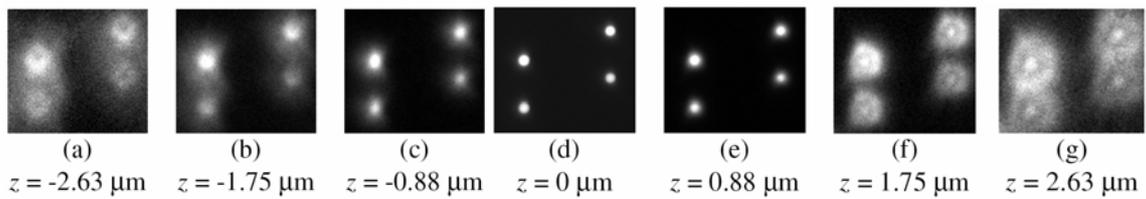


圖 1-21 為不同聚焦深度情形，(d)為完全聚焦 (c)(e)分別為完全聚焦向上 $0.88\ \mu\text{m}$ 和向下 $0.88\ \mu\text{m}$ 位置 (b)(f)則為完全聚焦向上 $1.75\ \mu\text{m}$ 和向下 $1.75\ \mu\text{m}$ 位置，但是已經無法辨識出向量圖 (a)(g)兩圖失焦的更為嚴重 [24]。

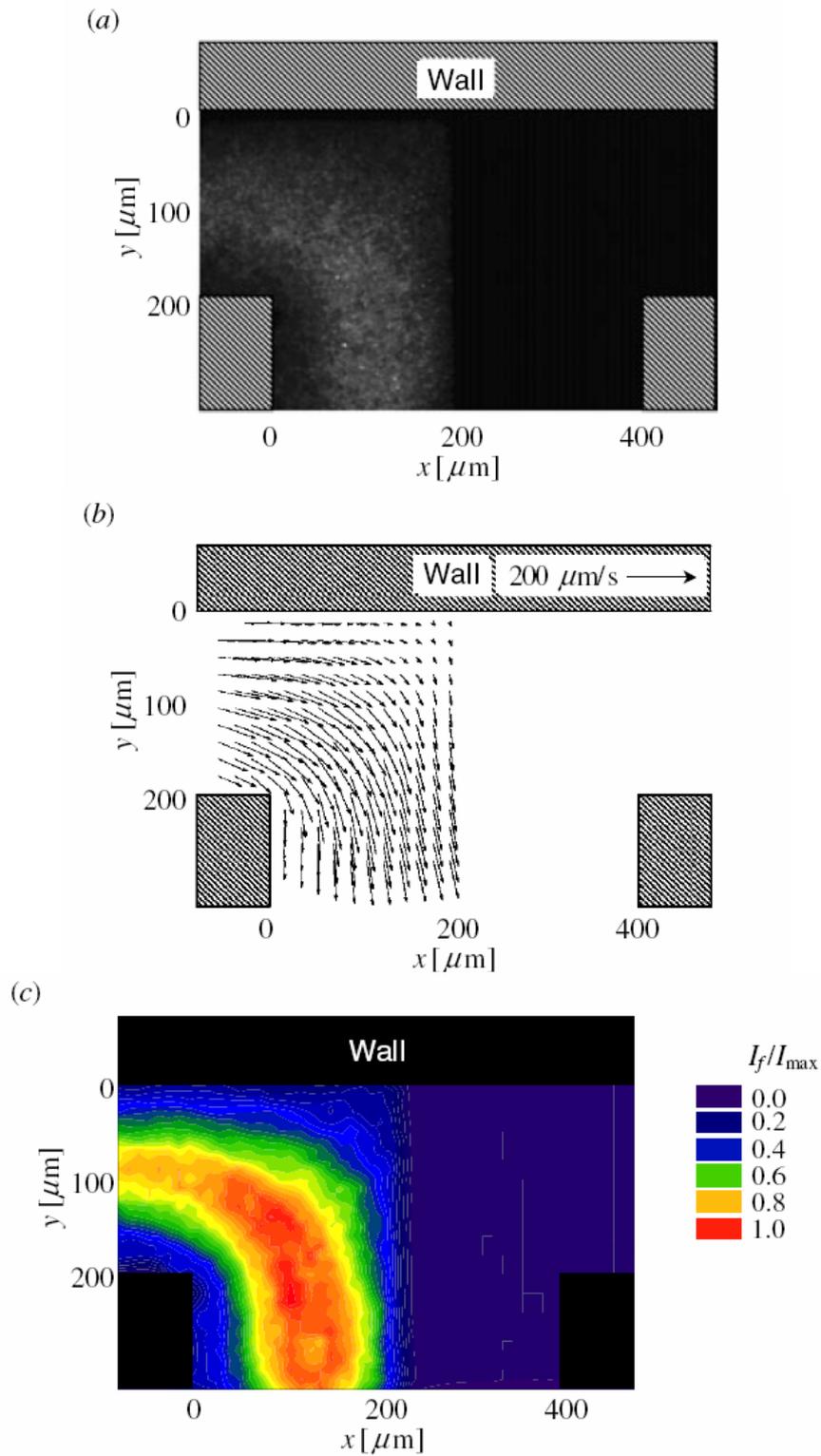


圖 1-22 Micro-PIV 量測(a)為瞬間粒子的影像，(b)為經由計算後的向量圖分佈，(c)為粒子濃度分佈[25]。

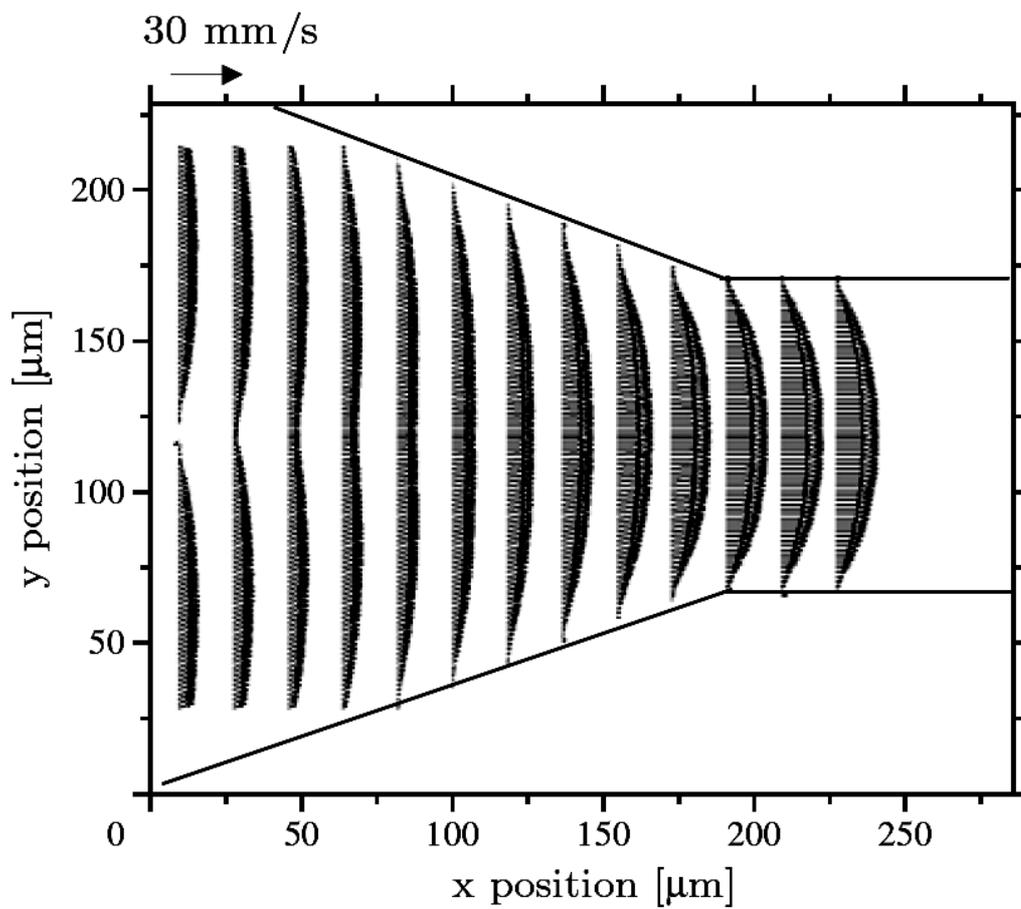


圖 1-23 為 Y 型注入口晶片之流場，範圍為 $250\ \mu\text{m} \times 275\ \mu\text{m}$ ，圖中向量圖為兩注入口的交會情形 [26]。

第2章 數值方法

由於近年來，電腦的運算處理單元和記憶體容量的快速成長，數值方法所能解決問題的複雜度也開始加大，利用計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)於流場中，已經廣泛被學術界使用。

2.2 肯德深數(Knudsen Number)

Kn 數可用來判斷流體是否連續的一個重要參數。可分為四個機制分別為連續體流機制、滑動流機制、過渡流機制、自由分子流機制，以下為 Kn 數的定義和四個機制，的區分範圍：

$$Kn = \frac{\lambda}{L}$$

λ ：流體分子的平均自由徑。

L ：流場的特徵長度。

(1) $Kn < 0.01$ 連續體流機制 (continuum flow regime)。

(2) $0.01 < Kn < 0.1$ 滑動流機制 (slip flow regime)。

(3) $0.1 < Kn < 3$ 過渡流機制 (transition flow regime)。

(4) $3 < Kn$ 自由分子流機制 (free molecular flow regime)。

本實驗的 $Kn < 0.01$ ，所以流體可視為連續體機制。

2.3 基本假設及統御方程式

再代入統御方程式中，為了簡化流場的設計做一些基本假設，而本研究所做的假設如下：

1. 流體為牛頓流體。
2. 流體為不可壓縮流體。
3. 流場為穩態。
4. 流體性質如黏度、密度與擴散係數為定值。
5. 忽略重力、磁力與溫度場的影響。
6. 兩流體進行混合只有濃度變化，沒有化學反應。

計算流體力學中求解偏微分統御方程式的方法為使用有限體積法 (Finite volume method) 的差分法，將微分方程式對其控制體積做積分，再將控制體積上的變數差分，而得到差分方程式。

以下為研究所需方程式：

連續方程式(Continuity equation)

$$\nabla \cdot V = 0$$

動量方程式(Momentum equation)

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \nabla)V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V$$

由基本假設中流場為穩態得 $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$

擴散方程式(Diffusion equation)

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + (V \cdot \nabla) C_m = D \nabla^2 C_m$$

由基本假設中流場為穩態 $\frac{\partial C_m}{\partial t} = 0$

為了簡化系統再分析上的複雜度，使用無因次化如下：

1. 連續方程式 (Continuity equation)

$$\nabla^* \cdot V^* = 0$$

2. 動量方程式 (Momentum equation)

$$-\nabla^* P^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} V^* = 0$$

3. 擴散方程式 (Diffusion equation)

$$\frac{1}{Re \cdot Sc} \nabla^{*2} C_m^* = 0$$

其中

C_m ：莫耳濃度 (kmol/m^3)。

V ：速度向量 (m/s)。

V_m ：速度量值 (m/s)。

ρ ：密度 (kg/m^3)。

μ ：黏滯係數 ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)。

$Re = \rho V_m D_h / \mu$ 。

在一般管流中 Re 可以用來分辨層流和紊流的界定，

當 $Re < 2300$ 為層流 (laminar)。

$Re > 2300$ 為紊流 (turbulent)。

$Sc = \mu / \rho D_h$ 。

經由無因次的過程中得知影響方程式的參數有二個分別是 Re 、 Sc 。 Re 數將隨著入口端給定的流速而有變化，因此雷諾數對晶片之混合效率及壓力降有一重要的影響，而 Sc 為動黏滯係數與擴散係數的比值，而由基本的假設可知動黏滯係數與擴散係數均為定值，所以 Sc 亦為定值。

2.4 模擬軟體簡介

在模擬的過程中可分為三個步驟，所使用的套裝應用軟體為 CFD-RC[®]，廣泛地使用於熱傳、流場、半導體製程、電場及磁場等情況。CFD-RC[®] 包括三個處理單元：前處理器 CFD-GEOM、主處理器 CFD-ACE、後處理器 CFD-VIEW。

(1)前處理：在前處理中，首要就是設計模型的幾何外形，之後建立網格，指定需要的邊界條件，所運用的軟體為 CFD-GEOM，使用的方法與 CAD 相似，並可以和 CAD、Pro-E 等相容，網格的建立包括結構性網格及非結構性網格，因此可應用在複雜幾何形狀上。

(2)運算處理器：經由前處理後，輸入模型所需要的流體性質，及各個邊界所需要的數值，再設定所要疊代的條件及收斂條件、輸出解答的格式，這個部分由軟體 CFD-ACE 完成。

CFD-ACE 可處理的範圍包括：

層流：可由給定的壓力場，求得速度場。

熱傳：利用焓求解，固體的熱傳導及熱輻射皆可計算。

化學：由內建的流場資料庫模擬混合物及多相的作用。

氣泡：可定義氣泡的直徑，求得氣泡的阻力及軌跡。

應力場：可由內建的資料庫給定材料性質，求得材料所受應力。

電場：電場總類包括直流電(DC)及交場電(AC)，於微場中特別定義電滲透流(EOF)。

(3)後處理：由運算處理後所得的資料，將所得資料整理的過程稱後處理。後處理常用是把資料轉移成人性化的圖形、表格，並用不同顏色表示不同的量值，所用的軟體 CFD-VIEW。

2.5 模擬步驟

模擬之前，首先要做的是對模型建立網格，這些過程由 CFD-GEOM 中製作，先將模型的幾何形狀製作完成，對個別線段定義格點數，而對於重要的部分，則使用較密的格點數，建立整個模型性網格。如果模型的外型複雜，不能使用結構性網格，則使用非結構性網格(圖 2-1)。本研究所使用的網格數為 376256，結構性網格為 10304，而非結構性網格為 365952，因為實驗上著重於阻塊的影響，所以阻塊上的格點數目分佈較密，入口和出口位置則使用較疏的格點。在網格的建立中，格點的疏密及分佈，將影響數值計算上的精確度及收斂速度，因此必須建立幾組不同的格點數的網格測試，找到一組精確度高，格點數目又能接受的網格。網格建立完成後，接下來就是對個別的邊界定義性質，包括入口、出口、壁面、接觸面等等。

完成以上步驟後則將檔案儲存成 DTF 的型式。打開 CFD-ACE 後打開用 CFD-GEOM 所儲存的 DTF 副檔名，進入主畫面(圖 2-2)，先對所要計算的模式(Problem Type)包括 Flow、Chemistry 點選，再設定系統為穩態(steady)或暫態(transient)，再設定系統的體積狀態(volume conditions)，其中包括密度(density)為 998 kg/m^3 、黏度(viscosity) 為 $10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 等等，另外還有設定染料的擴散係數(diffusivity) 為 $10^{-10} \text{ g/s} \cdot \text{m}^2$ 。邊界情形(boundary conditions)則是對個別邊界定義，如壁面的設定、每個區塊的交界面、入口的速度或壓力、出口的速度或壓力等等。還有初始條件設定，由於流道最初狀態為充滿流體且靜止的，因此設定無需做特別設定，之後就可進入疊代運算。

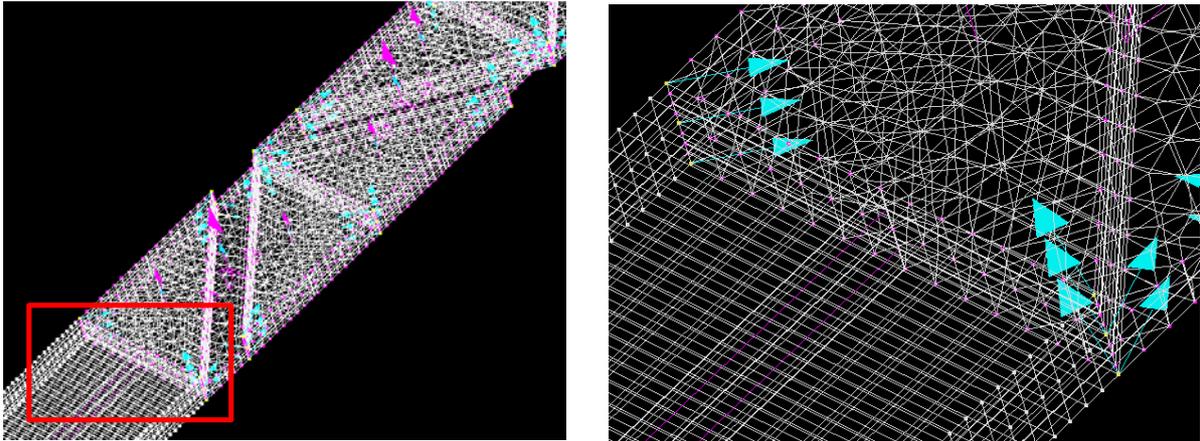


圖 2-1 左圖為微混合器網格設計。右圖為左圖框內局部放大圖。網格設計分二種，左下為結構網格性網格，右上為非結構性網格。

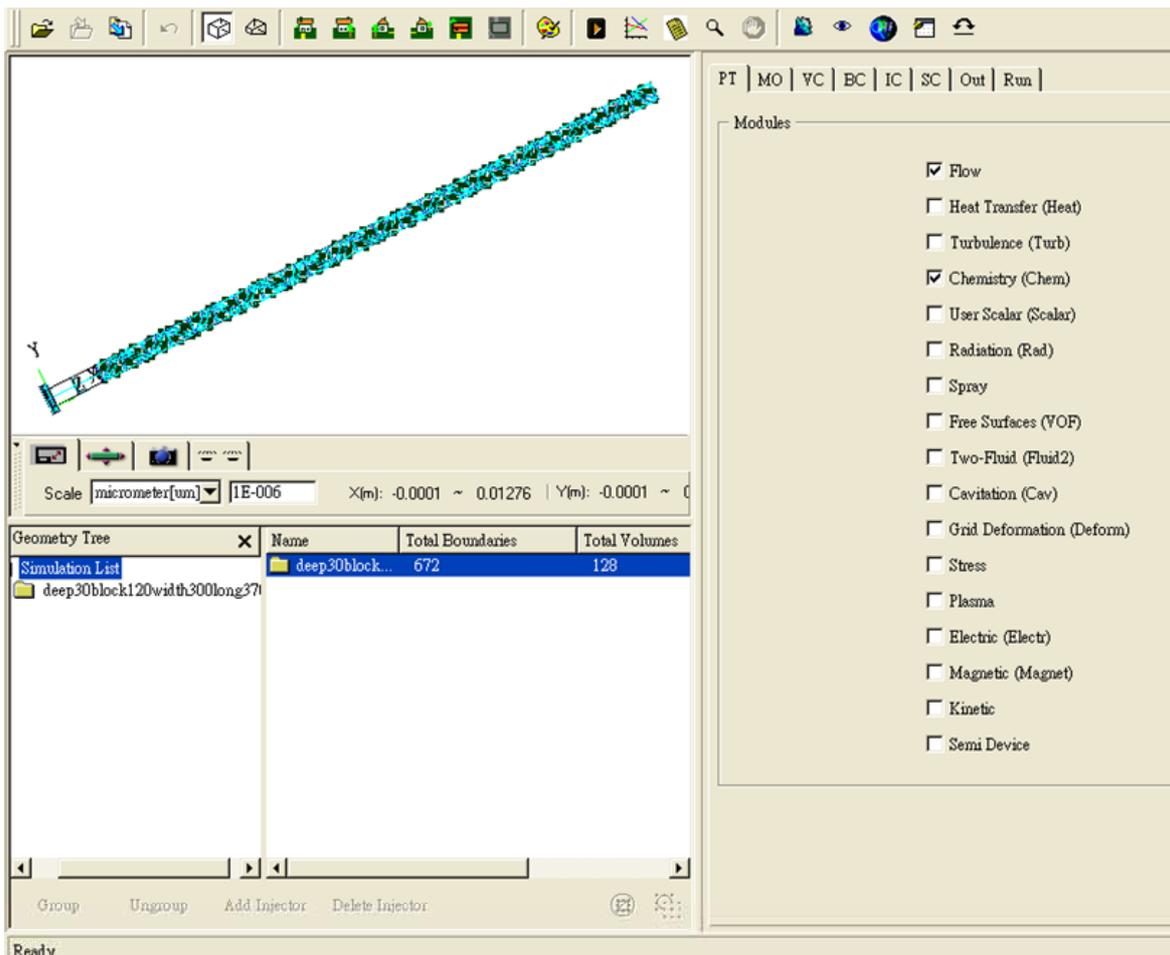


圖 2-2 CFD-ACE 主畫面，選擇模擬所需要的模式如圖中 Flow、chemistry。

第3章 實驗架設

3.2 微粒子影像速度儀

微粒子影像測速儀是以粒子影像測速儀做為分析基礎，另外加上顯微物鏡鏡頭而成，所以在介紹微粒子影像測速儀之前，先介紹粒子影像測速儀之系統。粒子影像測速系統乃是利用高速攝影機，將流場中雷射光頁(light sheet)上顯現之發光微粒子拍攝下來，利用對不同時間所拍攝之影像做分析，其分析方法是將整個拍攝區域分為數個分析區域，再利用統計方法對各質點求得各區域極短時間內之平均速度，因採用雙脈衝雷射曝光，故取像時間間隔極短，分析後所得之速度為極短時間內之平均速度，所以可視為瞬時速度，進而得到一完整之二維瞬時速度場。本實驗之微粒子影像測速儀使用螢光激發汞燈為照明光源，採用連續照射的方式把粒子的影像以顯微鏡系統放大，再由 CCD 裝置拍攝，之後傳送至個人電腦上。而相較於傳統的粒子影像測速儀所使用的六角透鏡形成雷射光頁，微粒子影像測速儀則是利用物鏡聚焦所產生的景深為量測面，稱為體積照明(volume illumination)，因此景深長短將影響測量的能力。

(圖 3-1)所示為本研究所架設之微粒子影像測速系統之架構示意圖。該系統包含六個部分，分述如下：

第一部分為光學系統：光學顯微鏡。此部分為系統的主要結構，包括

目鏡、物鏡、置物平台等等，它還支援架設電子耦合攝影機裝置、汞燈裝置等等。

第二部分為激發螢光粒子所需之激發光源，本實驗所使用的照明光源為 100 W 螢光激發汞燈。

第三部分為數位式：電子耦合攝影機為 Basler 所生產產品，型號為 A311fc，解析度(resolution)為 658×492 像素(pixels)其最高的拍攝速度為 73.5 fps。

第四部分為高傳輸介面卡：使用 IEEE1394 卡，傳輸速度為 200M bit/sec。

第五部分為質點影像測速分析軟體。本實驗利用 Fortran 所編寫的程式來計算流場的運動情形。所使用的方法是統計學上的相關性(correlation)。

第六部分為個人電腦：把 PIV 所產生的大量影像資料，傳輸到儲存系統上。

3.2.1 PIV 理論分析

由 CCD 在時間區間內 Δt 之兩張瞬時影像，由影像分析軟體可以得到數位化資料， $I_1(i, j)$ 和 $I_2(i, j)$ ，其中 $1 \leq i \leq M$ 和 $1 \leq j \leq N$ 。而 $M \times N$ 為數位化後的場總畫數。

為了要分析流場影數中的局部位移，因此將流場影像分割成次要區塊(interrogation)，分別為 I_{1P} 與 I_{2P} ，而次要區塊總畫素為 $m \times n$ 。因為質點的移

比其本身的平均間距大，因要在兩張影像中找出相同的質點並一一比對是很困難的，此時必須使用統計學上的方法來分析流場中質點的位移，而本實驗中所使的方法是相關函數。

相關函數的做法為固定其中一個影像，並將另一影像與之作相對的位移，找出其相關性 C ，

$$C(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{1P}(i, j) \cdot I_{2P}(i + \Delta x, j + \Delta y)$$

其中 $-m \leq \Delta x \leq m$ ， $-n \leq \Delta y \leq n$ 。同時並將其正交化(normalize)後可以得到，

$$C_n(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{1P}(i, j) \cdot I_{2P}(i + \Delta x, j + \Delta y)}{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{1P}^2(i, j) \right]^{1/2} \cdot \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{2P}^2(i, j) \right]^{1/2}}$$

其中 $-1 \leq C_n \leq 1$ ，而正負號即代表流場位移的方向。利用相關函數分佈後將會出現一個最高的峰值，即為最大相關性 $C_{n_{\max}}$ ，則相對於此最大的相關性的平移 $\Delta S(\Delta x, \Delta y)$ 即為質點的位移，亦即流場的位移。將此位移與鏡頭的放大率 (M') 作運算再除以時間間距 Δt 則可以得到流場的局部速度。

$$\vec{V}(u, v) = M' \times \frac{\Delta S(\Delta x, \Delta y)}{\Delta t}$$

而重複上述步驟，計算出流場中每一個解析區域所代表的局部速度，則可以獲得整個流場的運動情形，整個相關函數流程如(圖 3-2)。

3.2.2 實驗步驟

首先把 CCD 架構於顯微鏡上，在此過程中需先將 CCD 接上轉接環 (C-Mount)，把螢光激發汞燈打開並記得把汞燈的散熱風扇打開，接著把製作好的晶片放置於顯微鏡的平台上固定住，並把適量的粒子由注射幫浦注入晶片內，粒子經由汞燈的激發而發亮，把顯微鏡聚焦於所需的深度上，避免太近或太遠而降低了影像的辨識度。當影像已經從 CCD 取得時，由影像分析處理軟體轉換成數位化的資料，將資料載入分析程式進行運算，找出粒子移動位移，而由已知的時間差及粒子移動位移，求得影像內平面流場。整個實驗步驟流程如(圖 3-3)。過程中需注意幾點第一點為讓粒子的影像占較少的 pixel，因此應選擇適當的放大倍率或者合適的粒子直徑，使粒子不會占太大的 pixel。第二點為粒子濃度的配合，由於不同的放大倍率及不同的粒子直徑，因此需搭配粒子的濃度，適當的粒子濃度有助於 Micro-PIV 的辨識，但要注意的是粒子的影像儘量不要重疊。第三點為讓景深平面與流場平面有良好的平行度，避免因傾斜而造成速度場的干擾。

3.3 螢光粒子

選用粒子為 Duke scientific 所生產，產品包括數千 μm 到數百 nm 的標準粒子，粒子的種類包括乾式和溼式，及是否有螢光，螢光的種類包括綠，紅，藍等顏色。實驗所用的粒子為向台灣代理商煒群科技股份有限公司所購買的標準粒子直徑為 $3\ \mu\text{m}$ 的螢光粒子，粒子所發螢光為紅光，激發

波長(excitation maxima)為 542 nm，發散波長(emission maxima)為 612 nm。粒子的密度(density)為 1.05 g/cm^3 ，在波長 589 nm 時折射率(refractive index)為 1.59，每毫升的數量為 1.7×10^9 。原則上選用粒子直徑大、折射率大且密度相近於流體的粒子，使用螢光粒子可以解決在微觀下照明光源強度不足的問題。

3.4 模擬晶片設計

本研究所製作微混合器的程序為先從數值方式設計晶片的圖形比例，由模擬的結果分析混合的成效，再經由實際製作晶片測試實際的情形是否吻合。

在模擬的過程中設計三個相似的結構如下正反向上下層條紋 (Type 1)、上下層平行條紋(Type 2)、單層平行條紋 (Type 3)(圖 3-4)，三者差別在於不同的傾斜方向之障礙物及不同的位置之障礙物，由於這些差異而有不同的混合效率。

為了比較三個不同結構的差異性，在混合區域前的流體注入口，接上相同的長度、寬度、深度之入口，而三者出口的寬度，及深度亦相同。因此三者主要的差異僅在於混合區域的結構不同。在模擬的過程使用不同的 Re 數，分別為 $Re = 7.5$ 及 0.75 用來評估混合成效。由結果(圖 3-5)(圖 3-6)發現正反向上下層的結構的混合效率較高，因此使用正反向上下層的結構做為實際實驗晶片。

3.5 晶片製造

由於使用玻璃晶片設計材料，因此就必需使用光微影技術 (photolithography)。因為設計晶片的解析度往往到達數個微米之間，這種尺寸下傳統的機械加工方式不足以勝任此需求，所以須藉由光微影技術依實際設計的結構先製作出光罩，經由蝕刻的方式完成所需的結構。光微影技術又稱為黃光製程，整個過程必需在無塵室的黃光室完成。以下為光微影技術製程步驟及其它的製作程序：

1. 光罩設計

先設計所需的外形，再由軟體 AutoCAD 繪製幾何圖形，將繪製的幾何圖送外包廠商，能繪製的線寬最小為 20 μm 。

2. 基材前處理

使用基材製作品片前，基材本身不是潔淨的，因此必需先將基材表面的污垢清除，所使用的方法為將硫酸和雙氧水以 1:3 的方式混合，把基材放入混合液十分鐘，再浸泡三次的去離子水，將硫酸和雙氧水的混合液洗去。之後將晶片吹乾，再將晶片放置加熱板上，把晶片烤乾。

3. 底塗(priming)

由於光阻的附著力不佳，顯影或硬烤後易掉落，因此在晶片的表面先塗一層六甲基雙氧矽甲烷(hexamethyldisilazane, HMDS)，增加光阻附著力。

4. 光阻塗佈(coating photoresist)

將烤乾的晶片拿出放置於光阻塗佈機(spin coater)上，由真空泵將晶片吸附於轉架上，把適量的光阻擠出於晶片中央位置經由兩段速的旋轉，過程中避免氣泡的產生，啟動塗佈機，把光阻均勻塗於晶片上。實驗所使用的光阻為 AZ400K。

5.軟烤(soft bake)

將已均勻塗佈的晶片放置在加熱板上，把剛塗佈的光阻烤乾，軟烤溫度為 100 ，時間為 3 分鐘。

6.曝光(exposure)

將軟烤完的晶片取出，放置在曝光機內，把晶片固定於底座，在光罩置於晶片上且固定，經由曝光機曝光後，被照射的地方可由顯影液把光阻顯掉，則可在晶片上得所需的圖案。曝光的時間是 19 秒。

7.顯影(development)

曝光後的步驟為顯影，使用 AZ400K 當顯影液，把 AZ400K：去離子水= 1:3 的方式混合，把晶片放入 1 分鐘，再的去離子水清洗乾淨。

8.硬烤(hard bake)

加熱板加熱至 100 ，把晶片放置加熱板並開始加熱至 150 ，持溫 10 分鐘，之後慢慢使晶片在加熱板上降溫至室溫。

9.蝕刻(etching)

為濕式蝕刻(wet-etching)使用 BOE 當玻璃的蝕刻液，每蝕刻 5 分鐘，

以去離子水清洗，再泡稀釋的 HCl 至 10 秒左右，反覆數次，每次蝕刻所蝕刻深度為 0.9 μm ，蝕刻完把晶片清洗乾淨。

10. 去光阻(strip)

用 KOH 及 DI water 以 1 : 4 比例混合，並且加熱至 80 $^{\circ}\text{C}$ ，把晶片放置其中即可。

11. 對位

由於實驗所用晶片為雙層結構，因此需要較精確的對位。將已經清潔的晶片置於顯微鏡下的平臺上，使用針頭輕微地微調晶片直到晶片的邊界完全對準，使用 UV 膠塗於晶片的四角上固定，用 UV 光照射 10 分鐘固化。

12. 接合

將對位好的晶片放置於高溫爐內，晶片的下方放置石英平板，並且清潔平板使之平坦，上面亦放置石英平板，最後確定高溫爐水平，開始設定接合的溫度，每分鐘上升 5 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 675 $^{\circ}\text{C}$ ，持溫 20 分鐘，之後開始退火至室溫。(圖 3-7)整個實晶片的步驟流程。

3.6 實驗晶片計設

(圖 3-8)為微混合器的外觀圖形及內部的阻塊結構，整個結構由上下兩層晶片組成，二晶片上有些微差異，上層晶片障礙物位置為一個平行四邊形，而下層晶片則是另一方向相同尺寸的平行四邊形，晶片上的總寬度為 300 μm ，一單位的混合元件為 1040 μm ，障礙物寬度為 150 μm ，傾斜角

θ 為 39° ，此微混合器的設計變化於傾斜凹槽混合器，由於流體流過阻塊時會產生側向的擾動，提供對流效應而增加了分子的擴散效率，再藉由通道內流體表面的接觸以及微結構巧妙的安排，使得流體能在最短的時間內，提升混合。本晶片中傾斜凹槽結構的設計扮演著重要的地位，它影響著混合效率及壓力降大小。(圖 3-9)為微混合上視圖，將阻塊分割成 8 個截面，深色區域為阻塊，在截面 1-2-3-4 時阻塊在管道上方，首先流體從截面 1 到截面 2 時，由於阻塊的阻擋而使原本在上方的流體產生向左下的運動，從截面 2 到截面 3 時，阻塊從左上方慢慢移至中上方的位置，原本在左上方的流體開始往下流動，另一方面在下面的流體往右上流動，當從截面 3 到截面 4 時，左上方的流體亦往下流動。而截面 5-6-7-8 時阻塊則在管道下方，流體流動方式跟截面 1-2-3-4 時相同。

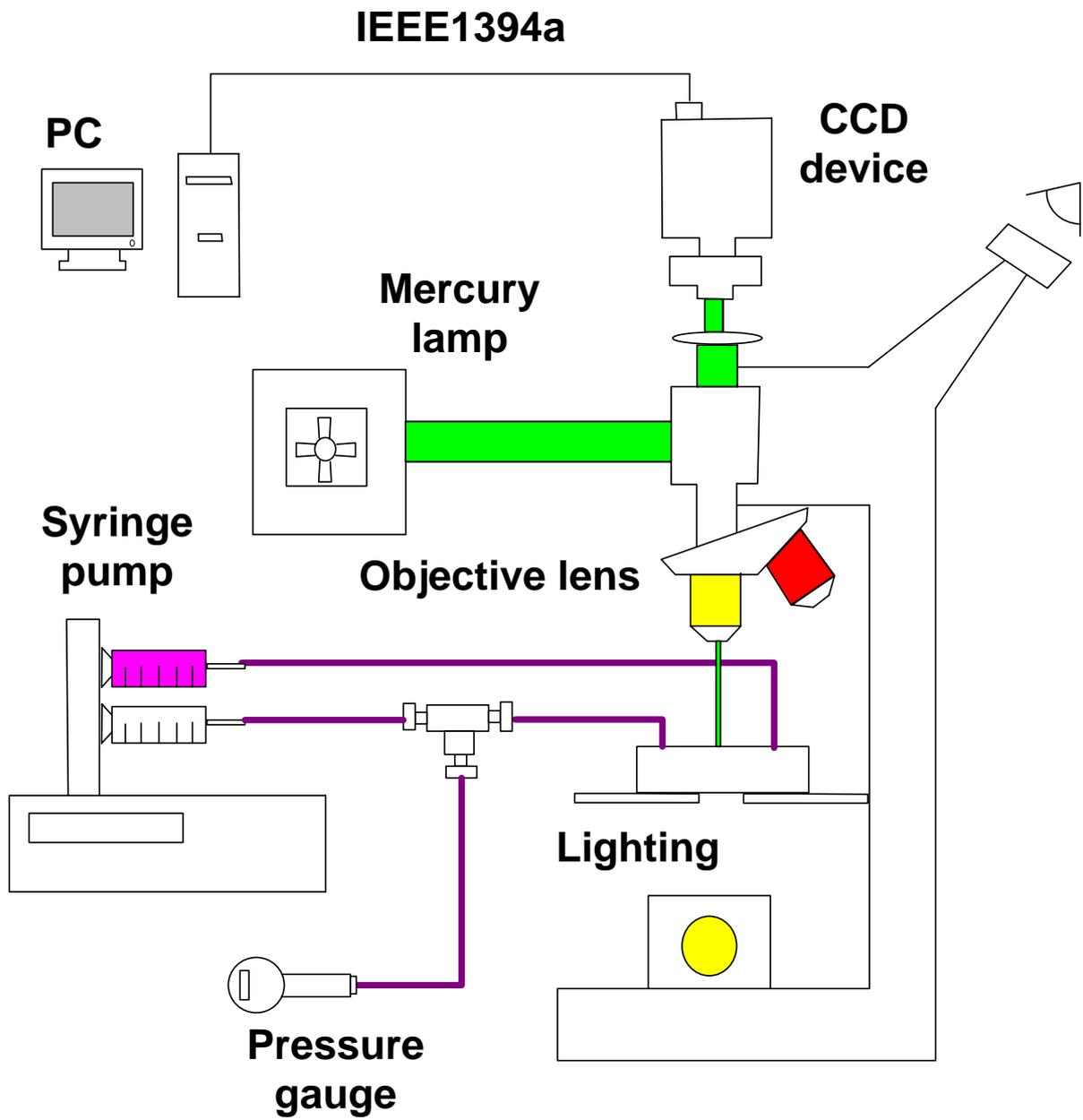


圖 3-1 微粒子顫像測速儀的架構。

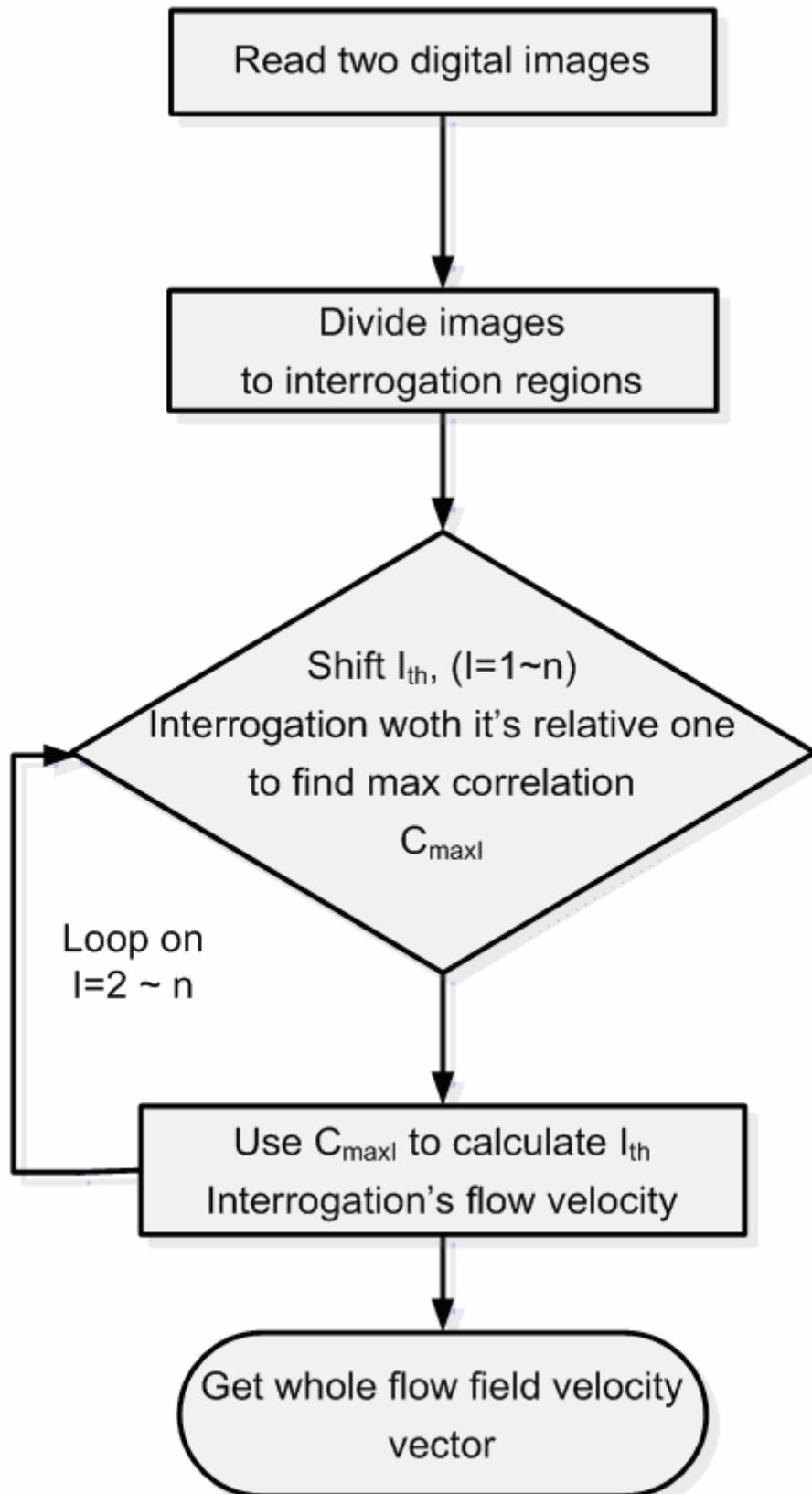


圖 3-2 統計學上的相關性之過程步驟。

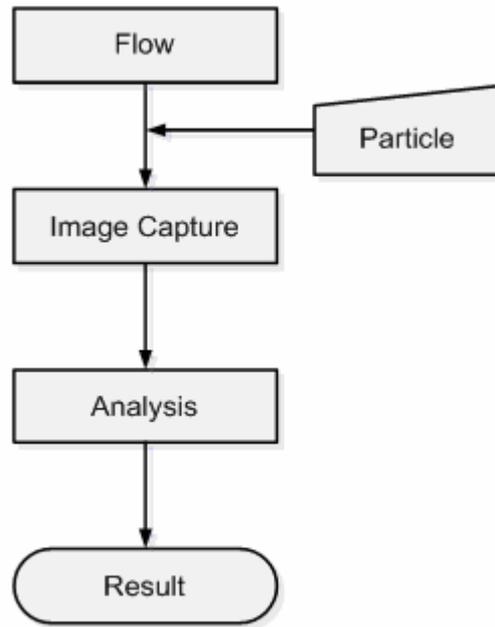
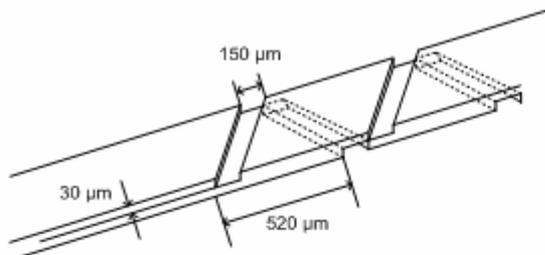
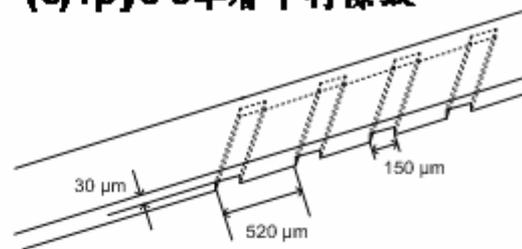


圖 3-3 微粒子顯像測速儀實驗過程之流程步驟。

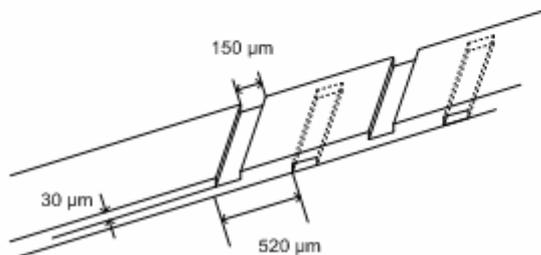
(a) Type 1 正反向上下層條紋



(c) Type 3 單層平行條紋



(b) Type 2 上下層平行條紋



(d) 注入口孔徑結構

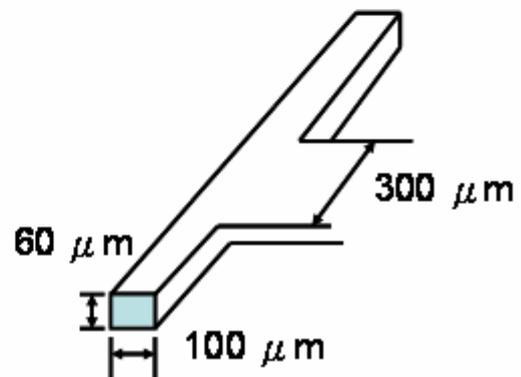


圖 3-4 三種混合器設計(a) 單層平行條紋、(b)上下層平行條紋、(c)正反向上下層條紋、(d)注入口口徑結構。

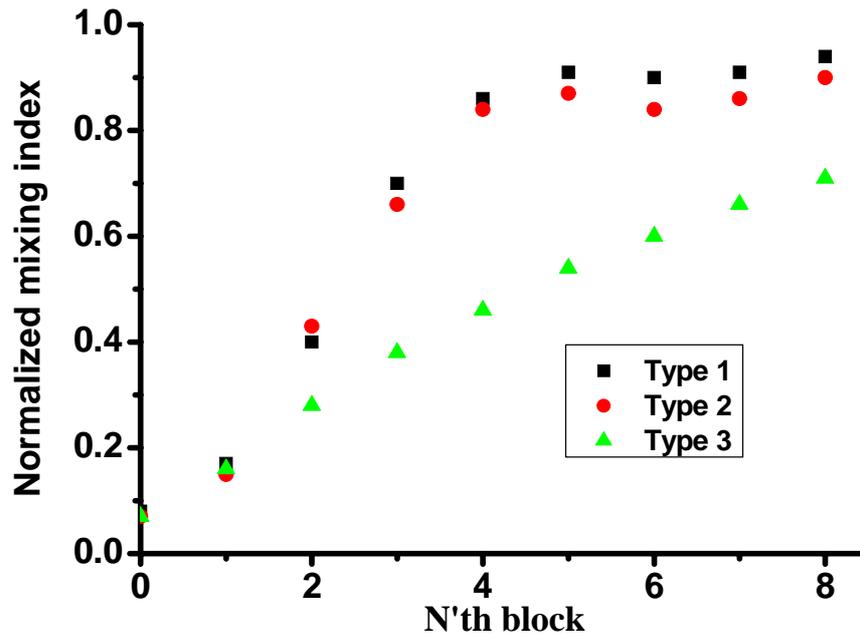


圖 3-5 當 $Re = 0.75$ 時，單層平行條紋、上下層平行條紋、正反向上下層條紋，三者的混合效率。Type 1 為正反向上下層條紋、Type 2 為上下層平行條紋、Type 3 為單層平行條紋。

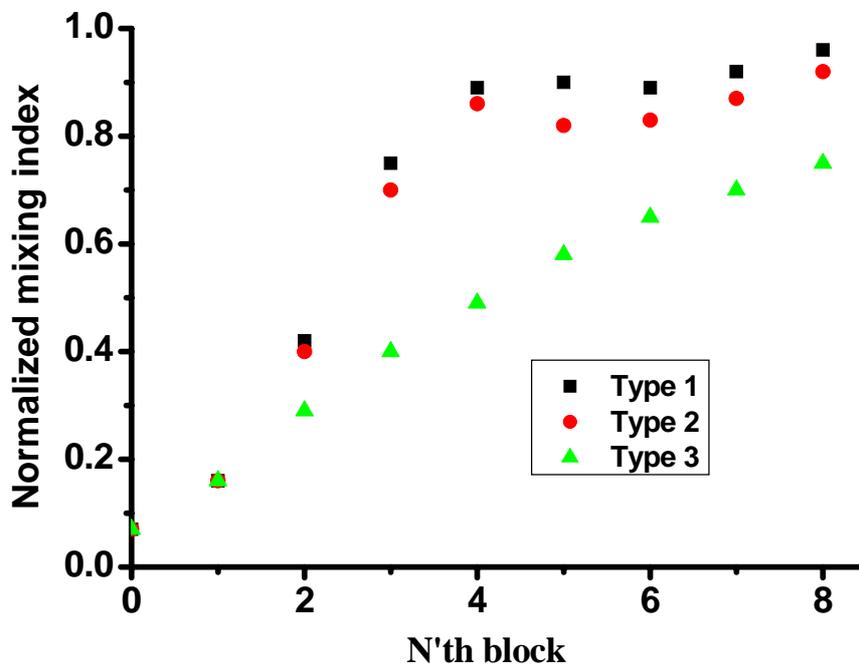


圖 3-6 當 $Re = 7.5$ 時，單層平行條紋、上下層平行條紋、正反向上下層條紋，三者的混合效率。Type 1 為正反向上下層條紋、Type 2 為上下層平行條紋、Type 3 為單層平行條紋。

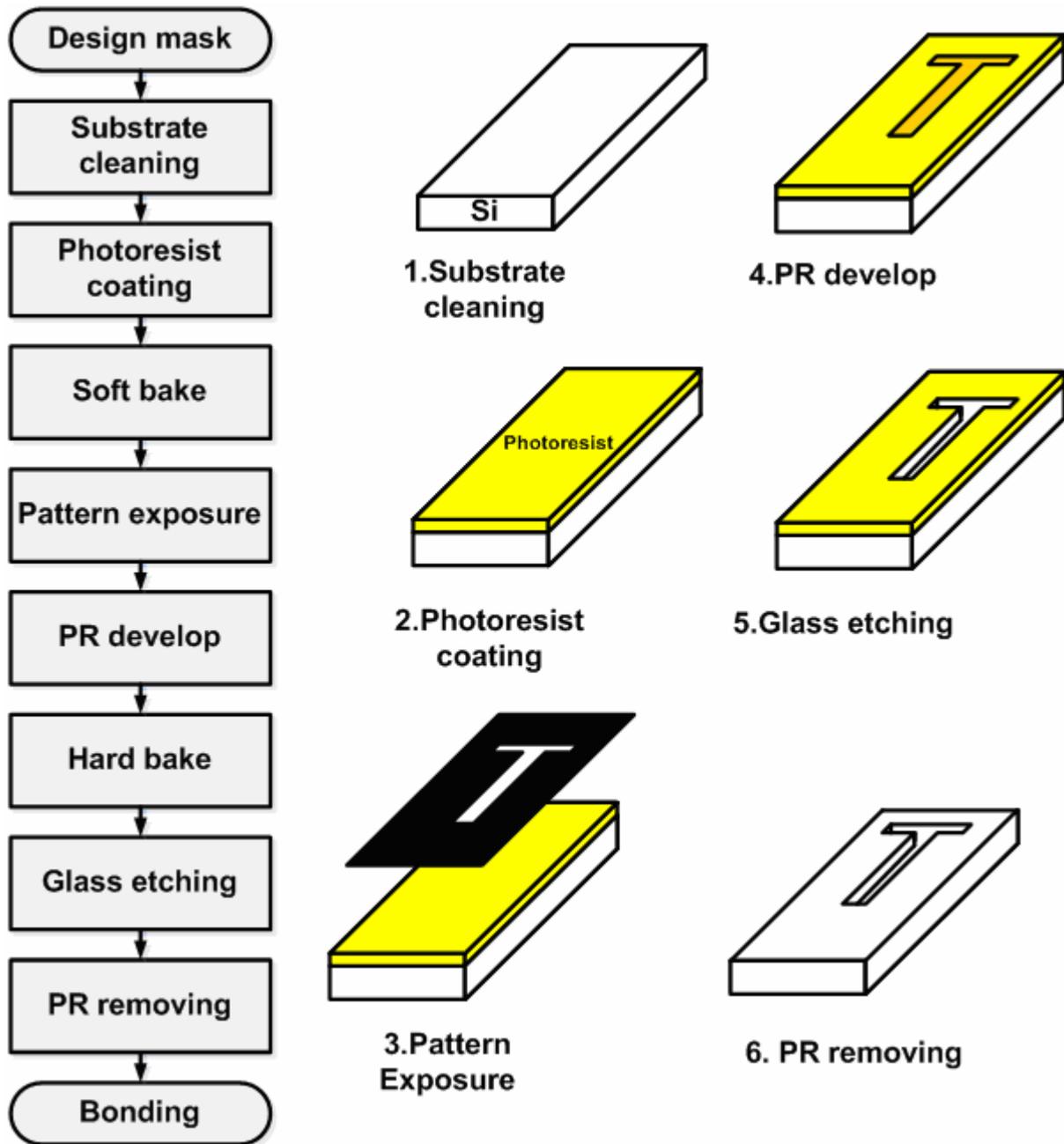


圖 3-7 晶片製作流程圖。

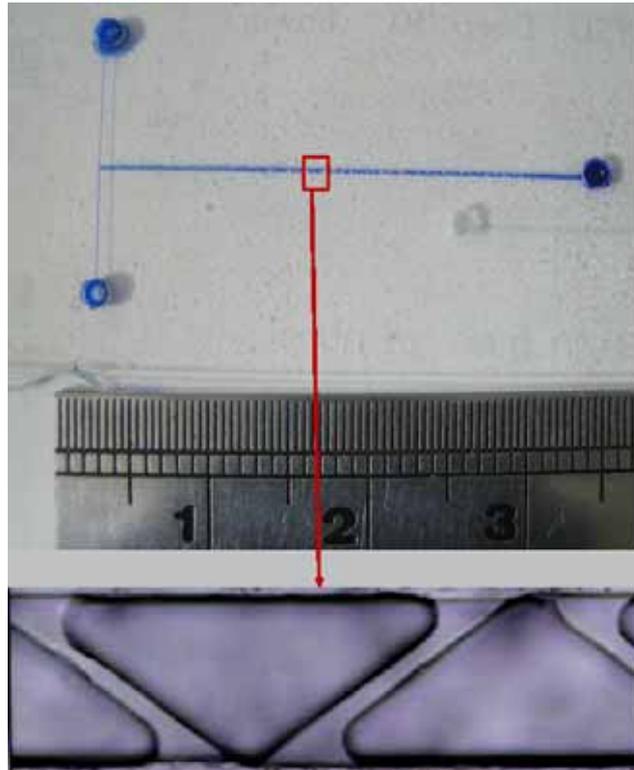


圖 3-8 微混合器之外觀。上圖藍色部分為填入染料的微管道結構，整個管道長度為 2.5 cm。下圖由顯微鏡下拍攝微混合器的阻塊結構。

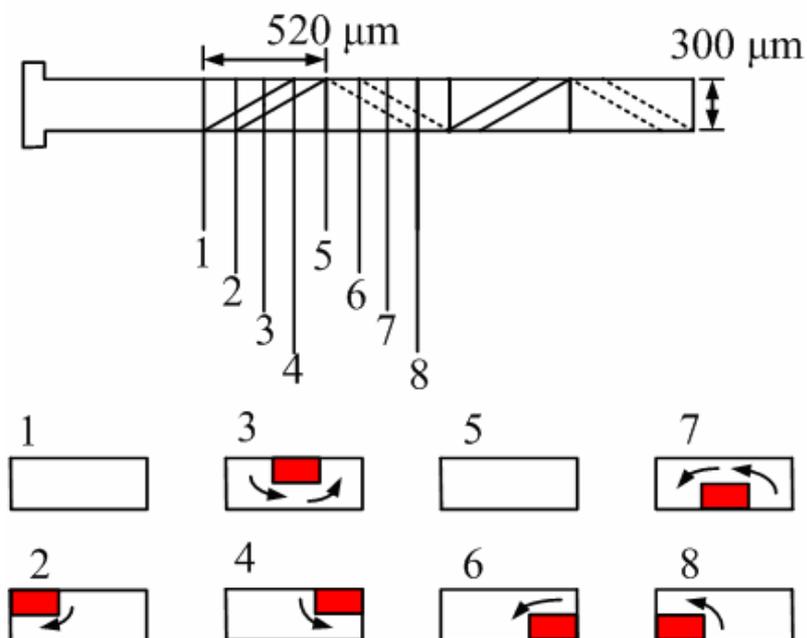


圖 3-9 微混合器上視圖及單位阻塊截面圖。將一單位阻塊分成 8 個截面，前 4 個截面時，阻塊位於微管道上方，而後 4 個截面時，阻塊則位於微管道下方。

第4章 結果與討論

實驗結果為不同 Re 數下的混合效率，由幫浦(syringe pump) 所注入的

流量求得速度及 Re 數如下：

$$Q = A \cdot V_m$$

$$D_h = \frac{4A}{\Gamma}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V_m \cdot D_h}{\mu}$$

其中

A：面積(m²)。

D_h：水利直徑(m)。

Q：流量(ml/min)。

V_m：速度量值(m/s)。

Γ：周長(m)。

ρ：密度(kg/m³)。

μ：黏滯係數(kg/m · s)。

4.2 混合結果分析

4.2.1 實驗結果及數值分析

在實驗的過程中，採用五組的流量為 36 μL/min、18 μL/min、14 μL/min、10 μL/min、3.6 μL/min，將流量轉換成 Re 數，可得分別為 Re = 7.5、

3.75、3、2.25、0.75 之間，藉由上述的流量範圍，觀察流體流經阻塊時混合效率的變化。

實驗前必須清潔晶片的表面與內部的通道，因為晶片的表面與內部的通道可能殘留微粒、雜質，在影像的擷取上將會被影響，影像的品質將會降低。當晶片已經完成接合後，內部的管道將無法再接觸到，所以無法使用一般的程序清潔，而藉由去離子水注入內部通道，清除內部的微粒、雜質，再以真空幫浦把去離子水連同微粒雜質一起吸出，將內部的污染程度降到最低。

在主流道的混合效果由染料濃度的分佈狀況判定。濃度的分佈起伏越平坦表示混合的效果越好。由以下的公式決定混合效率， C_0 表示未混合的濃度其值為 1 或 0， C_∞ 表示為最佳的混合濃度其值為 0.5，透過此公式，便可得到混合器沿著渠道之混合效率圖。

$$\text{Mixing index} = \left(1 - \frac{\int_0^w |C - C_\infty| dy}{\int_0^w |C_0 - C_\infty| dy} \right)$$

實驗中由 CCD 觀察兩入口交會處到出口通道的混合狀況，利用影像分析軟體，將所擷取到的影像載入，把影像轉成灰階格式，進行總體分析，判別染料的部分及去離子水的部分，染料部分為白色而去離子水為黑色(圖 4-1)，運算方式為影像中，白色和黑色所佔的比例進行分析，再由影像分析

軟體可將影像轉成數位化資料，找到數位化資料的最大值及最小值，影像數位化後的最大值及最小值分別表示未混合的染料及未混合的去離子水。

最後把數位化資料轉成範圍 0~1 之間，帶入上述公式及可得混合效率。

(圖 4-2)分三部份，分別為 $Re = 0.75$ ($V = 0.01 \text{ m/s}$) 實驗求得染料注入微渠道之分佈圖，及模擬求得染料注入微渠道之分佈和壓力的情形，最初流體由注入口流往管道至交會處可看出染料只有些微混合，但隨著流動距離的增加，開始有明顯的混合。(圖 4-3)為 $Re = 0.75$ 的混合效率圖，縱軸為混合效率，橫軸為流體經過數個阻塊，實心方塊為實驗結果，實線為模擬結果。當流體剛流經阻塊時，混合成效有明顯的提升，當到達第 9 個時達到一個高峰，然後緩緩下降，最低的混合效率為 78% 經過第 16 個時又慢慢的爬升，最後趨於穩定而混合效率為 95%。(圖 4-4)為實驗求得第 1, 6, 11, 16, 21 個阻塊所對照的濃度分佈，縱軸為染料的濃度分佈，橫軸為混合區域的位置。最初未經阻塊時可看出右邊表示入口端帶有染料，左邊為不帶染料的純水，只有中間的位置有較大的濃度梯度。當經過第 4 個阻塊時混合大大的提升，經過第 12 個阻塊時，產生翻轉的現象，高濃度的位置由原本的右邊移到左邊，到 16 個阻塊時已經趨於平衡。

(圖 4-5)為 $Re = 2.25$ ($V = 0.03 \text{ m/s}$) 實驗求得染料注入微渠道之分佈圖及模擬求得染料注入微渠道之分佈和壓力的情形，一開始流體交會處可看出染料只有些微混合，但隨著流動距離的增加，開始有明顯的混合。(圖 4-6)

為 $Re = 2.25$ 的混合效率圖，縱軸為混合效率，橫軸為流體經過數個阻塊，實心方塊為實驗結果，實線為模擬結果。當流體剛流經阻塊時，混合成效有明顯的提升，當到達第 8 個時達到一個高峰，然後緩緩下降，最低的混合效率為 75%，經過第 16 個時又慢慢的爬升，最後趨於穩定而混合效率為 92%。(圖 4-7)為實驗求得第 1, 6, 11, 16, 21 個阻塊所對照的濃度分佈，縱軸為染料的濃度分佈，橫軸為混合區域的位置。最初未經阻塊時可看出右邊表示入口端帶有染料，左邊為不帶染料的純水，只有中間的位置有較大的濃度梯度。當經過第 4 個阻塊時混合大大的提升，經過第 8 個阻塊時，產生翻轉的現象，高濃度的位置由原本的右邊移到左邊，到 16 個阻塊時已經趨於平衡。

(圖 4-8)為 $Re = 3$ ($V = 0.025$ m/s) 實驗求得染料注入微渠道之分佈圖及模擬求得染料注入微渠道之分佈和壓力的情形，一開始流體交會處可看出染料只有些微混合，但隨著流動距離的增加，開始有明顯的混合。(圖 4-9)為 $Re = 3$ 的混合效率圖，縱軸為混合效率，橫軸為流體經過數個阻塊，實心方塊為實驗結果，實線為模擬結果。當流體剛流經阻塊時，混合成效有明顯的提升，當到達第 7 個時達到一個高峰，然後緩緩下降，最低的混合效率為 74%，經過第 15 個時又慢慢的爬升，最後趨於穩定而混合效率為 94%。(圖 4-10)為實驗求得第 1, 6, 11, 16, 21 個阻塊所對照的濃度分佈，縱軸為染料的濃度分佈，橫軸為混合區域的位置。最初未經阻塊時可看出右

邊表示入口端帶有染料，左邊為不帶染料的純水，只有中間的位置有較大的濃度梯度。當經過第 4 個阻塊時混合大大的提升，經過第 8 個阻塊時，產生翻轉的現象，高濃度的位置由原本的右邊移到左邊，到 16 個阻塊時，則已經趨於平穩。

(圖 4-11)為 $Re = 3.75$ ($V = 0.05$ m/s) 實驗求得染料注入微渠道之分佈圖及模擬求得染料注入微渠道之分佈和壓力的情形，一開始流體交會處可看出染料只有些微混合，但隨著流動距離的增加，開始有明顯的混合。(圖 4-12)為 $Re = 3.75$ 的混合效率圖，縱軸為混合效率，橫軸為流體經過數個阻塊，實心方塊為實驗結果，實線為模擬結果。當流體剛流經阻塊時，混合成效有明顯的提升，當到達第 7 個時達到一個高峰，然後緩緩下降，最低的混合效率為 74%，經過第 15 個時又慢慢的爬升，最後趨於穩定而混合效率為 92%。(圖 4-13)為實驗求得第 1, 6, 11, 16, 21 個阻塊所對照的濃度分佈，縱軸為染料的濃度分佈，橫軸為混合區域的位置。最初未經阻塊時可看出右邊表示入口端帶有染料，左邊為不帶染料的純水，只有中間的位置有較大的濃度梯度。當經過第 4 個阻塊時混合大大的提升，經過第 8 個阻塊時，產生翻轉的現象，高濃度的位置由原本的右邊移到左邊，到 16 個阻塊時已經趨於平衡。

(圖 4-14)為 $Re = 7.5$ ($V = 0.1$ m/s) 實驗求得染料注入微渠道之分佈圖及模擬求得染料注入微渠道之分佈和壓力的情形，剛開始流體交會處可看

出染料只有些微混合，但隨著流動距離的增加，開始有明顯的混合。(圖 4-15) 為 $Re = 7.5$ 的混合效率圖，縱軸為混合效率，橫軸為流體經過數個阻塊，實心方塊為實驗結果，實線為模擬結果。當流體剛流經阻塊時，混合成效有明顯的提升，當到達第 6 個時達到一個高峰，然後緩緩下降，最低的混合效率為 73%，經過第 13 個時又慢慢的爬升，最後趨於穩定而混合效率為 90%。(圖 4-16) 為實驗求得第 1, 6, 11, 16, 21 個阻塊所對照的濃度分佈，縱軸為染料的濃度分佈，橫軸為混合區域的位置。最初未經阻塊時可看出右邊表示入口端帶有染料，左邊為不帶染料的純水，只有中間的位置有較大的濃度梯度。當經過第 4 個阻塊時混合大大的提升，經過第 8 個阻塊時，正產生翻轉的現象，高濃度的位置由原本的右邊移到左邊，到 16 個阻塊時已經趨於平衡。

(圖 4-17) 為 $Re=0.75$ 、 2.25 、 3 、 3.75 、 7.5 時的實驗所求得混合效率，5 條線的軌跡相當類似，顯示高雷諾數和低雷諾數的混合效率相當一致。(圖 4-18) 為微混合器所需的壓力降，壓力隨著雷諾數的增加而劇烈遞增。實驗所量測壓力降為接近注入口處所連結壓力計，到出口處之間的壓力差，因此有些微誤差，而量測值將比實際值來的大。

4.3 流場結果分析

4.3.1 實驗結果及數值分析

在實驗中，使用微粒子影像測速儀量測晶片內微管道的流場，並以數

值模擬的結果分析。量測的範圍分成二部份，第一部份為兩流體交會處，另一為流經阻塊之流場，由 CCD 照相機取得包括粒子影像圖，經由質點影像測速分析軟體得到流場的向量圖，和粒子沿著管道流動之軌跡圖。由這些測量的數據，證明設計的混合器所產生的橫向位移而提高混合效率。

4.3.1.1 未經阻塊前之流場

在微混合器入口的一端加入粒子，觀察在二入口交會處的流場，(圖 4-19 (a))由可看出在入口速度為 $200 \mu\text{m/s}$ 的流場，垂直寬度為 $150 \mu\text{m}$ ，水平長度為 $150 \mu\text{m}$ ，並觀察在未經阻塊前時流場能保持一定的均勻性。由 Micro-PIV 之分析可到流場的流速在水平方向 $200 \mu\text{m/s}$ ，而相對應的垂直方向速度均很小。經由此處分析可以確保之後的實驗流體在通過阻塊前之上游流場為一穩定均勻的。(圖 4-19 (b))為在相同的位置使用數值模擬而求得之流場向量圖，在這速度下所對應的雷諾數為 0.015。(圖 4-20)為二入口交會處，延長曝光時間之粒子移動路徑，藉由曝光時間的增加，則可得到流場中粒子的軌跡圖。上述圖中可觀察到，數值分析與實驗結果有良好的相似度。

4.3.1.2 經阻塊時之流場

當粒子由入口端流經管道，粒子因為層流的原因而相當平穩，但在粒子經過阻塊時，將開始隨著阻塊的位置而擾動，因此粒子的移動軌跡，由原本的一維的位移到後來三維的位移，(圖 4-21(a))為當入口速度為 200

$\mu\text{m/s}$ 時粒子流經阻塊時的流場，黑色線代表阻塊位置，垂直寬度為 $300\ \mu\text{m}$ ，水平長度為 $600\ \mu\text{m}$ ，觀察在經阻塊時產生的垂直方向速度。由結果得知粒子在流經阻塊時將產生向下的垂直方向速度。(圖 4-21(b))為使用數值模擬求得之流場，與實驗結果比較，可看出接近管壁之速度分佈有較明顯差異，推測為粒子無法流入管壁上邊界層，因此實驗上無法辨別出接近管壁上的速度，所以產生差異，(圖 4-22)為粒子流經阻塊時延長曝光時間之粒子軌跡，藉由調整 CCD 內曝光時間的增加則可得到流場中粒子的軌跡圖。(圖 4-23)為粒子流經第一個阻塊時產生向上位移，由圖中看出當流體流經一個阻塊時將產生 $50\ \mu\text{m}$ 的垂直方向位量。

由於實驗器材的限制，因此本實驗對流場的研究主要著重於非高速流場的研究，由微粒子影像測速儀量測晶片內管道的流場，在以相同的參數下使用數值模擬的方式驗證。

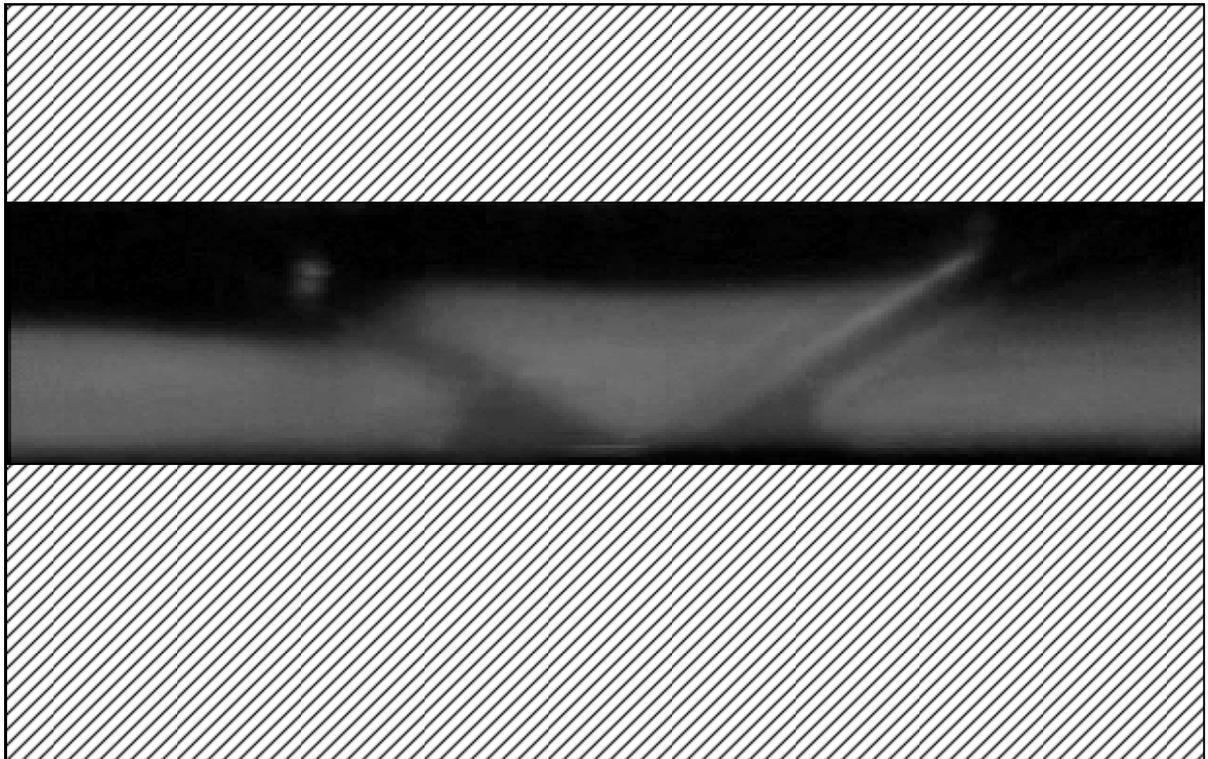
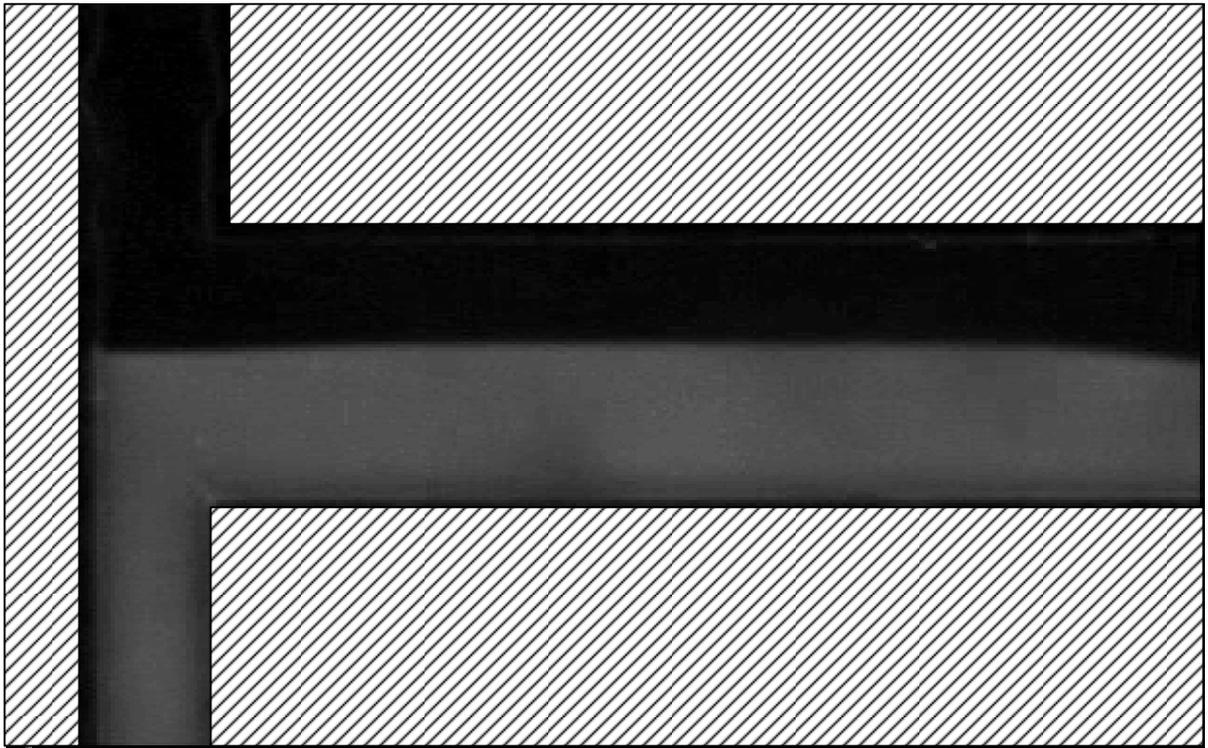


圖 4-1 入口交會處及流經阻塊之灰階影像。

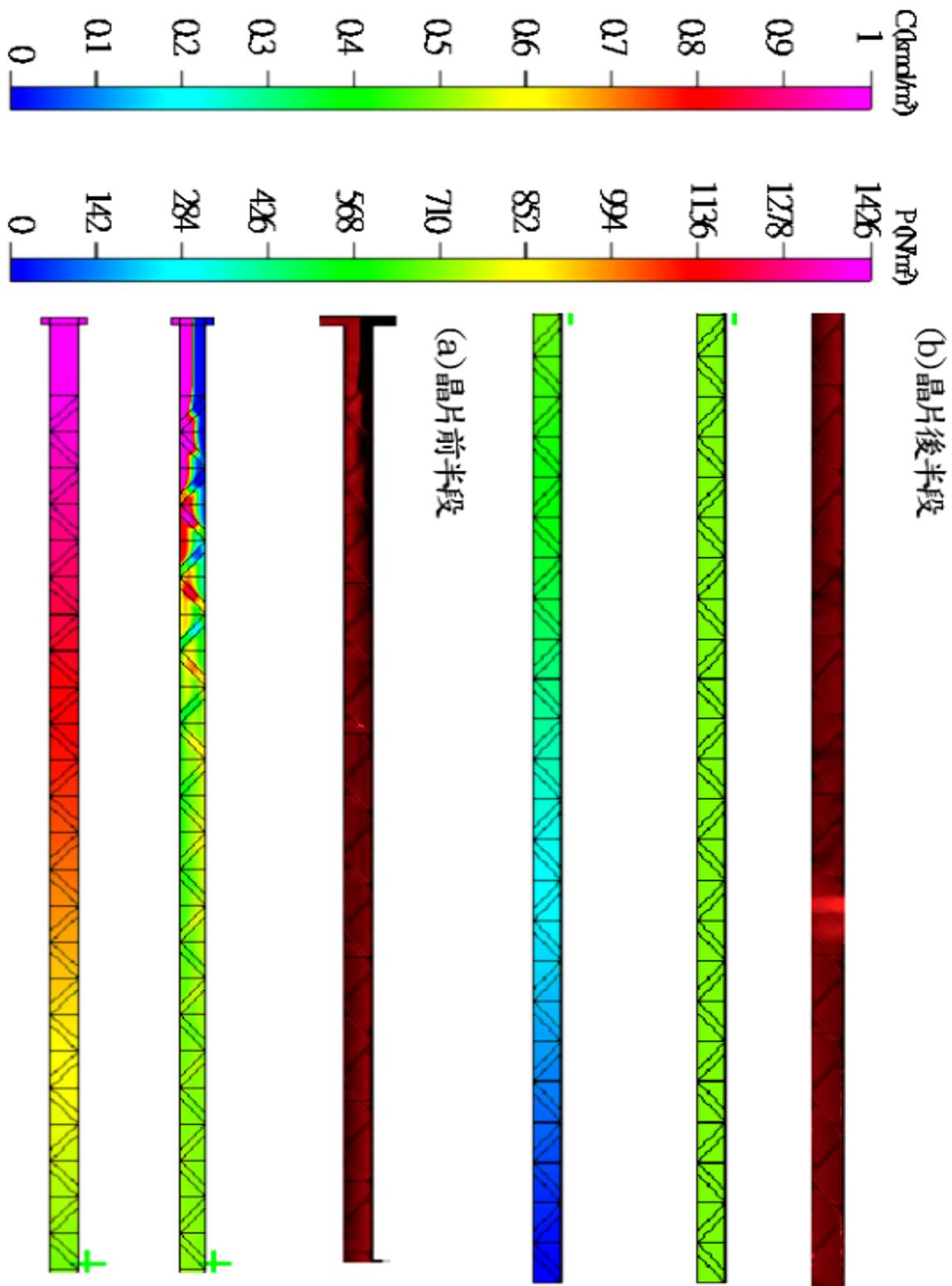


圖 4-2 當 $Re=0.75$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。

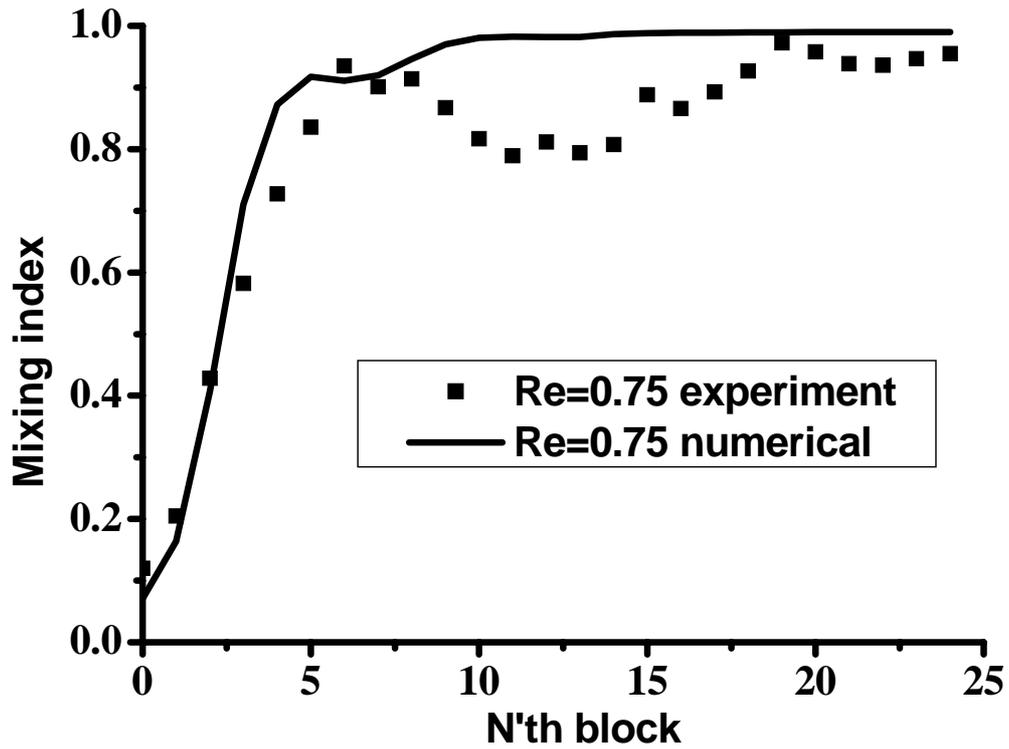


圖 4-3 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 0.75$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。

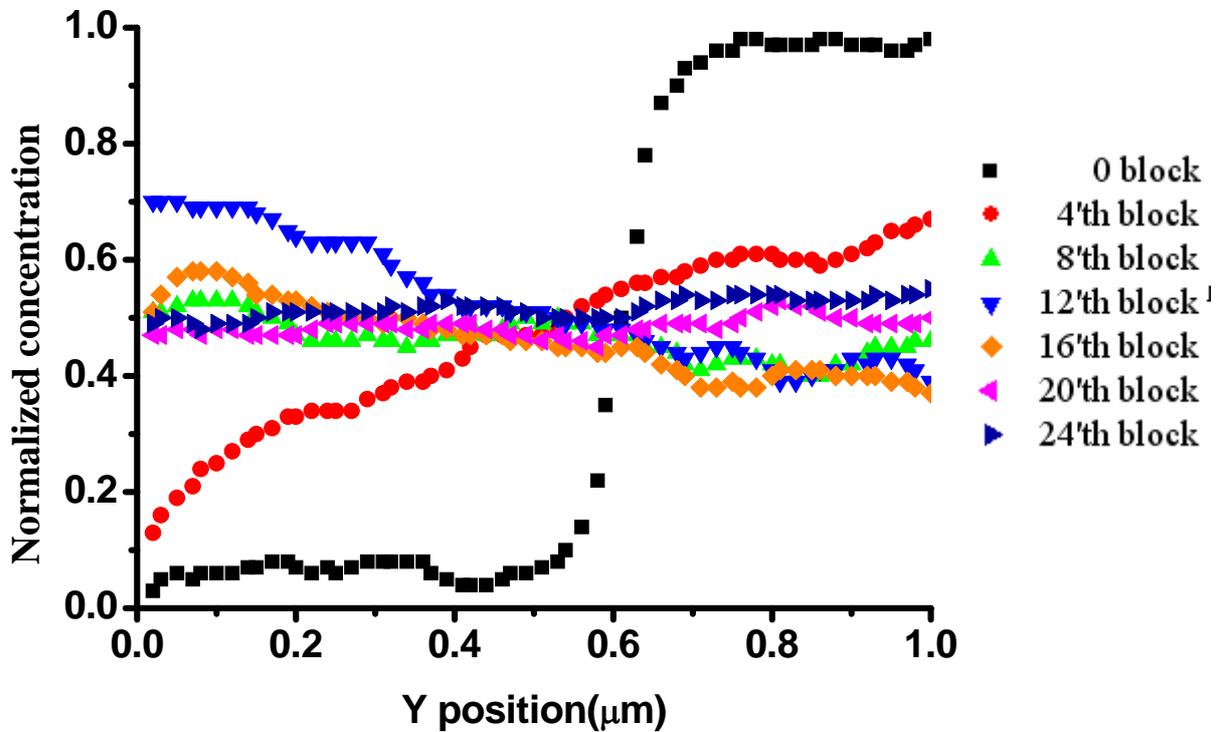


圖 4-4 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 0.75$)。

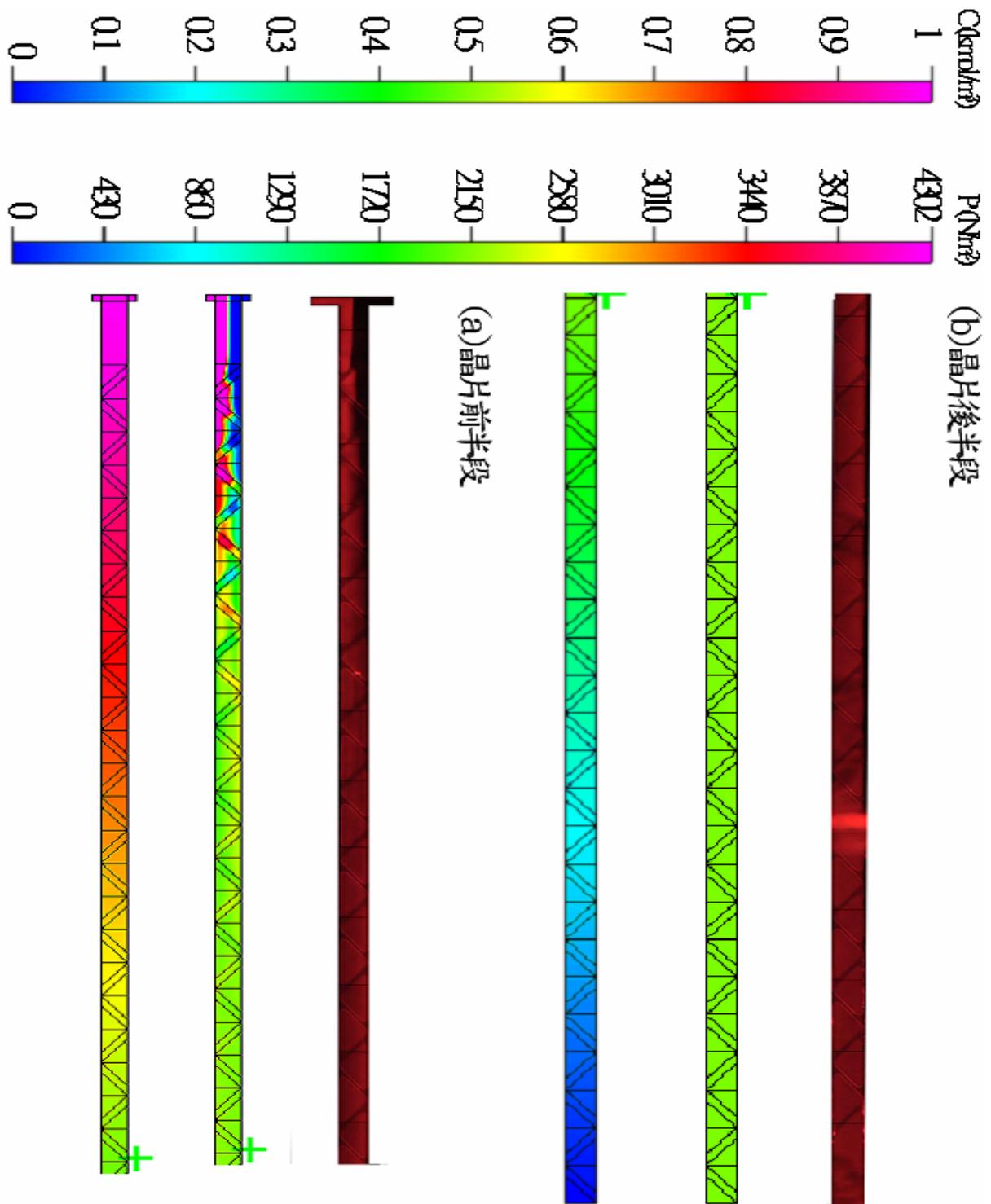


圖 4-5 當 $Re = 2.25$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。

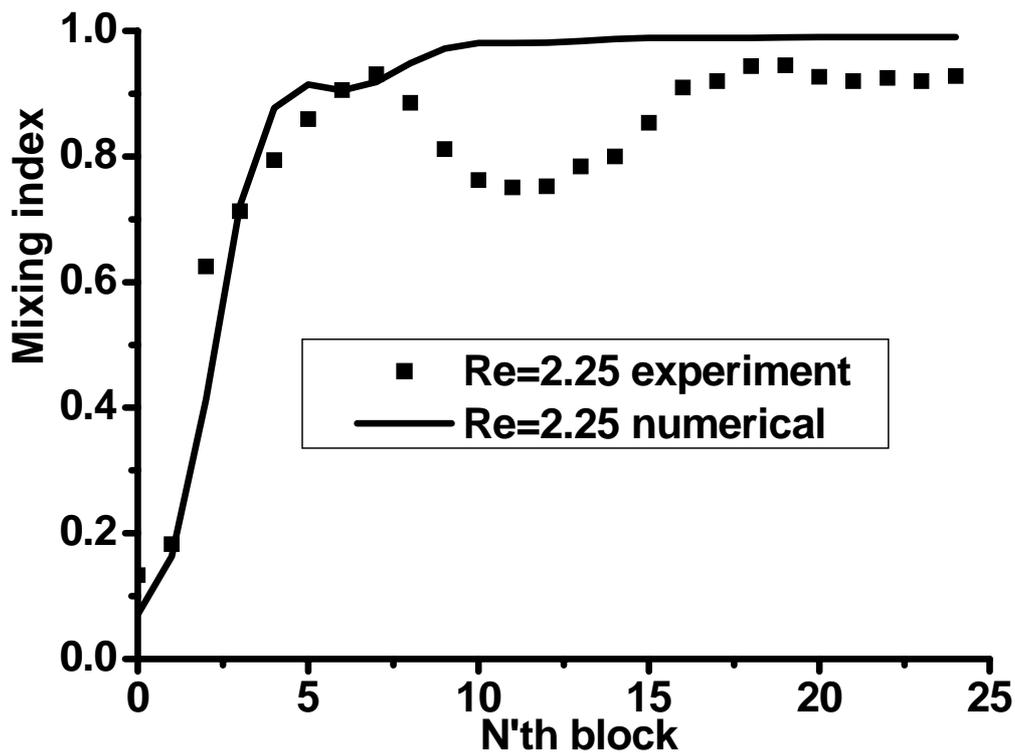


圖 4-6 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 2.25$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。

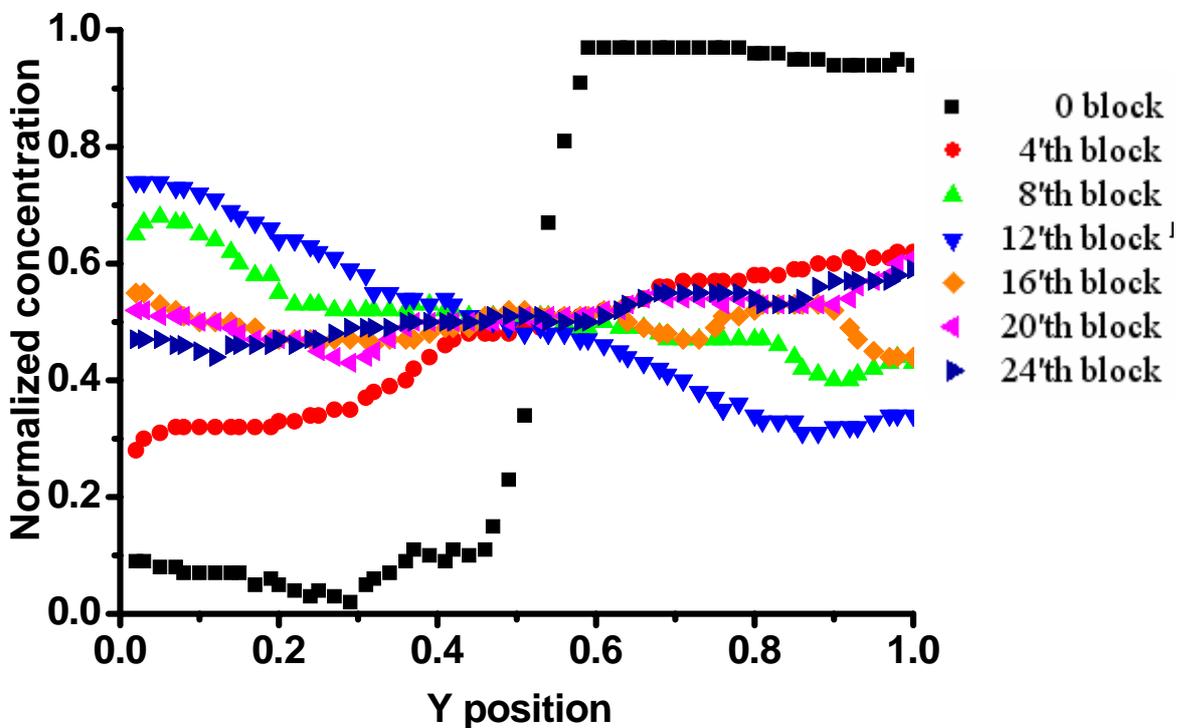


圖 4-7 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 2.25$)。

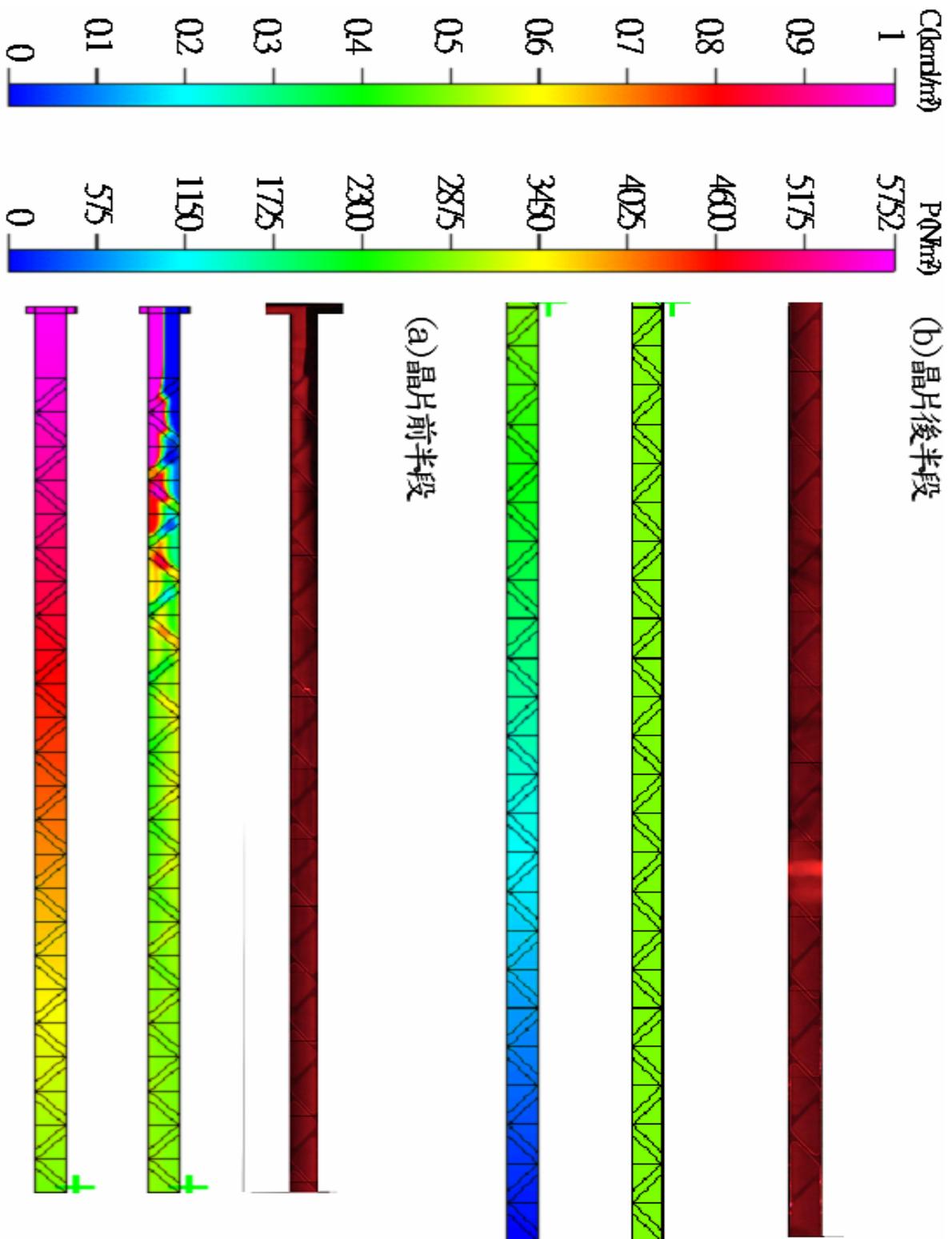


圖 4-8 當 $Re = 3$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。

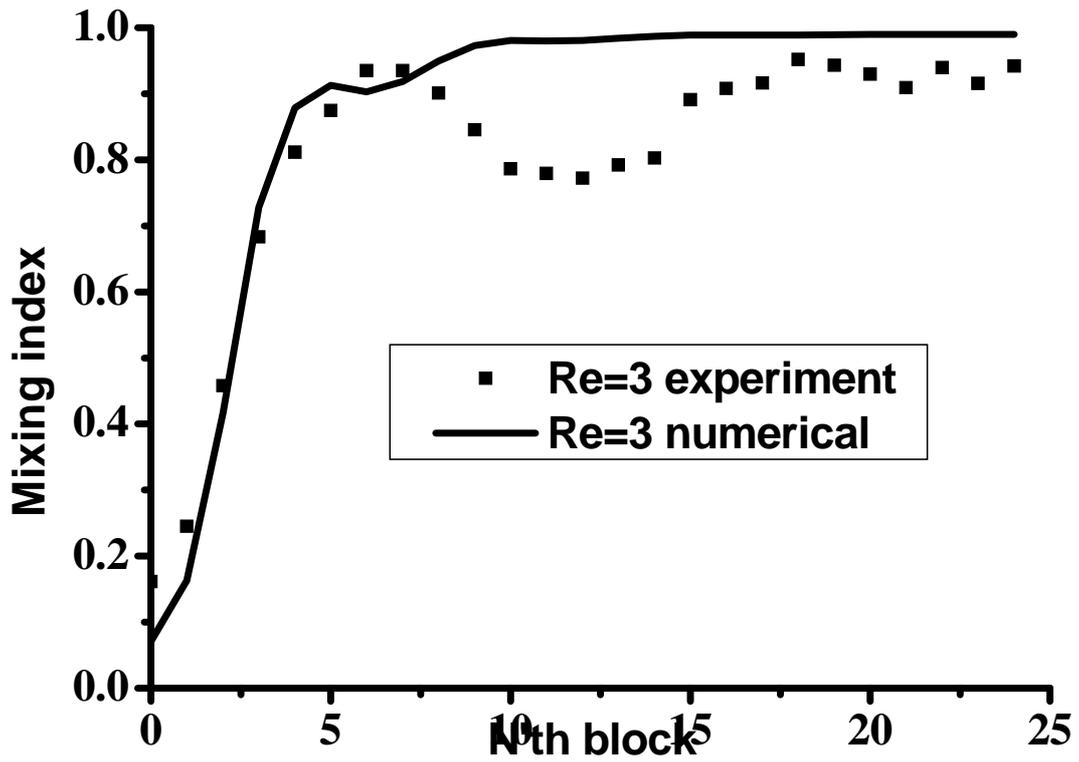


圖 4-9 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 3$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。

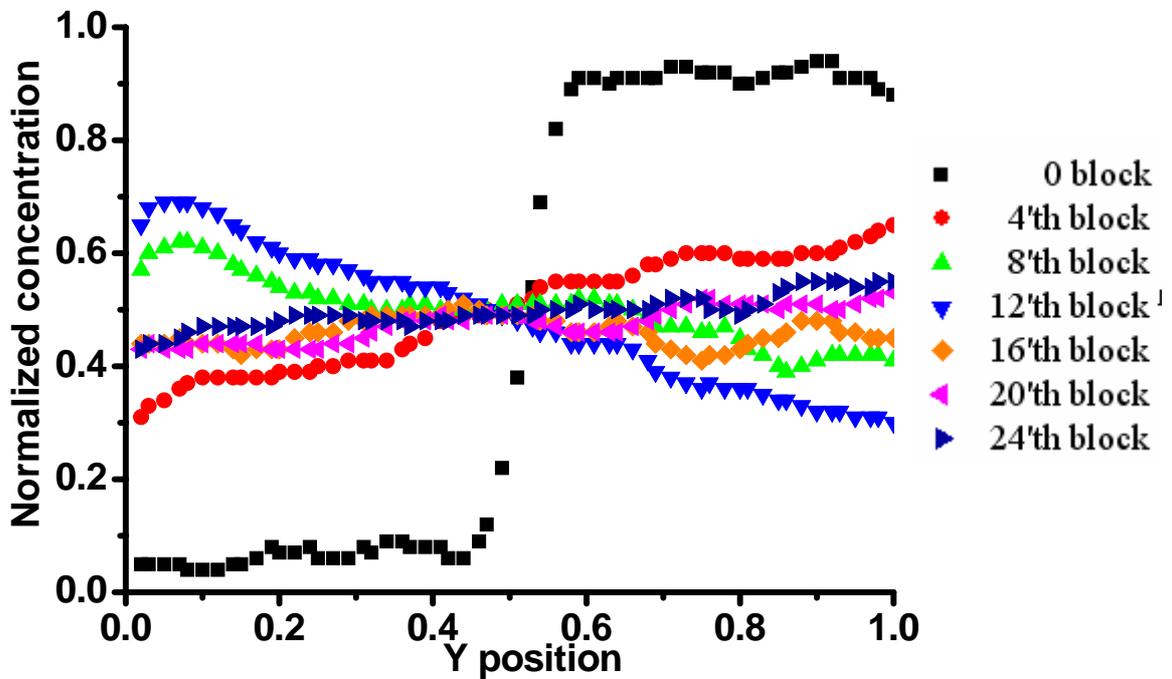


圖 4-10 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 3$)。

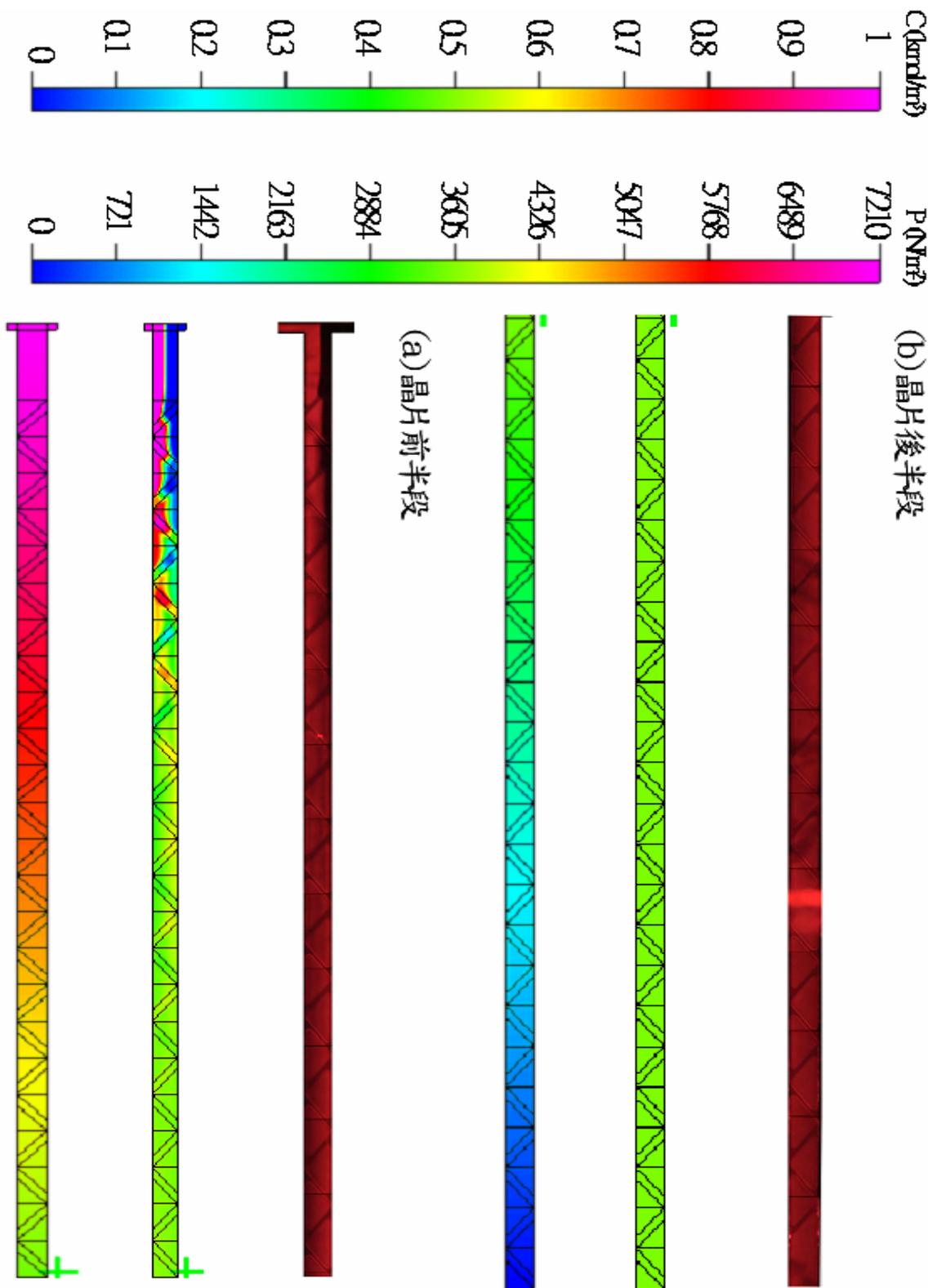


圖 4-11 當 $Re = 3.75$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。

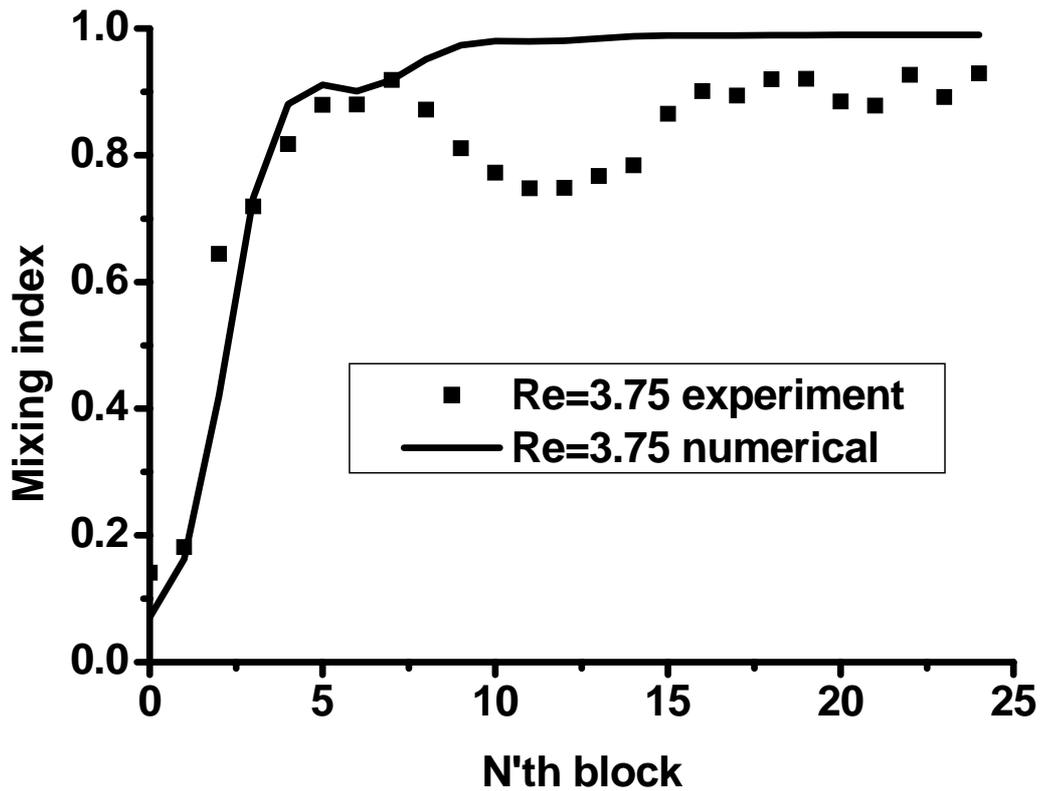


圖 4-12 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 3.75$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。

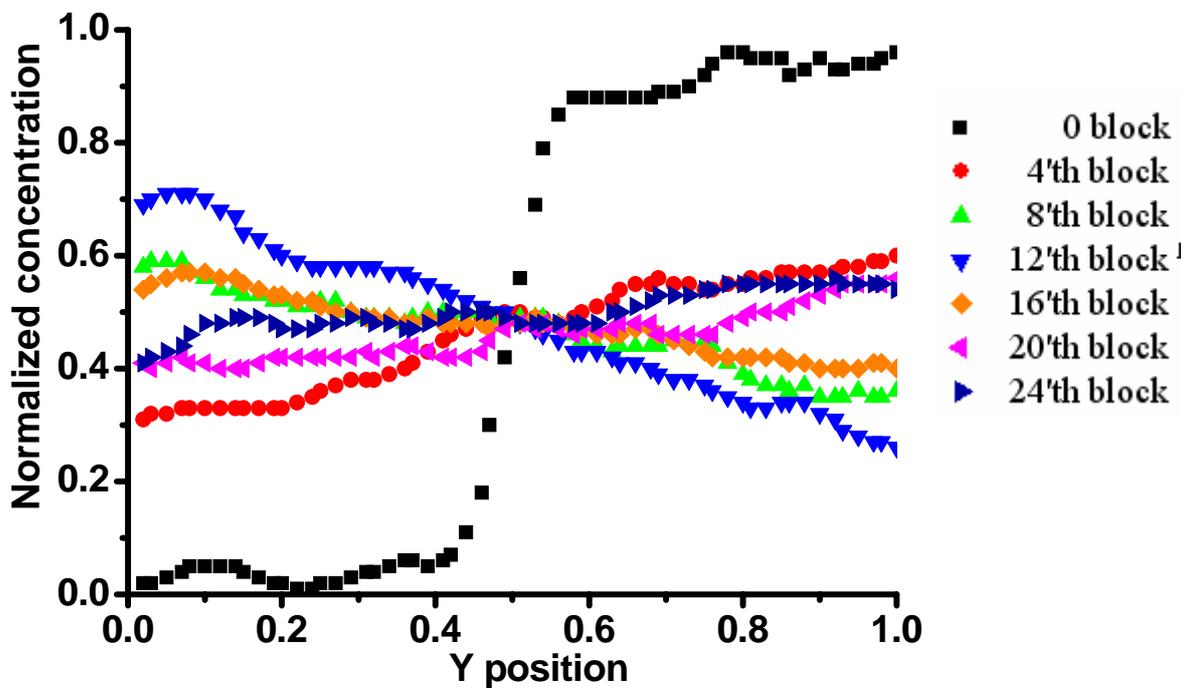


圖 4-13 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 3.75$)。

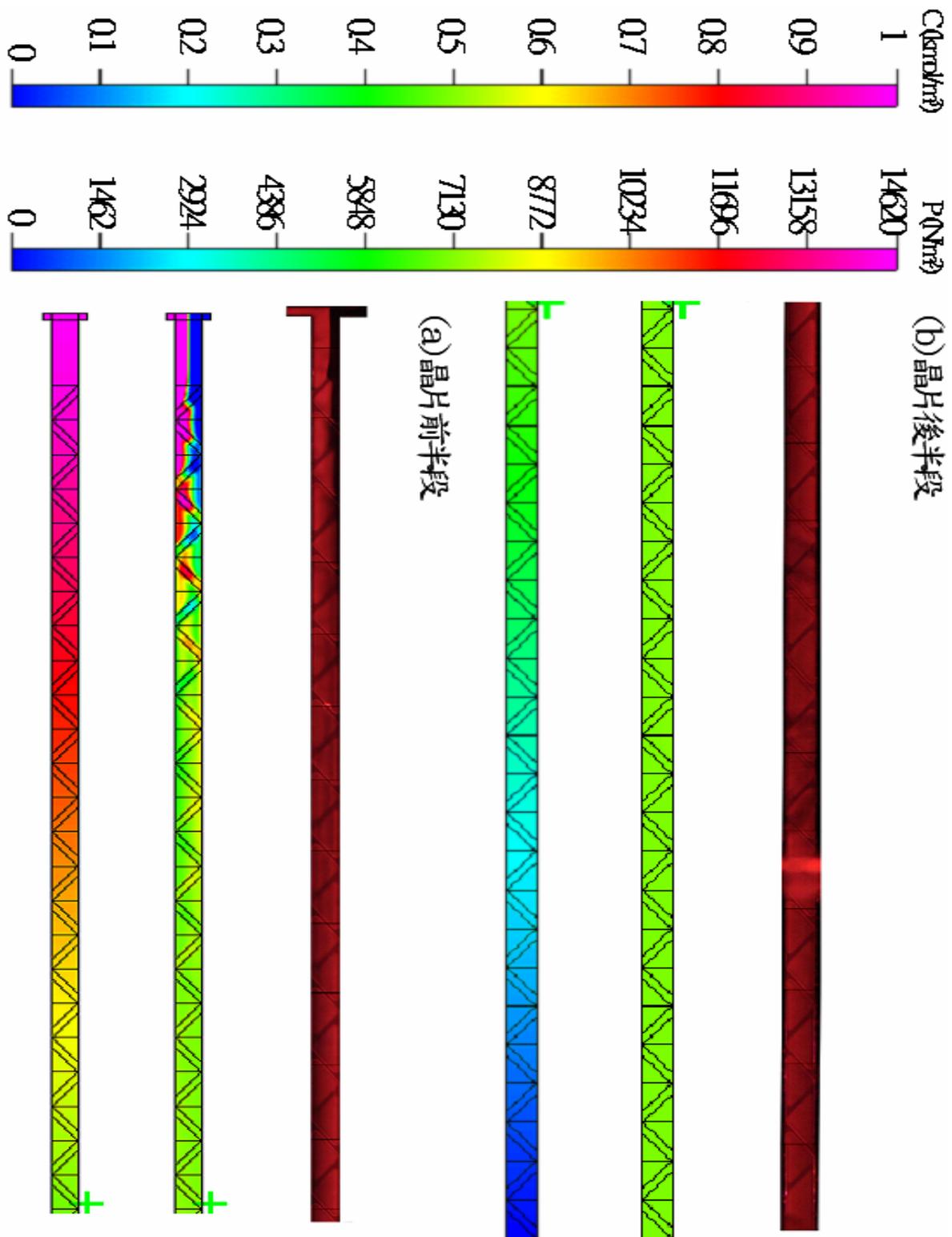


圖 4-14 當 $Re = 7.5$ 時之濃度分佈及壓力分佈，分成三個部份，上圖顯微鏡下拍攝混合情形，中間為模擬混合情形，下圖為模擬壓力分佈(a)為由兩流體交會至前 12 組阻塊(b)為後 12 組阻塊。

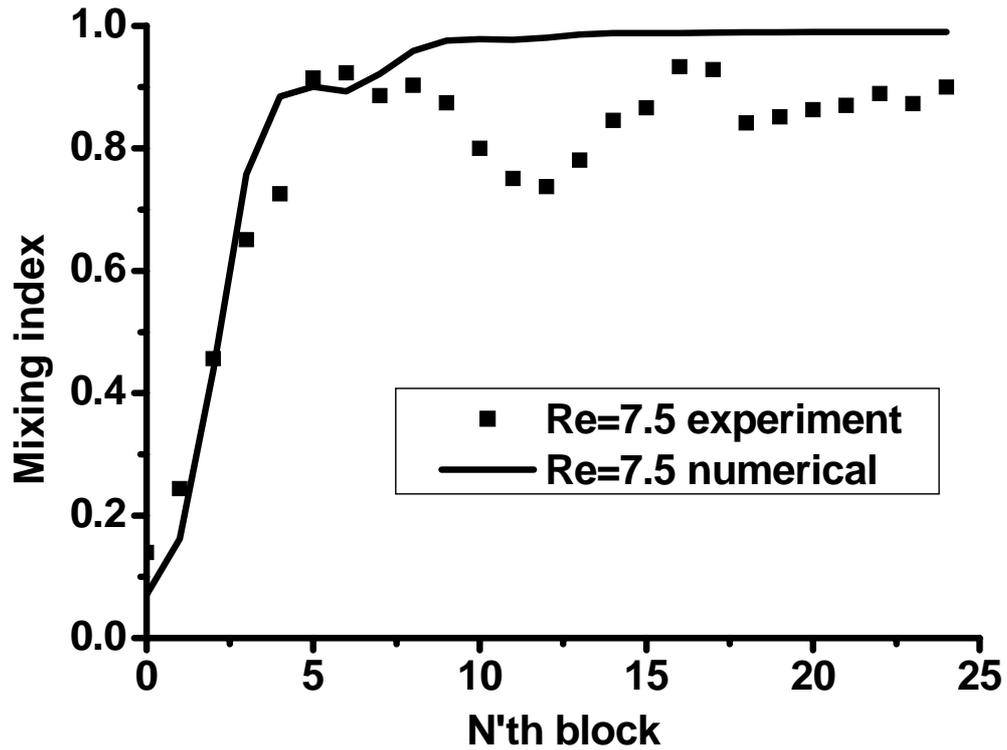


圖 4-15 微混合器在不同阻塊時的混合效率($Re = 7.5$)。方塊為實驗部分，實線為數值分析。

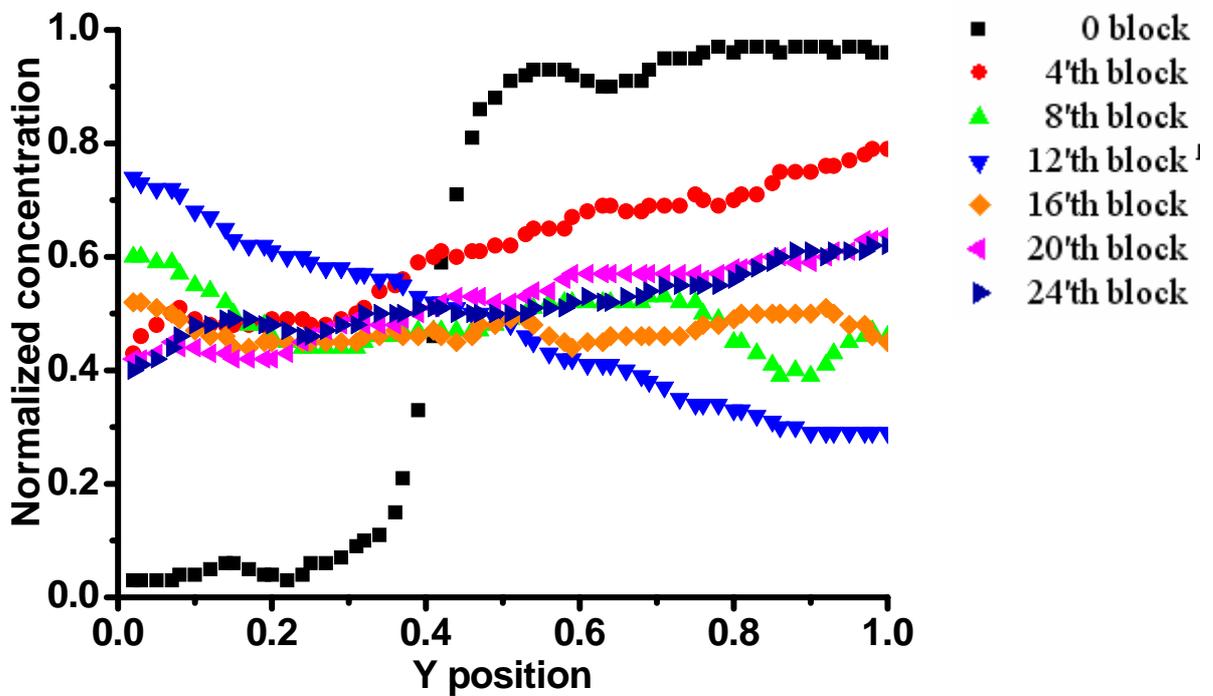


圖 4-16 在 0, 4, 8, 12, 16, 20, 24 個阻塊時微混合器的濃度分佈($Re = 7.5$)。

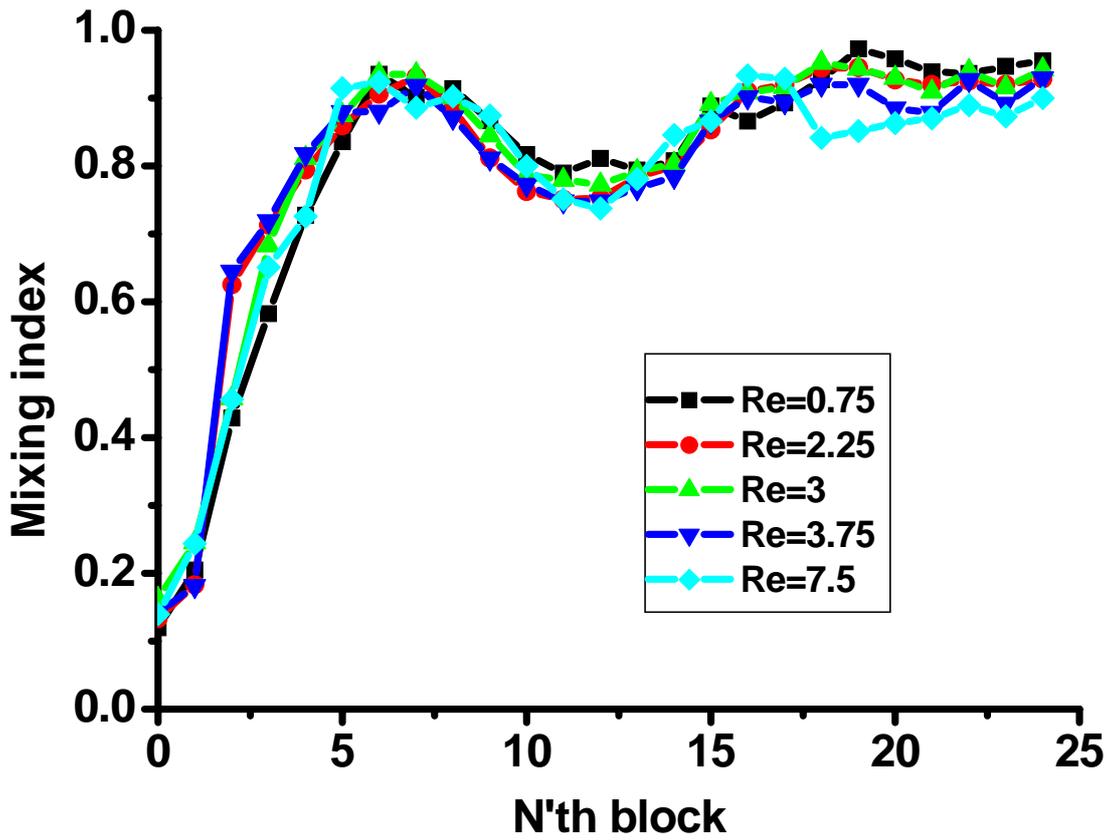


圖 4-17 微混合器於 $Re = 0.75$ 、 2.25 、 3 、 3.75 、 7.5 的混合效率。

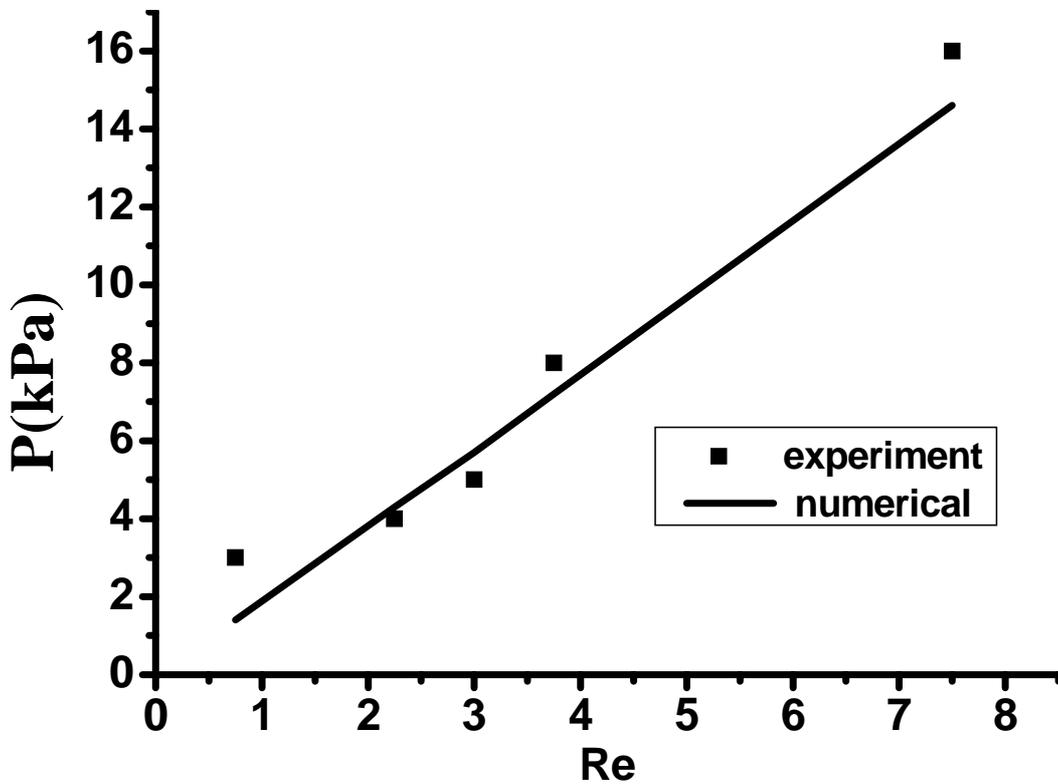


圖 4-18 微混合器於 $Re = 0.75 \sim 7.5$ 時微混合器之壓力降。

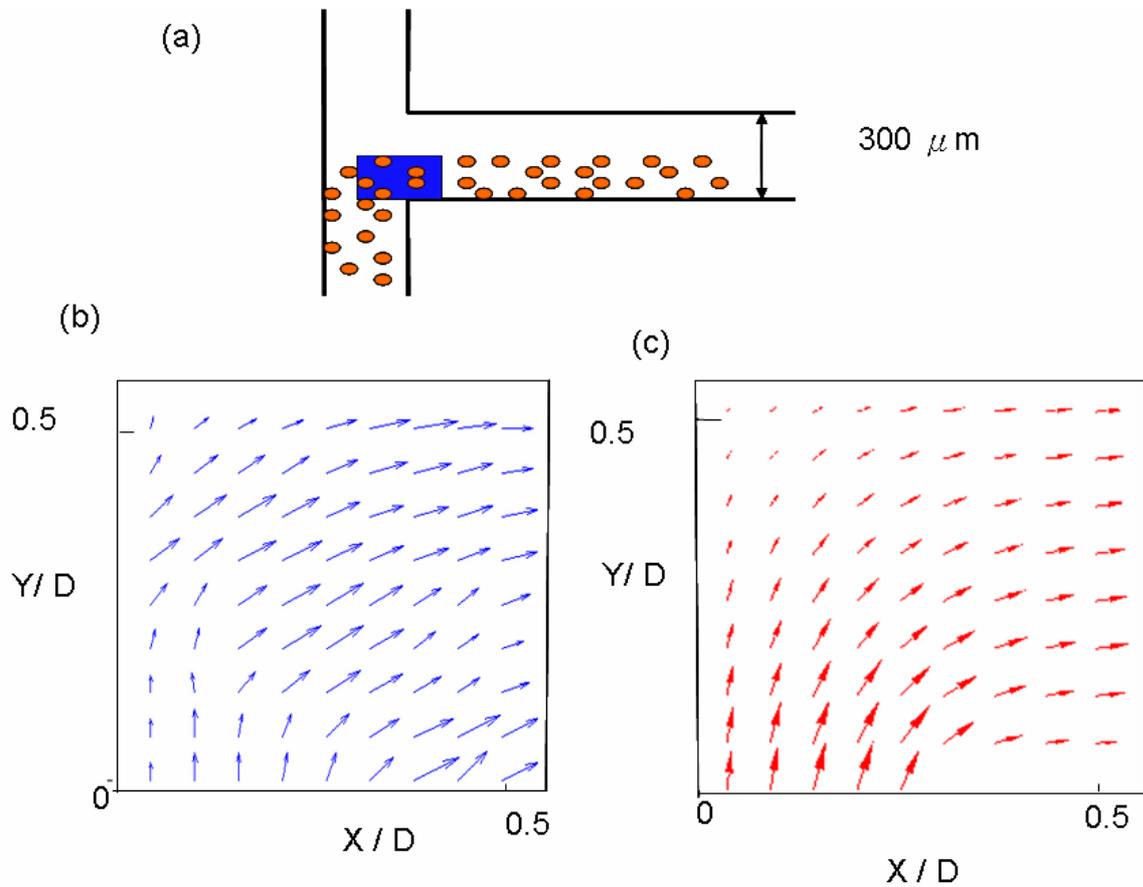


圖 4-19 當流速為 $200 \mu\text{m/s}$ 之流體交會處之流場分佈(a)流體交會處示意圖，藍色區域為量測位置(b)實驗量測結果(c)模擬結果 (D 為 $300 \mu\text{m}$)。

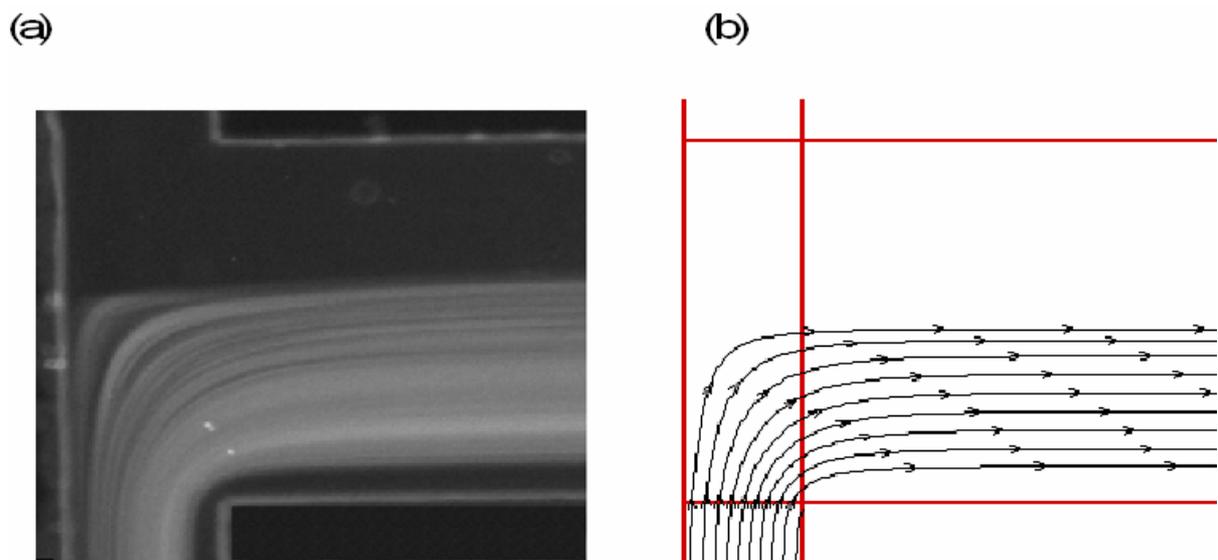


圖 4-20 流體交會處粒子流線圖(a)顯微鏡下拍攝(b)模擬結果。

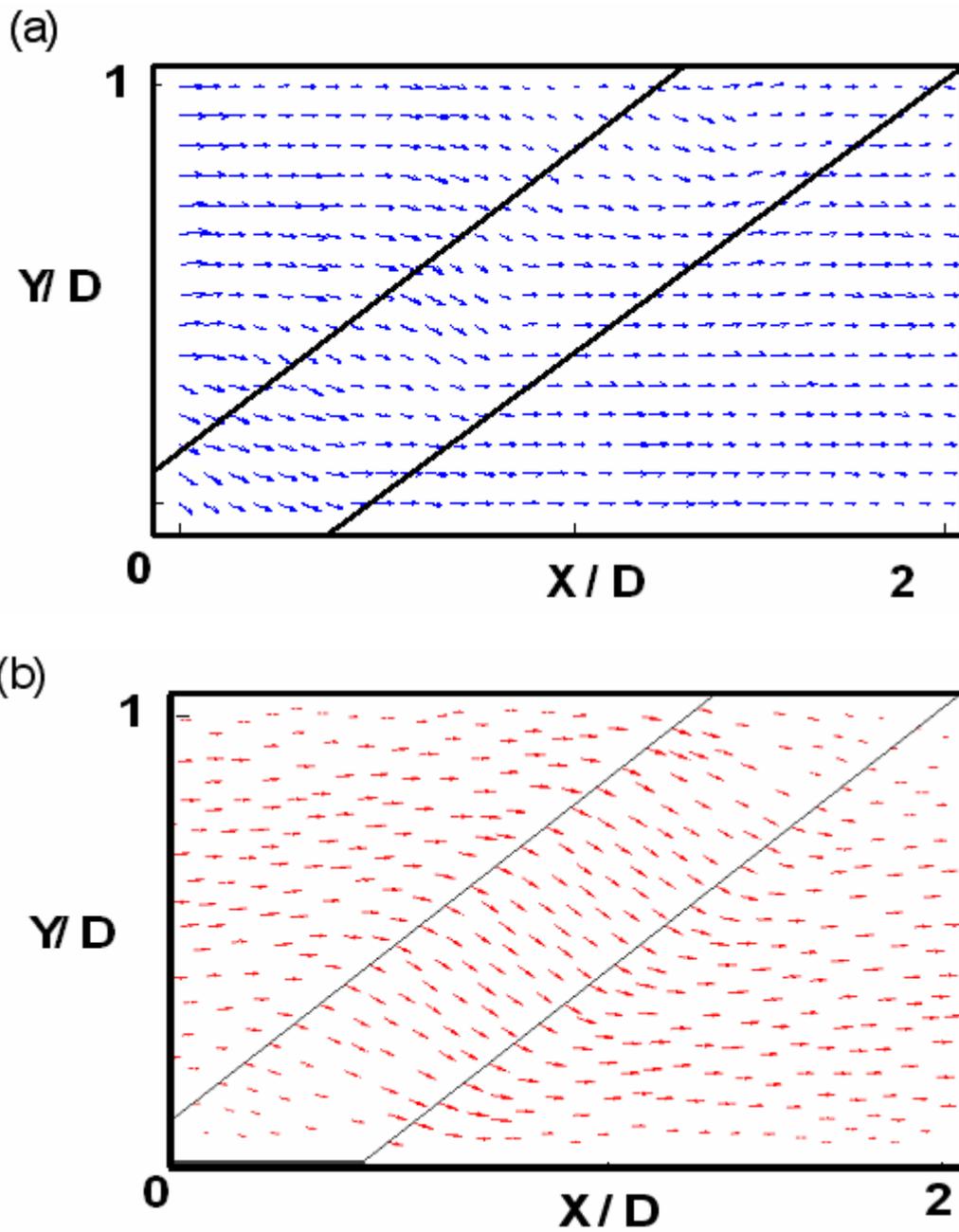
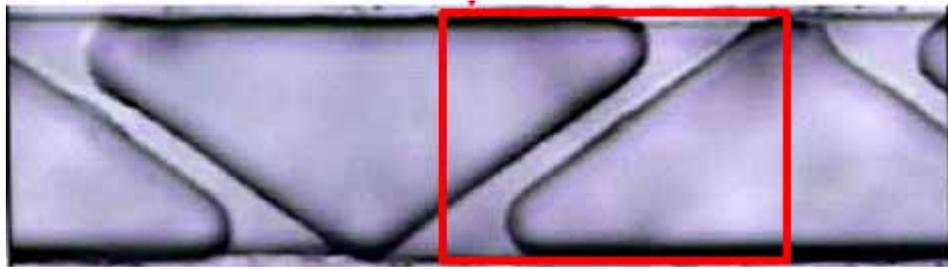


圖 4-21 當流速為 $200 \mu\text{m/s}$ 之流體流經阻塊之流場分佈，量測位置如框內所示(a)實驗量測速度(b) 模擬結果。

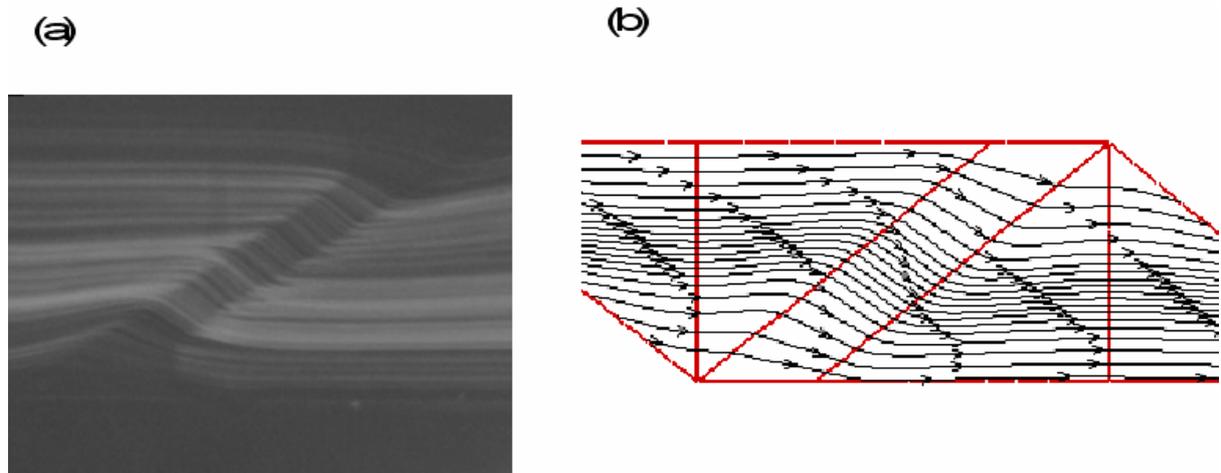


圖 4-22 粒子流經阻塊之流線圖(a)顯微鏡下拍攝(c)模擬結果。

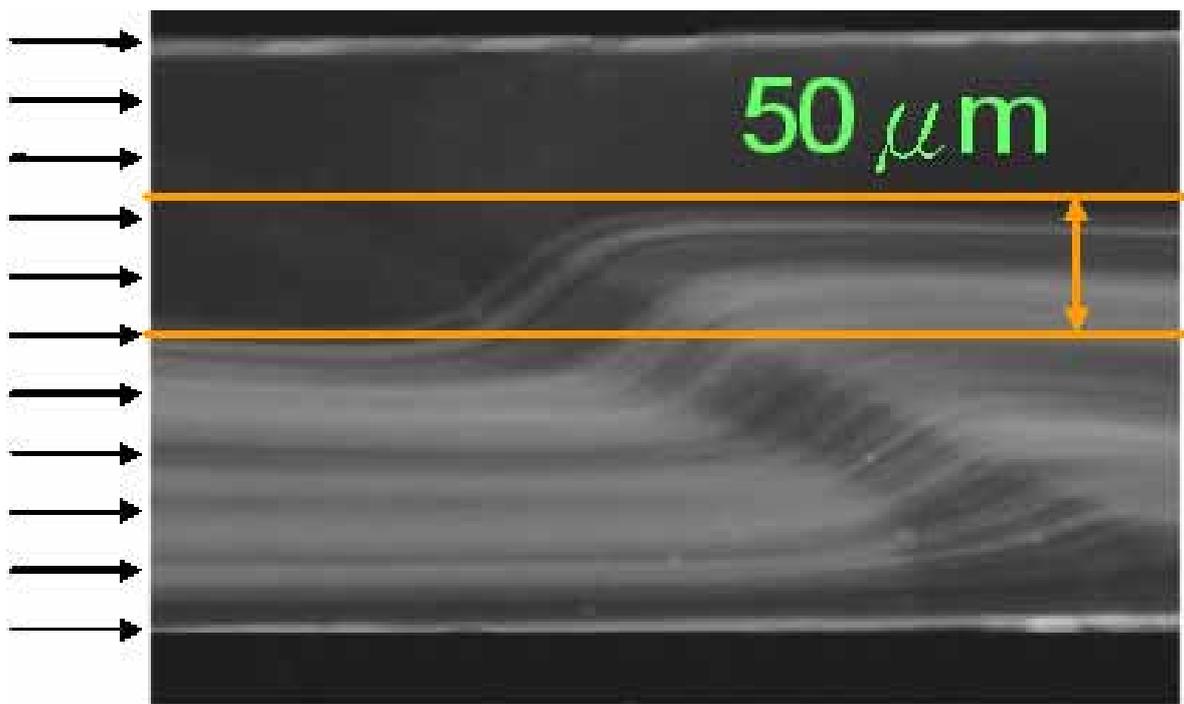


圖 4-23 粒子流經第一個阻塊的情形將產生 50 μm 的橫向位移。

第5章 晶片之影響因子

在不考慮外部環境改變，而影響晶片的混合效率及壓力降的因素，包括阻塊的長度、寬度，晶片的深度等。本研究考慮晶片的幾何外觀，進行探討，分別為阻塊斜率、晶片深度及阻塊寬度之影響等等。使用模擬軟體 CFD-RC[®] 討論本實驗所設計之晶片對於外觀尺寸上改變的影響，並由結果得知每個因素的影響程度。

由於有些晶片的單位阻塊長度不同，所以在混合效率的量測上以每個單元阻塊計算而不以平行於管道的距離計算，混合效率圖中橫軸則代表每個單元阻塊的位置，縱軸則是混合效率。而壓力降的計算方式則是由注入口的位置的壓力減去在相同距離位置的壓力，以利於比較各個微混合器的比較。

5.2 阻塊斜率之影響

在晶片上，將設計三種不同單位長度的微渠道，分別為 540 μm 、740 μm 、940 μm ，其它相同的參數設定包括有晶片的厚度、阻塊的厚度等等(圖 5-1)。(圖 5-2)為三個模擬微混合晶片的濃度分佈圖，微管道總長度為 1.03 cm。(圖 5-3)為混合效率圖。在二流體最初交會時，可由混合效率圖觀察出三個不同尺寸之混合器，皆只有 7 %的混合效率，進入第一個阻塊時可看

出隨著單位長度增加，將有效提高混合效率，當流體進入第三個阻塊時，則有可看出明顯的差異，當到達第六個阻塊時，則趨於平穩。(圖 5-4)為三者所需之壓力降，得知當晶片單位長度越長則所需的壓力則越小。

經由模擬的結果看出單位長度增加，有助於混合效率的增加，而所需的壓力降也較小，但管道總長度則相對增加。

5.3 晶片深度之影響

在晶片上設計三種不同深度的微渠道，深度分別為 40 μm 、60 μm 、80 μm ，其它相同的參數，包括有晶片上的單位長度、阻塊的厚度等等(圖 5-5)。(圖 5-6)為為三者模擬微混合晶片的濃度分佈圖，微管道總長度為 1.03 cm。(圖 5-7)為混合效率圖。在二流體最初交會時，可由混合效率圖觀察出三個不同的尺寸皆只有 7%的混合效率，當流體進入第 1 個阻塊時，三者之混合效率仍相當接近，而進入第 2 個阻塊時，可明顯看出晶片深度 80 μm 之混合效率大大提升，但從 4 阻塊到 5 阻塊發生混合效率下降的情形，推測為流體發生翻轉的情形而使混合效率下降，之後第 6 阻塊至 7 阻塊時則趨於平穩。深度 60 μm 之晶片流動時，也明顯產生翻動的情形，但是較晶片深度 80 μm 晚，在 6 阻塊到 7 阻塊時產生。(圖 5-8)為三者所需之壓力降，顯示當晶片深度越大則所需的壓力則越小。

經由模擬的結果得知晶片深度增加，有助於混合效率的增加，但深度增加，將造成流體沉積於壁面邊緣，因此反而不易混合。壓力方面則是隨

著深度增加所需的壓力降較小。

5.4 阻塊厚度晶片之影響

在晶片上，將設計三種不同長度的阻塊，分別為 120 μm 、150 μm 、180 μm ，其它相同的參數包括有晶片上的單位長度、阻塊的厚度等等(圖 5-9)。(圖 5-10)為三者的濃度分佈圖，微管道總長度為 1.03 cm。(圖 5-11)為三者之混合效率。在二流體最初交會時，可由混合效率圖觀察出三個不同的尺寸皆只有 7%的混合效率，進入第 1 個阻塊時，三者之混合效率仍相當接近，而第 3 個阻塊時，則可看出阻塊厚度 180 μm 的混合效率有些微較大，當流體到達第 5 阻塊時，則看出阻塊寬度越長效率越高，但到第 6 阻塊時，發生阻塊寬度越高而混合效率下降的情形，而隨著經過的阻塊數目混合效率慢慢提升，推測為流體發生翻轉的情形而使混合效率下降，之後在 7 阻塊至 8 阻塊時則趨於平穩。(圖 5-12)為三者所需之壓力降，顯示當阻塊厚度越大則所需的壓力則越大。

經由模擬的結果得知阻塊厚度增加，有助於混合效率的增加，而所需的壓力降也較大。

5.5 最佳化晶片

當我們考慮設計最佳化的微混合器晶片時，最值得注意的二個因素，即是流體的混合效率及把流體注入微混合器所需要的壓力。所以要製作最

佳化的晶片就要把二者考慮進去，那即是高的混合效率及低的壓力降。混合效率和壓力降皆和晶片的結構有關，由以上的模擬分析結果看出晶片深度之影響可說是最大的，當晶片的深度減少將造成相當大的壓力，而當深度增加將發生較激烈的翻轉，由混合效率圖中將可看出明顯的起伏。而單位長度的增加，亦可想而知會增加流體混合，相對將必須增加總長度，但所提供的壓力將微微減少。最後由阻塊的厚度長短得知，當阻塊的長度增加時，可看出所需增加的壓力越來越小，而混合效率將稍微增加。

如果我們只考慮在只提供低壓力的情形時，則在晶片的設計上就必需使用較長的單位長度、較深的晶片厚度、較短的阻塊厚度。而三個因子對混合效率之影響不明顯。

由上述混合效率結果中得知，當流體流經阻塊時，將可明顯看出流體翻轉，而當二流體翻轉時，二流體地接觸面由垂直 Y 軸截面轉變成垂直 Z 垂的截面，因此在相同的長度下接觸面由深度變成寬度，而晶片深度比微管道的寬度小，所以可得二流體最大的接觸面積。因此本研究第一步，將找出使流翻轉得到最大接觸面積所需要的阻塊數目，此目的為降低整個混合器晶片之壓力降，因為流體流經越多個阻塊，壓力降將大量上升。第二步為加大微管道寬度，在找到二流體的最大接觸面積後，將之後管道的寬度加寬，提升混合效率。(圖 5-13)為本研究所改良低壓力降微混合晶片，包含 8 個阻塊結構及一個橢圓形的管道。(圖 5-14)(圖 5-15)為模擬晶片上

視圖及前視圖的濃度分佈圖，由模擬結果(圖 5-16)發現，當流速為 0.001 m/s 時，流體流經第 8 個阻塊時，將可使流體產生翻轉，使接觸面積加大，在相同的長度下接觸面由 60 μm 的深度變成 300 μm 的寬度，在把 8 個阻塊後的管道寬度加寬，將更進一步使其接觸面積加大。最後的混合效率為 96% 而壓力降為 32 Pa。

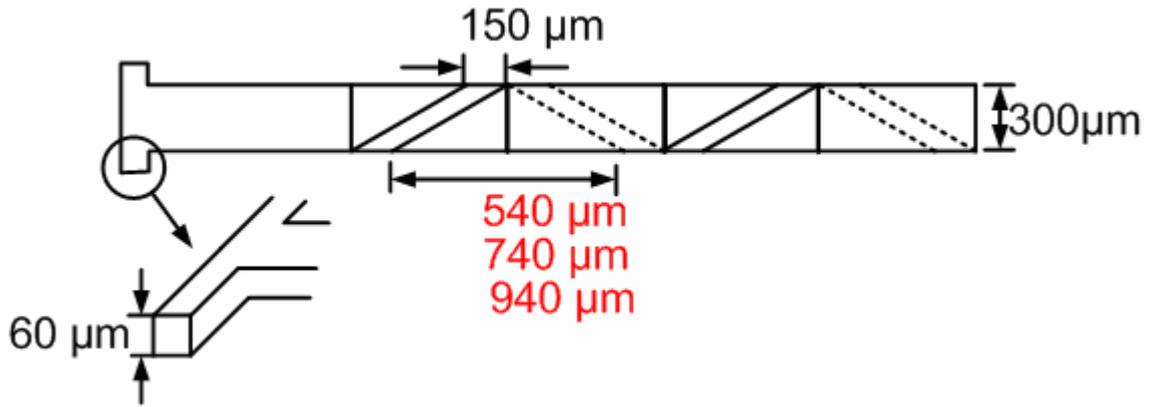


圖 5-1 比較三種不同單位長度的晶片圖形，分別為 540 μm 、740 μm 、940 μm 。

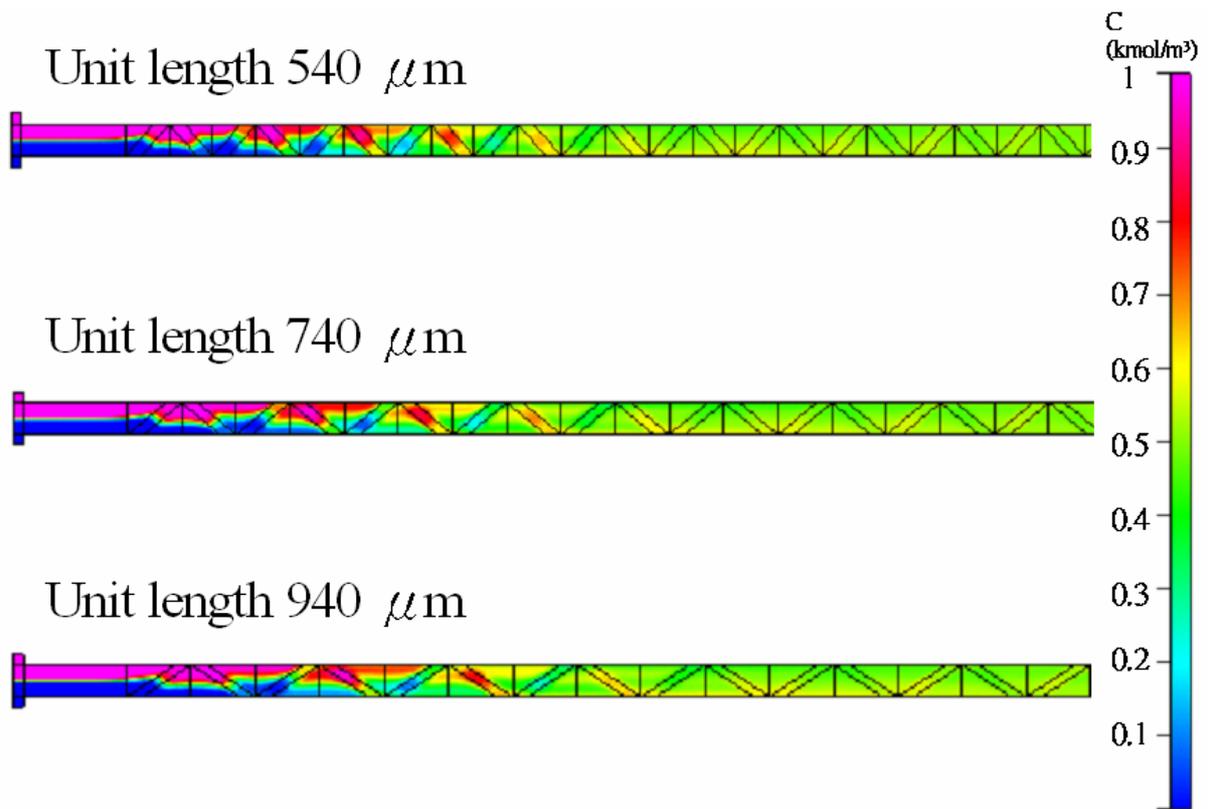


圖 5-2 三種不同阻塊斜率之濃度分佈。

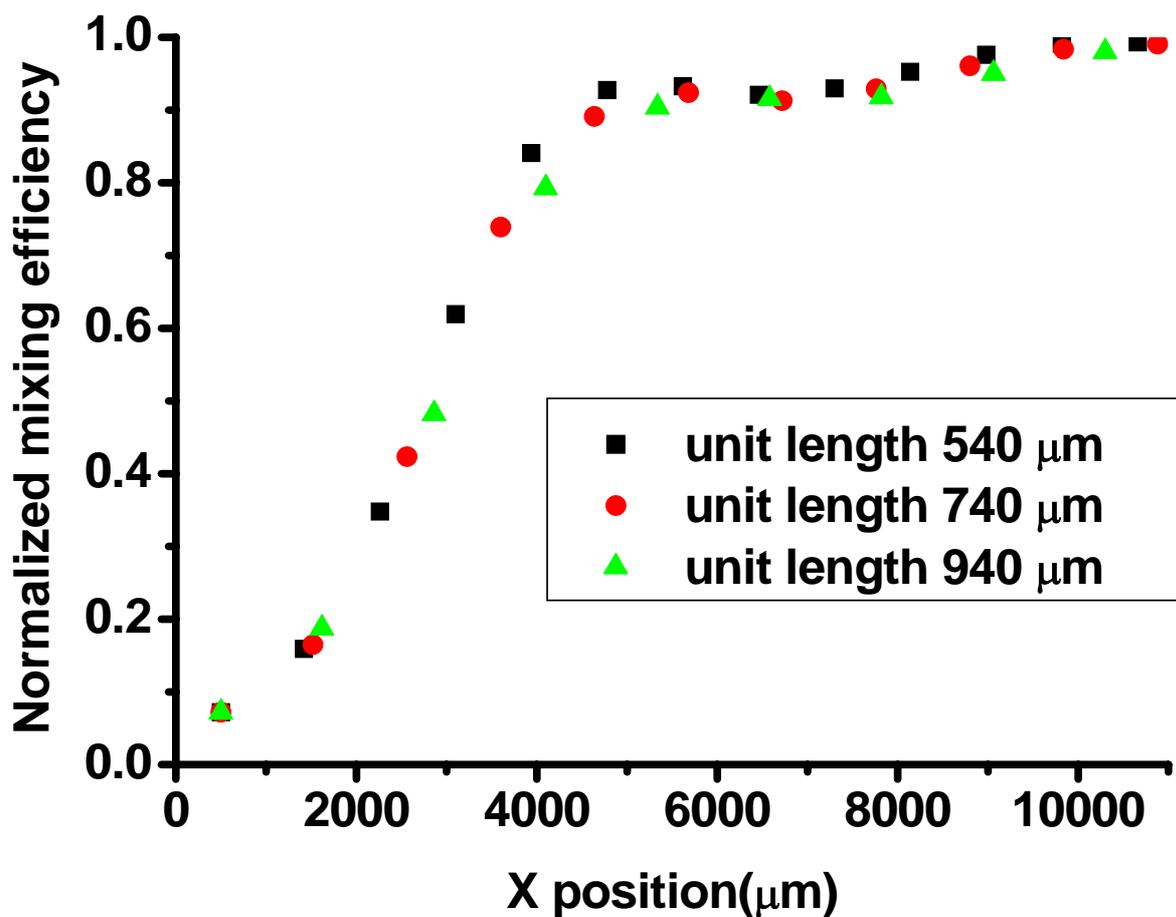


圖 5-3 比較三種不同單位長度的混合效率，分別為 540 μm、740 μm、940 μm。

單位長度(μm)	壓力(Pa)
540 μm	3430 Pa
740 μm	2800 Pa
940 μm	2373 Pa

圖 5-4 三種不同單位長度晶片之壓力降。

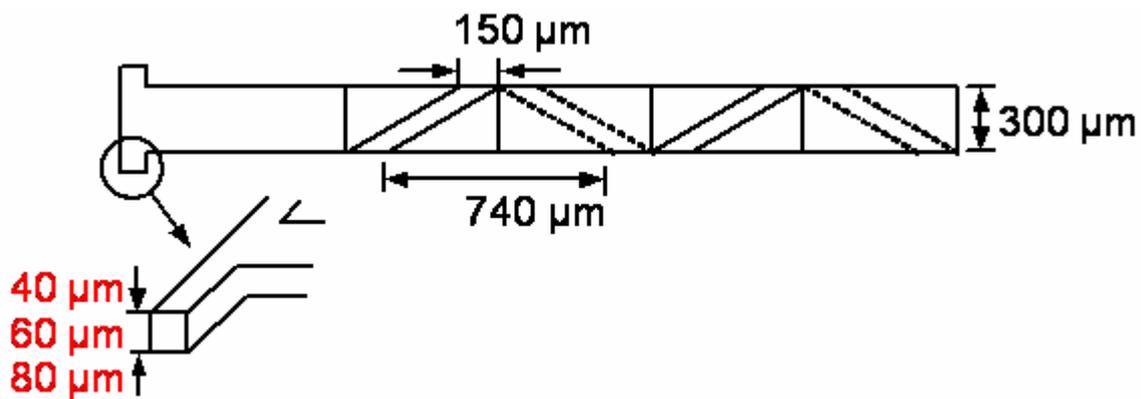


圖 5-5 比較三種晶片深度分別為 40 μm 、60 μm 、80 μm 的圖形。

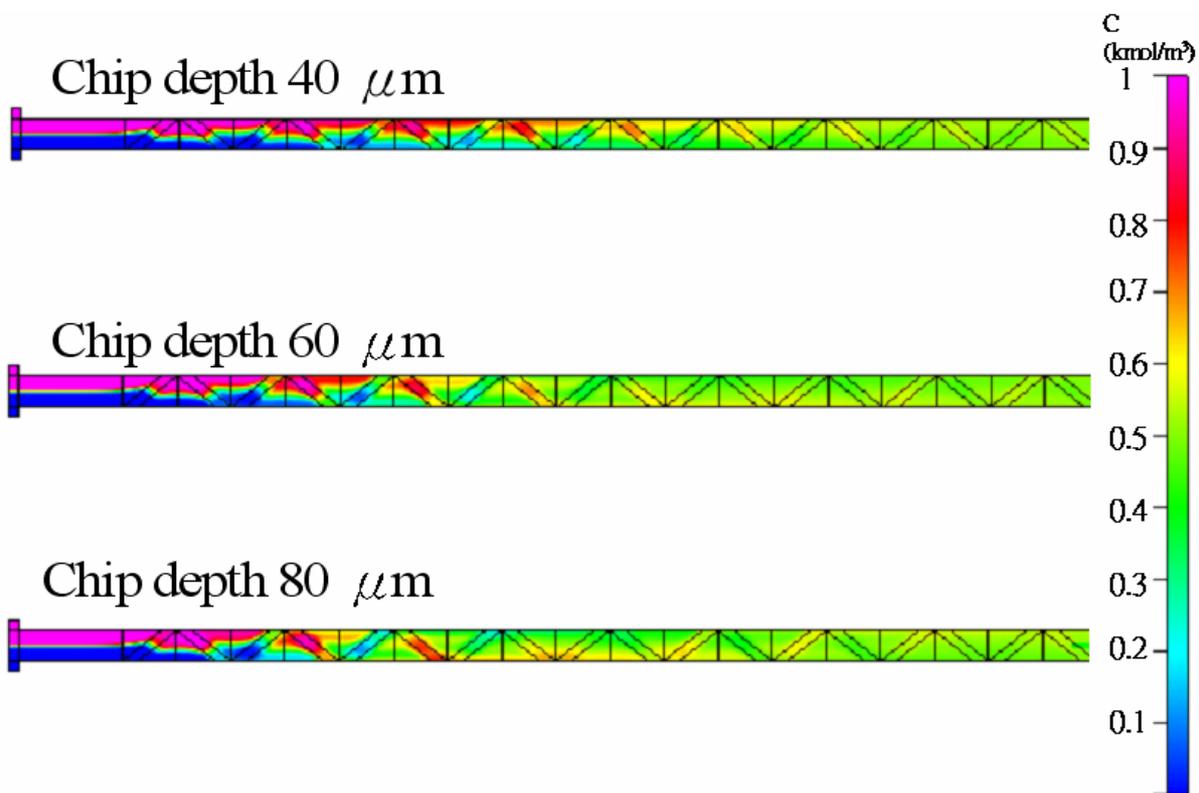


圖 5-6 三種不同晶片深度之濃度分佈圖。

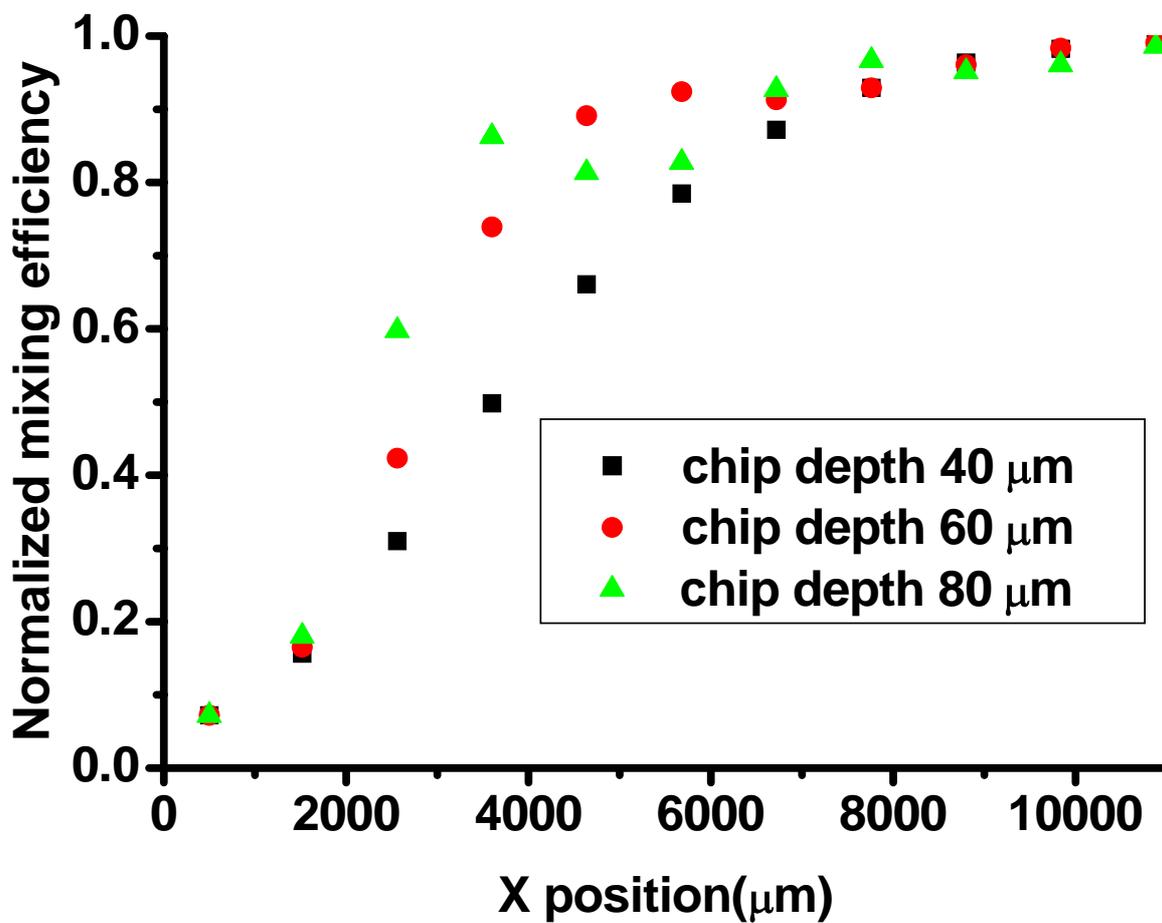


圖 5-7 比較三種晶片深度分別為 20 μm、30 μm、40 μm 的混合效率。

晶片深度(μm)	壓力(Pa)
20 μm	5710 Pa
30 μm	2800 Pa
40 μm	1743 Pa

圖 5-8 三種不同晶片深度之壓力降。

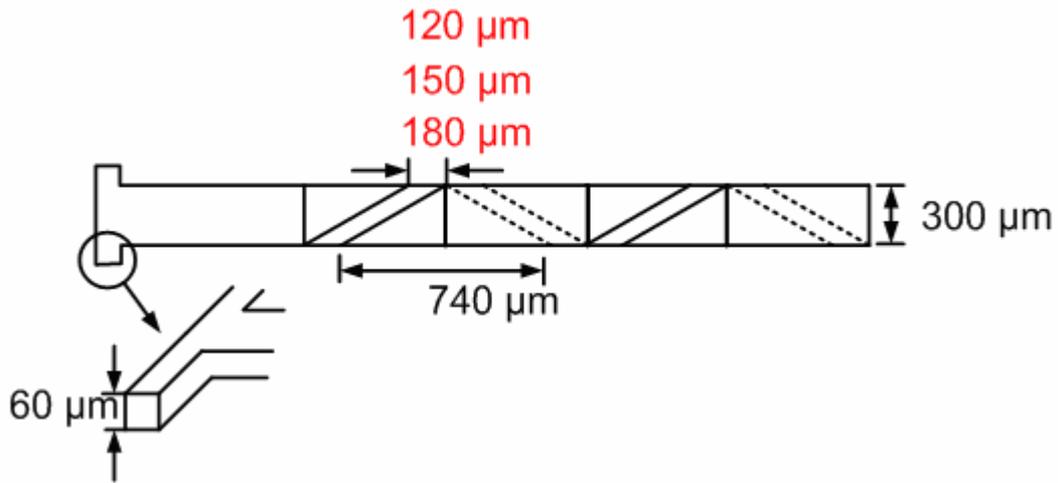


圖 5-9 比較三種不同阻塊寬度之圖形，分別為 120 μm 、150 μm 、180 μm 。

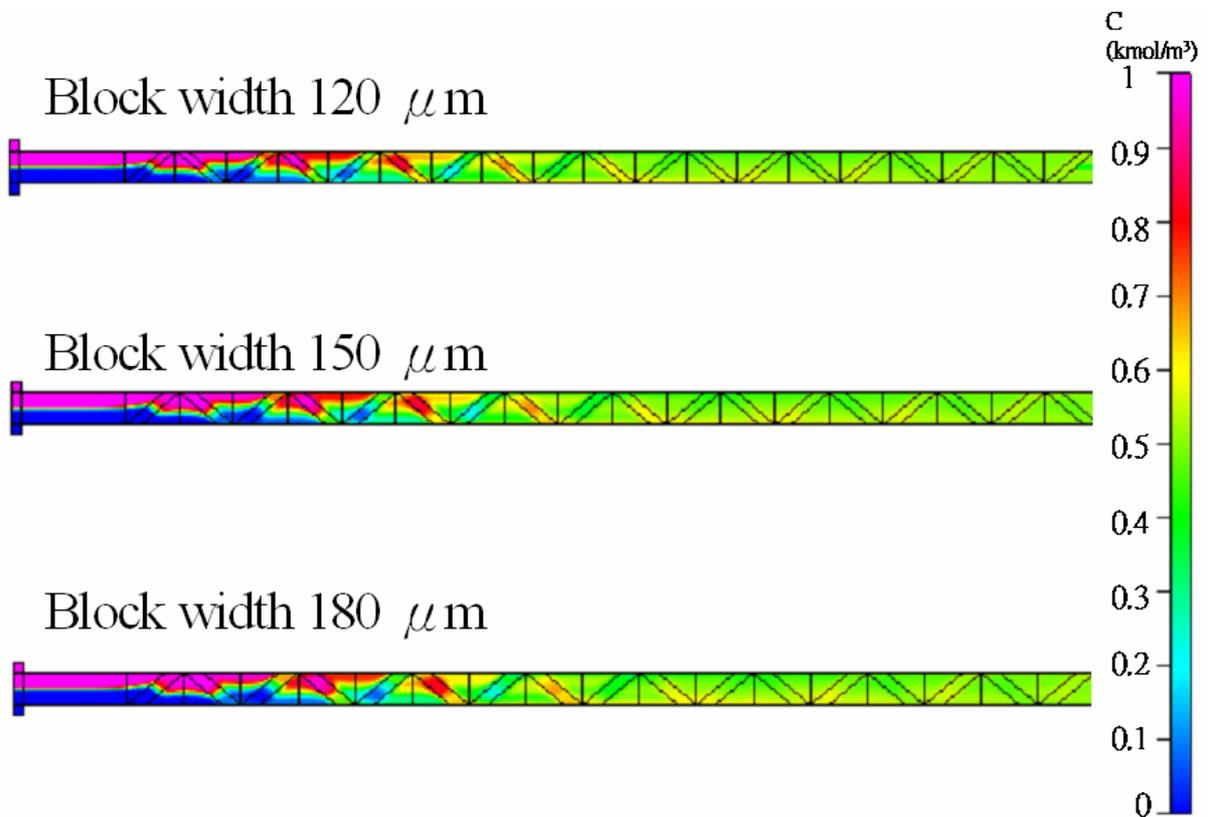


圖 5-10 三種不同阻塊寬度之濃度分佈。

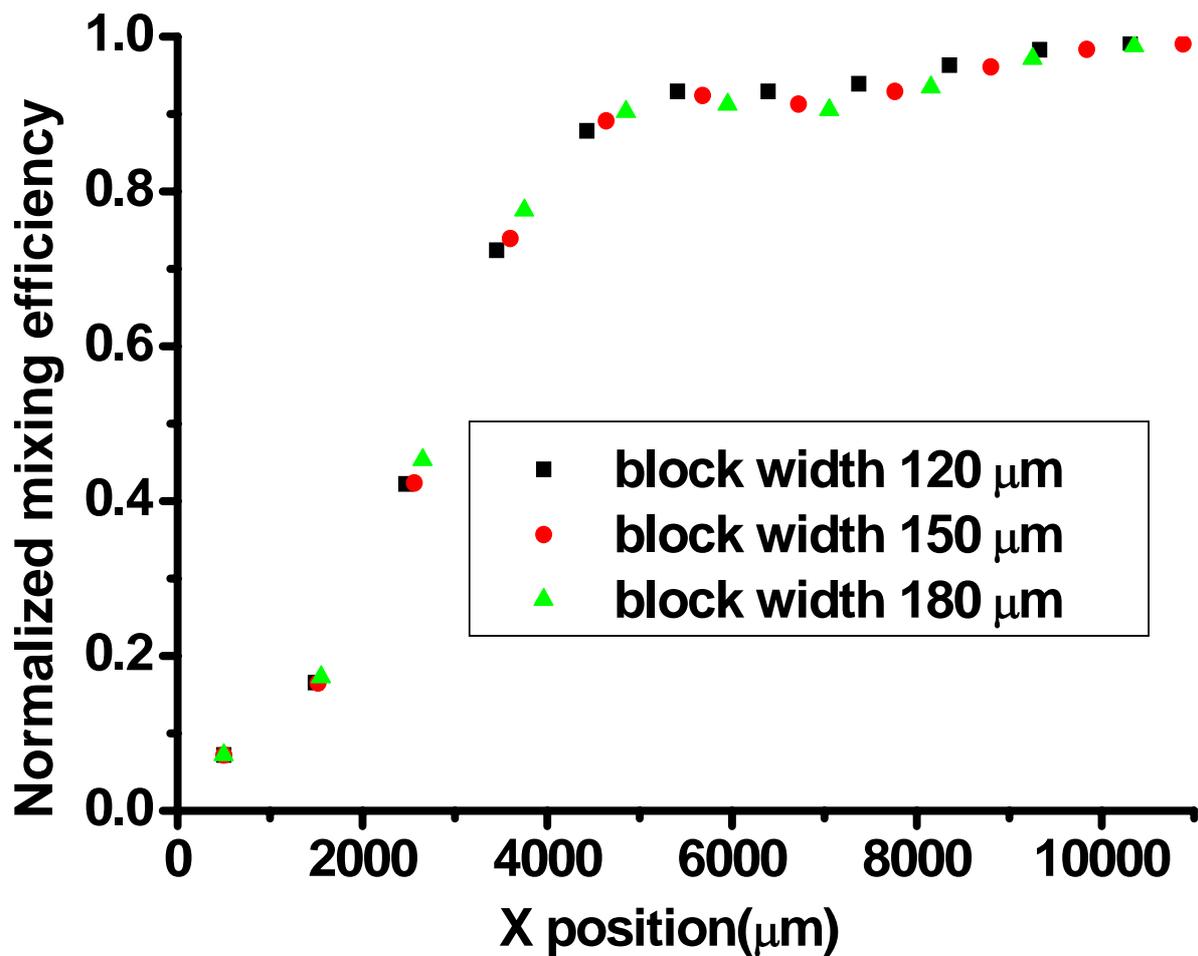


圖 5-11 比較三種不同阻塊寬度之混合效率，分別為 120 μm、150 μm、180 μm。

阻塊寬度(μm)	壓力(Pa)
120 μm	2589 Pa
150 μm	2800 Pa
180 μm	2984 Pa

圖 5-12 三種不同阻塊寬度之壓力降。

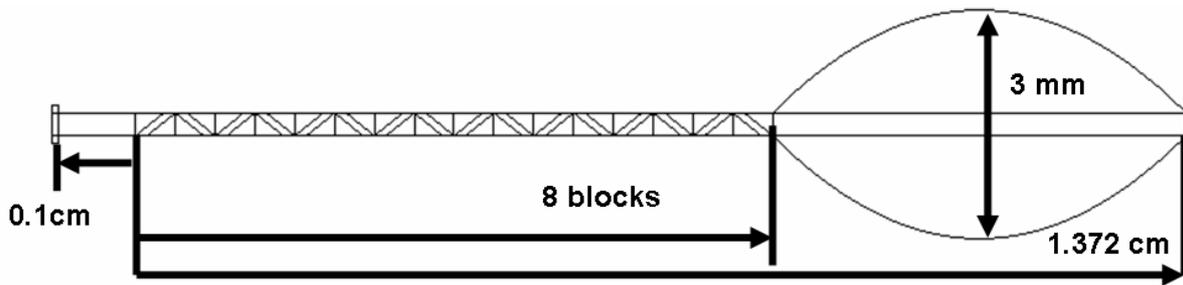


圖 5-13 改良型低壓力降微混合器晶片上視圖，包括 8 個阻塊結構及一個橢圓形管道，晶片總深度 $80\ \mu\text{m}$ 。

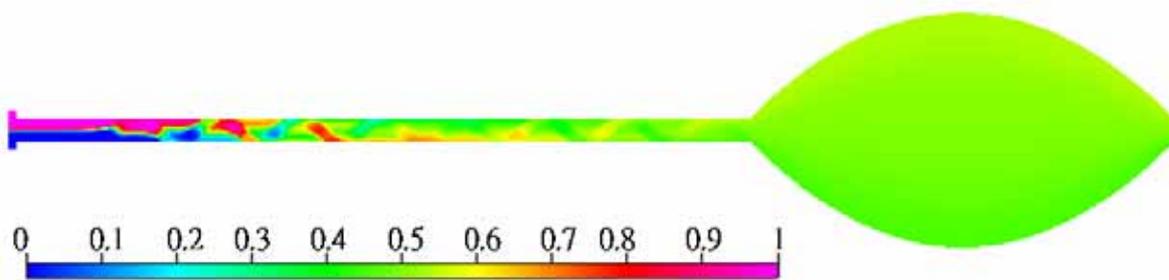


圖 5-14 為模擬微管道內的濃度分佈圖(上視圖)。

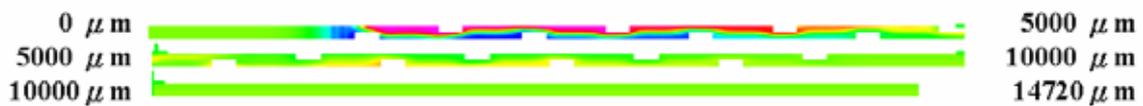


圖 5-15 為模擬微管道內的濃度分佈圖(前視圖)，由於尺寸長寬比過大，分成三段。

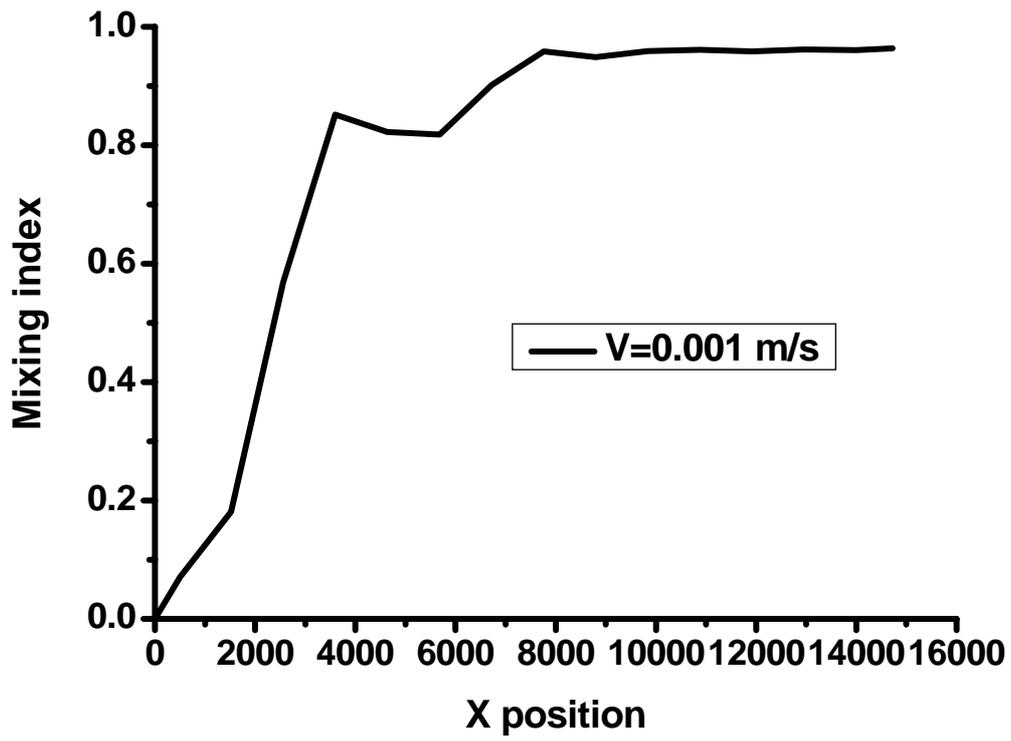


圖 5-16 改良型低壓力降微混合器之混合效率($V=0.0001$ m/s)。

第6章 結論與未來展望

本文以數值模擬及實驗操作探討 T 型微流體混合器中不同阻塊設計對其操作效能之影響，論文中分析包括不同 Re 數下的混合效率及在該操作條件下所產生的壓力降，並進而獲得微流道內阻塊之最佳設計參數。再使用微機電系統製作晶片進行實驗測試包含影像分析混合的效率，發現橫向對流於混合效率的影響，並由微粒子影像測速儀量測晶片內經過阻塊時之流場，之後將實驗晶片由模擬進行最佳化處理，設計最佳化的低壓力降混合器。

在微混合器的成效分析範圍從雷諾數(Re)在 0.75 ~ 7.5 之間，整個晶片有 23 組的阻塊，總長度從入口到出口約 2.5 cm。當 $Re = 0.75$ 時，流體產生翻轉混合效率明顯的上升。當流體通過第一阻塊而造成翻轉後，所獲得的最低混合效率為 78%，當隨著流動距離的增加，其混合效率將趨於平穩，於第 23 阻塊之後其混合效率為 95%。當 $Re = 2.25$ 時，流體產生翻轉混合效率明顯的上升。當流體通過第一阻塊而造成翻轉後，所獲得的最低混合效率為 75%，當隨著流動距離的增加，其混合效率將趨於平穩，於第 23 阻塊之後其混合效率為 92%。當 $Re = 3$ 時，流體產生翻轉混合效率明顯的上升。當流體通過第一阻塊而造成翻轉後，所獲得的最低混合效率為 74%，當隨著流動距離的增加，其混合效率將趨於平穩，於第 23 阻塊之後其混合

效率為 94%。當 $Re = 3.75$ 時，流體產生翻轉混合效率明顯的上升。當流體通過第一阻塊而造成翻轉後，所獲得的最低混合效率為 74%，當隨著流動距離的增加，其混合效率將趨於平穩，於第 23 阻塊之後其混合效率為 92%。當 $Re = 7.5$ 時，流體產生翻轉混合效率明顯的上升。當流體通過第一阻塊而造成翻轉後，所獲得的最低混合效率為 73%，當隨著流動距離的增加，其混合效率將趨於平穩，於第 23 阻塊之後其混合效率為 90%。所以得知當雷諾數大時流體的流速較快，使得流體無法在短時間內擴散，則產生翻轉時仍可隱約看見染料與去離子水之間的區別，而雷諾數小時流體的流速較慢，流體能有效的擴散則翻轉時較能有效的混合，驗證了流體在低速有較佳的混合效率。本研究所設計之微混合器之混合效率與流體流速相關性不高，當雷諾數增加 10 倍，混合效率只下降 5%，可符合各種流量之應用。

當使用微粒子影像測速儀，進行微流體中流場量測時，發現兩入口端之流體交會處有平行管道之均勻流速，但橫向速度非常小，顯示流體未經阻塊時將不會產生橫向的對流。而當流體流經混合通道中的阻塊時，由微粒子影像測速儀所得到之分析結果，可明顯的看出粒子經過阻塊時，將產生橫向的對流，而由拍攝粒子流經第一個阻塊時，所移動的軌跡路徑圖，使用影像分析，計算出本研究所設計之雙層阻塊微混合器，在寬度 $300\ \mu\text{m}$ 的管道中，可產生橫向位移達 $50\ \mu\text{m}$ 。

在使用數值模擬方式模擬微混合器的混合效率及流場，然後與實驗所

做的數據進行比較，發現在混合效率方面，最初流體通過阻塊而造成翻轉時，與實驗結果有較好的相似度，而最後平穩後的出口混合效率有 7~9% 的誤差。關於流場方面則是使用向量和流線的方式比較差異，當流體流速 200 $\mu\text{m/s}$ 時實驗數值有良好的相似度。因此更進一步，使用數值模擬求得最佳化的晶片，而影響晶片之因子包括阻塊的斜率、晶片深度、阻塊的寬度等等。由模擬分析結果，觀察晶片的混合效率及晶片內的壓力降，並找出最佳化的低壓力驅動晶片，發現當微混合器使用較大的阻塊斜率、較深的晶片深度及較短的阻塊寬度，可得較低的壓力降晶片。更進一步地設計出經由最少地阻塊數目得到最大的接觸面積，並減緩壓力降，當流速為 1000 $\mu\text{m/s}$ 時，可得到 96% 的混合效率而混合器所產生的壓力降僅僅 32 Pa。

本實驗室使用低成本的方式，架設微粒子影像測速儀系統，並發揮最佳的功能。如照明光源使用螢光激發汞燈取代脈衝雷射、粒子方面使用螢光粒子取代傳統非螢光粒子，因為非螢光粒子本身不會發亮，而由粒子反射雷射光產生亮度，經由 CCD 擷取影像時，粒子與流場背景的對比小，不易辨識出粒子的存在，因此使用螢光粒子可改善這個問題。但使用這種方式的實驗架設仍不夠完善，使用螢光激發汞燈當照明光源，激發螢光粒子時，在螢光亮度方面相較於脈衝雷射激稍嫌不足，所以當使用高速流場量測時，曝光時間減少，擷取出的相片粒子亮度亦相對較暗，在辨識上的解析度亦相對較難。因為硬體方面的限制，所以尚且無法量測高速的流場，

因此在微粒子影像測速儀的硬體方面仍有改善空間。除了光源的問題，還有 CCD 裝置方面，CCD 在流場量測方面是一個重要的影響因素，不管在解析度及影像擷取時間(frame rate)方面，對之後的分析上有著關鍵性的影響，因此高影像解析度及快的影像擷取時間，將能對流場的量測上有明顯的幫助。

本研究希望可以發展出一有效之微流體晶片設計平台，使將來微流體混合器之設計可以有一方便、準確之模擬系統。在現階段實驗所做流場的觀測仍以晶片上的管道為主。但近年來已經有實驗室進行活體的觀察如觀測雞胸內心室的跳動，使用染料將血液中的紅血球進行染色代替螢光粒子，當染色後的紅血球流經心室時，使用微粒子影像測速儀觀察心室內的血球流動的情形，並分析心室的流場，因此希望在未來的時間裡能朝此方向邁進。

參考文獻

1. E. John, L. Dorian, and P. Albert, "Planar Laminar Mixer," *Proceeding of the IEEE 10th Annual Workshop of MEMS*, vol. 96-101 (1997).
2. N. Schwesinger, T. Frank, and H. Wurmus, "A modular microfluidic system with an integrated micromixer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, pp. 99-102 (1996).
3. M. Koch, H. Witt, A. G. R. Evans, and A. Brunnschweiler, "Improved characterization technique for micromixers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, pp. 156-158 (1999).
4. M. S. Munson and P. Yager, "Simple quantitative optical method for monitoring the extent of mixing applied to a novel microfluidic mixer," *Analytica Chimica Acta*, vol. 507, pp. 63-71 (2004).
5. Y. Lin, G. J. Gerfen, D. L. Rousseau, and S. R. Yeh, "Ultrafast microfluidic mixer and freeze-quenching device," *Analytical Chemistry*, vol. 75, pp. 5381-5386 (2003).
6. V. Mengeaud, J. Josserand, and H. H. Girault, "Mixing processes in a zigzag microchannel: Finite element simulations and optical study," *Analytical Chemistry*, vol. 74, pp. 4279-4286 (2002).
7. S. J. Park, J. K. Kim, J. Park, S. Chung, C. Chung, and J. K. Chang, "Rapid three-dimensional passive rotation micromixer using the breakup process," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 6-14 (2004).
8. H. Chen and J. C. Meiners, "Topologic mixing on a microfluidic chip," *Applied Physics Letters*, vol. 84, pp. 2193-2195 (2004).
9. R. A. Vijayendran, K. M. Motsegood, D. J. Beebe, and D. E. Leckband, "Evaluation of a three-dimensional micromixer in a surface-based biosensor," *Langmuir*, vol. 19, pp. 1824-1828 (2003).
10. R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, and D. J. Beebe, "Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9, pp. 190-197 (2000).
11. T. J. Johnson, D. Ross, and L. E. Locascio, "Rapid microfluidic

- mixing," *Analytical Chemistry*, vol. 74, pp. 45-51 (2002).
12. A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H. A. Stone, and G. M. Whitesides, "Chaotic mixer for microchannels," *Science*, vol. 295, pp. 647-651 (2002).
 13. T. G. Kang and T. H. Kwon, "Colored particle tracking method for mixing analysis of chaotic micromixers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 891-899 (2004).
 14. M. K. Jeon, J. H. Kim, J. Noh, S. H. Kim, H. G. Park, and S. I. Woo, "Design and characterization of a passive recycle micromixer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 346-350 (2005).
 15. S. Bohm, K. Greiner, and S. Schlautmann, "A rapid vortex micromixer for studying high-speed chemical reactions," *Technical Proc. Micro Total Analysis Systems Micro TAS* (2001).
 16. W. L. W. Hau, L. M. Lee, Y. K. Lee, and Y. Zohar, "Electrokinetically-driven vortical motion for mixing of liquids in a microchannel," *7th international Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analytical Systems*, pp. 491-495 (2003).
 17. A. A. Deshmukh, D. Liepmann, and A. Pisano, "Characterization of a micro-mixing, pumping, and valving system," *Transducers'01, 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 779-782 (2001).
 18. X. Z. Niu and Y. K. Lee, "Efficient spatial-temporal chaotic mixing in microchannels," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, pp. 454-462 (2003).
 19. L. H. Lu, K. S. Ryu, and C. Liu, "A magnetic microstirrer and array for microfluidic mixing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 11, pp. 462-469 (2002).
 20. Z. L. Tang, S. B. Hong, D. Djukic, V. Modi, A. C. West, J. Yardley, and R. M. Osgood, "Electrokinetic flow control for composition modulation in a microchannel," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 12, pp. 870-877 (2002).
 21. A. M. Lanzillo, T. S. Leu, M. Amabile, and R. Samtaney, "A study of the structure and motion of fluidic microsystems," *28th AIAA Fluid Dynamics Conf. Snowmass Village* (1997).
 22. J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, and R. J. Adrian, "A particle image velocimetry system for microfluidics," *Experiments in Fluids*, vol. 25, pp. 316-319 (1998).
 23. A. G. Koutsiaris, D. S. Mathioulakis, and S. Tsangaris, "Microscope

- PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries," *Measurement Science & Technology*, vol. 10, pp. 1037-1046 (1999).
24. C. D. Meinhart, S. T. Wereley, and M. H. B. Gray, "Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry," *Measurement Science & Technology*, vol. 11, pp. 809-814 (2000).
 25. Y. Sato, G. Irisawa, M. Ishizuka, K. Hishida, and M. Maeda, "Visualization of convective mixing in microchannel by fluorescence imaging," *Measurement Science & Technology*, vol. 14, pp. 114-121 (2003).
 26. K. Shinohara, Y. Sugii, K. Okamoto, H. Madarame, A. Hibara, M. Tokeshi, and T. Kitamori, "Measurement of pH field of chemically reacting flow in microfluidic devices by laser-induced fluorescence," *Measurement Science & Technology*, vol. 15, pp. 955-960 (2004).
 27. S. Devasenathipathy, J. G. Santiago, and K. Takehara, "Particle tracking techniques for electrokinetic microchannel flows," *Analytical Chemistry*, vol. 74, pp. 3704-3713 (2002).