

# 微混合器的混合特徵及最佳化設計之模擬分析

## A Numerical Analysis of Mixing Characteristics and Optimal Designs of a Micro Mixer

陳志堅

Jyh-Jian Chen

本文以數值模擬方法探討一被動式微混合器的混合特徵，文中所設計的微混合器為一長方體結構，搭配多個微流道的出入口，而分析不同幾何參數和流體特徵對兩種流體混合效果的影響。結果顯示，流道入口的幾何位置、流道數目、流體的雷諾數及出口寬度，對流體混合的效應皆有影響。當考慮到減小壓降的問題時，文中選擇出最適當的設計參數，以提供此被動式微混合器的最佳操作條件。

Computational fluid dynamics simulations are utilized to study the mixing characteristics of a passive micro mixer. The device is based on a hexahedral structure accompanied with several input and output micro channels. The influences of various operating and design parameters on mixing of two fluids are analyzed. Results show that the relative locations of the inlets in the mixer, the numbers of channels, the Reynolds number of fluids and the width of outlet can affect the mixing effect. Regarding to the lower pressure drop, the optimal design parameters are chosen according to our calculated results.

### 一、緒論

近年來，將微機電技術應用在生物科技方面的分析和合成上，引起了越來越多人的注意。因具有價格便宜和容易操作的優勢，目前已有一些微流系統 (micro fluidic system) 在生物及生化科技上受到廣泛的使用，這些應用包括去氧核糖核酸 (DNA 或 deoxyribonucleic acid) 和蛋白質 (protein) 的分析、細

胞的排序、高通量的篩檢 (high-throughput screening) 和微小體積 (約為奈升) 的傳輸等。最近非常熱門的微全分析系統 ( $\mu$ -TAS 或 micro total analysis system)，也因為關鍵元件的微化而有很大的進展。在此，縮短分析或反應時間和減少樣本的量是非常重要的因素，但更重要的在於改進其反應的效率，這也是微小系統和傳統裝置最大的不同。

在微流裝置中，聚合酶連鎖反應 (polymerase

chain reaction, PCR) 或 DNA 雜交 (hybridization) 等不同的生化分析過程，細胞或分子的混合決定了整個系統的效率。因為在微小系統中，不同流體混合的時間和彼此反應的時間幾乎相等，或是混合的時間比反應的時間更長；在此情況下，混合和反應幾乎是同時發生的，也因此不完全的混合將會影響到反應的完成。所以在微全分析系統、臨床檢測和藥品篩檢等微裝置中，微混合器 (micro mixer) 就成了一個非常關鍵的次系統。由此可知，微混合器須具備可混合極少量的流體、可快速和均勻地完成混合、可用簡單的微機電製程製作及可組裝在生物晶片上等特徵。

在一般傳統的流體裝置中，混合的質傳機制是由對流擴散 (包含漩渦擴散 (eddy diffusion) 和塊狀擴散 (bulk diffusion)) 和分子擴散 (molecular diffusion) 構成；首先是由不同種類的流體利用對流方式互相接近，接著再由分子之間的擴散完成混合。對低黏滯性的 (viscous) 流體而言，可在混合區加裝攪拌器或設計不同形狀的管道 (如彎管或交叉管、流道上加凸塊等)，改變其幾何形狀，以產生紊流 (turbulent flow) 或擾動，這些擾流的產生可增加流體之間的接觸面積，以增進混合的效率。而在微流裝置中，因為典型的液流都只有較低的雷諾數 (Reynolds number，為慣性力與黏滯力的比值)，當流體間的黏滯力大於其慣性力，會將流動產生的擾動減弱，所以達到完全的混合則僅靠分子之間的擴散行為。由 Fick 定律 (Fick's law) 可知，分子擴散的驅動力為其濃度的差異：

$$J = -DA \frac{\partial y}{\partial x}$$

其中  $J$  為質量通量、 $D$  為擴散係數、 $A$  為接觸面積、 $y$  為濃度和  $x$  為幾何長度。由此可知，接觸面積的增加可以增大擴散的質量通量。在此情況下，分子移動的時間和其距離的平方成正比<sup>(1)</sup>，

$$\tau = \frac{L^2}{2dD}$$

其中  $\tau$  為時間、 $L$  為特徵長度而  $d$  為幾何維度；當幾何尺寸增加時，流體亦需要較長的時間完成混合的過程。也就是說減小特徵長度 (擴散長度)，將可減少混合的時間。

一般微混合器可依其驅動的方式分為兩種，分別為主動式 (active) 混合器和被動式 (passive) 混和器。主動式混合器是指藉著像放置移動式元件的方式，施加某種型態的主動控制或能量於流場中，以產生週期性或非週期性的擾動，增加混合的效果；驅動的方式包括熱對流、壓力差、超音波、氣動力和磁力等。1991 年，Moroney 等人<sup>(2)</sup> 提出在深度  $250 \mu\text{m}$  容器底部的兩側，被覆一層  $1 \mu\text{m}$  壓電材料氧化鋅 (zinc oxide)，產生波長  $100 \mu\text{m}$  和頻率  $4 \text{ MHz}$  的超音波，以此超音波振盪的方式，促進在容器中液體的混合。1998 年，Zhu 和 Kim<sup>(3)</sup> 在  $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} \times 500 \mu\text{m}$  的混合區中，容器底部被覆一層  $10 \mu\text{m}$  壓電材料 (氧化鋅) 的同心環狀薄膜，以  $240$  或  $480 \text{ MHz}$  的正弦波振動，以加速液體的混合。2000 年，Yang 等人<sup>(4)</sup> 在  $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 60 \mu\text{m}$  的混合區中，底部被覆一層  $150 \mu\text{m}$  厚的壓電陶瓷材料，產生  $60 \text{ kHz}$  的方形波，同樣以超音波振動的方式，完成流體的混合。同年，Vivek 等人<sup>(5)</sup> 在  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$  的混合區中，在壓電材料的基材上建立三種不同的致動器，以產生一強的側向 ( $4.5 \text{ MHz}$ ) 音波衝 (acoustic thrust)，加強混合的效率。2002 年，Tsai 和 Lin<sup>(6)</sup> 利用微幫浦在一個微管道中產生熱氣泡，兩種液體由 Y 形流道的兩分支注入一條曲折的微流道，氣泡的爆炸造成不同流體接觸面成波浪狀，以此方式增加接觸面積，結果顯示當熱氣泡的致動頻率到達  $200 \text{ Hz}$  時，此時波浪流的波長小於理論的擴散距離，有最佳的混合效率。2002 年，Lu 等人<sup>(7)</sup> 在混合區中建立磁性微攪拌器，以陣列式排列在  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 50 \mu\text{m}$  的混合區中，以幫助液體的混合。

被動式混和器是指除了利用幫浦外，無任何外來能量輸入的形式，驅使流體在定流量下固定幾何形狀的流道流動，以進行混合。當流體的雷諾數小於  $1$  時，達到完全的混合則僅靠分子間的擴散行為，利用增加接觸面積、減少擴散距離的方式，以增加混合效率。1993 年，Miyake 等人<sup>(8)</sup> 在  $2.2 \text{ mm}$

× 2 mm × 330 μm 的混合區中，底面以 400 個微噴嘴 (15 μm × 15 μm) 注入另一種流體，微噴嘴的間距為 10 μm 至 100 μm，以完成流體的混合。1996 年，Branebjerg 等人<sup>(9)</sup> 和 Schwesinger 等人<sup>(10)</sup> 利用多階段多層次層板式 (multi stage, multi layer lamination) 的微管道，將雷諾數小於 1 的兩種流體連續地重複分割及混合，在每個階段將流體分層，而每層的厚度也減半，以此方式不但可增加流體接觸面積，亦可減少擴散距離，以幫助其混合。1998 年及 1999 年，Koch 等人<sup>(11,12)</sup> 將兩種不同的流體先個別分成數個分支，然後在進入混合區時一起會合。1999 年，Bessoth 等人<sup>(13)</sup> 同樣也將兩種流體各分成 16 個分支，但各分支再兩兩陸續混合，最後結合在一起。1999 年，Ehrfeld 等人<sup>(14)</sup> 使兩種流體個別流進一排正弦波形的分支流道，再一起轉往垂直方向流進混合區進行混合。這些微混合器都是以改變微管道的幾何形狀，以加強混合的效率。當流體的雷諾數介於 1 到 100 間時，還可利用流體的慣性力來幫助其混合，例如利用不同流速之流體間的剪應力或是製造曲折的微管道<sup>(15)</sup>。在一個簡單規則的流場下產生渾沌的粒子軌線，這種現象稱為渾沌移流 (chaotic advection or Lagrangian chaos)；由動態系統理論得知，當一流場為二維暫態或是三維 (暫態或穩態)，渾沌的粒子運動便可發生。渾沌移流的發生通常表示流體界面快速的扭曲和拉長，這將可增加流體的接觸面積及減少擴散距離，而加速混合。但這種效應和紊流產生的效應是不同的，這純粹是由於流場本身時間和空間的特性所造成，而非紊流中流體的高應變率 (strain rate) 所造成的。對部分分子生物而言，紊流產生的剪應力會破壞其基本特性。2000 年，Liu 等人<sup>(16)</sup> 利用一三維的 S 形 (serpentine) 渠道，使雷諾數在 6 至 70 之間的流場產生渾沌移流，觀察其兩種流體的混合效果，並發現混合的機制除了擴散之外還有流體的攪拌；同時比較方形波 (square wave) 流道和直流道的觀測結果，顯示其 S 形流道的優勢。2001 年，Bertsch 等人<sup>(17)</sup> 將現有商品化的混合器縮小化，建立兩種不同幾何形狀的微流道，一種為網格交錯式，另一種為左右螺旋網格式，並強調其壓降 (pressure drop) 較一般被動式混和器小。2002 年，Stroock 等人<sup>(18)</sup> 在微管道上設計交錯式箭尾形狀 (staggered

herringbone) 的幾何形狀凹槽，並以斜線凹槽和平滑管道作比較，顯示其渾沌移流對混合的加強。

由以上的文獻回顧可知，主動式和被動式混和器在針對不同的需求時，各有其應用的範疇。若比較其優缺點時，主動式混和器的優點為對氣泡產生較不敏感、混合的效果可藉由輸入能量調整、控制容易等，缺點則為需要較大的電壓輸入、製程較為複雜、操作較為困難、當流體的黏滯力很大時，效果較有限等。對被動式混和器而言，其優勢為製程較為簡單，而缺點是混合的時間受到流量和流體流量比的嚴重影響、流道中較大的壓降對流體的同質性有影響、對氣泡較為敏感、流道有阻塞的可能等。其中利用渾沌移流的效應來加強流體混合時，還有另一個優點，就是僅需單一管道，可避免太多樣本附著於管壁上；但亦有其缺點，即是結構較為複雜。在越來越多資源投入生物微機電系統的研發製造下，現今趨勢乃為建立一整合性的分析及檢測平台，將數個微元件製造及組裝於一個微小晶片上，所以減少單一元件的製程，將可降低製造的成本。本文將設計出一個被動式的混合器，微混合器為一長方體結構，搭配多個微流道的出入口，由於入口分支較少，可避免大壓降的產生和樣本及試劑的損失。利用計算流體 (CFD) 數值模擬的方式，探討此微混合器中液流的混合特徵、分析操作和設計參數的改變對流體混合效應的影響，並提供微混合器的最佳操作和設計參數。

## 二、理論分析

圖 1 表示微混和器的幾何模型。系統中利用連續方程式 (continuity equation)、Navier-Stokes 方程式和質量傳遞方程式 (mass transfer equation)，配合適當的邊界條件，可以來描述其速度場和濃度場的變化。假設流場為牛頓流體 (Newtonian)、不可壓縮 (incompressible) 及層流 (laminar flow)，則無因次的方程式可表示如下：

$$\nabla U = 0$$

$$U \cdot \nabla U = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla^2 U$$

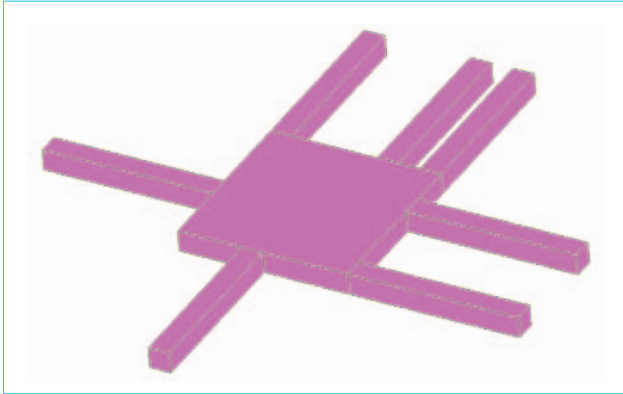


圖 1. 微混和器的幾何模型。

$$U \cdot \nabla Y = \frac{1}{ReSc} \nabla^2 Y$$

其中  $Re = ud/\nu$ ,  $Sc = \nu/D$ ,  $Pe = ReSc$ , 雷諾數  $Re$  表示慣性力和黏滯力的比值,  $Pe$  值為對流質傳和擴散質傳的比值。數值模擬的計算乃藉由商用軟體 CFDRC (Version 2002, CFD Research Corporation, Huntsville, AL) 的 CFD-ACE+™ 模組; 在求解壓力場和速度場時, 則利用 SIMPLEC 法。邊界條件係假設流體在管壁的速度為 0, 出口為一大氣壓力的狀態; 配合不同的入口條件, 可以得到微混合器中的穩態速度場和濃度場的分布。

### 三、結果和討論

在本文中所設計的微混合器如圖 1 所示, 其混

表 1. 水與酒精的物理性質比較。

	酒精	水
Dynamic viscosity: $\mu$ (kg/m·s)	$1.1941 \times 10^{-3}$	$1.0019 \times 10^{-3}$
Density: $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	757	1002
Kinematic viscosity: $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.5773 \times 10^{-6}$	$1.0037 \times 10^{-6}$
Diffusivity: $D$ (m <sup>2</sup> /s)	$1.2 \times 10^{-9}$	

合區為一長方體, 長寬各為  $900 \mu\text{m}$ , 而高度為  $100 \mu\text{m}$ , 入口及出口流道的高度也為  $100 \mu\text{m}$ 。兩種不同流體為水和酒精, 其物理性質的各參數如表 1。

圖 2 為不同的流體入口位置對出口流體混合效應的影響。水和酒精各有一個入口流道, 六種不同流體入口位置以對角線對稱方式排列, 距出口處位置由遠而近, 依序為 1 至 6, 寬度為  $100 \mu\text{m}$ ; 入口流速皆為  $0.5 \text{ m/s}$ , 即流量比為 1:1。當流體的雷諾數極小時, 則靠增加流體接觸面積、減少擴散距離的方式增加混合的效果。在此可看出擴散距離即相當於兩流體入口間的距離, 在入口 1 至入口 6 中, 兩流體的流道入口距離先增加而後減少, 所以混合的效果恰好相反。當入口位置同樣都在混合器周圍的中央位置時, 混合的效果取決於流體入口速度的方向和混合器幾何形狀的搭配; 當流速的方向朝向出口位置時, 幾何形狀的限制有助於減少擴散距離, 而相對於流速的方向相反於出口位置時, 促使大部分流體流向出口的另一端, 使得其混合效果較差。類似的結果可以在圖 3 看到; 圖 3 是考慮水和酒精各有二個入口流道的情況, 其順序則是以交

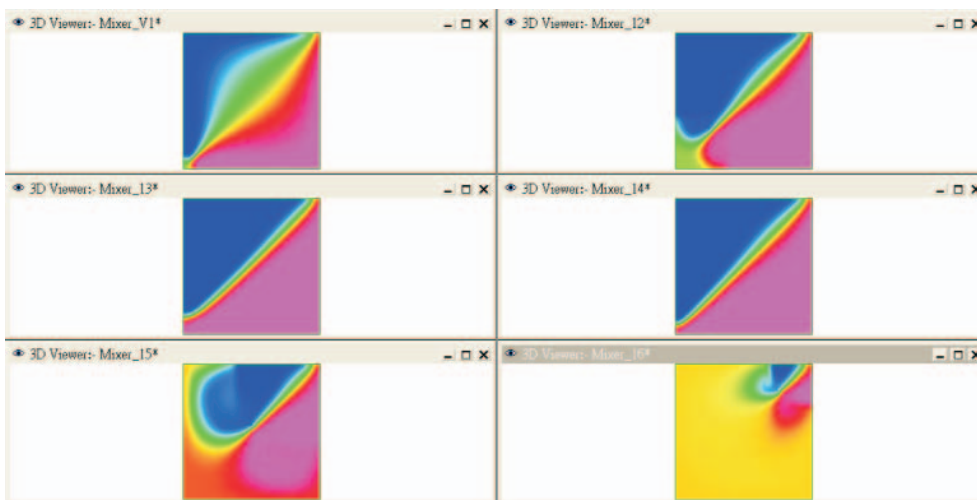


圖 2. 不同的流體入口位置對出口流體混合效應的影響。

圖 3.  
不同的流體入口位置對  
出口流體混合效應的影  
響。

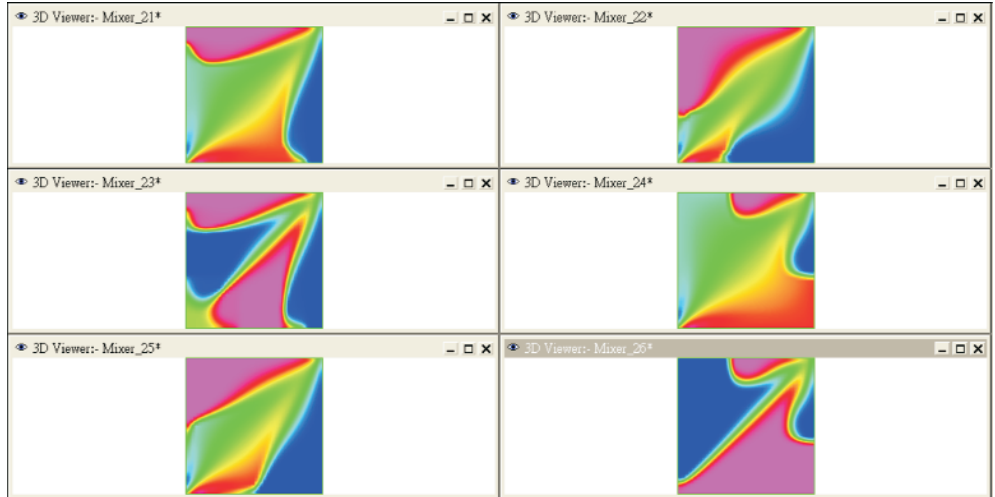
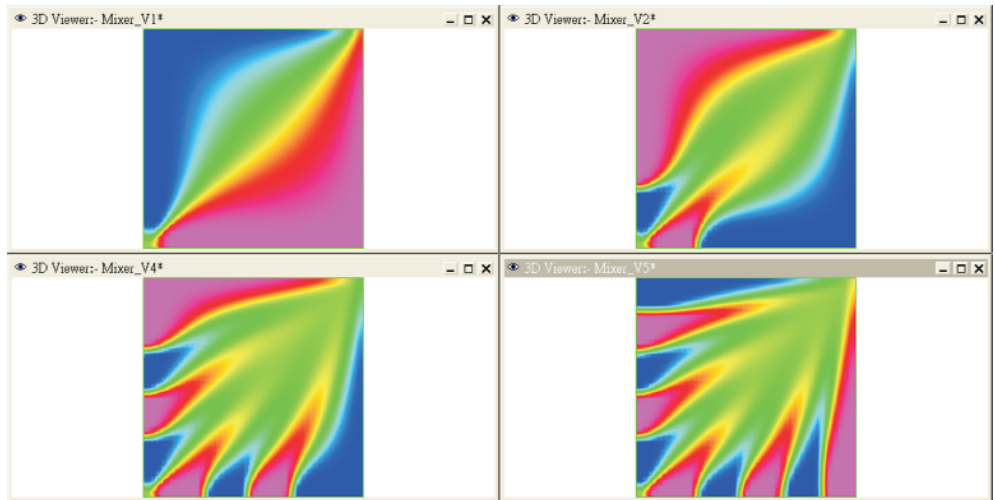


圖 4.  
相同流量下，不同數量  
的入口流道對出口流體  
混合效應的影響。



錯的方式排列。當入口流道相互間隔較近時，擴散距離的減少使得混合的效果提高；而入口流速的方向配合混合器幾何形狀對混合效應的影響，在圖中也同樣可以看到。

圖 4 顯示相同流量下，不同數量的入口流道 (即不同流速) 對出口流體混合效應的影響。由圖中可看出流道數目各為一、二、四及五對，入口流道皆交錯分布在混合器同一側，寬度為  $100\ \mu\text{m}$ ，間隔亦為  $100\ \mu\text{m}$ ，入口流速分別為  $0.5$ 、 $0.25$ 、 $0.125$  和  $0.1\ \text{m/s}$ ，所以流量皆為  $0.3\ \text{mL/min}$ 。隨著入口流道數目的增加，不同流體間的接觸面積也增加，因此出口流道流體混合的效果也隨之加強。混合的結果隨著入口流道數目的增加而迅速加強，然後趨近一定值，也就是說流道數目再繼續增加，對混合

的效果改變不大。

圖 5 表示在相同數目的入口流道下，不同入口流速 (即不同雷諾數) 對出口流體混合結果的影響。在此流道數為一對，寬度為  $100\ \mu\text{m}$ ，入口流速分別為  $1.0$ 、 $0.5$ 、 $0.1$  和  $0.01\ \text{m/s}$ 。由圖中可知，當雷諾數較小時，流體進入混合區後會從入口處向外擴張，使得此兩種流體的擴散距離增加，因而減弱流體的混合效果；反之，當雷諾數較大時，流體進入混合區後會在較短時間內直接接觸，也就是流體間會有較短的擴散距離，因此其混合效果較佳。圖 6 表示在相同情況下，流道入口與出口的壓力差，在此出口壓力為一大氣壓。此壓力差也是所謂的「壓降」(pressure drop)，表示外在幫浦所提供的流體驅動力。壓降越大則幫浦需要越大的輸入能

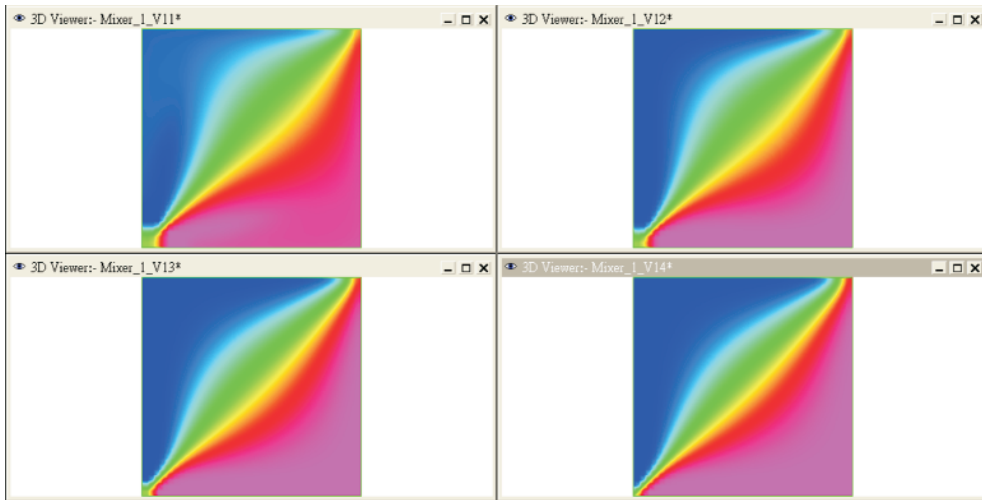


圖 5.  
在相同數目的入口流道下，不同入口流速對出口流體混合結果的影響。

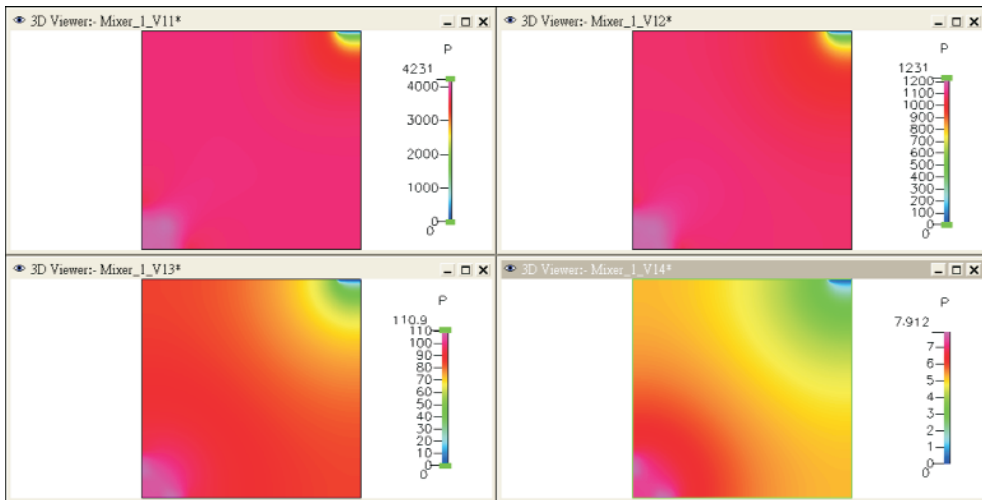


圖 6.  
在相同數目的入口流道下，流道入口與出口的壓力差。

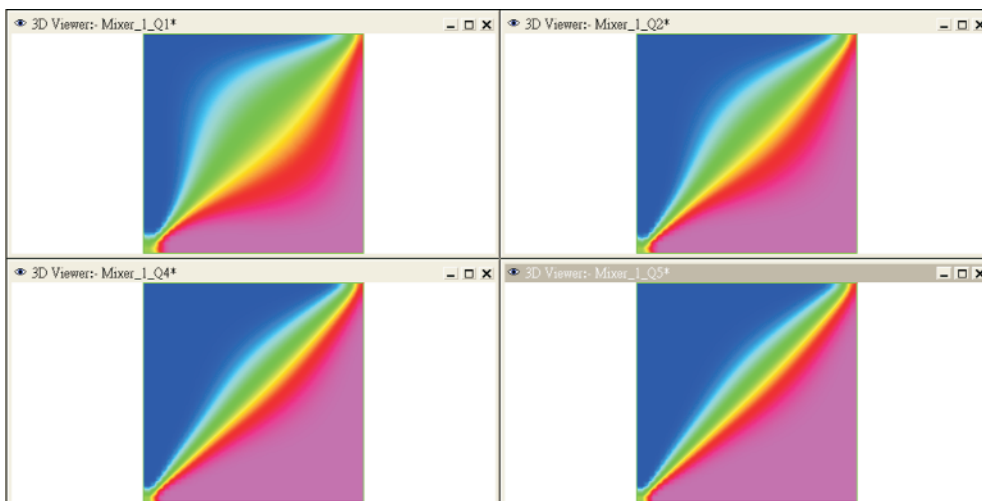


圖 7.  
在相同的入口流量下，不同入口流速對出口流體混合結果的影響。

量，而在實驗室的量測中，壓降越大也表示管路漏水的機率越大。當雷諾數較大時，其壓降越大，因此要獲得較佳的混合效果時，必須考慮到壓降大的負面影響。圖 7 顯示在相同的入口流量下，不同入口流速 (亦即不同寬度的流道) 對出口流體混合結果的影響。在此，流道數為一對，流量皆為 0.3 mL/min，入口流速分別為 0.5、0.25、0.125 和 0.1 m/s。當入口速度較大時，流體同樣會有較短的擴散距離，這使得其出口流體混合效果較好。圖 8 表示在相同情況下，流道入口與出口的壓力差，由此圖可看出四種不同流速的混合器中壓降幾乎一樣 (1159.42 – 1231.14 N/m<sup>2</sup>)。這結果和一般層流理論

的結果相符合，也就是當流體為層流時，流道中的壓降與流量成正比。

圖 9 為不同出口流道寬度對出口流體混合效應的影響。在此流道數為一對，寬度為 100 μm，入口流速為 0.5 m/s，出口流道的寬度分別為 100、200、300 和 400 μm。當出口流道寬度較大時，促使流入混合區中較多部分的流體有直接流向出口的趨勢，使得兩種流體的擴散距離較為增加；而當出口流道寬度較小時，流體間的擴散長度會在出口處附近縮減，所以圖中顯示出口流道寬度越小，流體混合的效果越佳。關於壓降的部分，類似的情況在此例中亦可得到，即出口流道寬度越小，其壓降越大。

圖 8.  
在相同的入口流量下，  
流道入口與出口的壓力差。

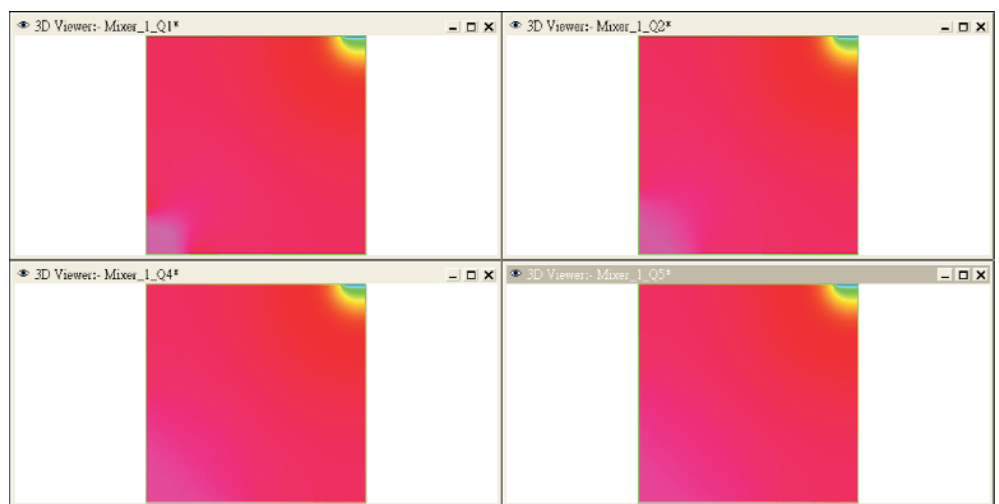
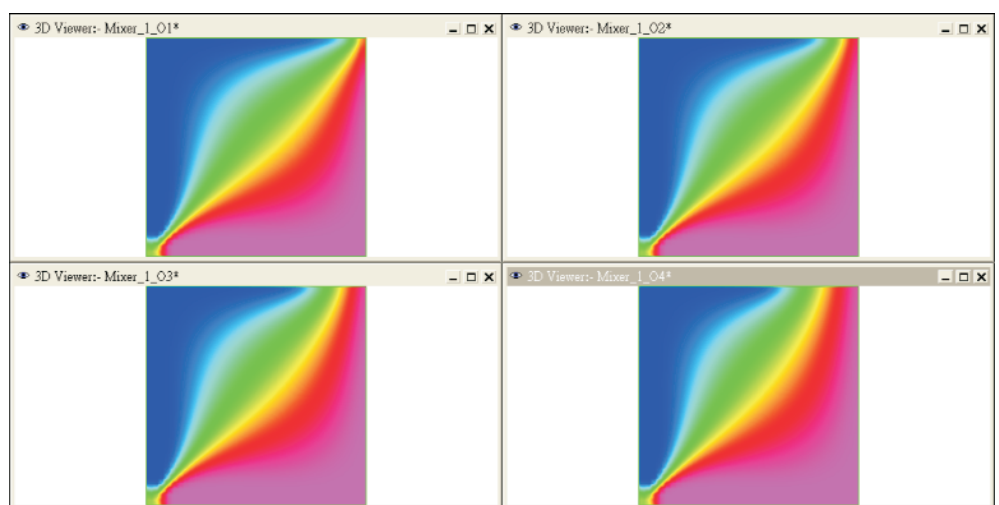


圖 9.  
不同出口流道寬度對出  
口流體混合效應的影  
響。



由文獻可知，增強混合器中的混合效果是利用減少擴散距離和增加接觸面積兩種方式，而考慮實際的使用時，較低的壓降則是可減少外加能量的輸入。由以上模擬結果可知，流道入口的相對位置較短、流道數目較多、流體的雷諾數較大及出口的寬度較窄時，可增加流體混合的效應。但在此條件下須選擇適當的設計，以避免較大的壓降，則為最佳化設計的目的。圖 10 顯示利用三對入口流道所組成的混合器，由圖中可看出在此混合器的出口處，兩流體幾乎完全混合。入口流道寬度皆為  $100\ \mu\text{m}$ ，入口位置分別在混合器周圍的中央位置及邊緣，兩種流體則交錯注入混合器中，入口流速 (以距出口流道的位置遠至近排列) 分別為  $0.5$ 、 $0.5$  和  $0.2\ \text{m/s}$ ，出口流道的寬度為  $100\ \mu\text{m}$ 。利用三對入口流道，乃在於增加流體間的接觸面積，配合流道寬度的選擇，則可避免較大的壓降。為減少流體的擴散距離，流道間的相對距離幾乎相近。最靠近出口的入口流速則利用較低的  $0.2\ \text{m/s}$ ，在此較大的流速可迫使流體較為集中於對角線區域，可減少流體的擴散距離，但也使得距出口流道較近的部分液體較難與另一種液體混合。利用此流道具有較低流速的情況，讓流體有充分時間混合，並配合混合器的幾何形狀，可提高混合效果，同時較低流速的流體可降低混合器出入口的壓降。因此根據之前的參數分析結果，可獲得此最佳設計的混合器。

#### 四、結論

本文設計一長方體結構，搭配多個微流道出入口的被動式微混合器，文中以數值模擬方法探討此微混合器的混合特徵，而分析不同幾何參數和流體特徵對水和酒精混合效果的影響。結果顯示，流道入口的相對位置較近、流道數目較多、流體的雷諾數較大及出口寬度的較窄時，可增加流體混合的效應；而流道入口在微混合器的幾何位置，也對流體的混合有極大的影響。當考慮到出入口的壓降時，文中選擇出最適當的設計參數，以提供此被動式微混合器的最佳操作條件。在此利用三對入口流道所組成的混合器，配合不同的入口流速，可看出在此混合器的出口處，兩流體幾乎完全混合。減少單一

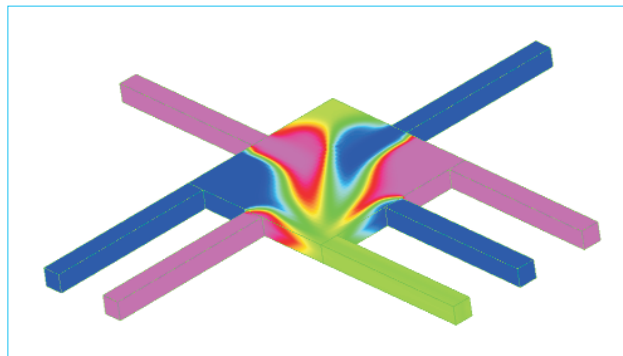


圖 10. 利用三對入口流道所組成的混合器。

元件的製程及降低製造的成本，乃是現今微機電系統發展的趨勢。文中所設計的微混合器，採用製程簡單的被動式微混合器，以較少入口分支來避免大壓降的產生和樣本及試劑的損失，將可提供實際應用上的最佳化設計概念。

#### 參考文獻

1. E. L. Cussler, *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems*, New York: Cambridge University Press (1984).
2. R. M. Moroney, R. M. White, and R. T. Howe, *IEEE Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '91, Proceedings*, 277, Nara, Japan (1991).
3. X. Zhu and E. S. Kim, *Sensors and Actuators, A. Phys.*, **66** (1-3), 355 (1998).
4. Z. Yang, H. Goto, M. Matsumoto, and R. Maeda, *The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000*, 80, Miyazaki, Japan (Jan. 2000).
5. V. Vivek, Y. Zeng, and E. S. Kim, *The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2000*, 668, Miyazaki, Japan (Jan. 2000).
6. J. H. Tsai and L. Lin, *Sensors and Actuators A*, **97-98**, 665 (2002).
7. L. H. Lu, K. S. Ryu, and C. Liu, *J. Microelectromech. Syst.*, **11** (5), 462 (2002).
8. R. Miyake, T. S. J. Lammerink, M. Elwenspoek, and J. H. J. Fluitman, *IEEE Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '93, Proceedings 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems'*, 248 (1993).
9. J. Branebjerg, P. Gravesen, J. P. Krog, and C. R. Nielsen, *IEEE The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '96, Proceedings 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems'*, 441, San Diego, CA (1996).
10. N. Schwesinger, T. Frank, and H. Wurmus, *J. Micromech. Microeng.*, **6**, 99 (1996).



11. M. Koch, D. Chatelain, A. G. R. Evans, and A. Brunnschweiler, *J. Micromech. Microeng.*, **8**, 123 (1998).
  12. M. Koch, H. Witt, A. G. R. Evans, and A. Brunnschweiler, *J. Micromech. Microeng.*, **9**, 156 (1999).
  13. F. G. Bessoth, A. J. deMello, and A. Manz, *Anal. Commun.*, **36**, 213 (1999).
  14. W. Ehrfeld, K. Golbig, V. Hessel, H. Lowe, and T. Richter, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**, 1075 (1999).
  15. S. W. Jones, O. M. Thomas, and H. Aref, *J. Fluid Mech.*, **209**, 335 (1989).
  16. R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, and D. J. Beebe, *J. Microelectromech. Syst.*, **9**, 190 (2000).
  17. A. Bertsch, S. Heimgartner, P. Cousseau, and P. Renaud, *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001*, 507, Interlaken, Switzerland, (Jan. 2001).
  18. A. D. Stroock, S. K. W. Dertinger, A. Ajdari, I. Mezic, H. A. Stone, and G. M. Whitesides, *Science*, **295**, 647 (2002).
- 

陳志堅先生為國立交通大學機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。

Jyh-Jian Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council.