

Y 型微混合器流道內圓柱形障礙物配置設計與性能分析

苗志銘* 厲復霖**

*國防大學理工學院機電能源及航太工程學系 **國防大學理工學院國防科學研究所

摘要

本研究之主要目的在利用計算流體力學軟體 FLUENT，在層流模式下求解 Navier-Stokes 方程式，對微流道試劑混合流場進行模擬與分析，探討在不同進口管數量及加入不同組合圓柱形障礙物的情況下，流道壓阻及混合效率的變化情形。模擬之試劑為水及酒精，Peclet 數包括 100、200 及 400 三種條件。結果顯示，在 Peclet 數為 200，且兩工作試劑總流量保持不變時，在 Y 型微混合器中央增加第三進口管，同時以交錯方式導入不同試劑，將可在不增加壓阻的情況下，比二進口管的算例大幅提高試劑的混合效率 2.14 倍；另外，若同時採用本研究三進口管的構型設計，並於流道中加入 12 個圓柱形障礙物，將可在 2mm 的流道長度內，使混合效率值達到 67.8%，比傳統 Y 型無障礙物的微混合器增加 2.43 倍，同時 Poiseuille 數亦僅有 37.81，是本研究中最優的選擇方案。

關鍵詞：計算流體力學，微混合器，Peclet 數，混合效率值，Poiseuille 數

Analysis on the Mixing Performance of Y-type Micromixer with Various Arrangements of Cylindrical Obstacles

Jr-Ming Miao*, Fuh-Lin Lih**

*Department of Mechtronic, Energy and Aerospace Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

**Graduate School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

The aim of present work is to investigate the mixing performance of a multiple-entry-type micromixer by placing several cylindrical obstacles with CFD techniques. Several major parameters, such as the numbers of inlet channel and the inline or staggered arrangements of various cylindrical obstacles on the overall mixing channel pressure drop and mixing efficiency all are well predicted and compared. The simulated results show that mixing efficiency and pressure drop were significantly affected by adding the numbers of inlet channel and proper placing of cylindrical obstacles. Moreover, when $Pe=200$, the serpentine flow structure which produced by placing 12 staggered cylindrical obstacles has the highest mixing efficiency value in all test cases. For case of combining three import tubes design and 12 cylindrical obstacles in the mixing channel obviously increased the mixing efficiency value to 67.8% while the Poiseuille number is kept a value of 37.81 simultaneously.

Keywords: CFD, micromixer, Peclet number, mixing efficiency, Poiseuille number.

文稿收件日期 96.3.5.; 文稿修正後接受日期 96.4.27.
Manuscript received March 5, 2007; revised April 27, 2007.

一、前言

數十年前，全世界才興起一片半導體熱，相關產業不斷如雨後春筍般崛起，改變了大多數人的生活模式，現在，微機電系統(MEMS) 暨其技術發展蓬勃，加上應用層面廣泛，遍及國防工業、生醫科技、工業生產、農林水產、環保工安、航太科技及資電通訊等，儼然成為二十一世紀最受矚目的明星產業。其中運用在生醫科技上，採用半導體策略於生物性分析所產生的微小化裝置，將傳統大型的分析、檢驗等器具，如微泵(micro-pump)、微閥門(micro-valve)、微過濾器(micro-filter)、微混合器(micro-mixer)、微通道(micro-channel)、微致動器(micro-actuator)、微感測器(micro-sensor)及微反應器(micro-reactor)等，予以微小化、積體化以及平行多工化，整合在一微小的晶片上，製成晶片實驗室(lab-on-a-chip)，即是所謂的「生物晶片」。

生物晶片通常以矽晶片、玻璃或高分子為基質，以微小化技術整合生物有機分子(如核酸或蛋白質)為生化探針，用來檢測或分析生物性分子。生物晶片的體積小、反應快速並且能夠平行分析大量生物資訊，因此適用於生化處理、疾病診斷、分析檢驗、新藥開發及環境監測等用途上。目前生物晶片的運用愈趨廣泛，尤其對國防工業上而言，因戰場生活環境普遍不佳，部隊士兵容易感染各式疾病，同時為應付未來可能發生的生化戰爭，軍隊亟須制訂一套快速且精準的生化檢驗體系，以降低戰士的畏戰心理並確保其寶貴的生命，生物晶片即是此體系中相當重要的一環。以目前生物晶片的發展趨勢，仍有許多關鍵技術瓶頸有待克服，譬如檢驗流程中混合器混合效率(mixing efficiency)的提升，就是一個相當重要的課題。因為在幾何尺寸僅數百微米的微流道中，雷諾數相當地小，此時流場多屬於層流性質，與強制對流效應相比較，擴散效應(diffusion effect)反而是決定混合效率的主要因素，雖然增加流道長度或混合時間可提升混合效率，但受限於目前晶片規格需求，不可能無限制的增加尺寸，因此在此類型晶片的設計中，如何在最短的流道長度內，使檢測試劑達到最佳的混合，是各界一直不斷努力的目標。

在 2000 年時，Xu 等人[1]曾發表一篇評論

性文章，文中詳述了生物晶片的應用範圍及未來發展的前景，使各界對此新技術的開發與應用有了進一步的瞭解；另外，根據 Nguyen 等人 [2]於 2005 年發表的 Micromixer - a Review 一文也可得知，目前微混合器依作動方式的不同，可概分為二種形式：(1)被動式的微混合器(passive micromixer)；(2)主動式的微混合器(active micromixer) (如圖 1)。此兩者差別在於：被動式的微混合器是在微管道中加入一些複雜的幾何形狀，或改變流道的外型，藉以增加二種液體的接觸面積，達到增進混合效率的目的；而主動式的微混合器則是藉由在流場中加入一些可移動的機構或是不斷地改變壓力梯度、加入電場或磁場驅動，給予直接的力量增加不同流體間的混合。

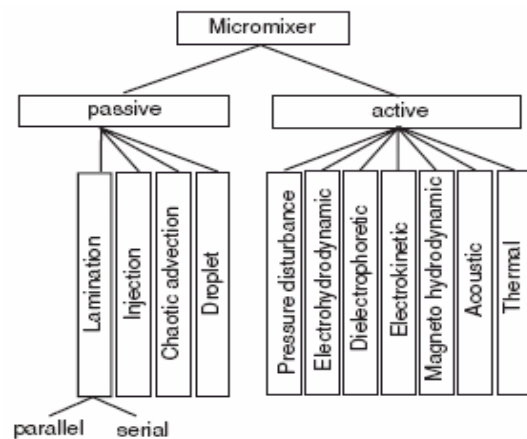


圖 1. 現行微混合器分類[2]。

一般來說，微混合器性能優劣的評估標準就在於混合效率的提升與壓阻值的降低，近年來有關增進微混合器性能的研究工作也是不斷朝此方向努力，而在被動式微混合器部分，因為其具備構型簡單、製程參數可控制與成本低廉的優勢，因此其相關設計參數的探討，一直在此類型研究中佔有相當大的比例。如 1993 年，Miyake 等人[3]利用微噴嘴，將試劑經微噴嘴注入檢體中，藉由增加兩種液體的接觸面積而達到迅速混合之目標；1999 年，Veenstra 等人[4]將流道中混合段製作成為噴嘴構型，藉由改變流道深寬比以增加反應流體之擴散時間，結果顯示混合效率將可大幅提升；Liu 等人[5]設計出一種蛇型彎曲流道，並設定在不同雷諾數下進行實驗工作，結果發現當雷諾數愈大時，混合效率會因流體擴散效應之增強而提

高；2001年，Gobby 等人[6]從改變 Y 型流道入口管角度及形狀兩參數來探討其對流體在微通道內混合程度的影響，得到進口流速愈快，在有限的流道長度下，愈不易充份混合；而改變入口管的角度並不會影響混合的效能。此外，他們的研究也發現扼縮(throttling)入口管匯流處將有利於混合效率的提高；Bertsch 等人[7]則在流道內設計一種蜂巢式結構，並同時採用數值與實驗的方法進行流場特性分析工作。由於蜂巢式結構近似於一層多孔性介質，流體在通道內的減速運動相對地增加其擴散時間，因此混合效率值可以有效地提升，但其缺點是其壓阻值同時也會連帶增加。

2002年，Stroock 等人[8]在微流道下表面刻入淺槽(groove)結構，藉引發局部混沌對流(chaotic convective)流場以增加混合效率；2003年，Tice 等人[9]利用多相流(multi-phase)的原理設計出液滴型微混合器，藉由 PFD 工作流體與檢體 A、B 互不相溶的特性，形成多股獨立液柱，且內部因動量不平衡而發生對流泡(convective bubble)，使兩種檢體流體 A、B 達到充分的混合。2004年，Chung 等人[10]在流道中加入一圓形槽，希望藉由兩股流體因為動量不平衡與離心力雙重作用產生自我的旋轉運動，使接觸面積的增加反應出增加兩流體的混合現象，結果證明可比直管增加約 30%的混合效率；Park 等人[11]也利用特殊的旋轉流道設計，使低雷諾數流場結構在發展中產生破裂(breakup)現象，使得流體在 4mm 的流道長度內即可達到 70%的混合效率。

在有限的晶片尺寸下，利用流道構型的改變增加混合效率，也是微混合器的重點研究方向。2005年，Lin 等人[12]採用多通道的微流道構型，藉由多股流體交會時所引發的動量不平衡，使流體產生自我旋轉(self-rotation)，進而達到在低雷諾數流場下增加混合效能的目的；Kim 等人[13]則是以微機電製程完成蛇狀薄型微混合器(serpentine laminating micromixer, SLM)的製作，並採用數值模擬及實驗量測兩種方式進行參數研究，證明在相同 Pe 數下，此構型設計將比矩形通道更能夠增加混合效率；Chang 等人[14]建構一種交錯旋轉薄型(alternating whirl-lamination, AWL)微混合器，證明在相同 Pe 數下，此構型設計將使有效混合長度大幅度地縮短；Xia 等人[15]以實驗和數值兩

種方式，探討二層交叉之混沌對流式微混合器(chaotic micromixer)在低雷諾數下之混合效率；Aubin 等人[16]則針對鯊魚骨式微混合器之溝槽數量、深度及寬度對混合效率之影響進行有系統的討論；Howell 等人[17]同樣採用鯊魚骨式的微混合器設計，但研究重點在於探討溝槽置於流道上方或下方對混合效率之影響。Yang 等人[18]同樣針對鯊魚骨型微混合器，以「田口法」(Taguchi method)進行溝槽深度比、溝槽不對稱因子、溝槽交叉角度及進出口管寬度比四個參數對此型微混合器混合效率影響之實驗設計，此作法除減少實驗次數外，也可以歸納出此構型設計最佳操作條件之參數。

2006年，仍有多篇關於被動式微混合器流道設計之研究成果發表，如 Nichols 等人[19]在微流道內設置數個交叉排列的鋸齒形障礙物，希望使流場產生速度及流向的改變，並藉此提升混合的效率；Sudarsan 等人[20]設計了一種螺旋形流道，並嘗試在不同流道設計長度及改變雷諾數的情況下，尋求此型微混合器最佳化的操作參數；Lee 等人[21]透過上下交疊式流道設計，使兩種流入試劑各別分離後再重合，形成更多的接觸面積以達到充分混合的目的，研究中並運用微機電製程完成實體模型以進行實驗，同時也利用數值模擬模式進行定性的分析。

由上面的文獻回顧可了解，有關被動式微混合器流場特性之研究是相當受到重視的一個課題，而且影響混合效率值的因素也相當多，雖然許多研究者在微流道中，常藉由改變流道形狀，或在流道中加入不同形狀及數量的障礙物等方式，藉由產生側向力以增加試劑間的接觸面積，進一步提高分子擴散的效應，而達到增進混合效率的目的，然而針對三進口管流道設計與同時具有障礙物之複合組合下之微混合器設計，就現有的文獻中較少，且尚無有一完整且有系統性的三維微混合器性能分析與參數探討。因此，本研究除利用微機電製程，製作微混合器的實體模型，建立完整實驗方法與設備，來觀察微管道中試劑混合的情形，並與數值結果進行驗證外，最主要的就是利用計算流體力學方法，探討 Pe 數在 100、200 與 400 的範圍內，以二及三進口管構型為基礎(如圖 2)，配合在流道內增加 6、12、16 與 18 個不同數量及配置方式的圓柱形障礙物，探討其對微混合器混合效率值及流道壓阻的影響。為了分析混

合效率沿著流道出口方向的變化情形，在研究中將自進口管流道匯流處為原點，至出口處分別截取十五個平面，定義為 S1~15，其取樣位置詳如圖 3 所示，其中 L 為混合段流道長度。

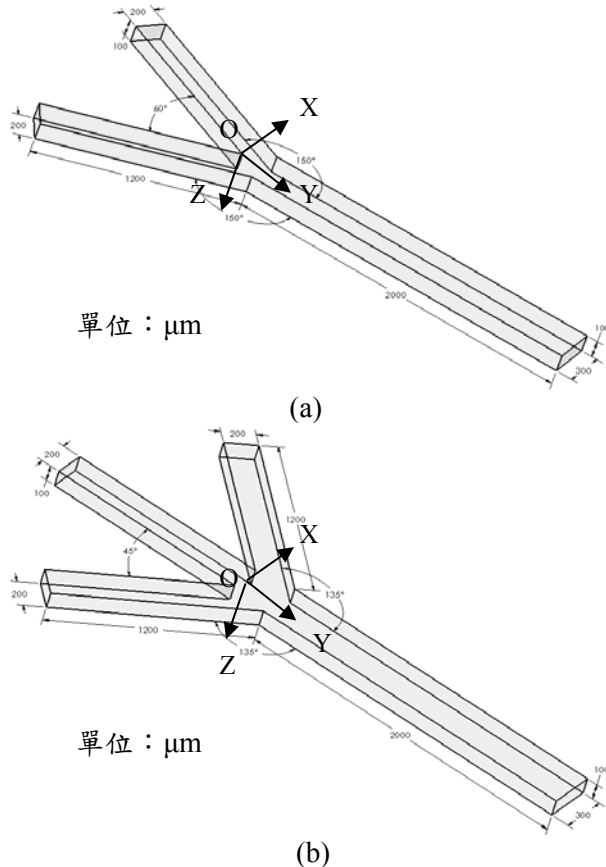


圖 2. 各型微混合器幾何構型示意圖：(a)Model A，(b)Model B。

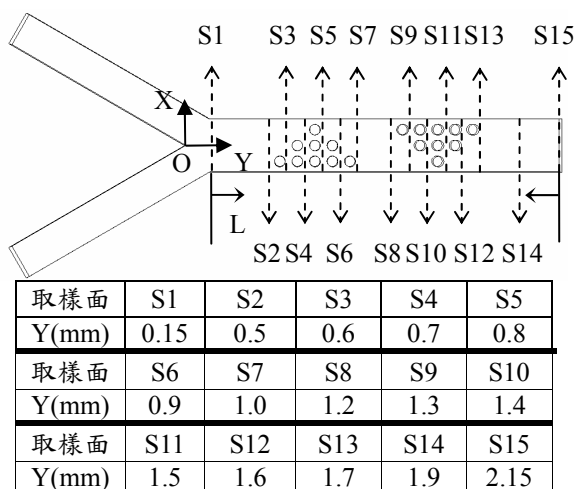


圖 3. 混合段流道沿著出口方向各取樣平面位置示意圖。

二、參數定義

2.1 Peclet 數(Pe):

在微混合器流場中，Peclet 數是一個非常重要的參數，所謂 Peclet 數即是流場中對流效應與擴散效應之比，其定義為：

$$Pe = \frac{V \times d}{D} \equiv \text{對流效應} / \text{擴散效應} \quad (1)$$

其中 d 為特徵長度， D 為擴散係數，而 V 為平均速度。此外，根據布朗運動 (Brownian motion) 定義 [22]，因為擴散時間 $t_D = \frac{d^2}{D}$ ，故可導出當流體達到完全混合時，所需之距離 $L_m = V \times t_D = Pe \times d$ ，式中 t_D 為達成完全混合所需的時間。因微流道的特徵尺度通常介於 $1\mu\text{m}$ 至 1mm 之間，而目前已知的生物晶片尺寸大多在 10cm 以下，故由上式可知，操作 Pe 數設定在 10^2 至 10^5 間是合理的範圍，其值過大或過小都是不切實際的數值。

2.2 混合效率值(σ):

在本研究中為了進行定量的探討，對於不同障礙物排列方式下所產生混合的程度，是以一個混合效率值 σ 加以表示，此參數是參考 Erickson 等人 [23] 的研究，其定義為：

$$\sigma = \left(1 - \frac{\int_A |C - C_\infty| dA}{\int_A |C_0 - C_\infty| dA} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中 C 為流道截面上不同計算點上的成分濃度，可由模擬所得結果求出； C_0 代表試劑完全未混合 (值為 1 或 0) 狀況下的成分濃度，而 C_∞ 則為試劑到達完全混合 (值為 0.5) 狀況下的成分濃度。

2.3 Poiseuille 數(Po):

在此類型研究中，壓阻值也是判斷微混合器性能優劣的關鍵參數之一，而在微流道研究中，壓阻值的表示方式有很多，為求一致性，本研究將採用無因次的 Po 作為不同操作條件

下，流道阻力大小的參考指標。其定義為：

$$Po = f \cdot Re \quad (3)$$

其中 f 稱為達西摩擦因子(Darcy friction factor)，而 Re 為雷諾數(Reynolds number)。 f 值與流道內阻力有一正比關係，可表示為：

$$f = \frac{2d}{\rho V^2} \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right) \quad (4)$$

上式中 $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)$ 即為延著流道長度 ΔL 的單位壓阻值。

因研究模型為多進口管構型，而進口管與出口管之截面積不同，故計算時將在多股進口管匯流處截取一平面，並由模擬結果求得該截面與出口截面壓力之差，做為壓阻 ΔP ，再經由式(3)、(4)計算 Po 值的大小，進而判定流體流入流道時所承受之阻力。

三、統御方程式與數值方法

3.1 基本假設：

在進行模擬之前，必須針對數值模型之物理特性與狀態做基本的假設，包括：

(1) 流場為穩態且為固定物理性質之不可壓縮流。

(2) 工作流體為水及酒精，其剪應力與剪應變率（速度梯度）呈線性關係，屬於牛頓系流體(Newtonian fluid)。

(3) 兩工作流體間之擴散係數為常數。

(4) 忽略流道內粗糙度及表面張力現象。

(5) 工作流體間不產生任何化學反應。

3.2 統御方程式：

本研究使用計算流體力學軟體 FLUENT 作為求解運算器，而在微尺度下，流場是否連續將視 Knudsen 數 ($Kn = \lambda/d$) 而定，其中 λ 為分子平均自由路徑， d 為特徵長度，當 $Kn < 0.01$ 時，稱為連續流區(continuum flow regime)，在此範圍內，流體分子間之碰撞頻率高，以本研究之各種初始條件而言， Kn 值遠低於此標準，故統御方程式仍是由質量、動量項皆遵守雷諾

傳輸定理之守恆原則(conservation principle)下所組成的偏微分方程式，稱之為雷諾均值 Navier-Stokes 方程式。

因本研究並不考慮熱傳問題，所以方程式僅包括質量守恆、動量守恆及成分質量守恆等三個傳輸方程式，分別敘述如下：

質量守恆方程式：

$$\nabla \cdot (\rho \bar{U}) = 0 \quad (5)$$

動量守恆方程式：

$$\rho(\bar{U} \cdot \nabla) \bar{U} = \rho \bar{g} - \nabla P + \mu \nabla^2 \bar{U} \quad (6)$$

當雷諾數大時，慣性力遠大於黏滯力，所以黏滯力可忽略不計，但對於微流道流場而言，因為流速非常低，換算之雷諾數相當小，故黏滯力對流場的發展，將顯得極為重要，而式中 $\rho \bar{g}$ 所代表的是流場中的體力(body force)，在本研究中也即可忽略不計。

成分質量守恆方程式：

$$\rho(\bar{U} \cdot \nabla) C_i = D_i \nabla^2 (\rho C_i) + S_i \quad (7)$$

其中， C_i 為成分 i 的體積濃度， ρC_i 為該成分的質量濃度， D_i 為該成分的擴散係數， S_i 為經由化學反應所生成該成分的生產率，因本研究中工作流體間並無化學反應發生，故此項在模擬中亦可忽略不計。

3.3 數值方法：

本研究選擇雙倍精準度之分離式(segregated)運算器求解上述之層流模式 Navier-Stokes 方程組，並假設流場為穩態及不可壓縮流，在壓力項的處理係選擇 PRESTO!(pressure staggering option)作為離散法則，對流項之離散則是採用中央差分法，而動量項及擴散項之離散則均採用二階上風法(second order upwind scheme)；對於壓力項與速度項之耦合則採用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)法則；另外因流場包括兩種不同流體混合，所以在計算上採用 FLUENT 內建的無化學反應的成分傳輸模組(species transport without reactions)，並選擇酒

精及水兩種液體進行混合。

四、格點系統

本研究目的為在於使用數值模擬工具作為微流網格系統之製作上，本研究使用ICEM/CFD軟體完成所有算例所需之三維網格系統。ICEM/CFD軟體可精確地構建出計算模型的幾何形狀，然後將全部之計算域分割成數個區塊，再行貼接至標的物的表面，其優點是可構建幾何外形複雜模型之內外流場網格系統，且格點系統修改較為簡便；其缺點是區塊的數目及次序無法由人為方法準確控制，尤其是在分割計算域區塊的步驟上，會因建構者的不同而產生不同的結果，完全取決於建構者對計算流體力學與此軟體了解的程度。而由於網格數量與計算時間成正比，但與模擬結果精度則不一定成正比，所以為求得良好的數值結果並節省計算的時間，研究前必須施以格點測試，期能獲得最佳的網格系統，以符合實際流場特性與兼顧計算效率。在進行格點測試時為求解數值穩態解，當絕對殘值變化隨時間趨近於零並符合收斂標準時，即視所得結果為收斂解，為考量研究模型為微小流道，故本研究模擬之結果，皆以質量項之殘值達到 10^{-12} 以下為收斂標準。

若以二通道內無障礙物微流道作為測試模型，此模型採用HEXA模組進行網格建構，計算域共分為 9 個區塊，並於混合段將網格加密。測試時分別使用三種網格系統，其格點數配置分別為：甲格點系統為 43,316 個網格，乙格點系統為 139,020 個網格，丙格點系統為 203,136 個網格，格點正交性品質均達 0.8 以上。若將三種網格分別施以相同的邊界條件加以計算，結果顯示甲、乙、丙三格點系統分別經過 341、465 及 578 次疊代後，殘值即已達到 10^{-12} 以下的收斂標準。圖 4 為以此構型在 $Pe=200$ 時，以不同格點數計算所得沿出口方向混合效率值變化情形，比較結果發現，甲及乙格點系統計算所得平均混合效率值之差異為 11.67%，而乙格點系統與丙格點系統相對差異僅為 0.14%，基於模擬精度與計算效率的要求，本研究將以乙格點作為後續研究之格點系統。

而如圖 5 顯示的是混合段中含有 12 個圓柱形障礙物 Y 型微混合器(Model D)的局部網格系統，係按上述乙格點系統，以同比例 HEXA 模

組建構，將計算域分為 452 個區塊，共計 218,520 個網格。值得說明的是，在格點系統生成時，本研究是將流道混合段各障礙物周邊以 O 型網格包覆，並利用網格局部加密技術，以達到快速收斂及預測結果準確性之要求。

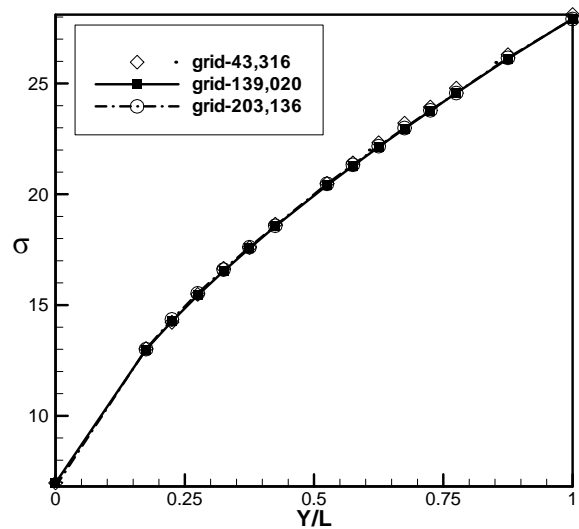


圖 4. Model A 在 $Pe=200$ 時，以不同格點計算所得沿下游方向混合效率值變化。

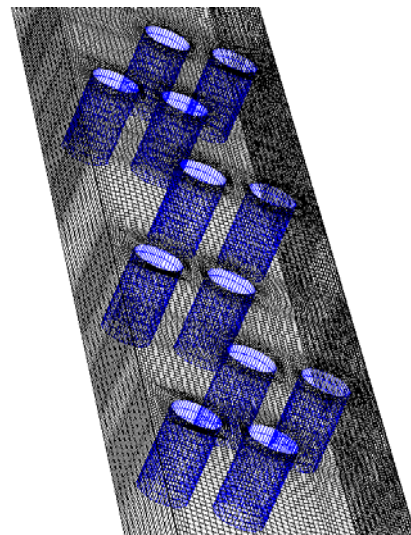


圖 5. Model D 構型微混合器局部網格系統示意圖。

五、研究矩陣與邊界條件

表 1 顯示在本研究所有算例構型之定義，另外，依前面圖 2 顯示，研究模型的進口管寬 $200\mu\text{m}$ ，出口管寬 $300\mu\text{m}$ ，管道高度皆為 $100\mu\text{m}$ ，出口管自匯流處至出口長 2mm ，管道

深寬比為 0.5，當 Pe 數為 100 時，可計算出進口速度為 $6 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ，餘各物理性質條件詳如表 2；另外，根據現有的條件參數，計算時邊界條件的設定如下：首先在進口管入口流邊界條件上，因已知各進口管流入成分及速度，所以在進口管入口可設為速度流入(velocity inlet)邊界條件；出口流設為壓力流出(pressure outlet)邊界條件，在操作壓力為 1 atm 下，並假設出口靜壓為 0 Pa；最後在壁面邊界條件的設定上，本研究則均設定為無擴散通量(zero diffusive flux)及無滑移(no-slip)邊界條件。

表 1. 研究矩陣

計算型	A	B	C	D
進口管數	2	3	2	2
進口管夾角	60°	45°	60°	60°
障礙物數	0	0	6	12
計算型	E	F	G	
障礙物形狀	2	2	3	
障礙物位置	60°	60°	45°	
障礙物數	16	18	12	

表 2. 計算參數

性質	黏滯係數 ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	密度 (kgm^{-3})	擴散係數 ($\mu\text{m}^2\text{s}^{-1}$)	分子量
水	1.003×10^{-9}	9.98×10^{-16}	1.2×10^3	18
酒精	1.2×10^{-9}	7.9×10^{-16}	1.2×10^3	41

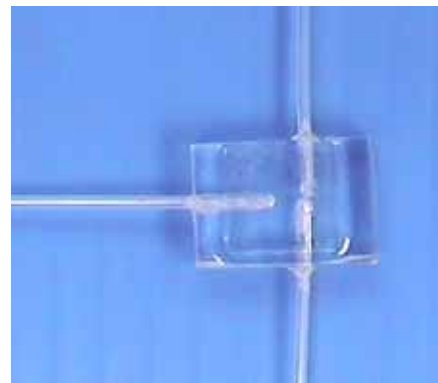
六、微混合器實體模型製作

現今各種製作微元件的微機電製程技術相當多，如本研究所採用的微影蝕刻法(photolithography and etching)，即是其中發展較為成熟的方法之一。為符合製作較大深寬比結

構及未來觀測方便所需，在此以矽晶片作為基材，選用 SU-8 厚膜光阻，以微影及蝕刻技術先行完成微混合器母模製作，再以聚二甲基矽氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)進行翻模，完成微混合器的流道結構，最後以壓克力板與 PDMS 製作的流道進行接合(bonding)，並在壓克力上鑽孔及接上 PE 軟管後，即完成本研究所所需的微混合器實體模型(如圖 6)。



(a)



(b)

圖 6. 在顯微鏡下觀察之 Model A 微混合器實體模型：(a)以 PDMS 製成的 Y 型微流道，(b)實體全模型。

七、實驗結果驗證

本流場可視化實驗重點在於針對 Model A 微混合器模擬結果進行比對，並進行定性的分析，因此在工作流體的選擇上，係以無化學反應及觀測方便為主要考量，在此以無色及加入紅色墨水的去離子水(DI water)作為工作流體，並以 KD Scientific 公司之 KDS-220 微量注射式幫浦(syringe pump)搭配 20 毫升針筒將試劑以 0.4ml/min 定速分別注入左、右流道，以光學顯

微鏡進行流場觀測，配合彩色 CCD 攝影機，擷取流場穩定後之影像，最後再利用影像分析軟體 NIH Image/Image J 對流道截面進行分析。

實驗結果顯示，當 $Pe=200$ 時，二進口管均以相同速度流入，因雷諾數相當小，流場為層流流場，所以明顯地觀察到兩股工作流體幾乎分佔流道一半寬度，混合程度不佳，如圖 7(a) 所示。此與數值計算所得結果相比，可謂相當吻合，如圖 7(b)。此外，將實驗結果利用影像分析所獲得匯流處之混合效率值為 5.52%，也與數值模擬結果 5.1% 相近，如圖 7(c)。

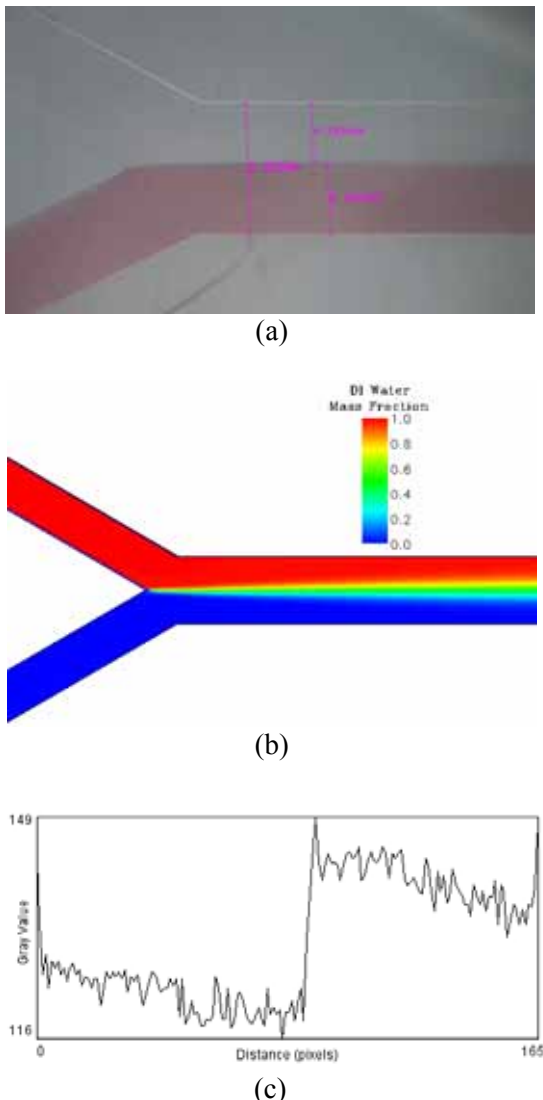


圖 7. Model A 實驗與計算所得結果比對：(a) 實驗結果，(b) 數值模擬結果，(c) 以 ImageJ 軟體分析所得色階分佈（取兩工作流體匯流處）。

八、模擬結果與討論

本研究的目的是在於探討改變 Y 型微混合器流道進口管數量，及配合在流道內部安置不同數量及排列方式的圓柱形障礙物，對混合效率值與流道壓阻的影響，並嘗試找出障礙物配置的最佳方案。障礙物的數量分別為 6、12、16 與 18 個，設定流場之 Pe 數為 100、200 與 400，而工作流體為水與酒精。由於研究對象屬於圖 1 中所示之被動層流式 (passive lamination) 微混合器，混合效率之增強在於如何在有效的混合長度內，增加試劑間的接觸面積，因此本研究將採取二種方法：其一為改變進口管數，由原 Y 型二進口管的左右流入不同試劑，成為魚刺狀的三進口管並改變進口管間夾角，而其中一試劑由中央管流入，將另一試劑流量均分為二，在總流量不變的條件下，改由左、右二管同時流入；其二則有別於流道側壁安置交錯式排列矩形障礙物之設計 (Chang 等人 [24])，利用圓柱形障礙物低流動阻力，以及在低雷諾數下，圓柱流場尾端存在低速尾流區的特性，藉由配置方式的選擇，尋求微混合器性能的最適化方案。以下將分別針對改變進口管數與增加不同數量及排列方式的圓柱形障礙物，對混合效率值與混合段流道壓阻值的影響進行討論。

8.1 改變進口管數量效應：

為了進行構型設計結果的比較，在研究初期，先針對無圓柱形障礙物存在於流道中的 Y 型微混合器 (定義為 Model A) 進行流場與成分濃度質傳場模擬，以引為爾後比對之參考依據。對 Model A 而言，當左、右二管分別流入酒精及水、且 $Pe=100$ 、200 或 400 時，依前述定義求得混合效率值及流道壓阻如表 3。圖 8 則為 Model A 在不同 Pe 數下，在混合段流道沿著出口方向的混合效率值變化情形，由圖中可知，因為此階段中兩試劑的混合完全取決於流體間接觸面的擴散作用，故混合效率將與擴散長度間存在著近似線性遞增的關係，同時，當 Pe 數增加，代表著進口流速愈大時，模擬結果顯示將愈不利於試劑的混合，當 $Pe=100$ 、200 或 400，出口處 σ 值分別為 41.1%、27.93% 及 19.51%，此外，壓阻也將隨 Pe 數提高而明顯增加。

表 3. Model A 以不同 Pe 數計算所得參數

Pe 數	100	200	400
σ (%)	41.1	27.93	19.51
Po	17.25	17.3	17.28

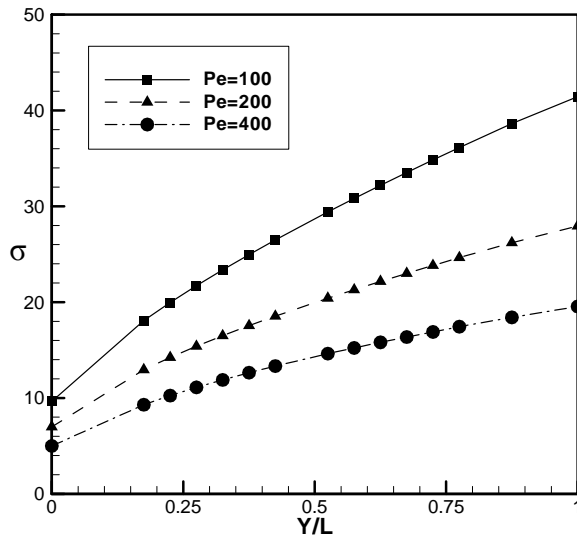


圖 8. Model A 在不同 Pe 數下沿流道下游方向混合效率值變化情形。

接著增加與二進口管幾何完全相同的第三進口管(如圖 2(b), 定義為 Model B), 並設定水從原單管流入改為左、右二進口管同時以一半體積流率流入, 酒精則由增加的中央進口管維持原體積流率流入。圖 9 為 Model B 計算所得在 $Z=50\mu\text{m}$ 處 X-Y 平面之酒精成分分佈圖。結果發現, 此設計對流道壓阻影響不大, Po 值仍為 17.09, 但出口面之混合效率卻由原 Model A 的 27.93% 大幅提高至 59.86%, 增加了 2.14 倍, 究其主因是此設計可增加兩試劑間的接觸面積, 進而提升擴散作用, 因此, 增加進口管由二管至三管確實有助於混合效率值的提升。

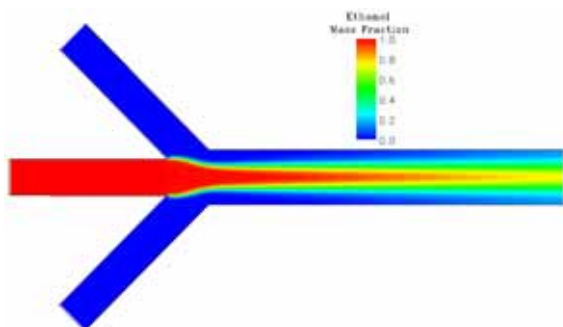


圖 9. Model B 所得流道中央 X-Y 平面酒精成份分佈圖 ($Pe=200$)。

8.2 增加不同數量及排列方式的圓柱形障礙物效應：

接著以 Model A 構型為基礎, 為增加在有限流道長度內, 兩工作流體的接觸面積, 而將不同數量及排列方式的圓柱形障礙物加入(定義為 Model C~F), 圖 10 為各構型下圓柱形障礙物幾何位置及排列方式示意圖, 圓柱形障礙物的直徑固定為 $60\mu\text{m}$, 第一個(排)障礙物與混合段入口面的距離也維持在 $400\mu\text{m}$ 。將 Model C 的幾何構型與初始的 Model A 進行比較, 為增加試劑的混合現象, 首先在流道的中央安置一圓柱形障礙物, 然後朝下游處每隔 $200\mu\text{m}$, 等間距以交錯方式地排列出 5 個圓柱形障礙物, 而距離中心線的距離皆固定為 $60\mu\text{m}$ 。圖 11 為 Model C 在 $Pe=200$ 時計算所得的流道中央 X-Y 平面酒精成份及流場速度向量分佈情形, 由圖中可明顯地觀察到水與酒精的流動將因於流道中加入對稱且交錯排列的障礙物而改變流向, 此現象符合預期結果。將圖 11(a)與圖 10(a) 相互比較後可以觀察到, 在相同 Pe 數下, 混合段流道中交錯地配置圓柱形障礙物所形成的週期正弦波形式的流場, 可明顯地增加水與酒精的接觸面積, 此種流場型態, 將使得擴散距離增加, 在相同流速下, 也相對地增加了流體間擴散作用時間, 使得混合效率在相同流道長度下有所提昇, 稍微比 Model A 的算例平均增加了約 1.1 倍, 但也因障礙物存在的作用, 造成了流道阻力的增加, Po 數為 23.09, 增加了 1.33 倍。圖 11(b)顯示的是圓柱形障礙物附近的局部流場速度向量放大圖, 可看出在相同 Pe 數下, 由於水的動力黏滯係數比酒精低, 因此即使第一個圓柱形障礙物位於中心平面上, 位於上半平面水的流動速度會比位於下半平面酒精高, 然而第二個圓柱形障礙物位於酒精平面, 阻礙酒精層流狀的向下發展, 使得向上半平面中運動的酒精成分增加與水接觸的表面積, 愈往下游處, 週期且呈交錯式排列的圓柱形障礙物, 引發了週期且近似蜿蜒型流場的最大速度向量變化特性。

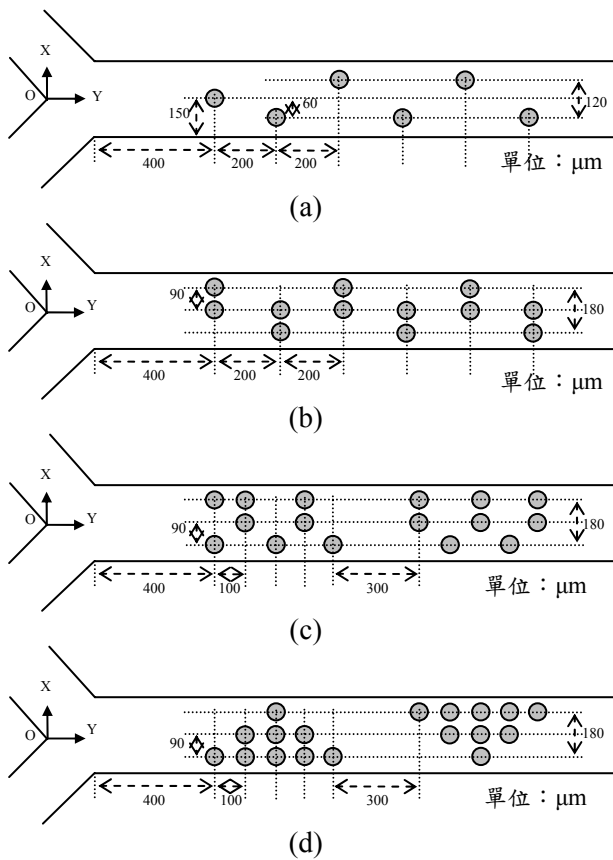


圖 10. 各種障礙物排列方式及幾何尺寸示意圖：(a)Model C，(b)Model D，(c)Model E，(d)Model F。

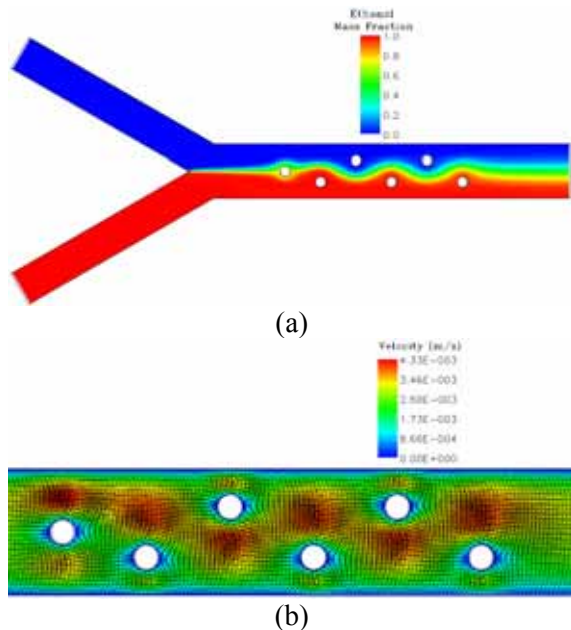
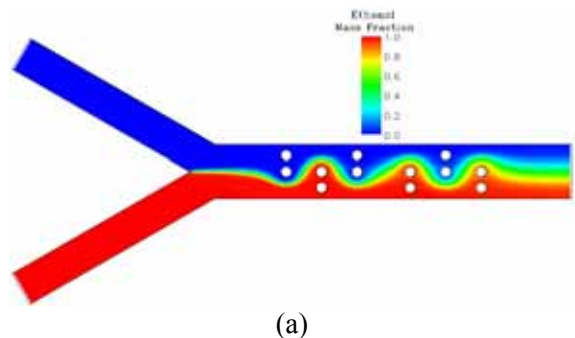


圖 11. Model C 計算所得流道中央 X-Y 平面結果 ($Pe=200$)：(a)酒精成份分佈圖，(b)障礙物周邊局部速度向量圖。

若依 Model C 的結果，可以發現到在流道中安置圓柱形障礙物，的確可增加水與酒精的接觸面積，而提昇混合效率值，然而將 Model C 與 Model A 的結果相互比較後也可以發現，安置 6 個障礙物的效應並不顯著。為在有效的混合段流道長度下，增加兩流體間的接觸面積，在原 Model C 設計的位置各增加一個障礙物，成為 12 個障礙物構型，即為 Model D，同樣分別以不同 Pe 數進行模擬工作。圖 12 為 Model D 在 $Pe=200$ 時，計算所得在流道中央 X-Y 平面的酒精成份及流場速度向量分佈圖。由圖 12(a) 中可發現，障礙物由 6 個增加到 12 個時，位於上半平面的水在流經第一排障礙物時，因為壓力梯度的存在，迫使相對高速的水往原本位於下半平面流動的酒精方向流動，流場開始呈現出預期的擺動現象，緊接著位於下游處存在的第二排障礙物，則使得酒精往上半平面流動，週期性排列的障礙物就引發出週期蛇形型態的濃度成份分佈特性。觀察圖 12(a) 也可以發現到，Model D 的設計使得擴散作用距離更長，在擴散作用時間也愈長的情況下，使混合效率值的提升愈加明顯，當 $Pe=100$ 時，兩試劑在 2mm 的流道長度內，可達到 51.76% 的混合效率值。觀察位於圓柱形障礙物附近流場的局部速度放大圖（如圖 12(b) 所示）後可以發現，此種排列方式使得混合段內原本平直分層狀的流場結構，改變為近似蛇形流場型態，但是因為障礙物幾何構型為圓柱形，且中心相隔 $90\mu\text{m}$ （如圖 10(b) 所示），水或酒精仍能穿越過其所構成的通道，而不會像在側壁安置矩形障礙物般形成角渦流 (corner vortex)，或是迴流區 (recirculation zone)，而大幅增高流動阻力，影響到輸送時所需之泵浦性能要求。如預期地，最大的速度並不會發生在圓柱形障礙物側壁，或是兩跨向相鄰的圓柱形障礙物所構成的通道內，而是在障礙物與較遠離一端側壁的流道內。



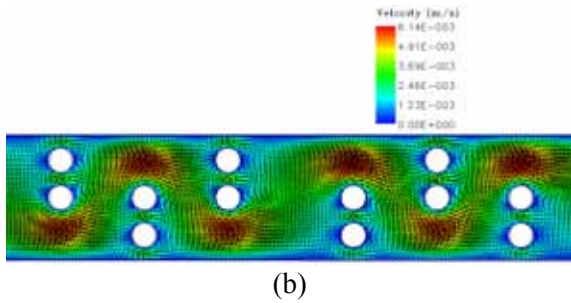


圖 12. Model D 計算所得流道中央 X-Y 平面結果 ($Pe=200$): (a) 酒精成份分佈圖, (b) 障礙物周邊局部速度向量圖。

雖然在相同的 Pe 數下, Model D 所獲得之混合效率值比 Model C 高, 但是 Po 數卻增加了約 1.6 倍。由於 Model C 與 D 皆是採用對稱方式排列圓柱形障礙物, 若將障礙物數量增加至 16 個, 同時採取不規則的方式排列, 如圖 10(c) 所顯示的 Model E。在此情況下, 與 Model C 相比, 各 Pe 值條件下所計算得到混合效率值差異不大, 但壓阻卻大幅增加 (如圖 16), 此結果在微混合器的性能上是相當不利的設計方案。圖 13 為 Model E 在 $Pe=200$ 時計算所得流道中央 X-Y 平面的酒精成份及流場速度向量分佈圖。比對圖 12 與圖 13 後, 可知增加障礙物的數量, 並不表示對混合效率的提升一定有幫助, 而適當運用障礙物並進行妥善的排列才是關鍵。

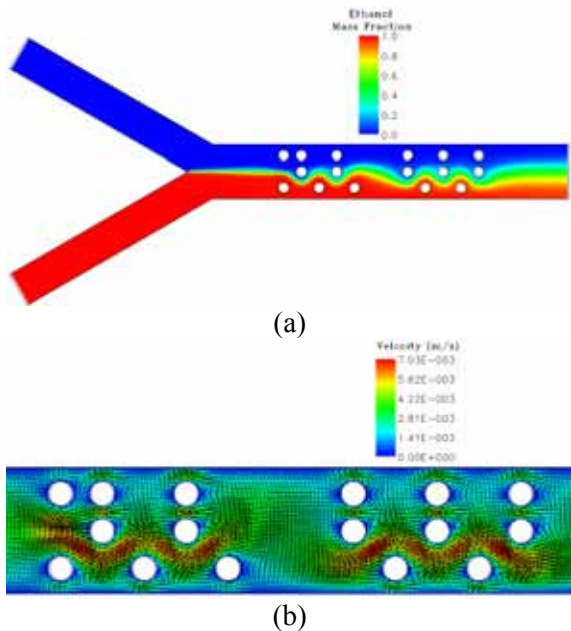


圖 13. Model E 計算所得流道中央 X-Y 平面結果 ($Pe=200$): (a) 酒精成份分佈圖, (b) 障礙物周邊局部速度向量圖。

本研究中先後已採用在流道中加入 6 及 12 個規則排列的障礙物, 及非規則排列的 16 個圓柱形障礙物, 作為討論增加障礙物數量對混合效應影響的構型, 也獲得當障礙物增加至 16 個時, 採非規則排列障礙物 (Model E) 卻與 12 個規則排列障礙物 (Model D) 的算例所得混合效率值差異不大, 但壓阻卻大幅增加的不利因素, 因此, 本研究也設計兩組上、下游非對稱排列金字塔 9 個圓柱形障礙物的微混合器構型進行比較。圖 10(d) 顯示此構型相關幾何尺寸與障礙物位置, 而此構型記為 Model F, 並同樣以三種 Pe 數進行流場模擬工作, 圖 14 為 Model F 在 $Pe=200$ 時計算所得流道中央 X-Y 平面的酒精成份及等速度向量分佈情形, 由結果可知此種設計所得混合效率值反而較 Model D 及 E 低, σ 僅為 34.14%, 但流道內的壓阻卻是所有算例中最大的結果, Po 數高達 55.88, 比 Model A 多了 3.23 倍, 可知非對稱排列成組圓柱形障礙物並非一定是最佳選擇, 少量且將障礙物個別進行適當的配置有時反而可以發揮最大的效果。

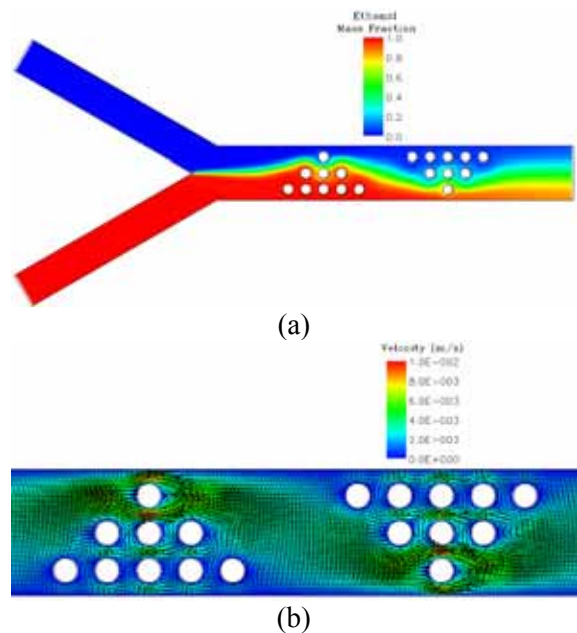


圖 14. Model F 計算所得流道中央 X-Y 平面結果 ($Pe=200$): (a) 酒精成份分佈圖, (b) 障礙物周邊局部速度向量圖。

圖 15 為 $Pe=200$ 時, 各模型沿下游方向之混合效率變化曲線, 圖中部份曲線均有峰值出現, 主要是因為當擴散層恰好穿越障礙物時, 此處流體將因障礙物前產生的減速現象, 而有

利於試劑的混合，因此，當截取此平面時計算混合效率值時，會有較高的峰值產生。由此可知，在進行障礙物排列設計時，若能將障礙物置於試劑擴散層介面內，將有利於混合效率的提升。而上述各型微混合器構型在不同 Pe 值計算所得混合效率值及 Po 值表示於圖 16。從圖中也可明顯看出，不論是考量混合效率的提升，或是流道的壓阻的不利影響，Model D 都是所有計算模型中表現最佳的構型，在 $Pe=200$ 時，混合效率值達到 35.89%，且 Po 數僅有約 37.46，遠低於 Model E 與 F 的 49.29 及 55.88。

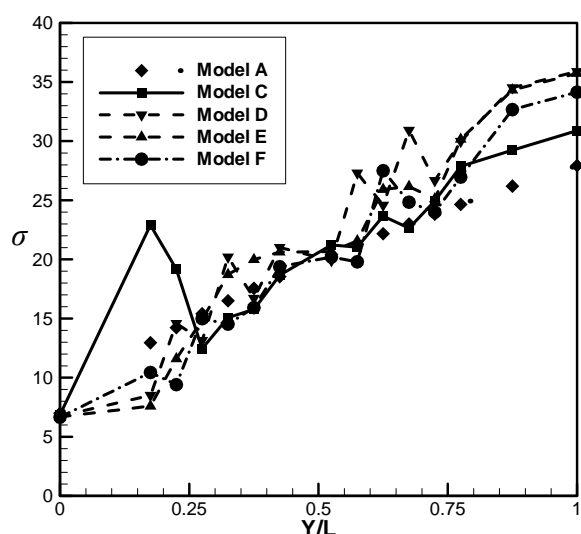


圖 15. 各種微混合器構型在 $Pe=200$ 時，沿流道下游方向混合效率值變化曲線。

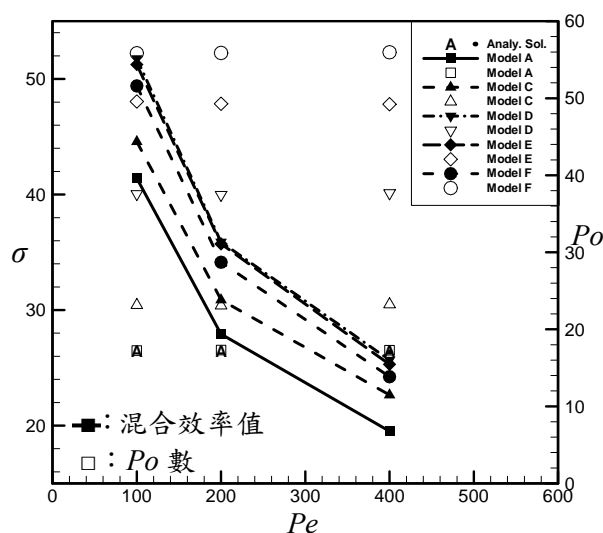
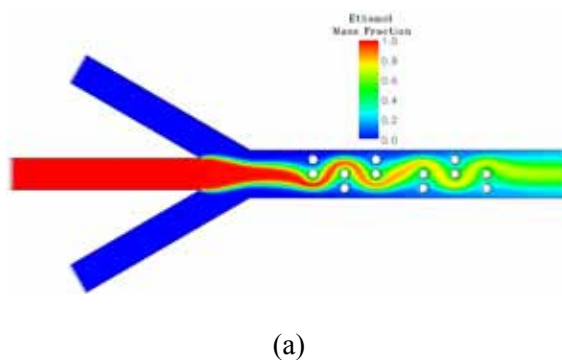


圖 16. 各種微混合器構型在不同 Pe 值計算所得混合效率及 Po 值。

在前面的研究中，已知增加中央進口管及採用 Model D 的 12 個圓柱形障礙物構型，將有最佳的混合效率值表現，故若將二者之設計結合，以 Model B 的構型為基礎，並在流道中加入 12 個圓柱形障礙物，並同樣設定水由左、右二進口管同時以 $Pe=100$ 之速度流入，酒精則由中央進口管以 $Pe=200$ 之速度流入，以此條件進行流場模擬。圖 17 即為此條件下，計算所得流道中央 X-Y 平面之酒精成份分佈及等速度流線分布情形，圖 18 則為進口管數不同及分別採用 Model D 的障礙物配置，在 $Pe=200$ 時計算所得沿流道下游方向混合效率變化曲線之比較。由圖中可發現當採用 Model G 構型且酒精自中央管流入時，不但與兩側水的間接觸面積最大，且流體擴散距離也是最長，這二者都有利於擴散作用的進行，因此在 2mm 的流道長度內，計算所得混合效率值將高達 67.8%，同時 Po 值亦僅有 37.81，與 Model D 幾乎相同，所以可知 Model G 構型是本研究中最優的選擇方案。

綜整上述研究成果，證明當增加試劑流入管由二個(Model A)成為三個(Model B)，同時以交錯方式導入不同試劑，將可有效地提升混合效率值至 59.86%，比原傳統 Y 型微混合器算例增加 2.14 倍；若同時採用 Model B 增加中央第三進口管及 Model D 的 12 個圓柱形障礙物構型設計，則可在 2mm 的流道長度內，使混合效率達到 67.8%。此結果與 Wang 等人[25]所設計的被動式微混合器，在同樣進口 Pe 數為 200 情況下，而所得混合效率值僅有 17%~57%相比，確實有相當大幅的提升。



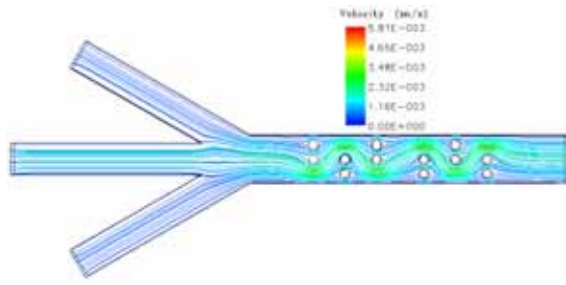


圖 17. Model G 計算所得流道中央 X-Y 平面結果 ($Pe=200$): (a) 酒精成份分佈圖, (b) 等速度流線分佈圖。

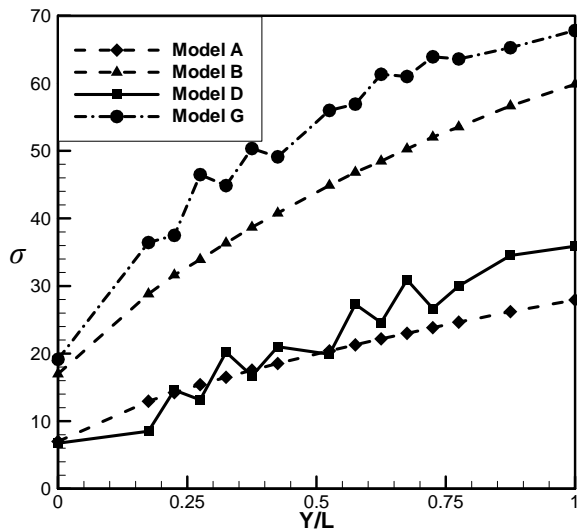


圖 18. 各種微混合器構型在 $Pe=200$ 時, 沿流道下游方向混合效率值變化曲線。

九、結論

本研究的目的主要在於探討改變 Y 型微混合器流道進口管數量, 及配合在流道內部安置不同數量及排列方式的圓柱形障礙物存在, 對混合效率值與流道壓阻的影響, 並嘗試找出障礙物配置的最佳方案。為降低因為障礙物而可能增加的壓阻值, 研究中特別採用圓柱形的設計, 利用圓柱形障礙物相對低流動阻力, 以及在低雷諾數下, 圓柱流場尾端存在低速尾流區的特性, 而避免如同在側壁安置矩形障礙物般形成角渦流, 或是迴流區而大幅增高流動阻力, 產生影響到輸送時所需之幫浦性能要求的不利情形。設計的障礙物數量分別為 6、12、16 與 18 個, 設定流場之 Pe 數範圍為 100、200 與 400, 而混合的工作流體分別為水與酒精。經由本研究的模擬結果分析, 可以獲得下列幾

點重要結論:

(1) 在進口流道深寬比為 0.5 的條件下, 試劑混合效率值與擴散長度間存在著近似線性遞增的關係, 且與進口流速成反比, 即入口流之 Pe 數愈大, 愈不利於流體的混合。

(2) 在流道中不含圓柱形障礙物的微混合器中, 當所有計算邊界條件相同時, 增加試劑流入管由二個(Model A)成為三個(Model B), 同時以交錯方式導入不同試劑, 將可有效地提升混合效率值; 且此種設計對流道內壓阻影響不大, 在總流量不變的情形下, 混合效率值可大幅提高至 59.86%, 比原二管算例增加 2.14 倍。

(3) 當 Pe 值及進口管數量保持不變時, 在流道中增加圓柱形障礙物, 確實可以達到增加混合效率值的效果; 但增加障礙物的數量, 並非一定是最佳的選擇, 將障礙物進行交錯排列的配置, 有時反而可以發揮最大的試劑混合效果。本研究結果顯示, 以試劑通過 12 個圓柱形障礙物所形成的蜿蜒形流場, 將可以在不增加壓阻的情況下, 達到最高的混合效率值。

(4) 在 Model A 構型的基礎下, 同時採用 Model B 增加中央第三進口管及 Model D 的 12 個圓柱形障礙物構型設計, 可在 2mm 的流道長度內, 使混合效率達到 67.8%, 同時 Po 值亦僅有 37.81, 是本研究中最優的選擇方案。

致謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫編號 NSC-95-2221-E-014-036 經費支助, 僅此致謝。

參考文獻

- [1] Xu, J., He, X., Zhou, Y., Liu, L., and Cheng, J., "Research and Applications of Biochip Technologies," Chinese Science Bulletin, Vol. 45, No. 2, pp. 101-107, 2000.
- [2] Nguyen, N. T., and Wu, Z., "Micromixers - a Review," J. Micromech. Microeng., Vol. 15, pp. R1-16, 2005.
- [3] Miyake, R., Lammerink, T., Elwenspoek, M., and Fluitman, J., "Micro Mixer with Fast Diffusion," MEMS '93, Proceedings An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, IEEE, 1993.
- [4] Veenstra, T. T., Lammerink, T., Elwenspoek,

- M. C., and Berg, A., "Characterization Method for a New Diffusion Mixer Applicable in Micro Flow Injection Analysis Systems," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 9, pp. 199-202, 1999.
- [5] Liu, R. H., Stremler, M. A., Sharp, K. V., Olsen, M. G., Santiago, J. G., and Adrian, R. J., "Passive Mixing in a Three-dimensional Serpentine Microchannel," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 190-197, 2000.
- [6] Gobby, D., Angeli, P., and Gavriilidis, A., "Mixing Characteristics of T-type Microfluidic Mixers," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 126-132, 2001.
- [7] Bertsch, A., Heimgartner, S., Cousseau, P., and Renaud, P., "Static Micromixers Based on Large-scale Industrial Mixer Geometry," *Lab Chip*, Vol. 1, pp. 56-60, 2001.
- [8] Stroock, A. D., Dertinger, S., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A., and Whitesides, G. M., "Chaotic Mixer for Microchannels," *Science*, Vol. 295, pp. 647-651, 2002.
- [9] Tice, J. D., Song, H., Lyon, A. D., and Ismagilov, R. F., "Formation of Droplets and Mixing in Multiphase Microfluidics at Low Values of the Reynolds and the Capillary Numbers," *Langmuir*, Vol. 19, pp. 9127-9133, 2003.
- [10] Chung, Y. C., Hsu, Y. L., Jen, C. P., Lu, M. C., and Lin, Y. C., "Design of Passive Mixers Utilizing Microfluidic Self-circulation in the Mixing Chamber," *Lab Chip*, Vol. 4, pp. 70-77, 2004.
- [11] Park, S. J., Kim, J. K., Park, J., Chung, S., Chung, C., and Chang, J. K., "Rapid Three-dimensional Passive Rotation Micromixer Using the Breakup Process," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 6-14, 2004.
- [12] Lin, C. H., Tsai, C. H., and Fu, L. M., "A Rapid Three-dimensional Vortex Micromixer Utilizing Self-rotation Effects Under Low Reynolds Number Conditions," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 935-943, 2005.
- [13] Kim, D. S., Lee, S. H., Kwon, T. H., and Ahn, C. H., "A Serpentine Laminating Micromixer Combining Splitting/Recombination and Advection," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 739-747, 2005.
- [14] Chang, S., and Cho, Y. H., "Static Micromixers Using Alternating Whirls and Lamination," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 1397-1405, 2005.
- [15] Xia, H. M., Wan, S., Shu, C., and Chew, Y. T., "Chaotic Micromixers Using Two-layer Crossing Channels to Exhibit Fast Mixing at Low Reynolds Numbers," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 748-755, 2005.
- [16] Aubin, J., Fletcher, D. F., and Xuereb, C., "Design of Micromixers Using CFD Modelling," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 2503-2516, 2005.
- [17] Howell, P. B., Mott, D., Fertig, S., Kaplan, C. R., Golden, J. P., Oran, E. S., and Ligler, F. S., "A Microfluidic Mixer with Grooves Placed on the Top and Bottom of the Channel," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 524-530, 2005.
- [18] Yang, J. T., Huang, K. J., and Lin, Y. C., "Geometric Effects on Fluid Mixing in Passive Grooved Micromixers," *Lab Chip*, Vol. 5, pp. 1140-1147, 2005.
- [19] Nichols, K. P., Ferullo, J. R., and Baemner, A. J., "Recirculating, Passive Micromixer with a Novel Sawtooth Structure," *Lab Chip*, Vol. 6, pp. 242-246, 2006.
- [20] Sudarsan, A. P., and Ugaz, V. M., "Fluid Mixing in Planar Spiral Microchannels," *Lab Chip*, Vol. 6, pp. 74-82, 2006.
- [21] Lee, S. W., Kim, D. S., Lee, S. S., and Kwon T. H., "A Split and Recombination Micromixer Fabricated in a PDMS Three-dimensional Structure," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 16, pp. 1067-1072, 2006.
- [22] Einstein, A., "On the Motion of Small Particles Suspended in Liquids," *Ann. Phys.*, Vol. 17, pp. 549-560, 1905.
- [23] Erickson, D., and Li, D., "Influence of Surface Heterogeneity on Electrokinetically Driven Microfluidic Mixing," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 1883-1892, 2002.
- [24] Chang, C. C., and Yang, R. J., "Computational Analysis of Electrokinetically Driven Flow Mixing in Microchannels with Patterned Blocks," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 550-558, 2004.
- [25] Wang, H., Iovenitti, P., Harvey, E., and Masood, S., "Optimizing Layout of Obstacles for Enhanced Mixing in Microchannels," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 11, pp. 662-667, 2002.