

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

微流道中粒子操控技術研究及其二相懸浮流流場分析

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-002-042-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 10 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：沈弘俊

計畫參與人員：許家睿，黃志宇，朱信彰

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 2 月 17 日

微流道中粒子操控技術研究及其二相懸浮流流場分析

Study of Two-Phase Suspension Flow and Particle Manipulating technique in Micro-fluidics

計劃編號：NSC 93-2212-E-002-042-

執行期限：93/08/01 ~ 94/10/3

執行機關：國立台灣大學應用力學研究所

主持人：沈弘俊

計畫參與人員：許家睿、李青俊、劉振邦、黃志宇、朱信彰

摘要

本計畫目的主要建立一套微粒子影像測速(Micro-PIV)系統，用於量測微流場之速度與特性，實驗利用了簡易的微影製程製作微流道，並以去離子水加入 $1\mu\text{m}$ 直徑之螢光微粒子作為觀察的對象，實驗條件的雷諾數均屬於層流範圍，實驗中以直流道驗證微粒子影像測速儀之準確性，觀察不同流速下的速度剖面。此外，也改變直流道的深寬比觀察其對於流場之影響，並以理論計算進行比較。從實驗結果顯示：在高深寬比的條件下，實驗觀察的流場呈現所謂的Hele-Shaw流，即速度沿剖面呈現均勻分布的特性，而當深寬比縮小時，速度分布則與傳統管流的內流場接近，這些結果也在數值計算上獲得了驗證。最後實驗也針對具有不同彎角角度之微流道進行流場的量測，可發現在彎角附近流場具有相當大的速度差異，內側流道具有較高的流速，而外側的流速的明顯偏低，隨著彎角角度的增加，外側因為低流速所形成的停滯區域也愈來愈明顯，此也證明本計畫所建立之micro-PIV系統可以觀察量測不同微流道下的流場特性，對於未來微流場的研究具有相當的重要性。

關鍵詞：微粒子影像測速儀(Micro-PIV)、微流場、Hele-Shaw流

一、前言

隨著光電、半導體等高科技產業的快速發展，微小化已成為顯著的趨勢，特別是在微機電系統及分子生物領域的快速發展，使得在微米尺度空間中的流體傳輸顯得特別重要。許多微流元件：如微混合器、微幫浦、微分離器等，都是現階段對於微流體應用的研究重點，為了能得到最佳的設計與效能，必須更進一步得到微流場的特性，然而實際流場量測往往受到限制而無法獲得，因此量測技術成為目前研究發展的關鍵，本計畫利用非介入式的微粒子影像測速儀進行微流場的量測，希望於未來藉由這套量測系統獲得更多的微流場資訊。

非介入式的微流場量測可分為單點量測與整體的流場量測，在單點測量方面，主要利用傳統的雷射都卜勒測速儀(Laser Doppler

Velocimetry，簡稱 LDV)搭配高具焦性之光學鏡片[1]，可使兩道雷射交會的空間體積縮小，因此可增加空間上的解析度，然而這種單點量測的方式在流場的測量上有其不便性。而微粒子影像測速儀(Micro Particle Image Velocimetry，簡稱 Micro-PIV)則為二維平面的流場量測，可一次獲得即时的速度分布資訊，因此成為許多團隊發展的重要量測技術。這套系統主要由 Santiago 等人[2]利用了顯微光學系統搭配傳統粒子影像測速儀原理建立而成，因此在使用上所考量的差異也與傳統 PIV 不同。

Micro-PIV 與 PIV 的差異主要是因為加入了顯微光學系統及其流場的特性，因此在 PIV 中較不受到影響的因素必須在 Micro PIV 中被考慮，在此列舉幾點如下：

(1). 繞射極限的克服: 由於要解析的流場是發生在微流道中, 因此所需使用的粒子也隨之縮小, 然而當粒子的直徑接近入射光的波長時, 繞射現象的發生將使得流場中的粒子無法反射光線, 目前多數的研究改採用具有螢光性質的微粒子, 在吸收雷射光後以非彈性散射的方式散射出不同波長的光線, 根據 Santiago 等人[3]的實驗, 可將置入的粒子直徑縮小至 300nm。

(2). 布朗運動(Brownian Motion)的影響: 微小的粒子在液體中, 因為受到溫度與粒子間不平衡的作用力影響, 產生不規則的隨機運動, 因此布朗運動在流場量測的過程中, 可能會導致速度的誤差, 這項誤差的評估主要根據布朗運動的速度與流場的速度進行比較, 在二維平面上的 X 與 Y 方向, 其誤差估計如下所示:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{\Delta x} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{\Delta y} = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (2)$$

其中 Δx 、 Δy 為在 Δt 的時間內粒子在流場內的位移, σ_x 、 σ_y 則為布朗運動所造成的位移。

(3). 相關深度(depth of correlation)的定義: 過去傳統 PIV 的光葉厚度決定了所觀測流場的厚度, 在 Micro PIV 中, 取而代之的是光學鏡的景深值(depth of field), 所謂景深的廣泛定義是被觀測物體在聚焦平面上上下移動一段距離, 其成像仍能維持清晰, 這樣的距離稱之為景深。對於 Micro PIV 量測系統而言, 整體系統對於景深所造成的影響也必須被考慮, Meinhart 等人[4]根據相關光學原理提出了相關深度的計算, 以顯微物鏡光軸上的光強度與焦平面的光強度進行比較, 在焦平面沿物鏡光軸的上下方各可以找到一點, 其光強度只有焦點光強度的十分之一, 此兩點間的距離即為相關深度, 其公式如下所示:

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda_0}{NA^2} + \frac{2.16d_p}{\tan \theta} + d_p \quad (3)$$

其中 n 為介質折射率, λ_0 為雷射波長, NA 為顯微物鏡的數值孔徑(numerical aperture), d_p

為置入的螢光粒子直徑, 而 θ 則為折射的角度, 顯然當減少粒子尺寸、縮短雷射的波長、及增加數值孔徑都可以縮短相關深度, 以增加在軸向的空間解析度。

微粒子影像測速一可以被廣泛的應用於不同情況下的微流場量測, Kim 等人[5]利用了 μ -PIV 對於不同比例下的甘油在 Y 型流道的微混合器中之混合流場進行研究, 可以發現由於不同濃度所造成的速度梯度發生在交會的介面處。另外, 這樣的量測系統也可以應用於生醫流體的量測, Okuda[6]與 Park 等人[7]利用了 Micro-PIV 系統對於人體血液的非牛頓流體特性進行研究, 可發現血液的速度剖面具有非牛頓流體之特性。Stone 等人[8]則利用了高倍率的物鏡進行微粒子影像速度量測, 並搭配數值方法對於接近微流道邊界的區域進行測量。這些應用都證明 Micor-PIV 系統在微流場的量測具有相當的實用性與重要性。

二、內容

2-1 實驗設備架構

本計畫所利用之實驗設備主要是傳統 PIV 系統搭配金相顯微鏡所建置成的 Micro PIV 量測系統, 所使用的微流道則利用簡易的微影製程自行製作, 並可重複使用。

2-1-1 Micro PIV 量測系統

Micro PIV 量測系統可視為顯微光學加上傳統 PIV 的結合, 本計畫使用之雷射光源為 Spectran Physic 公司所提供的雙管 Nd-YAG 雷射, 其波長為 532nm, 當微流場中的螢光粒子受到雷射的激發時, 便會散射出 612nm 的紅色螢光, 螢光透過物鏡及 Olympus 的金相顯微鏡中的濾片後, 由顯微鏡頂端所銜接的 CCD 所接收, 實驗中所使用的物鏡的放大倍率為 10X、20X 及 50X, 其中 20X 與 50X 分別為 Olympus 與 Mitstoyu 公司所製造的物鏡, 10X 物鏡則為一般高解析度之物鏡。

整套系統主要由 TSI 公司所發展的 Insight 3.0 軟體透過訊號同步器進行控制, 訊號同步器可以控制兩發雷射的時間間隔與 CCD 擷取影像的時機。所擷取的影像透過 Insight 3.0 軟

體進行交錯相關的運算，在分析的流場範圍內可根據所需要的解析度選擇適合的適合大小的分割視窗進行運算分析，所得到的結果可以即時以速度向量表示，或儲存成相關的資料檔案以供 Tecplot 等軟體進行向量的繪圖分析，其內容提供 X、Y 方向的速度向量、渦度 (Vorticity)、及速度的變化量等相關流場資訊。

2-1-2 微流道製作與流體傳輸

多數研究使用的微流道可概分為利用矽晶圓進行蝕刻、微型加工、或利用簡易的微影製程獲得，本計畫使用的微流道主要使用 SU-8 厚光阻於矽晶圓上先製作出流道的模，並以調製成的 PDMS 聚合物 (聚二甲基矽氧烷，全名 Polydimethyl siloxane) 淋至光阻母模上，當 PDMS 固化後即形成觀測所需的流道，完成之 PDMS 流道於鑽孔後與 100 μm 厚之蓋玻片送入氧氣電漿反應器中進行表面活化，並於活化後將流道與蓋玻片進行結合，在外部接上軟管後即可將流體注入流道內。實驗中使用的流道包含直流道與具有不同彎角的流道，直流道寬度分別為 100 μm 與 300 μm ，具彎角的流道寬度則為 500 μm ，深度均為 30 μm ，其製作流程如圖一所示。

本計畫之流體選用去離子水(depleted ion water)，並在流體中加入適當濃度的微螢光粒子，其直徑為 1 μm 。流體驅動的來源主要利用微注射幫浦(Syringe pump)推動不同直徑的針筒，也因此可根據流道的幾何尺寸或所需之流速進行推進速率的設定，然而過快的推進速率可能會使得 PDMS 微流道產生些微的形變，導致流體的實際速率與理論值產生誤差。整體之實驗設備架構示意圖則如圖二所示。

2-2 微流道之流場速度分布理論計算

為能夠驗證 Micro PIV 系統能夠有效量測流場中的速度分布，因此將利用相關的理論計算進行比對。Gondret 等人[9]以有限深寬比及黏滯流的條件下，根據管流的理論分析搭配限制的條件，推導出適用於計算矩形流道內流場的 Hele-Shaw Flow 方程式，因此可以撰寫其程式以獲得不同深度下的流速剖面，其公式如下所示：

$$u(y, z) = \frac{Ge^2}{8\mu} \left\{ 1 - \left(\frac{2y}{e} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{32}{(2n-1)^3 \pi^3} \times \frac{\cosh(2n-1)\pi(z/e)}{\cosh(2n-1)\pi/2(h/e)} \cos \left((2n-1)\pi \frac{y}{e} \right) \right\} \quad (4)$$

其中 $u(y, z)$ 表示在不同位置的速度值， e 與 h 分別表示流道的寬度與深度， G 為壓力梯度沿流線方向的分布， μ 則為黏滯係數。

2-3 實驗結果

實驗中設計了三組不同的流量進行量測，表一列出了三個不同流量下，微管道內的平均流速與雷諾數作為參考，可發現所有的操作條件均在層流的狀態下，所觀察的區域則選擇在流道的中間段，該區流場已經成為完全發展流，因此適合量測後進行比較。本實驗在長度的校正方面主要利用精細度 1 μm 的微尺度測量尺在顯微鏡的視野下進行觀察，實際驗證其放大的倍率值，表二紀錄了本實驗使用的三組物鏡的標示倍率與實際放大倍率，可發現 10X 物鏡的實際放大倍率較大，20X 物鏡則較接近標示值，50X 物鏡的實際放大倍率較小。表二也提供了不同鏡頭的景深值，可以發現在理論計算與實際測量的結果都是以 50X 的鏡頭景深最淺，10X 則最深。

以 20X 物鏡針對不同的流率在 300 μm 的流道內進行流速測量，當物鏡的焦平面位於流道深度的中心時，可以得到最大的流速剖面，圖三顯示了在三種不同的流率 0.17 ml/hr、0.33 ml/hr、0.66 ml/hr 下的流道深度中心流速剖面，每組實驗均取 150 對的影像計算後的平均值，實驗結果發現大致符合數值計算的結果，流速在中間呈現均勻的分布，而靠近流道邊界的地帶，受到流道邊界表面粗糙度的影響，所量測的流速與計算結果則有明顯的差異，而流率較低的情況下，所得到的速度剖面也較計算的結果低。

圖四則分別對於不同流率之條件，量測位在流道不同深度的速度剖面分布，其深度包含流道中心及其下方 8 μm 及 14 μm 之位置，可發現在中心或下方 8 μm 所量測到的流速均小於或近似於計算結果，然而於下方 14 μm 之位置即接近流道底部，然而受到物鏡景深與表面粗

糙度的影響，導致實驗進行相關性計算時產生誤差，因此量測到的速度遠比計算值低。

圖五則針對不同尺寸的分析視窗所得到的速度剖面進行比較，可發現在分析視窗為 32X32、64X64 與 128X128 時，所得到之速度剖面與計算結果較為接近，而較小之分析視窗如 16X16 之分析區域大小，所得到之結果雖然其趨勢與計算結果吻合，但速度卻偏低，主要原因可能是因為當縮小分析視窗時，視窗內之粒子於兩張影像擷取時間內所移動距離已大於分析視窗邊長的一半，即沒有達到 Nyquist 的考量，因此進行相關運算時容易產生錯誤的速度向量。然而較小的視窗可以增加微流場量測的空間解析度，為了能夠在小分析視窗的情況下獲得正確的速度向量，可藉由改善影像的品質或利用不同的相關運算方式。

圖六則利用不同深寬比之流道觀察不同深寬比對於流場的影響，並利用模擬進行比對，實驗所使用之流道寬度分別為 100 μm 及 300 μm ，深度均為 30 μm ，實驗結果發現 Hele-Shaw 流場在低深寬比的微流道中逐漸變得不明顯，較接近傳統管流內流場的拋物線特性，利用式(4)所模擬得到的結果也與實驗結果相符合，此也驗證了 Hele-Shaw 流場只存在於高深寬比的流道中。

本計畫也利用 Micro PIV 的量測技術對於具有彎角之微流道進行量測，流道的寬度為 500 μm ，深度為 30 μm ，其彎角分別為 30°、60° 與 90°。圖七則對三種不同彎角之微流道在流率 0.56ml/hr 的條件下進行流場的量測，可發現其速度的分部都在內側的彎角處出現較大的流速分布，而靠近外側流道的流場速度則明顯發現變慢，當彎角為 90°時，可以明顯發現彎角的外側為一停滯區，幾乎沒有流速，證明 Micro-PIV 在流場量測上的準確性。

50X 物鏡在本實驗中並沒有實際的運用於量測，主要原因是因為高倍率物鏡需要較強的光源進行照明，因此在目前缺乏同軸光源系統的情況下，所拍攝到的影像品質不佳，無法應用於速度向量的分析，未來將考慮使用同軸光源以獲得較佳的影像品質，高倍率物鏡也可被

用於量測更細微的流場，以獲得更精確的流場特性。

三、結論

綜合本實驗之成果，本研究所完成之工作與結果可歸納入下列幾點：

1. 建立可以量測微流場之微粒子測速儀 (Micro-PIV) 系統，並實際針對不同型態之微流場進行量流場流速的測量。
2. 針對不同深寬比的流道進行流場量測，發現高深寬比之流場為 Hele-Shaw flow 之流場，即流速沿剖面方向之分布接近定值，而當深寬比減少時，流速之分布則接近拋物線分布，與傳統之管流內流場接近，此結果在實驗上與數值計算上皆有相同的結果。
3. 針對直的微流道在不同流量下進行流場的速度量測，並搭配數值計算的結果進行比較，發現本系統在微流道中心的速度分布與計算之結果極為接近，然而在非中心所量測的速度剖面卻因為受到景深、微流道壁面粗糙度及三維移動平台移動過程所造成的誤差，導致實驗所得到之結果與計算值具有相當之差異。此外，由實驗結果得之，要在良好的影像下才能獲得較佳的空間解析度，否則所計算的速度向量會因為不同分析視窗下訊噪比的差異而不同，因此可能獲得錯誤的速度向量分布。
4. 本量測系統被用於量測不同彎角下的流場速度分布，其結果可發現速度分布由彎角的內側至外側呈現明顯的減少，彎角的角度愈大，則可於彎角處的外側獲得愈大的停滯區間，符合該流場之特性，未來更可以廣泛應用於不同微流場的量測。

四、致謝

本計畫承國科會經費補助(計劃編號: NSC 93-2212-E-002-042)，謹此致謝。

五、參考文獻

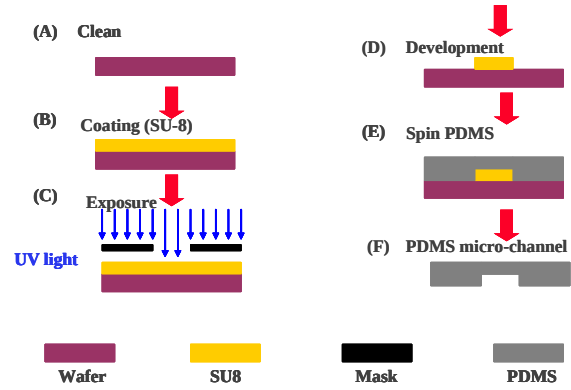
- [1] Compton, D.A., and Eaton, J.K., "A high-resolution laser Doppler anemometer for three-dimensional turbulent boundary

layers”, Exp. Fluids, Vol.22, pp. 111-117, 1996.

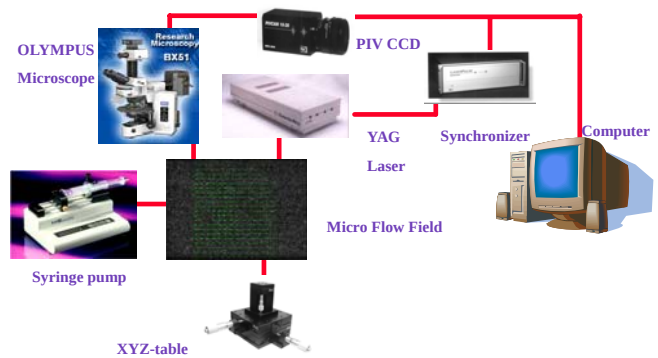
- [2] Santiago, J.G., Wereley, S.T., Meinhart, C.D., Beebe, D.J., Adrian, R.J., “A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics,” Exp. Fluids, Vol.25, pp. 316-319, 1998.
- [3] Meinhart, C.D., Wereley, S.T., and Santiago, J.G., “PIV Measurements of a Microchannel Flow,” Exp. Fluid, Vol.27, pp. 414-419, 1999.
- [4] Meinhart, C.D., Wereley, S.T., and Santiago, J.G., “Volume illumination for two-dimension particle image velocimetry”, Meas. Sci. Technol., Vol. 11, pp. 809-814, 2000.
- [5] Kim, B.J., Liu, Y.Z., and Sung, H.J., “Micro PIV Measurement of Two-fluid Flow with Different Refractive Indices,” Meas. Sci. Technol., Vol. 15, 2004, pp.1097-1103.
- [6] Okuda, R., Sugii, Y., and Okamoto, K., “Velocity-field Measurement of in Vitro Blood Flow Using Micro PIV Technique,” 5th Internal Symposium on Particle Image Velocimetry, 2003, paper 3315.
- [7] Park, C.W., and Lee, S.J., “Micro-PIV Measurements of Blood Flow in a Micro-channel,” 5th Internal Symposium on Particle Image Velocimetry, 2003, paper 3314.
- [8] Stone, S.W., Meinhart, C.D., and Wereley, S.T., “A Microfluidic-Based Nanoscope,” Exp. Fluids, 2002, Vol. 33, pp. 613-619.
- [9] Gondret, P., Rakotomalala, N., Rabaud, M., Salin, D., and Watzky, P., “Viscous parallel flows in finite aspect ratio Hele-Shaw cell: Analytical and numerical results”, Phys. Fluids, Vol. 9, pp. 1841-1843, 1997.

表 2 實驗使用之物鏡相關參數

物鏡倍率	實際放大倍率	NA 值	景深值 理論/實驗 (μm)
10X	11.5X	0.12	34.9 / 40
20X	20X	0.35	19.8 / 20
50X	45X	0.55	9.6 / 7



圖一、PDMS 流道製作流程圖

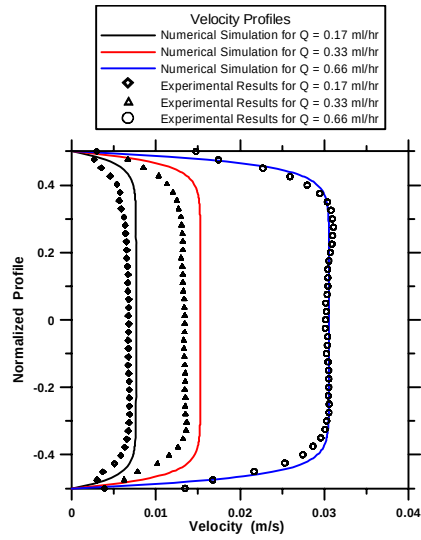


圖二、實驗架構示意圖

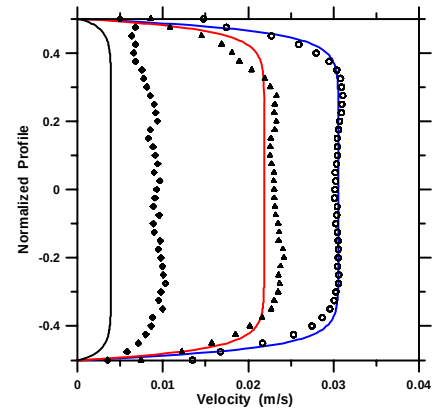
六、圖表彙整

表 1 不同流率於寬 300 μm 、深 30 μm 之平均流速與雷諾數

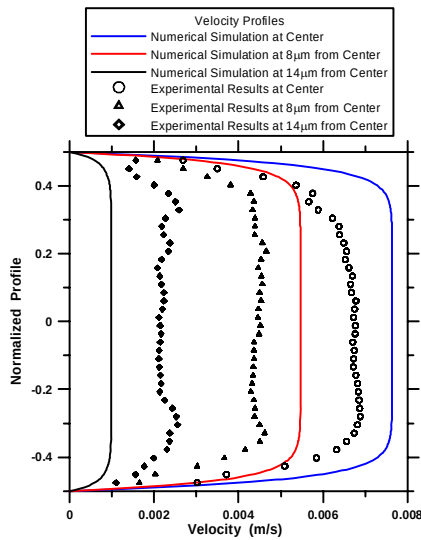
流率(ml/hr)	平均流速(m/s)	雷諾數
0.17	5.62×10^{-3}	0.2859
0.33	1.09×10^{-2}	0.5551
0.66	2.18×10^{-2}	1.1101



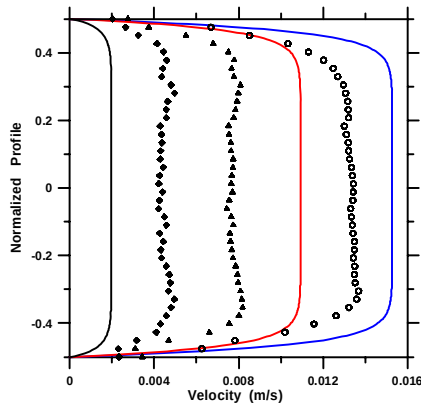
圖三、不同流率下流速剖面之實驗與計算之比較



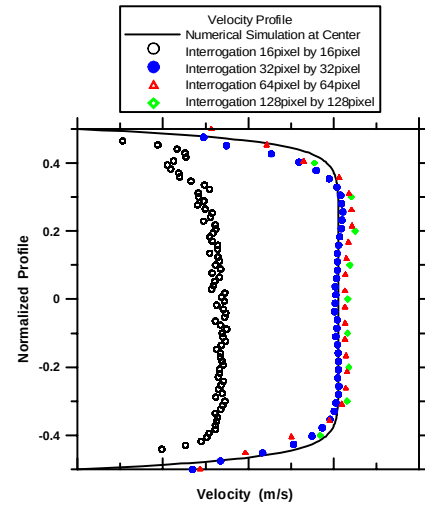
(c) 流率 66ml/hr
圖四、不同流率下，於不同流道深度所測量之流速剖面



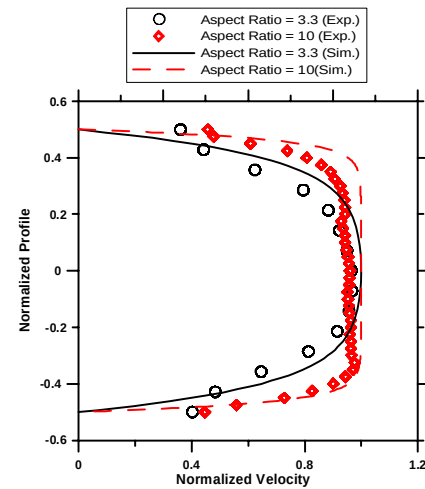
(a) 流率 17ml/hr



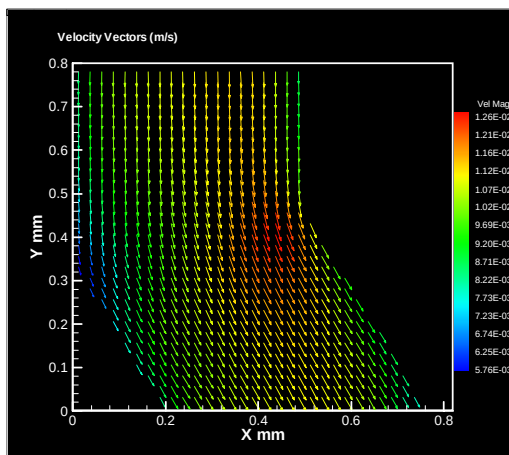
(b) 流率 33ml/hr



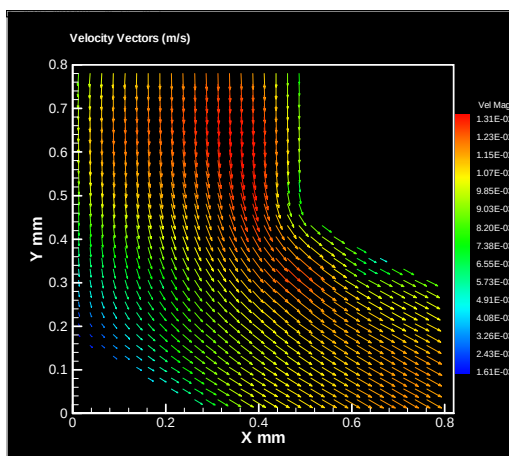
圖五、不同分析視窗下所測量之流速剖面



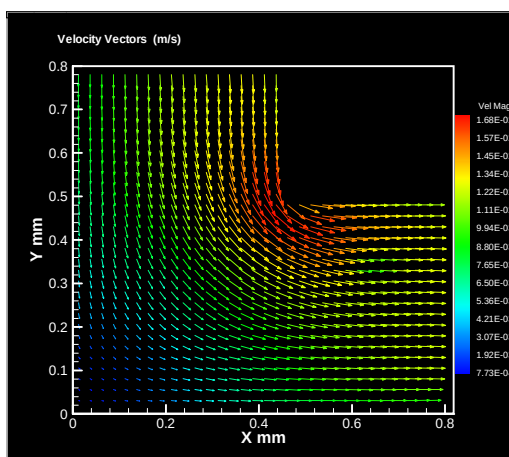
圖六、不同深寬比微流道內之流場分布



(A) 彎角 30°



(B) 彎角 60°



(C) 彎角 90°

圖七、不同彎角下所量測之流場速度分布

國科會國外研討會心得報告

計畫名稱：微流道中粒子操控技術及其在二相懸浮流流場分析

計畫編號：NSC 93-2212-E-002-042

撰寫人： 李青峻

服務單位名稱：國立台灣大學應用力學研究所

出國地點：捷克布拉格(Prague)

出國日期：2005/08/28~2005/09/02

一、會議簡介

本次會議是在捷克布拉格舉辦的 ISTP-16 (The Sixteenth International Symposium on Transport Phenomena) 國際研討會。本次會議的時間為 2005 年 8 月 29 日至 9 月 1 日，內容包含十四個大主題，分別如下：

TFI Turbulence and Flow Instabilities
HMT Heat and Mass Transfer
BLF Boundary Layer and Free Shear Flows
ECG Experimental and Computational Fluid Dynamics - Gassis
ECL Experimental and Computational Fluid Dynamics - Liquids
TPF Two Phase Flow
CPS Chemical Process Systems
ENS Environmental Systems
FDM Fluid Dynamics in Micro-systems
RCB Rheologically Complex Systems and Biofluid Dynamics
CRF Combustion and Reacting Flows
HEX Heat Exchangers
EEC Electronic Equipment Cooling
IAW Industrial Aerodynamics and Wind Engineering

本次會議提供了一個相當好的知識交流平台，提供與會的研究者交換最新的研究成果，並討論傳輸現象在未來的研究方向與趨勢。整體而言，傳輸現象的範疇包括了流體、熱與質量、電流與電子、中子以及粒子移動等，本次會議的主題涵蓋的範圍相當廣泛，包含了紊流與流體穩定性、熱傳與質傳、邊界層與自由剪力流、氣體與液體的實驗與電腦模擬、二相流流場、化學反應系統、環境系統、微系統下的流體動力學、複合系統與生醫流體動力學、燃燒與反應系統、熱交換、電子環境冷卻、航空動力學、風力工程等。從基本原理的探討、實驗技術、計算模擬到實際的應用裝置等等，參與的學者橫跨物理、化學、生醫、熱傳、流力、結構等領域的大師，大家齊聚一堂共同討論傳輸現象在各種不同領域的最新研究成果與應用。

本次會議的投稿論文為301篇，總共錄取的篇數為180篇，約為60%。總共的作者人數為457

人，分佈在三十個不同的國家，被錄取的文章中，數量最多的是日本，共有180人84篇，台灣是第二有91人共38篇。在大會中口頭發表131篇，海報發表為49篇。比較少見的是，在本次會議中，並沒有來自於美國的文章，而其他像是德國與法國的文章加起來也才8篇，不到3%。與其他與會人員討論的結果，認為主要的原因可能是與本次會議的地點有關，因為美國本身就有許多大型的國際研討會，而且開會時間也太接近開學，加上在東歐開會，地理位置偏遠，種種因素造成美國學者此次會議的參與意願不足。

此行最大的收穫為獲得先進國家在傳輸現象相關研究上最新的發展趨勢，對於今後研究計畫的執行與未來研究方向的規劃將有莫大的助益，本次會議由於主題眾多，因此分為四天舉行，這在一般國際會議中是較為少見的，因為通常的會議時間多為三天，但也因為大會將時間拉長，使得同時之間只有三個不同主題的研究在進行報告，對於想多方面了解各國在不同領域研究現況的我，反而是一項有利的安排，雖然還是有一些想了解的主題，還是會因為時間的重疊而無法參與，幸而可就大會所整理的論文集而加以了解。以下就本次會議中一些精彩的演講做一些心得摘要：

二、會議參與心得內容

1.邀請演講(plenary lecture)部份

本次大會在前三天的早上均有安排邀請演講，講題與講員分別如下：

(1) August 29th

“An Outlook on Cryobioengineering with a Primary Focus on Cryopreservation”,
Ichiro Tanasawa, College of Engineering, Nihon University, Japan

(2) August 30th

“NANO-TO-MACROSCALE MODELING OF PHOTONICS THERMAL TRANSPORT”,
Yildiz Bayazitoglu, H.S. Cameron Chair Professor, Mechanical Engineering & Materials, Science Department, Rice University, U.S.A.

由於第二天的演講者身體出了一些狀況，所以由介紹人W. J. Wang代為發表。

(3) August 31

“TRANSPORT PHENOMENA AND NON-NEWTONIAN FLUID MECHANICS IN

MECHANICAL ENGINEERING”, Jiří Šesták, Institute of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering-CTU Prague

由本次大會所安排的三場邀請演講的內容看來，可以看出現在國際間的研究趨勢，大多集中在生物科技、奈米技術與微小尺度下的力學機制，這也是我們國家現在努力發展的方向。很多在巨觀尺度下的傳輸現象在經過幾百年來的研究後，已經有了定論。但是近年來由於奈米科技的盛行，學者們開始注意在微觀尺度下，傳輸現象因尺度變化而產生的差異性，舉例來說，在微通道中，流體性質為非牛頓流體，此一改變牽動了許多流體力學的性質，諸如無滑移邊界、邊界層厚度以及流場速度分佈等等。對我們研究人員來說，每一個新的現象不僅新奇而且更具有挑戰性，只要有心，一定可以找到自己發揮的舞台。

2.各別的論文心得：

(1)ENHANCEMENT OF MIXING IN MICROCHANNELS USING PERIODIC PRESSURE INTERFERENCE, (Jerry M. Chen et al., Department of Mechanical Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan)

心得：此研究主要是探討在微通道流中，如何運用週期性的壓力變化來增強流體混合的效果，作者使用顯微鏡搭配CCD和frame grabber來擷取影像，實驗環境的雷諾數則是定在1.1到22，符合大多數的實際使用環境。實驗結果得知較低的頻率與較高的振幅可以強化流體混合的效果。

(2)TRANSPORT OF NANOPARTICLES INSIDEMICROCHANNELS WITH NANO-SIZED CAVITIES, (R. J. Yu et al., Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, Taiwan)

心得：此研究主要是利用數值模擬的方法來探討在各種不同的微通道網路中，如何運用奈米尺度等級的凹洞來收集流體中奈米等級的粒子，由計算結果得知，當粒子的直徑小於450nm以下時，必須將布朗運動(Brownian motion)的影響加以考慮。此研究結果對於在生醫系統中常見的微小粒子流經血管壁的運動特性可以提供一個分析的方向。

(3)FLOW VISUALIZATION OF FERROMAGNETIC NANOPARTICLES ON MICROCHANNEL FLOW USING DARK FIELD MICROSCOPY (Hiroshige Kikura et al., Tokyo Institute of Technology, Japan)

心得：此研究是探討磁性流體在微毛細管中的運動現象，主要的目的在了解強磁性的奈米粒子之群集(cluster)現象的特性，配合光學黑區域顯微鏡系統(optical dark-field microscope system) 以及粒子軌跡測速儀(particle tracking velocimetry, PTV)來提供即時的流場視察(Real-time visualization)，藉此了解布朗運動所造成的影響。

(4)A FLOW OF BLOOD CELLS IN THE BIO-PUMP SYSTEM OF A MOSQUITO (Osamu Mochizuki & Kenji Kikuchi, Faculty of Engineering, Toyo University)

心得：此研究是應用微粒子顯像測速儀(micro-piv)來研究蚊子的吸食器系統，蚊子的吸食器本身就像是一個小型的微幫浦，其內部的微通道直徑為21，長度為1620 μm ，血液在內部流動的情形，儼然就像是一個微流場。作者更利用SEM與TEM的觀測技術來深入探討在吸食器中微流體與表面摩擦力的關係，並根據所得到的關係式，提出在微系統中微幫浦設計的相關建議。

(5)PROCESSING IN PIV, (Milan Pěta & Jan Novotný, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering)

心得：由於PIV的技術是根據在固定的時間差下，所擷取得到粒子位移的影像來分析，藉以得到粒子之間運動的速度，因此影像的品質對於實驗的分析結果具有舉足輕重的影響。作者先提出不同的粒子濃度對影像品質的影響，再探討不同CCD的BIT數與影像品質的關係，利用兩套不同的PIV系統進行分析比對，一套是DANTEC的標準PIV系統，另一套則是由較便宜的連續性雷射加以改裝，軟體則是使用MATLAB加以分析。

(6)STEREO DIGITAL INLINE HOLOGRAPHY SYSTEM FOR MICRO-3D-PIV,

(Tomomasa UEMURA & Yasufumi Yamamoto, Kansai University, Dept. Engineering, Japan)

心得：全相干涉術(holographic)已經發展了很長的一段時間，雖然全相術可以量測到空間中三維的速度向量，但它的應用卻因為需使用底片而遭受侷限。本篇的作者以全相術的技術為基礎結合Stereo-PIV技術，試圖發展出一套容易架設且具有高精度的micro-3D-PIV的全相術技術。

(7)MICRO-CHANNEL FABRICATIONS WITH TMAH ANISOTROPIC WET-ETCHING,

(Fu-Shin Lee et al. Mechatronics Engineering Dept., Huaan University, Taiwan)

心得：近年來微機電製程應用在生醫系統的研究愈來愈多，其中微通道(micro-channel)是所有生醫系統中不可或缺的一部份，作者運用新的製程技術- TMAH wet-etching來製造微通

道，這與我的研究有所不同，在我所提出的新型微幫浦製程中，我所選用的是ICP，是屬於乾蝕刻的一種，與本文所提的溼蝕刻不同，兩者各有其應用範圍。作者經過實驗統計分析後，提出TMAH精確的配方比例以及蝕刻速率，對於將來想應用這種製程的人而言，是個重要的參考。

3.論文報告過程與心得：

在本次會議的第三天是我最緊張也是最興奮的一天，因為我要上台發表自己的研究成果。我很高興論文評審團讓我的論文可以以口頭發表的形式發表，讓我有機會讓大家知道我們觀察到的新發現，同時也可以順便介紹自己，以便讓著名的學者有機會認識我，增加合作機會的可能性。這個session共有四篇論文，其中二篇與燃燒有關，另一篇是紊流(turbulence)的數值模型，前三篇均為理論模擬，只有一篇和實驗有關，而我的論文就是那唯一的微流體實驗，我所報告的內容為 "Development of a valveless micropump with asymmetric obstacles"，在整個演講過程中，只有剛開始上台會有些緊張，之後就很順利了。我所發表的內容除了提出我們實驗室近三年來在無閥門微幫浦的成果外，也就無閥門微幫浦的應用提出了一些說明，包括將此一新型無閥門微幫浦經過串、並聯的配置後，成為一個高效能的微混合器，此外，也發表了此一新型微幫浦在學界科專計畫 "先進可攜式無線生醫監測系統-WHAM-BioS" 中所扮演的角色，我們已經成功的使用單一顆12V的電池加以驅動我們的微幫浦，對於未來此微幫浦在生醫系統上的應用有重大的突破。當我的簡報結束後，與本次主辦單位捷克科技大學的Zdenek Travnicek教授就無閥門微幫浦的部份，進行了深入的討論，該教授本身也是從事微幫浦的研究，對於之前Olssen 等人所提出的Nozzle/Diffuser之無閥門微幫浦等理論有相當深入的研究，並表示對於我所發表之新型無閥門微幫浦所衍生之微混合器相當有興趣。該教授提出了Olssen等人所提出的Nozzle/Diffuser微幫浦模型與我討論，在相同的流量下，由於其特徵尺度較大，理論上可以達到較高的雷諾數，而提高雷諾數正是所有發展微混合器的人所共同努力的目標，而我所提出架構在新型無閥門微幫浦的微混合器，理論上其雷諾數約為Olssen等人的二分之一，因此對於我所提出的微混合器之效率，該教授持保留態度，經過我的解說並提出其他的實驗結果(該部份結果並不在本次發表內容)予以證明後，該教授同意我所提出的微混合器構想，並表示該構想確實可行，而且效率很高。

4.其他心得與感想：

本次大會除了安排發表的議程外，也在第二天的晚上邀請所有來賓參加一場大會所主辦的音樂會，可見大會很用心的在舉辦會議之餘也推廣捷克布拉格的觀光，這是值得我們所學習的，畢

竟我們在舉辦國際研討會的同時，除了可以增加國際性的學術交流外，也希望能夠推廣台灣在國際社會的能見度，把握像研討會這一類的機會，會有很好的廣告效果。此次研討會除了學術上的一些心得外，還有一些舉辦研討會的心得，本次主辦單位的應變能力不太夠，像第二天的演講者身體出了一些狀況，結果由介紹人代為報告，這在國際會議上是比較罕見的，而第二天晚上的音樂會，原本立意甚佳，結果在音樂會一開始，就宣佈說樂團指揮身體不太舒服，所以只能指揮一首，後來的節目則改為風琴獨奏，這反而造成與會者的不諒解，在行政作業上確有值得商榷之處。最後一天大會公告本次參加會議的國籍及人數分佈，並宣布下屆 ISTP-17 將在日本 Toyama 舉行，期待再次相遇。

三、結論

在此特別感謝國科會與傑出人才基金會提供經費上的補助，使得我能順利參加在捷克布拉格舉辦的ISTP-16國際研討會。ISTP年會是相當著名的年會，參與年會除了可以增進學生對於相關領域研究趨勢的了解之外，更可以與外國的專家學者溝通，同時也可增加台灣在世界上的能見度與地位，對於我國當前所面臨的外交困境也算是盡個人的一份心力。

由於本次主辦單位捷克科技大學在傳統的研究領域上有相當多的研究成果，包括像飛機的發動機、汽車的空氣動力學、鑄造技術等，從本次他們自己的投稿論文來看，主辦單位近年來在流體力學領域的研究，也從傳統的燃燒、發動機與流體阻力等轉往生醫微流體系統的方面研究，此一轉變與我國現今的研究方向正巧不謀而合，可見我國現今的方向也符合世界潮流。

在本次會議中，也遇到幾位台灣的老師，如台大的黃美嬌教授、清華的劉通敏教授、交大的陳俊勳教授等，本來在國內所舉辦的研討會中也會遇到這些老師，但是在國內的研討會，由於相關研究的人士眾多，通常會先與研究領域相近的人士交換意見，反而容易侷限，此次利用機會也與幾位老師交換意見，對於國內別的學校目前的研究內容也有了初步的了解，相信在回國後，可以就研究的需求，就近互相切磋。

捷克科技大學本次也有有關於粒子影像測速儀 (Particle Image Velocimetry, PIV)的文章發表，這套儀器我們實驗室早在 1999 年即購置，也應用這套儀器進行了許多的流場量測，如硬碟機、微通道流、微幫浦等，原本此套系統的理論已經發展的很完善了，但由於近年來生醫系統微流場的研究需求，進一步將 PIV 發展成 Micro-PIV，因此使得 PIV 的理論基礎需要進行一些修正，所以有許多人投入 Micro-PIV 的理論研究與實驗量測。本次會議也有相當多的學者就這方面的研

究提出他們的研究成果，而國內除了台大沈弘俊老師之外，還有中興大學的林呈老師、交通大學的吳宗信老師等，此次會議中的論文內容正可以作為我們的研究參考。

本次會議中還有一個特殊的現象，幾乎全部有關於微流體力學的研究與應用都是來自於台灣，而像日本、歐洲等國的研究，則是較著重於傳統流力，這樣的落差可說是相當明顯，我也和幾位與會的老師討論過這個問題，我們的研究資源過度集中在微系統的研究上，是否是個明確的選擇呢？恐怕只有時間能夠解答這個問題了。

整體而言，參與本次國際會議對我而言是個重要的經驗，不僅讓我有了更寬廣的國際觀，也有了更深的研究體認，想要在國際會議中獲得掌聲、贏得尊敬，只有秉持精益求精的精神，不斷的自我要求，這是在國內研討會所難以感受的。

國科會國外研討會心得報告

計畫名稱：微流道中粒子操控技術及其在二相懸浮流流場分析

計畫編號：NSC 93-2212-E-002-042

撰寫人： 許家睿

服務單位名稱：國立台灣大學應用力學研究所

出國地點：埃及開羅(Cairo)

出國日期：2005/09/19~2005/09/22

一、會議簡介

本次會議是在埃及開羅舉辦的HEAFT 2005 (The 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics) 國際研討會。本次會議的時間為 2005 年 9 月 19 日至 9 月 22 日，內容包含二十個大主題，分別如下：

K Keynote papers

- (1) Power plants and power generation
- (2) Energy, second law
- (3) Measurements techniques and thermal properties
- (4) Turbulence
- (5) Refrigerants, refrigerators, freezers, thermal management
- (6) Natural convection and cooling towers
- (7) Phase change
- (8) Enhanced heat transfer
- (9) Heat exchangers
- (11) Novel applications
- (12) Pumps, blowers and fans
- (13) Turbines, compressors, intakes and engines
- (14) Combustion
- (15) Multi-phase flow
- (16) Electronic cooling
- (17) Incompressible flow
- (18) Flow in porous materials
- (19) Heat transfer specific
- (20) Compressible flow

由分類的主題可知本次國際會議提供了一個在熱流研究領域中相當廣泛的知識交流平台，在熱傳方面涵蓋了熱力學、能源、燃燒及熱傳導、熱交換等研究。而流體力學方面主要可由不同的流體進行區分，以空氣為流體方面，包含了可壓縮流、渦輪蒸壓等，而以液體為流體的方面，則

有不可壓縮流、幫浦等流體機械的研究。此外，對於一些較不屬於此傳統熱傳流力範疇的研究，則另闢一個主題，稱之為新穎科技的研究，我所投稿之論文即屬於新穎研究的主題，雖然這次會議主要是以傳統之熱傳流力為主，但是仍很慶幸可以聆聽不同領域的學者所發表的最新研究成果與應用。

本次會議的發表論文為390篇，分佈在數十個不同的國家，分布涵蓋美洲、歐洲、亞洲及非洲等國家，而台灣這次在會議中只有五篇論文發表，算是相當的少數，數量較多的是美國與歐洲方面的論文。本次會議由於主題眾多，因此分為四天舉行，同時間就七個不同主題的研究在進行報告，加上大會在這次會議的議程資訊上有些設計不良，在會議的第一天上午才拿到議程的資訊，並且需要花上一段時間才能夠選擇出想聽的演講來，對於想多方面了解各國在不同領域研究現況的我，就必須仔細的選擇與目前研究相關與有興趣的論文聆聽，其他無法聆聽的論文就必須透過大會所整理的論文集而加以了解。以下就本次會議中一些精彩的演講做一些心得摘要：

二、會議參與心得內容

1.邀請演講(Keynote paper)部份

本次大會在每天的早上均有安排一至二場邀請演講，講題與講員分別如下：

(1) Sep. 19th

“Bubble Dynamics and Heat Transfer during Pool and Flow”, Dhir VK, Mechanical and Aerospace Engineering Department, Henry Samueli School of Engineering and applied Science

(2) Sep 20th

“The Leveque-analogy or how to predict heat and mass transfer from fluid friction”, Martin H, Thermische Verfahrenstechnik (TVT), Universität Karlsruhe (TH)

“Flow and heat transfer in micro-channels”, Hetsroni G, Department of Mechanical Engineering, Technion – Israel Institute of Technology

(3) Sep. 21st

“Rotordynamic problems in centrifugal pumps - from rocket turbopumps to blood pumps”, Tsujimoto Y, Engineering Science, Osaka University

“Fractional step methods for heat and fluid flow”, Nithiarasu P, School of Engineering, University of Wales Swansea

(4) Sep. 22nd

“International space-related fluid physics, heat transfer and thermal control research: State of the art & near-future issues”, Delil AAM, Advanced Aerospace Thermal Control Systems Consultant

這六場的演講分別具有在熱流領域中的不同代表性，從基本現象的研究到相關的熱流機械應用，甚至也包含了與我論文發表有關的微流體元件的開發，這些邀請演講是我一定會去聽的，不過對於各國的英語發音還是不大習慣，因此有些演講聽起來還是有點斷斷續續的，主要利用關鍵字去了解演講的內容。我特別留意的是第二天第二場的邀請演講，主要想要了解國外研究團體在微流體元件開發上的進展，該位講者 Hetsroni 教授介紹了他們研究團隊目前在微流體元件開發上的成果，其中包含了微幫浦、微混合器的設計製作，但是仍然是對於獨立元件的設計，然而現階段的發展趨勢是將獨立的微流元件整合為一個微流體系統，並且應用於生醫與化學分析方面，因此在一些獨立的微流體元件設計上必須考慮到未來的整合性。

2. 個別論文發表部份

特別演講完後便是根據分類進行的論文發表，基本上根據投稿的內容，然而大會在議程的設計似乎有些瑕疵，首先大會給了所有人三份文件，包含作者、發表論文的題目、時間、地點、論文編號、與國籍等等，然而這三份文件卻沒有辦法給我們很明確的資訊，必須要互相對照，才能夠對某篇論文的相關資訊有所了解，因此必須花上許多時間。這次我所選擇去聆聽的論文發表如下所示：

- (1) **“An experimental study of explosive boiling of water and FC-72 on a platinum wire micro-heater”, Dey PK, Leong LW, Mujumdar AS, Hawlader MNA & Elias E**, Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore
- (2) **“Drying process of microscale Polymer-solution droplets deposited on substrates”, Fukai J, Ishizuka H, Sakai Y, Kaneda M, Morita M & Takahara A**, Department of Chemical Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu University

- (3) **“Computational analysis of flow field on the propulsion nozzle of a micro-turbojet engine”**, Garrido Tellez JL, Toledo Velazquez M, Armenta Ortiz MR, Hernandez Fernandez A & Rivera Guevara CA, Engineering Aeronautics CFD Lab., School Higher of Engineering Mechanical and Electrical
- (4) **“Numerical characterization of oscillating pressure driven flow through vaned diffuser micropump”**, Huang KH & Sun C-L, Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University of Science and Technology
- (5) **“The first stokes problem for a micropolar fluid in the presence of thermal radiation field”**, Kim K-S, Lee J-C & Kim YJ, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
- (6) **“Comparison of the thermal- fluid analysis codes cathare and flownex with experimental data from the pebble bed micro model”**, Widlund O, Van Ravenswaay J, Geffraye G, van Niekerk W & Tauveron N, School of Mechanical and Materials Engineering, North West University
- (7) **“Formation of a homogeneous scalar field in an axis-symmetrical mixer”**, Zhdanov VL, Chorny AD, Kornev NV & Hassel E, Department of Technical Thermodynamics, University of Rostock
- (8) **“Fluid-structure interaction in pipe flow”**, Benyahia N & Souidi F, Faculté de Physique, Université des Sciences et de la Technologie

這些論文多半在討論微小尺度下的一些流力與熱傳的現象與特性，其中包含有實驗與數值模擬，由於當特徵尺寸縮小的同時，其某些特性已無法單純以巨觀的方式進行預測，所需考量的變因更多，也更難單純以實驗就能徹底了解，因此也往往需要數值模擬進行搭配。另外有些並不視為小尺度下的研究，但是我仍然很有興趣，如列在最後一篇的論文是討論管流中流道結構對於流場的影響，對於微流元件的設計中，常常也有許多的微結構放置於流道內，因此結構與流體間之交互作用對於流場的影響也是我們所研究的重點，不過對我來說，較困難的是當其他講者發表其研究時，常常因為發音的腔調不同，會對發表的內容產生誤解，因此也需要較多的反應時間。

3. 論文報告過程與心得

我所發表的論文則歸類於新穎的研究(novel application)，發表的時間則訂在會議的最後一天中午，當天的議程中有五篇論文在我所要發表論文的討論室，其中有三篇是與能源及環境污染有關的，另一篇則與水波有關的研究，只有我的算是微流體方面的研究，我所發表的題目是“Self-pumping micromixer with PZT disc and asymmetrical obstacles”，然而我的前一位講者可能因為有事不克前來，所以實際上只有四篇有發表，我的論文則是上午議程中該討論室的最後一篇，由於在之前就練習過幾遍，因此並不會緊張，整個發表的過程中都算順暢，發表時間為二十分鐘，另外有五分鐘的發問時間，我個人認為最困難的是最後的問題回答，因為不同國籍學者所提問題

的發音上都聽起來不習慣，因此比較需要多一點時間去了解，如果有任何不清楚的地方我會請他們在說一遍，不過問題大致都能回答，其實非常感謝他們所提出的問題，有些問題如邊界效應對於混合的影響，當然報告完後有一種輕鬆愉快的感覺，像是通過某種考驗一樣，下圖則是我在報告的準備過程請友人用相機所拍攝的照片。



我覺得參加這個會議給了我許多的新體驗，雖然這個會議偏重的是在傳統方面的流力與熱傳等相關的研究，但是仍然訓練我報告與溝通的能力，此外也很高興可以跟許多不同國籍的外國學者一起聊天，可以藉此多了解不同國家內的學術發展情況，他們其實也很樂意回答他們所知道的資訊，對我來說是一個訓練獨立自主與外國人相處的好機會。

4. 其他心得與感想：

來到埃及開羅這樣一個古都，當然免不了要去參觀名聞世界的埃及古蹟與博物館，大會在會議過程中也挑了一些時間安排這些古蹟的參訪，其中我去了博物館與吉薩(Giza)金字塔，第一次可以親眼目睹這些古物古蹟，心中有種莫名的感動。此外，本來想打算參觀開羅大學，感受一下當地的學術氣息，可惜的是其管制極為嚴格，非本校學生，在沒有事先申請的情況下，都是不可以進入的，因此我只能拍下開羅大學的校門作為紀念。

三、結論

在此特別感謝傑出人才基金會提供經費上的補助，使得我能順利參加在埃及開羅舉辦的 HEAFT 2005 國際研討會。該會雖然仍無相當久的歷史，但是觀察過去其參與的人數都達到兩百人以上，今年更突破了三百人，參與年會除了可以增加學生對於論文發表的經驗外，更可以與外

國的專家學者溝通，達到學術交流的目的。

在本次會議中，也遇到少數來自於台灣的老師，如中央大學的周正堂教授、中原大學的陳宗夏教授，其他兩篇由台灣學者所發表的文章則因故沒有出席，因此也沒有機會認識，此次利用機會也與幾位老師交換意見並且學習參加國際研討會的經驗，對我有極大幫助，在此也感謝在當地經營工廠的台灣人士曹芸瑄小姐在生活上的照顧與協助。

整體而言，參與本次國際會議對我而言是個重要的經驗，不僅讓我有了更寬廣的國際觀，也有了更深的研究體認，也因參加了國際會議了解別人做研究的態度與精神，其中有相當多的資訊與經驗並不是參加國內研討會能獲得的，相信這將對我做研究的態度有極大的助益。