

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

噴孔流道曲率變化與表面親疏水性

對噴射液滴行為影響之研究

Influence of channel curvature and liquid hydrophobicity
on microfluidic dynamics in droplet ejection process

研究生：陳志豪

指導教授：林振德

中華民國九十七年七月

噴孔流道曲率變化與表面親疏水性對噴射液滴行為影響之研究

研究生：陳志豪

指導教授：林振德

中文摘要

本文中我們透過數值模擬來探討一噴孔片透過壓電材料的形變振動，將液體噴射而出的模型，所使用的計算軟體為商業化計算流體力學軟體 CFD-ACE+。我們透過給予不同液固接觸角的邊界條件來模擬液固界面的不同親疏水性，再利用流體體積-片段線性界面重建法來作液氣界面的時變追蹤，分析不同噴孔渠道曲率在不同邊界條件的情形下，對液滴噴射行為、衛星液滴個數與殘液的影響。

研究結果顯示流道曲率會影響液滴的飛行速度、斷裂時間、主液滴體積、衛星液滴與黏滯區域等。噴孔孔徑變大會降低液滴飛行速度，增加液滴的體積。提高噴孔片振幅或是提高振動頻率代表輸入能量增加，因此液滴飛行速度提高，減少主液滴的體積，降低斷裂時間，但是會帶有較多細碎的衛星液滴。接觸角方面，接觸角上升表示固液界面的作用力下降，因此阻力下降使得飛行速度上升，斷裂時間由親水表面略為上升，至疏水表面下降許多，主液滴體積則會下降。

Influence of channel curvature and liquid hydrophobicity on microfluidic dynamics in droplet ejection process

Student: Chih-Hao Chen

Advisor: Prof. Jenn-Der Lin

英文摘要

A model which is a droplet on the nozzle plate linked to a nozzle plate injects due to the vibration had been simulated. By different curvature of the flow channel, giving different amplitude, contact angle, and frequency of the nozzle plate we can observe the behavior of the droplet injection in the simulation. In this simulation, we use time-dependent VOF method to track the interface between gas and liquid and re-build the interface to observe the injection behavior of the droplet graphically. The simulation code we use in this article is the commercial CFD software CFD-ACE+.

The results show that curvature of the flow channel will affect the velocity, breakup time, volume of the droplet, and numbers of satellite drop. Increasing the diameter of the orifice will increase the volume and reduce the velocity of the droplet. The adjustment of increasing amplitude or frequency of the nozzle plate raise the input energy, so it will increase the velocity, reduce the volume, and shorten the breakup time of the droplet. But increasing the amplitude or the frequency causes more satellite drops. On the hydrophobic boundary, the velocity will increase, the volume will decrease, and the breakup time will shorten.

致謝

誠摯的感謝指導教授林振德博士，老師悉心的教導使我得以一窺熱流領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺。老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。

在實驗室的這些日子里，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、實驗技巧的經驗傳承，感謝眾位學長姐、同學、學弟妹的共同砥礪，你們的陪伴讓我的研究生生活變得絢麗多彩。

感謝涂文福、賴志銘學長們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝黃昌彥同學的幫忙，恭喜我們順利走過這兩年。實驗室的藍順龍、李偉民、鄭守昆、黃文錚、黃泰碩學弟們當然也不能忘記，你們的幫忙我銘感在心。

女朋友篠蝶在背後的默默支持更是我前進的動力，沒有篠蝶的體諒、包容，相信這幾年的生活將是很不一樣的光景。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vii
圖目錄.....	viii
符號表.....	x
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 噴射驅動介紹.....	1
1-3 文獻回顧.....	3
1-4 研究動機與目的.....	6
第二章 物理模式與數學模式.....	7
2-1 物理模式.....	7
2-2 數學模式.....	7
2-2-1 流體區域.....	7
2-2-2 液固氣界面：.....	8
第三章 軟體介紹與數值模擬方法.....	12



3-1	軟體介紹	12
3-1-1	CFD-GEOM 軟體	13
3-1-2	CFD-ACE+ 軟體	14
3-1-3	CFD-VIEW 軟體	15
3-1-4	CFDRC 軟體使用流程	15
3-2	模擬方法	15
3-2-1	前處理	16
3-2-2	求解分析	17
3-2-3	後處理	18
第四章	結果與討論	19
4-1	模擬驗證	19
4-2	不同流道曲率對液滴的影響	21
4-2-1	流道曲率對液滴飛行速度的影響	22
4-2-2	流道曲率對主液滴體積的影響	23
4-2-3	流道曲率對主液滴斷裂時間的影響	24
4-2-4	表面接觸角對液滴噴射行為的影響	25
4-2-5	振動頻率對液滴噴射行為的影響	26
4-2-6	衛星液滴與殘留液滴	27
第五章	結論與未來展望	29



5-1 結論	29
5-2 未來展望	30
Reference.....	31



表目錄

表 2-1 幾何尺寸.....	35
表 3-1 物理參數.....	36
表 4-1 case 的幾何尺寸	37
表 4-2 case 的物理參數	38
表 4-3 不同孔徑的體積、速度表	38
表 4-4 主液滴飛行速度時間(m/s)結果表.....	39
表 4-5 主液滴體積(pl)結果表.....	39
表 4-6 主液滴斷裂時間(μ s)結果表	39
表 4-7 主液滴飛行速度時間(m/s)與接觸角關係表	40
表 4-8 主液滴體積(pl) 與接觸角關係表.....	40
表 4-9 主液滴斷裂時間(μ s) 與接觸角關係表	41
表 4-10 主液滴飛行速度時間(m/s)結果表.....	42
表 4-11 主液滴體積(pl)結果表.....	42
表 4-12 主液滴斷裂時間(μ s)結果表	42
表 4-13 衛星液滴個數與接觸角關係表	43
表 4-14 黏滯面積(μ m ²)與接觸角、振幅關係表	43

圖目錄

圖 1-1 熱汽泡式微噴液裝置	44
圖 1-2 壓電式微噴液裝置	44
圖 2-1 振動噴孔片模型	45
圖 2-2 物理模型圖	45
圖 3-1 CFD-GEOM 操作畫面	46
圖 3-2 CFD-ACE 操作畫面	46
圖 3-3 CFD-VIEW 操作畫面	47
圖 3-4 CFD-RC 的概要使用流程圖	48
圖 3-5 建立外流場與噴孔片的模型	49
圖 3-6 噴口處與液滴飛行的外流場處等細微部分再做微小分割	50
圖 4-1 驗證案例的幾何尺寸	50
圖 4-2 震盪片孔徑 $34\mu\text{m}$ 實驗拍攝與模擬畫面(驗證案例) ..	51
圖 4-3 震盪片噴孔孔徑與液滴體積、速度圖	52
圖 4-4 震盪片噴孔孔徑 $24\mu\text{m}$ 、 $14\mu\text{m}$ 噴射過程圖	53
圖 4-5 流道曲率示意圖	54
圖 4-6 流道曲率與速度關係圖	54

圖 4-7 a 流道與 b 流道壓力分佈圖	55
圖 4-8 流道壓力分佈圖(流道 e)	56
圖 4-9 流道曲率與主液滴體積關係圖	56
圖 4-10 流道曲率與斷裂時間關係圖	57
圖 4-11 內流線分佈圖(c 流道).....	58
圖 4-12 振動幅度 $0.25\mu\text{m}$ 的回流位置分佈圖	59
圖 4-13 振動幅度 $1\mu\text{m}$ 的回流位置分佈圖	59
圖 4-14 不同接觸角的主液滴斷裂時間關係圖	60
圖 4-15 不同接觸角的主液滴飛行速度關係圖	60
圖 4-16 不同接觸角的主液滴體積關係圖	61
圖 4-17 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴速度關係圖 .	61
圖 4-18 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴體積關係圖 .	62
圖 4-19 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴斷裂時間關係圖	62
圖 4-20 b 流道與 d 流道的液柱長度比較	63
圖 4-21 振動幅度 $1\mu\text{m}$ 與 $0.25\mu\text{m}$ 的斷裂圖(c 流道).....	63
圖 4-22 振動頻率 100k 與 200k 斷裂圖(c 流道).....	64
圖 4-23 流道曲率與殘液關係圖	64

符號表

A 振動幅度

f 流體體積函數值

g 重力加速度

P 壓力

V 速度

w 頻率

t 時間

μ 黏滯係數

ρ 密度



緒論

1-1 前言

近來液滴噴射器相關應用產品已在生活上隨處可見，其可見的明顯趨勢是往小、快、精確方向演進。液滴噴射系統是一種結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫等多重技術整合的研發領域，其特色為可噴射出微小液滴來進行不同的應用。故相關研究人員近年來對於這具有廣大發展潛力的領域積極地發展其新的研究方向，如噴墨列印(inkjet printing)[1, 2]、生醫流體的植佈(biofluid printing)、燃料噴射系統[3]、藥物服用(drug dosage)[4]、晶片冷卻與直接印表製程技術(IC cooling and direct writing)。高可靠度、高性能與低成本的微噴液裝置是近來致力研發的重點。

所謂高性能的微噴液裝置包含以下幾個特性：

- (1) 能產生高品質的液滴，即是主液滴旁無微小的衛星液滴
(satellite droplet)
- (2) 高頻率響應，一般超過 10 kHz
- (3) 高空間解析度，一般超過 300 dpi

1-2 噴射驅動介紹

依照驅動噴射方式的不同，微噴液裝置一般可分為熱氣泡式

(thermal bubble)[1, 2, 3]、壓電式(piezoelectric)[4, 5]、熱彎曲式(thermal buckling)[6]、音波式(acoustic wave)[7]和靜電式(electrostatic)[8]。

目前較為成熟的是熱氣泡式和壓電式，且已成功商業化應用在噴墨印表機上[1, 2, 5]。熱氣泡式微噴液裝置[1, 2, 3, 9]一般由電壓控制薄膜熱電阻加熱器(thin-film heater)、儲存工作流體的腔體(chamber)與一噴嘴(nozzle)所組成，如圖 1-1 所示，其原理為利用加熱元件瞬間將墨水瞬間加熱汽化成氣泡，產生高壓推擠氣泡週邊的墨水向噴孔噴出，接著加熱元件快速冷卻，讓墨滴脫離飛出。因此，熱氣泡式微噴液裝置必須考慮到工作流體的可加熱性與成核溫度(threshold temperature)，也限制了熱氣泡式微噴液裝置的適用性。

壓電式微噴液裝置[5, 10]一般係由壓電陶瓷元件(piezo-ceramic)、振動模板(diaphragm)、壓力艙(pressure chamber)與噴孔(nozzle)所組成，如圖 1-2 所示。其作動原理是利用材料的壓電效應產生形變，擠壓液體。因此，壓電式微噴嘴裝置的設計必須考慮有足夠的空間，讓壓電材料能產生形變位移，擠壓液體。所以壓電式微噴液裝置較熱氣泡式噴墨裝置少了工作流體種類的限制，但壓電式微噴墨裝置的設計更需要考慮到有足夠的空間，使壓電材料能產生形變位移。

1-3 文獻回顧

在微噴液裝置的設計中[11]，想要產生高品質的液滴，則主液滴在脫離前，其尾端拉長部份不能過長；想要提高空間解析度，必須有效縮小噴射出液滴的體積，而這些參數皆與噴液裝置裡的幾何形狀、邊界條件等息息相關。

針對液體透過噴孔噴射而出、進而斷裂成液滴的現象，Pimbley[12]採取線性一維模型(linear one-dimensional analysis)與邊界值擾動(boundary value perturbation)以探討液體噴流液滴生成現象，由計算結果探討液滴生成過程並檢視液體噴射速度與擾動波形的關係。Curry 等[13]利用因次分析(dimensional analysis)的方法，將所有與液體噴流斷裂成液滴現象的無因次參數列出，並試著找出何種操作條件下液體噴流無衛星液滴的產生。Fromm[14]利用標記網格法(marker-and-cell scheme)來解二維 Navier-Stokes 方程式，來預測液體從圓形噴孔噴出進而斷裂成液滴的行為。Fromm 將入口隨時間變化的壓力波檢化成一方波的形式，並考慮到等截面積的噴孔。接著 Adams 與 Roy [15]考慮與 Fromm 相同的方形壓力波與等截面積噴孔發展出一維模型，可以非常良好的預測出與 Fromm 相同的結果。Asai 等人[16]發展一維數值模型來預測液滴生成行為，其結果可以良好的預測出液滴噴射離噴孔的長度距離。Shield 等人[17]提出內噴孔區

應用特徵法(method of characteristic, MOC)求出壓力變化，外噴孔區則解考慮表面張力之一維自由噴流。隨後，Asai[18]使用有限差分法解三維 Navier-Stokes 方程式來預測側向式熱氣泡微噴液裝置液滴噴射行為，數值結果顯示液滴體積與噴射速度隨著氣泡起始壓力的升高而增加，並隨著黏度及表面張力的增加而減少。Chen 等人[19]採用數值方法與光學量測系統，研究熱氣泡成長與微噴流裝置液滴生成過程。該研究使用有限差分法求解一維熱傳方程式，氣泡成長曲線則依一階指數遞減方程式近似，以模擬瞬時加熱導致氣泡快速生成的步驟。此外，在微噴液裝置內流體的運動僅考慮一維方向自由度，而液體流動的能量方程式則採用隱式有限差分法進行求解。數值結果可以預測氣泡體積、溫度與壓力變化，微液滴噴射距離僅在加熱初期可被良好預測。Chen 等人[19, 20]採用一維模型與光學量測，研究加熱電壓脈衝、工作流體性質與重力效應對側向式熱氣泡微噴液裝置液滴噴射行為的影響。Chen 等人[21]以特徵法(characteristic method)解一維波動方程式來求得壓電式微噴液裝置壓力與速度隨時間變化關係式，數值結果顯示電壓脈衝是影響液滴長度及重量最主要的因素。Rembe 等人[22]發展一識別和模擬動態現象的簡化模型，可應用於熱氣泡致動微噴液裝置的計算，以取得液滴的位置、速度、加速度和熱通量相關係數。Liou 等人[23]採用有限體積法(control volume

method)來求解考慮表面張力效應的流場統御方程式，並配合流體體積法(volume of fluid, VOF)以預測流體界面，研究針對兩種不同長度墨水匣探討液滴噴射過程之液滴發展機制。Yeh[24]採用有限元素法並結合流體體積法完成壓電式微噴液裝置之模擬，過程中充分顯現液滴噴出液氣自由界面之演變，提供液滴噴射動力易於理解之說明。Yang 等人[25]利用流體體積法求解液氣介面之暫態變化。過程中藉由改變不同黏滯係數與表面張力，探討其對液滴噴射行為的影響。Yu 等人[26]利用有限差分法(finite difference method)去解二維不可壓縮軸對稱 Navier-Stokes 方程式，來探討壓電式微噴液裝置液滴噴射行為。文中利用表面調整投影法(level set method)來作液氣界面的追蹤，並同時考慮表面張力效應。其微噴液裝置入口壓力波形則是利用等效電路法(equivalent circuit model)來求得。作者探討了驅動電壓波形振幅與噴出液滴體積的關係，接著討論了不同液體表面張力對液滴斷裂時間的影響。Wu 等人[27]發展一三維模型來探討擠壓式壓電微噴液裝置(Squeeze-mode piezoelectric printhead)液滴噴射與液滴撞擊基材現象。文中利用流體體積-片段線性介面重建法(VOF-PLIC)來作液氣界面追蹤，並以連續表面力法(continuum surface force mode, CSF mode)來考慮表面張力的效應，並探討了流體表面張力與黏性對液滴噴射的影響。Yang 等人[28]利用商業化

計算流體力學軟體 CFD-ACE+來模擬 Picojet 壓電式微噴液裝置。由模擬計算結果與高速攝影系統所拍攝液滴噴射行為，在液滴型態變化、液滴噴射距離、液滴斷裂時間均有良好的一致性。

1-4 研究動機與目的

可以廣泛應用在各種領域是噴液系統的最大優點，因此如何改善噴液系統的品質是目前各方面重要的議題之一。由上面的文獻探討可知，先前的研究大都著重在液體特性，操作電壓波形與噴孔幾何尺寸對液滴噴射行為的影響，沒有考慮噴孔流道的幾何形狀與噴孔表面性質，即表面親疏水性對液滴噴射行為的影響。

因此本研究中，我們探討不同幾何形狀的噴孔流道與不同表面性質對液滴噴射行為的影響。為了簡化所要計算的模型，我們選取壓電式微噴液裝置，並略去工作流體以及噴液裝置受熱後所產生的熱變化影響。文中所使用的模擬軟體為商用套裝流體力學分析軟體 CFD-ACE+，分別利用其中的 CFD-GEOM、CFD-ACE 與 CFD-VIEW 來進行網格設計、求解與後處理，來求得模擬的結果。

第二章 物理模式與數學模式

2-1 物理模式

本研究中所採用的物理模型[29, 30]是採用一壓電材料噴孔片的形變振動，使噴孔處之液體因受高壓噴射而出，進而斷裂成液滴的設計，裝置如圖 2-1。而模擬所使用的幾何尺寸如表 2-1，物理模型圖如圖 2-2。

設定一外流場，工作流體則成半圓球狀置於噴孔片上。工作流體採用水，外流場採用空氣並給予兩者之流體性質，設定外界溫度與壓力。而噴孔片則是設定其振動頻率、振幅與邊界接觸角，設定對稱面以觀察流體向外噴出之物理現象。

為了模擬出不可壓縮流體流動同時考慮重力與表面張力的效應，有以下假設：

- (1) 液體與氣體皆視為不可壓縮流體
- (2) 流體為牛頓流體
- (3) 所有流體的物理性質皆設為常數

2-2 數學模式

2-2-1 流體區域

本研究中的統御方程式包括了質量守恆與動量守恆方程式：

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F}_\sigma$$

其中 \vec{V} 為流體速度， P 為流體壓力， μ 為黏滯係數， ρ 為流體密度， \vec{g} 為重力加速度， \vec{F}_σ 為表面張力效應項。本模型是以連續表面力法(CSF mode)[31]將表面張力等效成靠近液氣介面微小體積的體力(body force)，因此：

$$\vec{F}_\sigma = f_\sigma \delta_\sigma$$

其中 f_σ 為每單位面積的力， δ_σ 為表面單位脈衝函數(surface delta function)。



2-2-2 液固氣界面：

為了描述液體之液氣界面，我們首先需定義出液氣界面的位置，其次要能計算出液氣界面隨時間變化的情形，進而求出界面經流動後的分佈，最後需處理液氣界面兩側的邊界條件。本模型是以連續表面力法(CSF mode)將表面張力等效成靠近液氣界面微小體積的體力，直接在動量守恆方程式中計算，在液氣界面上其流體速度之邊界條件為

$$\frac{dV}{dn} = 0。$$

在本模型中，我們採用 VOF 法[32]求解液氣界面的問題。VOF 法

可以描述兩種不可壓縮、不互溶之液體，並以兩種流體在計算區域內所佔得體積比例，來判斷此區域內有無液氣界面的存在，進而追蹤界面隨時間的變化與形態。流體在計算區域內所佔得體積比例以一個體積函數 $f(x, y, z, t)$ 來表示，當計算區域內充滿液體時，其值為 1；當充滿氣體時，其值為 0。若 f 值介於 0~1 之間時，表示此區域屬於液氣共存的情形。因此當流體流動時，其界面改變時，將會根據重新計算後的 f 值重建新的流體界面。因為視為不可壓縮，故其統御方程式為：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \left(\vec{V} \cdot \nabla \right) f = 0$$

當速度場 \vec{V} 由 Navier-Stokes 方程式求解出之後，我們可以根據上式計算出新的 f 值，並得到新的流體液氣界面情況，進而得到整個流體的流動分佈狀況，所以上式必須與基本的質量、動量守恆是耦合運算。因此，當計算區域內存在不同比例的液體與氣體時，其計算區域內的流體性質、液氣界面與液氣在邊界上的通量都必須另外考慮。在流體性質方面，對於氣體與液體同時共存在一個計算區域時，此計算區域的流體密度、黏滯係數等物理性質，可以依照體積函數 f 依比例算出：

$$\rho = f\rho_L + (1-f)\rho_G$$

$$\mu = \frac{f\rho_L\mu_L + (1-f)\rho_G\mu_G}{\rho}$$

其中 ρ_L 為液體密度， μ_L 為液體黏滯係數， ρ_G 為氣體密度， μ_G 為氣體黏滯係數。

對於不同計算網格之間液氣界面，需使之相連以確保界面描述之正確性，用以處理液氣界面的方法稱為界面重建。本研究中我們採用片段線性界面重建法(PLIC)[32]來重建新計算的 f 值代表的液氣界面形狀。PLIC 法係將液氣界面依據不同網格 f 值以一直線來代表，液氣所佔據的體積比例決定了直線截距，相離網格 f 值梯度向量決定了直線斜率。至於不同親疏水性即是代表不同表面性質之接觸角，則在壁面邊界條件中，直接限制液氣界面與液固界面夾角。

一般分析時在壁面的邊界條件可分為兩種：(1)自由滑移之邊界 (free slip)；(2)無滑移之邊界(no slip)。流體在邊界上流動時會形成一個邊界層，在邊界層流體流動的速度會較邊界層外低，此邊界層的厚度則與流體性質、速度與邊牆性質有關。而在本研究中，壁面的邊界條件所採用的是無滑移之邊界來處理，即為：

- (1) 垂直於壁面的速度為零
- (2) 平行於壁面的切速度為零

此外，由於此模擬為工作流體置於震盪片上，因此需設定壁面的位移，移動的邊界位移量設定為： $A \sin(2\pi tw)$ ， A 是振幅， t 為時間， w 則是振動頻率。

除此之外，周圍所設定的 outlet 流場的邊界條件，壓力值我們設定為一大氣壓，溫度值則是為 300K，初始空氣流體的速度值均為零。而我們模擬的計算範圍則是前述所提到的整個模型。



第三章 軟體介紹與數值模擬方法

3-1 軟體介紹

利用電子計算機可使數學上複雜的分析計算獲得迅速的解決，大量節省人力與時間，並能達到有效的精確度，對未來科學的研究有極大的影響性。本研究所採用的是商業化計算流體力學軟體CFD-RC來進行計算。

CFDRC為美國CFDRC (CFD Research Corporation)公司所發展的計算流體力學軟體，提供多樣化工具的模擬和流體流動分析及多樣化工業應用，可同時分析流力、熱傳、熱輻射、化學反應與質傳、結構應力與形變、電磁場與電擾動、電泳與電滲透、電漿場之複雜現象。主要用於微機電工程、半導體製程、生化微機電晶片、醫學工程、航太、汽車、電子冷卻、化工與製造等的工程領域。

CFDRC 為套裝軟體，最主要分為三套軟體，CFD-GEOM 為model格點製作，操作介面如圖3-1 所示，CFD-ACE+為所有參數設定與數值運算之軟體，包括了兩個部份：CFD-GUI和求解器，CFD-GUI則為使用者介面，方便使用者利用圖形界面設定參數值，操作介面如圖3-2 所示，CFD-VIEW 為後製軟體，操作介面如3-3所示。其中，CFD-RC是三維計算流體力學軟體，此軟體已廣泛地被用在空氣動力學(如飛機流

場、汽車流場)、工業工程及建築通風設計、半導體設計、流場結構藕合計算、電漿流場、流場結構電場藕合計算等等，以下將簡略介紹 CFDRC 最主要的三套軟體。

3-1-1 CFD-GEOM 軟體

CFD-GEOM 軟體是一套建立幾何結構和產生格點的系統以利 CFD(Computational fluid dynamics)分析，同時可提供多區塊結構，多域非結構和多元素混合格點的全域結合。CFD-GEOM 軟體的設計是能很快速的建立幾何模型和分析網格或者從其它CAD 系統讀取資料進來，以便利使用者建立幾何模型和格點來作CFD 分析。操作介面如圖3-1，其特徵如下列：



1. 廣泛的幾何模型建構。
2. 多功能的格點產生器。
3. 方便的使用者介面，能快速建立模型與網格
4. 擁有彈性Mix 和Match 的幾何模型和網格建立的能力。
5. 有幾何模型、網格點和邊界條件擴充的輸出。
6. 提供使用者在任何流動問題解上自訂邊界條件。
7. 能在結構和非結構實體上邊界和體積條件的設定。
8. 支援Plot3D、FAST、NASTRAN、PATRAN、CFDRC Mixed Element

Format(MFG)和CFDRC Data Transfer Facility format(DTF)。

3-1-2 CFD-ACE+ 軟體

CFD-RC是一泛用型finite volume、pressure based 三維計算流體力學軟體，也是多物理學模擬分析的電腦程式，網格可為結構性與非結構性網格，其操作介面如圖3-2，功能簡列如下：

- 不可壓縮的/可壓縮的
- 穩態/非穩態
- 紊流模組
- 層流模組
- 固定和轉動結構的參考
- 流體體積模組
- 多孔質媒介
- 熱質傳模組
- 表面間輻射熱傳
- 化學反應模組
- 多流體組成方面
- 耦合力計算
- 微機電方面



3-1-3 CFD-VIEW 軟體

CFD-VIEW 軟體即是所謂的後處理器，提供圖像和分析的工具，以利檢查計算和分析模擬的結果，其操作介面如圖 3-3。

3-1-4 CFDRC 軟體使用流程

CFDRC軟體基本的使用流程如圖3-4，先在CFD-GEOM 軟體建構幾何模型和分析的格點，在到CFD-ACE+軟體的使用者界面中設定物理性質、邊界條件、初始條件和求解運算，最後把運算結果到CFD-VIEW 軟體檢查和分析。



3-2 模擬方法

數值模擬架構一般分為三個流程：即前處理(Pre-Processing)，此部分主要是在建構分析之模型，選用適當的網格元素，定義分析時所需要的材料及物理性質等特性，因此前處理可視為描述數值分析之物理意義的重要階段；分析求解(Solve)，在模擬軟體的設計概念上，此部份為最重要的核心部份，在前處理所產生的模型，將在此一模組中進行分析；後處理(Post-Processing)，其最主要的任務乃是將分析的結果以圖形或文字等形式表現出來，以作為判斷分析之用。

3-2-1 前處理

(1) 建立實體模型：

利用 CFD-GEOM 軟體建立外流場與噴孔片相同尺寸的模型，如圖

3-5

(2) 網格分割：

本研究中我們所使用的模型係利用 2D 軸對稱的四邊形結構性網格作切割來得到較佳的品質。在 CFD-GEOM 中在 XYZ 邊界設定好格點數後，會由軟體自動生成網格，本模擬選用網格動態調整，越往觀察區即噴口逐漸縮小網格，並在噴口處與液滴飛行的外流場處等細微部分再做微小分割(圖 3-6)，希冀能獲得較佳的準確性。網格測試方面，總網格數為 17 萬時，液滴飛行速度值為 20.45 m/s；總網格數為 19 萬時，液滴飛行速度值為 20.5 m/s，與總網格數為 17 萬的速度誤差值為 0.2%；總網格數為 25 萬時，液滴飛行速度值為 20.9 m/s 與總網格數為 17 萬的速度誤差值為 2.2%。經過測試與運算時間的選擇下，最後選擇網格尺寸 $0.285 \mu\text{m}$ 作為劃分依據，總網格數約為 17 萬左右。由於我們選用 CFD-ACE+ 的 Grid Deformation 模組，因此在做移動邊界計算時，會先計算所設定移動邊界上每一點速度值而得到之後移動的位置後，再將整個網格重建後，重新計算每個網格內我們所需要的變數值，並不是固定式網格的計算，因此雖然前節中，我們模

擬所設定的振動幅度為 $0.25 \mu\text{m}$ ，小於我們的網格尺寸，但是計算中，模型中的網格隨時均在動態調整後重建，因此並不影響計算。

(3)選定分析模組：

在 CFD-ACE 中選用 Flow-Free surface (VOF) 與 Grid deformation 功能。

(4)設定邊界條件與初始條件：

由於本研究的模型並非利用腔體(chamber)，而是利用工作流體置於振動的噴孔片上的設計，因此模型周圍的邊界皆設定為 outlet。

而噴孔片則是利用 VOF 模組設定其接觸角，Grid deformation 模組設定其振動幅度與頻率。所使用的物理參數如表 3-1 所示。

設定重力方向與大小後，則是將模型分為兩區：初始主要工作流體則利用 VOF 模組給定其幾何尺寸，外部噴射區則是設定為空氣。

3-2-2 求解分析

(1)收斂監控：

設定分別對流場中的速度場及壓力場分別進行計算收斂值監控，收斂條件設定為 10^{-4} ，即當我們所設定的任何變數的殘值小於 10^{-4} ，我們變視其為收斂。由於各物理量在疊代的過程中，方程式所得到的值不為零，即代表尚未收斂，因此將方程式中所產生的差值視

為殘值，當殘值的數值愈趨近於零表示愈接近所求的解(exact solution)。疊代次數設定為50次。

(2)求解：

進行計算，時間約五天。

3-2-3 後處理

可利用 CFD-VIEW 觀看計算後流體斷裂脫離飛行情形與隨時間不同的液氣界面變化情形，並可利用 CFD-VIEW 軟體內部工具列的探針 (probe) 得到所要的速度或壓力值等參數。



第四章 結果與討論

4-1 模擬驗證

為了驗證本模擬所使用的液滴噴射模型是否符合物理現象，本模擬引用交通大學林振德老師實驗室黃昌彥同學所作的震盪片實驗案例加以比較。其幾何圖形與尺寸如圖 4-1 與表 4-1 所示，所使用的物理參數為實驗當天之物理參數值，如表 4-2 所示。實驗中所拍攝到的畫面如圖 4-2。此實驗為連續性的噴射，在此的比對主要是以所噴射出的液滴體積為主。實驗中所拍攝到連續幾顆較為均勻的液滴體積為 22.812 picoliter，而模擬噴射出的液滴體積為 22.657 picoliter，誤差約為 0.68%；實驗液滴噴射的速度值為 4.3 m/s，而模擬噴射的液滴速度值為 4.173 m/s，誤差約為 2.9%。

由於本模擬所探討微小噴孔噴射行為，因此縮小孔徑由 34 μm 至 4 μm 。而在孔徑縮小的過程中，我們發現當孔徑為 24 μm 時，所噴出的液柱剛好脫離表面而斷裂，斷裂後的液滴速度甚慢為 1.85 m/s，後方液柱再度噴射的速度為 6.77 m/s，因此液滴會被後方液柱追撞形成新液柱，受到震盪片的振動而持續噴出，再因為不穩定性的關係斷裂。而當孔徑縮小至 14 μm 時，噴射行為便與間段式噴射較為相似，液柱尚未與主液滴脫離時，液柱根部便因為噴孔片回拉的關係而

斷裂，而液柱本身則慢慢斷裂成衛星液滴，而較後方的衛星液滴則會與下一次受到震盪片的振動所噴射出的液柱相結合，因此部份震盪片的液滴體積不均勻，因為部份液滴為拉長後的斷裂液柱再度斷裂所形成的衛星液滴，與其他連續式噴射是由噴出未斷裂的液柱本身不穩定性而斷裂不相同。隨著孔徑的縮小，我們觀察到所噴射出的液滴本身也隨著孔徑的變化而有所不同。當孔徑縮小時，液滴本身的體積也隨之變小，而反之速度卻隨著孔徑縮小而上升，如圖 4-3 所示，數據如表 4-3 所示。而在液滴的均勻度方面也有所差異，由於 $34\ \mu\text{m}$ 孔徑的孔徑較大，噴射初期會有流體在噴口處堆積現象，因此所噴出的第一顆液滴會較後面噴射出的液滴體積大許多，因此我們略去第一顆液滴不計，取之後所噴射出的液滴平均之後為液滴平均體積。 $34\ \mu\text{m}$ 的噴孔所噴出的液滴體積與平均體積差異最大為 4.4%，而孔徑為 $14\ \mu\text{m}$ 的噴孔所噴出的液滴體積與平均體積差異最大的則為 36.88%，原因則是因為孔徑為 $34\ \mu\text{m}$ 時，衛星液滴尚未出現，因此所噴射出的液滴粒徑大小均勻，當孔徑縮小至 $14\ \mu\text{m}$ 時，衛星液滴便開始出現。當主液滴從液柱斷裂時，脫離流道內工作流體的液柱也斷裂成為衛星液滴，影響了液滴的均勻性，所以會出現一個週期的噴射會出現兩三顆液滴以上，造成震盪片噴出液滴體積不均的現象，如圖 4-4 所示。斷裂時間方面，由於 $14\ \mu\text{m}$ 孔徑的噴孔因為受到衛星液滴的干擾，較難

判斷其準確斷裂時間，所以便只將 $34\ \mu\text{m}$ 與 $24\ \mu\text{m}$ 孔徑的噴孔來作比較，此外第一顆液滴通常會在噴口堆積而後才噴出的現象，因此以第二顆穩定後的液滴來作比較。 $34\ \mu\text{m}$ 孔徑噴孔的斷裂時間為 $24.7\ \mu\text{s}$ ，而 $24\ \mu\text{m}$ 孔徑噴孔的斷裂時間為 $13.5\ \mu\text{s}$ 。因此我們可以知道當孔徑變小時，液滴體積會下降，速度會上升，斷裂時間會下降。接著當孔徑縮小至 $4\ \mu\text{m}$ 時，發現整個噴射行為以不再是連續式的噴射，因此之後的模擬則是再縮小孔徑為 $4\ \mu\text{m}$ 的模型，探討間斷式噴射的液滴行為以及觀察衛星液滴的影響。



4-2 不同流道曲率對液滴的影響

在以下間斷式的噴射行為中，我們將探討不同流道曲率在不同表面親疏水性對液滴噴射行為與殘留液體的影響，本研究設計了不同的流道曲率。以噴孔直徑 $4\ \mu\text{m}$ 為出發點，將外噴孔圓心設為原點，一個單位長為 $1\ \mu\text{m}$ ，設計以下幾種流道：

- a. 一次曲線： $30y = 38x + 2$
- b. 二次曲線： $900y = 38x^2 + 2$
- c. 橢圓曲線：外噴孔圓心設為原點，橢圓圓心為 $(0, 40)$ ，x 軸向半徑設為 30，y 軸向半徑設為 38
- d. 三次曲線： $27000y = 38x^3 + 2$

e. 漸縮漸擴曲線：最窄處為 $2.5 \mu\text{m}$ ，距離噴孔 $7 \mu\text{m}$ ，為 nozzle 形狀

f. 內噴孔與外噴孔相同大小

以上述六種流道與四種不同大小的接觸角： 7.1° 、 70° 、 120° 、 170° 進行討論，曲率圖如圖 4-5 所示。

4-2-1 流道曲率對液滴飛行速度的影響

此節討論中我們先固定噴孔片的頻率、振幅以及表面接觸角角度，就流道曲率不同來討論對液滴飛行速度的影響。數據詳見表 4-4 由曲率圖 4-5 可以看到 a 流道靠近噴孔處的直徑最大，而流道 b、流道 c 和流道 d 隨著曲率的變化靠近噴口處的直徑便愈小，在圖 4-6 中可以看出，隨著案例 a 到 d 曲率的變化，飛行速度便隨之下降。由於不同的幾何形狀造成內部壓力的不同，以流道 a 與流道 b 來說，我們可以由圖 4-7 看到，當相同時間點時，在流道 a 壓力分佈中最大壓力約為 $2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ，流道 b 壓力分佈的最大壓力則約為 $3.2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ，使得兩流道的速度相差甚大。而在原先設定的振動幅度 $0.25 \mu\text{m}$ 中，流道 e、f 並無法噴出。由於流道 e 是漸縮漸擴形狀流道，使得工作流體通過窄處時，壓力便已下降小於外界的大氣壓力而無法噴出，如圖 4-8 所示。

而為了比較流道 e、f 可以與其他流道，因此加大振動幅度為 $1\ \mu\text{m}$ 。測試此二流道可噴出後，我們發現當加大振幅時會使得內部壓力增大，以流道 a 為例，當振幅由 $0.25\ \mu\text{m}$ 升高到 $1\ \mu\text{m}$ 時，流道內部的最高壓力約增加十倍，導致液滴的噴射速度提高。而流道 e 與流道 f 雖然加大振動幅度，使得流道 e 的工作流體可以噴出，但其速度仍然因為壓力降的關係，較其餘 a~b 四流道為慢。而流道 f 則因為內噴孔一致，並沒有受到幾何形狀改變的影響，且進入的流體質量低於其他流道，當噴孔片提高振幅振動時，其噴出速度最小。因此幾何形狀的改變會影響內部壓力的分佈，進而影響噴出液滴的速度，當加大振幅會提高流道內部的壓力，使得噴出的液滴速度上升。



4-2-2 流道曲率對主液滴體積的影響

此節討論中我們固定噴孔片的頻率、振幅以及表面接觸角角度，就流道曲率不同來討論對主液滴體積的影響。數據詳見表 4-5 由 4-2-1 節的討論可以得知，速度由流道 a 至流道 d 而越慢，圖 4-6 中可以看到由於流道 a 至流道 d 幾何形狀不同，使得流道內的壓力分佈不同，造成流道 a 至流道 d 噴出的速度越快。噴孔所噴出的流體速度越快，則噴出的液柱會較細長而容易造成頸縮斷裂，使得斷裂體積會呈現出與噴出速度相反的情況，即速度越快者斷裂後的液滴體積越

小，如圖 4-9 所示。

之後，我們將原先設定的振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 調高至 $1\ \mu\text{m}$ ，比較後發現噴出速度上升，斷裂體積亦呈現出與振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 相同的現象，即噴出的液滴體積下降，由於速度比振幅 $0.25\ \mu\text{m}$ 高，因此在噴出液柱直徑較振幅 $0.25\ \mu\text{m}$ 小，所以斷裂後的液滴體積較小。因此幾何形狀的改變會影響噴出液滴的速度，且加大振幅會使得噴出的液滴體積減少。

4-2-3 流道曲率對主液滴斷裂時間的影響

此節討論中我們固定噴孔片的頻率、振幅以及表面接觸角角度，就流道曲率不同來討論對液滴斷裂時間的影響。數據詳見表 4-6。由圖 4-10 可以看出，隨著曲率的變化，噴口處越狹小而斷裂時間便越長。由上節討論得知，隨著流道所受到的壓力越大則速度越快，所以 $\frac{\partial u}{\partial x}$ 越大導致剪力越大，故隨著速度上升其斷裂時間則下降。

另外，從流線圖來看，由圖 4-11 我們可以看出，當噴孔片一開始朝工作流體擠壓時，便開始有回流現象，隨著噴孔片的向內部擠壓，回流位置便越往噴口處靠近，之後會在接近噴口處產生渦流，而渦流慢慢變小後則工作流體即不再噴出而轉為流往內部，但此時液柱仍因為慣性力的關係而持續向外飛行，因而會在噴口處斷裂。由圖

4-12 我們可以看到，隨著曲率的變化，使得回流位置出現的位置與時間也跟著不同。之後，我們將原先設定的振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 調高至 $1\ \mu\text{m}$ 。由圖 4-13 可以看到，當振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 調高至 $1\ \mu\text{m}$ 時，回流出現的位置較振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 更為靠近噴口處，而渦流出現的時間也較振動幅度 $0.25\ \mu\text{m}$ 早。因為回流的情形較為顯著，因此導致液滴的斷裂時間提早。因此幾何形狀的改變會影響斷裂的時間，且加大振幅會使得斷裂時間縮短。

4-2-4 表面接觸角對液滴噴射行為的影響



此節討論中我們固定噴孔片的頻率、振幅，改變不同的表面接觸角角度討論對主液滴的影響。數據詳見表 4-7、表 4-8、表 4-9。由圖 4-14、圖 4-15、圖 4-16 中我們可以看到當表面較為疏水的情形下噴出的速度會較快，由於在高接觸角的表面噴出時，液體所受到的黏滯力較小，因此液體能夠以較快的速度噴出噴孔，而使得斷裂後的主液滴有較快的速度。而主液滴的體積亦隨著接觸角的上升而下降，這與前節 4-2-1 所獲得的結果相同，當液柱有較快的噴出速度時，則斷裂後的主液滴則會較小。在極親水的表面則是因為速度較慢，因此噴出後會使得部份流體附著於噴孔片表面，而因為親水性的關係，會有拉扯液柱的合力朝向液柱噴射的相反方向，使得極親水表面的噴射液

滴會較快斷裂，隨著接觸角的上升，壁面黏滯的流體量下降，使得此效應漸漸不明顯，導致斷裂時間略為上升。由於主液滴的速度隨著接觸角上升而增加，體積在減少的情形下，因此我們發現在接觸角高的疏水表面時，工作流體在噴射過程中，會因為疏水性的關係較快退回到腔體內部，使得液柱很快達到頸縮的情形，導致斷裂時間下降，在圖中可以看到在高接觸角時會有斷裂時間縮短的情形。因此隨著壁面接觸角的提高，會使得主液滴的飛行速度隨之增加，體積減少，而斷裂時間則是會先在親水表面略為升高到疏水表面後下降。



4-2-5 振動頻率對液滴噴射行為的影響

此節討論中我們固定噴孔片的振幅以及表面接觸角角度，就振動頻率不同來討論對液滴飛行行為的影響。數據詳見表 4-10、表 4-11、表 4-12。由圖 4-17、圖 4-18、圖 4-19 中我們可以看到，隨著頻率的提高，液滴的飛行速度也隨之提高，主液滴的體積下降，斷裂時間縮短。由於噴孔片的頻率提高，即單位時間內總能量提高，因此噴孔片的動能變大後，會使得工作流體受到較大的慣性力，降低黏滯力對工作流體的影響，使得噴出工作流體能以較快的速度脫離噴孔，如前節討論提高速度會使得液柱較為細長而容易達到頸縮，因此會大幅縮短斷裂的時間與斷裂後的主液滴體積。而流道 e 則是由於在靠近噴口

處有一個緊縮的部位，因此當我們把頻率提高後，使得流道 e 靠近緊縮處的工作流體受到慣性力的影響變大而斷裂，所以飛行速度緩慢。因此隨著振動頻率的提高，會使得液滴的飛行速度上升，主液滴的體積下降，斷裂時間縮短。

4-2-6 衛星液滴與殘留液滴

在衛星液滴方面，由表 4-13 中我們可以看出衛星液滴的數量。由之前文獻中可知道當液柱所部份越長，則衛星液滴越多。在相同振動頻率與振幅的情形下，由圖 4-20 比較可知，流道噴出的速度越快，會造成液柱長度越長，因此斷裂後會有較多衛星液滴。在相同振動頻率不同振動振幅的情形下，由圖 4-21 比較可知，振幅較大的噴孔噴出的速度快因此也會有較多衛星液滴。在相同振動振幅不同振動頻率的情形下，由圖 4-22 比較可知，頻率較大的噴孔噴出的速度快，因此也會有較多衛星液滴。而振動幅度為 $1\ \mu\text{m}$ 以及振動頻率為 200k 的案例所出現的衛星液滴均是多而碎裂的。

在殘留液體方面，由於噴射過程中我們發現會有液體在噴口處殘留，而所殘留的液體將會對下次的噴射有所影響，因此我們觀察殘液情形後分析如下，由於模型設計為 2D 軸對稱模型，因此以下分析是以噴口處殘留面積作比較，整體黏滯體積則是將上述所比較的殘留面

積作環積分可得之。我們發現只有在接觸角低於 70° 下才有殘留液體，其餘 7.1° 、 30° 與 50° 皆有殘留的情形。由於我們所使用的物理模型為 2D 軸對稱，因此以黏滯面積直接作比較，如表 4-14 所示。此外，工作流體噴出速度最快的流道 a 則是在 7.1° 以上任何接觸角皆沒有液體殘留。如圖 4-23 所見，當振幅提高，速度較大的情形液體殘留較少；而速度最慢的流道 f 由於噴出的速度較慢，因此黏著於噴孔片上的液體較多。由於振幅提高時，會使得工作流體受到較大的慣性力，降低表面附著力的影響，因此在相同接觸角時，速度較快的噴孔會殘留較少的工作流體。



第五章 結論與未來展望

5-1 結論

本文針對噴孔片中不同流道曲率與接觸角變化來分析噴射行為與殘液現象，在不同設計參數下經數值模擬計算以探討分析噴射過程現象，詳細過程在上章已有討論及敘述，在此歸納以下結論：

(1) 縮小噴孔的孔徑，會使主液滴的體積下降，速度會上升；

提高噴孔的振幅，會使主液滴的體積下降，速度上升，斷

裂時間提早；提高接觸角角度會使主液滴的體積下降，速

度上升，斷裂時間則在高接觸角時較低；提高噴孔片的振

動頻率，會使主液滴的體積下降，速度上升，斷裂時間提

早。

(2) 若是考慮提高空間解析度，則主液滴的體積需縮小，直線

流道所產生的主液滴最小，但卻帶有太多衛星液滴，因此

考慮衛星液滴個數的情形下，三次曲線流道是較佳的選

擇。

(3) 此外，若加上表面親疏水性的處理，則疏水性比親水性來

的好，除了有較快的飛行速度外，也有較小的主液滴體積

與較快的斷裂時間，也可以減少殘留液體的影響。

5-2 未來展望

本文數值模擬中，重視的是不同曲率的流道如何影響噴液的行為，也加入了不同振幅、頻率與親疏水性的邊界條件來觀察是否對噴液行為有所影響，並沒有考慮到噴孔片的材料性質與流體性質不同是否會有影響。例如改變噴孔片的材質、流體的黏滯係數等。此外本文的模型是採用 2D 軸對稱，因此設計的噴孔呈現圓形，或許未來可以透過 3D 的模型來討論不同噴孔形狀以及孔與孔之間排列的疏密度會否對液滴噴射系統有所影響，這些種種的問題都是未來值得去探討的。



Reference

- [1] I. Endo, Y. Sato, S. Satio, T. Nakagiri, S. Ohno, and Canon, Inc., "Bubble Jet Recording Method and Apparatus in Which a Heating Element Generates Bubbles in Multiple Liquid Flow Paths to Project Droplets," U.S. Pat. 4 740 796, Apr. 1988.
- [2] B.J. Keefe, M.F. Ho, K.J. Courian, S.W. Steinfield, W.D. Chiders, E.R. Tappor, K. E. Trucba, T.I. Chapman, W.R. Knight, J.G. Mortz, and Hewlett-Packard Company, "Inkjet Printhead Architecture for High Speed and High Resolution Printing," U.S. Pat. 5 648 805, Oct. 6, 1994.
- [3] F.G. Tseng, C. Linder, C.J. Kim, and C.M. Ho, "Control of Mixing with Micro-Injectors for Combustion Application," in Proc. MEMS, ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 59, DSC, Atlanta, GA, Nov. 1996, pp.183-187.
- [4] M. Fahndrich, B. Hochwind, and A. Zollner, "Fluid Dynamics in Micro Dosing Actuators," in Tech. Dig. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95) Stockholm, Sweden, June 1995, pp.295-298
- [5] S. Sakai, A. Kobayashi, T. Naka, S. Yonekubo, T. Mitsuzawa, S. Shinada, and Seiko Epson Corporation, "Inkjet Recording Head," European Patent no. 0 573 055A2, April 1993.
- [6] S. Hirata, T. Ishii, H. Matoba, and T. Inui, "An Ink-Jet Head Using Diaphragm Micro-Actuator," in Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, San Diego, CA, Feb. 1996, pp. 418-423.
- [7] X. Zhu, E. Tran, W. Wang, E. S. Kim, and S. Y. Lee, "Micromachined Acoustic-Wave Liquid Ejector," in Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, June 1996, pp.280-282.
- [8] S. Kamisuki, T. Hagata, C. Tezuka, Y. Nose, M. Fujii, and M. Atobe, "A Low Power, Small, Electrostatically-Driven Commercial Inkjet Head," in Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System, Heidelberg, Germany, Jan. 1998, pp.63-68.
- [9] P. H. Chen, W. C. Chen and S. H. Chang, "Bubble Growth And Ink Ejection

- Process of a Thermal Ink jet Printhead,” International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39, No. 6, 1997, pp.683-695.
- [10] Y. Erna, H. Fujimoto, T. Amana, and Rohm Co., Ltd., “Inkjet Print Head and Inkject Printer,” U. S. Pat. 5 541 603, Aug. 1993.
- [11] F. G. Tseng, C. J. Kim, and C. M. Ho, “A High-Resolution High-Frequency Monolithic Top-Shooting Microinjector Free of Satellite Drop-Part1: Concept, Design, and Model,” Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 11, 2002, pp. 427-436.
- [12] W. T. Pimbley, “Drop Formation from a Liquid Jet: A Linear One-dimensional Analysis Considered as a Boundary Value Problem,” IBM Journal of Research and Development, 20, 1976, pp.148-156.
- [13] S. A. Curry, and H. Protig, “Scale Model of an Ink Jet,” IBM Journal of Research and Development, 21, 1977, pp.10-20.
- [14] J. E. Fromm, “Numerical Calculations of the Fluid Dynamics of Drop-on Demand Jets,” IBM J. Res. Develop, 28, No.3, 1984, pp.323-333.
- [15] R. L. Adams, and J. Roy, “A One-dimensional Numerical Model of a Drop-on-Demand Ink Jet,” Journal of Applied Mechanics, 53, No.1, 1986, pp.193-197.
- [16] A. Asai, T. Hara, and I. Endo, “One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers,” Japanese Journal of Applied Physics, 26, 1987, pp. 1794-1801.
- [17] T. W. Shield, D. B. Bogy, and P. E. Talke, “Drop Formation by DoD Ink-Jet Nozzles : A Comparison of Experiment and Numerical Simulaton,” IBM J. Res. Develop, 31, No.1, 1987, pp.96-110.
- [18] A. Asai, “Three-dimesional Calculation of Bubble Growth and Drop Ejection in a Bubble Jet Printer,” ASME Journal of Fluids Engineering, 114, No.4, 1992, pp.638-641.
- [19] P. H. Chen, W. C. Chen, P. P. Ding, and S. H. Chang, “Drop Formation of a

- Thermal Sideshooter Inkjet Printhead,” *International Journal of Heat and Fluid Flow* 19, 1998, pp.382-390.
- [20] P. H. Chen, W.C. Chen and S. H. Chang, “Visualization of Drop Ejection Process of a Thermal Bubble Ink jet Printhead,” *Proceedings of The First Pacific Symposium on Flow Visualization and Image 1*, 1997, pp.132-137.
- [21] P. H. Chen, H. Y. Peng, H. Y. Liu, S. L. Chang, T. I. Wu, and C. H. Cheng., “Pressure Response and Droplet Ejection of a Piezoelectric Inkjet Printhead,” *International Journal of Mechanical Sciences* Vol. 41, No.2, 1999, pp.235-248.
- [22] C. Rembe, S. Wiesche, and E. P. Hofer, “Thermal Ink jet Dynamics : Modeling, Simulation, and Testing,” *Microelectronics Reliability* Vol. 40, No.3, 2000, pp.525-532.
- [23] T. M. Liou, S. W. Chau, S. C. Chen, and K. C. Shih, “Three-dimensional Simulations of The Droplet Formation During The Inkjet Printing Process,” *International Communications in Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No.8, 2002, pp.1109-1118.
- [24] J. T. Yeh, “A VOf-FEM and Coupled Inkjet Simulation,” *Proceedings of ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2001-18182*, New Orleans, LA, 2001.
- [25] J.C. Yang, C. L. Chiu, C. L. Wu, C. T. Chen, H. L. Chen, M. D. Yang, C. Y. Mo, C. B. Lo, and C. J. Chen, “The Simulation of The Viscosity and Surface Tension for The Inkjet Printhead,” *IS&Ts NIP19:International Conference On Digital Printing Technologies*, 2003.
- [26] J. D. Yu, S. Sakai, and J. A. Sethian, “A Coupled Level Set Projection Method Applied to Ink Jet Simulation,” *Interfaces and Free Boundaries* 5, 2003, pp.459-482.
- [27] H. C. Wu, W. S. Hwang, and H. J. Lin, “Development of a Three-Dimensional Simulation System for Micro-Inkjet and Its Experimental Verification,” *Material Science and Engineering A* 373, 2004, pp.268-278.
- [28] A. S. Yang. J. C. Yang, and M. C. Hong, “Droplet Ejection Study of a Picojet

- Printhead,” J. Micromech. Microeng. 16, 2006, pp.180-188.
- [29] B.A. Strayer, and D. Dunn-Rankin, “Toward a Control Model for Manipulating the Breakup of a Liquid Jet,” Atomization and Sprays 11, 2001, pp.415-431.
- [30] 沈聖智，王郁人，吳泰鋒，陳易呈，李聰瑞，“微機電技術應用於吸入式霧化器之研發”，機械工業雜誌(Vol. 269)，2005, pp. 77-88.
- [31] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, “A Continuum Method for Modeling Surface Tension,” Journal of Computational Physics 100, 1992, pp.335-354.
- [32] D. B. Kothe, W. J. Rider, S. J. Mosso, and J. S. Brock, “Volume Tracking of Interfaces Having Surface Tension in Two and Three Dimensions,” AIAA paper 96-0859, 1996.
- [33] 殷孟雲，“噴墨印表機設計原理”，全華科技圖書股份有限公司，2005, pp.2-10,13



表附錄

表 2-1 模擬模型的幾何尺寸

	數值範圍
源項流場尺寸 (μm)	10000*10000
源項工作流體直徑 (μm)	8000
源項流場壓力 (N/m^2)	100000
噴口外流場尺寸 (μm)	12*400
噴口外流場壓力 (N/m^2)	100000
震盪片厚度 (μm)	30
震盪片內噴口直徑 (μm)	80
震盪片外噴口直徑 (μm)	4
震盪振幅 (μm)	0.25
震盪頻率 (kHz)	100
接觸角角度	7.1° , 70° , 120° , 170°

表 3-1 模擬模型的物理參數

工作流體	water	air
Density (kg/m ³)	1000	1.1614
Kinematic Viscosity (m ² /s)	1.00E-06	1.59E-05
Surface Tension (N/m)	0.0725	
Temperature (K)	300	

表 4-1 驗證案例的幾何尺寸

	數值範圍
源項流場尺寸 (μm)	10000*10000
源項工作流體直徑 (mm)	7.256
源項流場壓力 (N/m^2)	100000
噴口外流場尺寸 (μm)	170*2000
噴口外流場壓力 (N/m^2)	100000
震盪片厚度 (μm)	46
震盪片內噴口直徑 (μm)	111.5
震盪片外噴口直徑 (μm)	34
震盪振幅 (μm)	0.275
震盪頻率 (Hz)	61703
接觸角角度	73°

表 4-2 驗證案例的物理參數

工作流體	water	air
Density (kg/m ³)	1000	1.19
Dynamic Viscosity (m ² /s)	1.00E-03	1.84E-05
Surface Tension (N/m)	0.0727	
Temperature (K)	300	

表 4-3 不同孔徑的體積、速度表

orifice diameter(μm)	Volume(pl)	Velocity(m/s)
14	2.57154	7.799813
24	13.94013	5.48239
34	22.10772	4.173263

表 4-4 主液滴飛行速度時間(m/s)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
0.25(μm)	66.976	30.0023	20.4554	13.2331		
1(μm)	520.048	158.774	126.404	99.392	32.330	20.644

表 4-5 主液滴體積(picoliter)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
0.25(μm)	0.009799	0.0402	0.04422	0.04759		
1(μm)	0.007746	0.03165	0.03173	0.0335	0.05089	0.0556

表 4-6 主液滴斷裂時間(μs)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
0.25(μm)	0.2995	1.17	1.43	1.515		
1(μm)	0.08145	0.496	0.657	0.823	0.7475	1.685

表 4-7 主液滴飛行速度時間(m/s)與接觸角關係表

案例 接觸角	a	b	c	d
7.1°	104.643	30.002	20.455	13.233
70°	105.070	30.466	22.897	16.140
120°	105.081	31.981	24.321	18.487
170°	105.213	34.404	28.643	21.187



表 4-8 主液滴體積(picoliter)與接觸角關係表

案例 接觸角	a	b	c	d
7.1°	0.0098	0.0402	0.0442	0.0476
70°	0.0094	0.0348	0.0403	0.0415
120°	0.0092	0.0332	0.0391	0.0412
170°	0.0086	0.0325	0.0384	0.0392

表 4-9 主液滴斷裂時間(μs) 與接觸角關係表

接觸角 \ 案例	a	b	c	d
7.1°	0.2995	1.17	1.43	1.515
70°	0.314	1.285	1.453	1.515
120°	0.314	1.38	1.4	1.525
170°	0.314	1.1135	1.2	1.43

表 4-10 主液滴飛行速度時間(m/s)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
f_100k	66.976	30.002	20.455	13.233		
f_200k	249.225	77.155	58.298	48.624	3.202	

表 4-11 主液滴體積(picoliter)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
f_100k	0.0098	0.0402	0.0442	0.0476		
f_200k	0.007	0.0337	0.0348	0.0385	0.0298	

表 4-12 主液滴斷裂時間(μ s)結果表

振幅 \ 案例	a	b	c	d	e	f
f_100k	0.2995	1.17	1.43	1.515		
f_200k	0.1575	0.8115	0.8715	1.115	1.076	

表 4-13 衛星液滴個數與接觸角關係表

接觸角 \ 案例	a	b	c	d
7.1°	>10	7	6	2
70°	>10	6	5	2
120°	>10	6	6	3
170°	>10	8	5	5

表 4-14 黏滯面積(μm^2)與接觸角、振幅關係表

接觸角 \ 案例	a	b	c	d	e	f
7.1°	0	0.796	1.238	1.417	1.82	2.2
30°	0	0.597	0.65	0.84		
50°	0	0	0	0.308		
70°	0	0	0	0		
7.1° (1 μm)	0	0.47	0.4437	0.476	0.4835	1.355

圖目錄

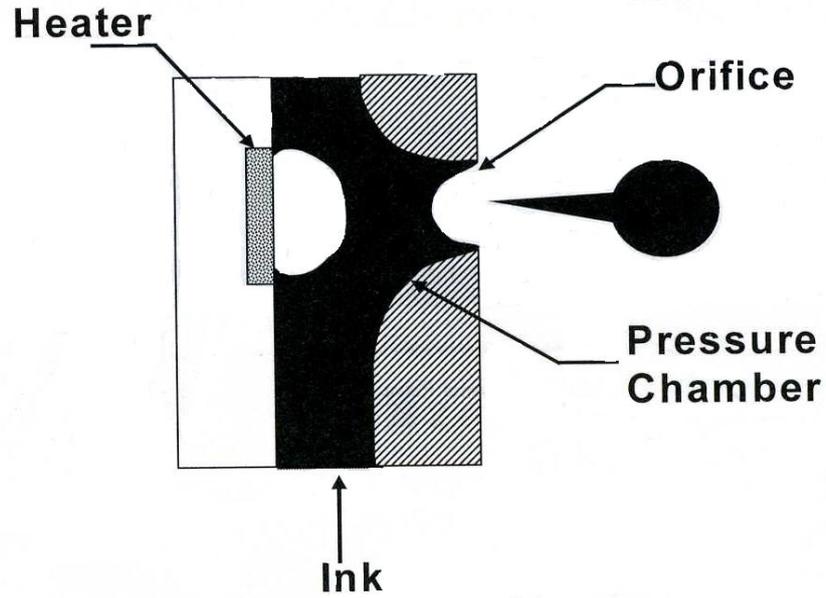


圖 1-1 熱汽泡式微噴液裝置[33]

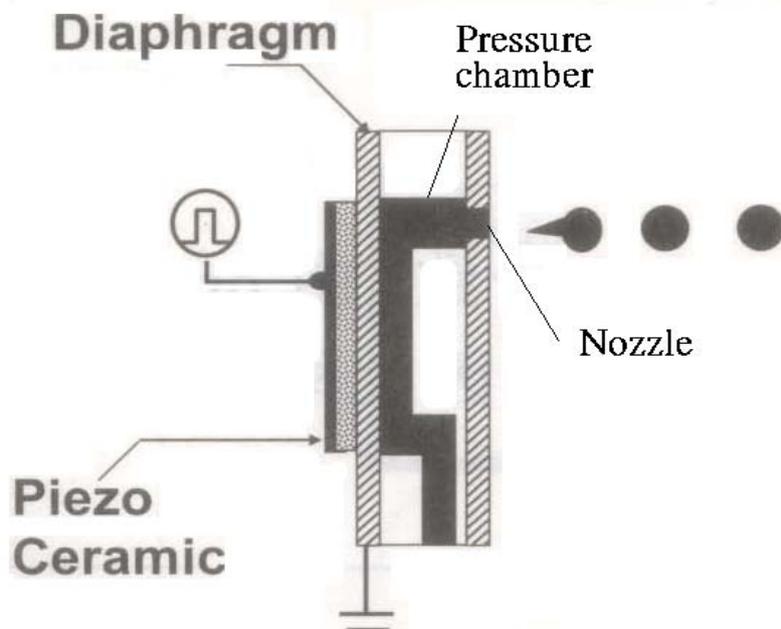


圖 1-2 壓電式微噴液裝置[33]

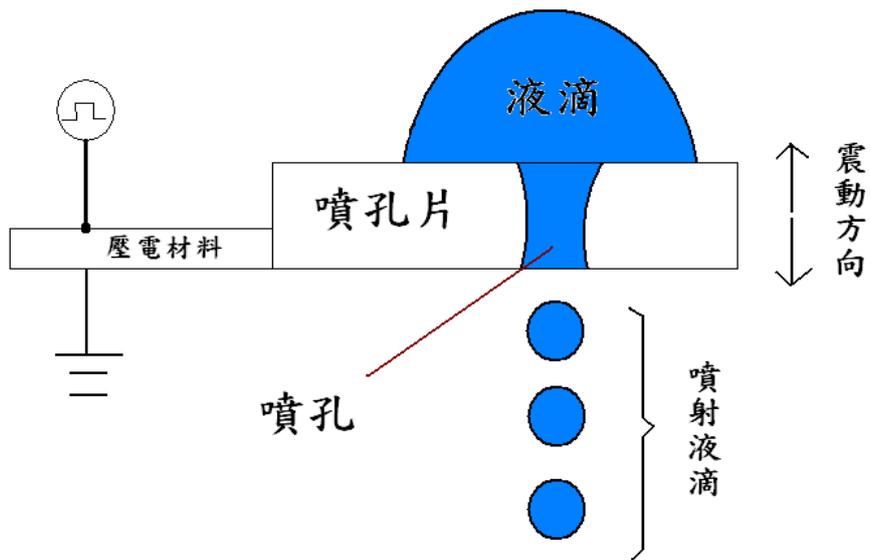


圖 2-1 振動噴孔片模型

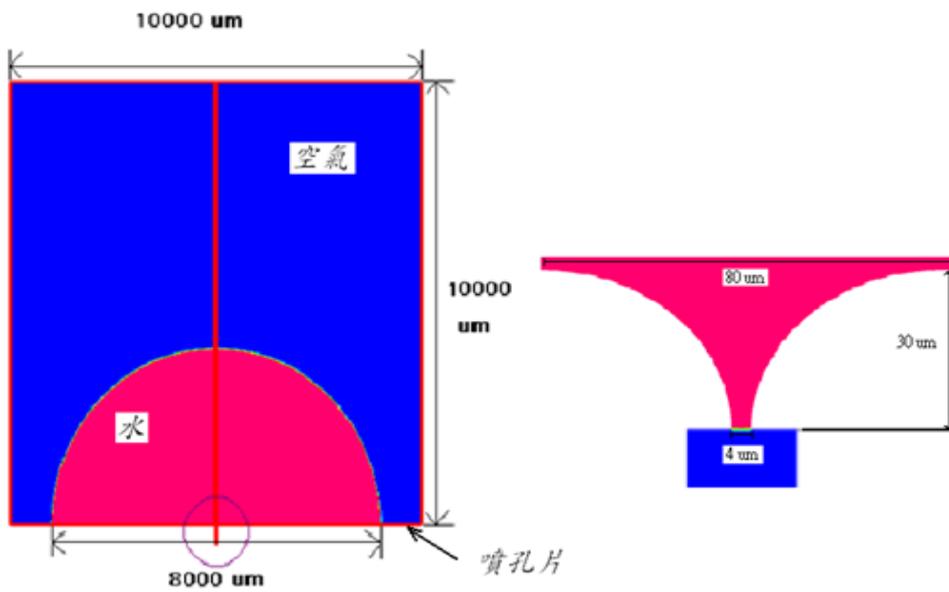


圖 2-2 物理模型圖

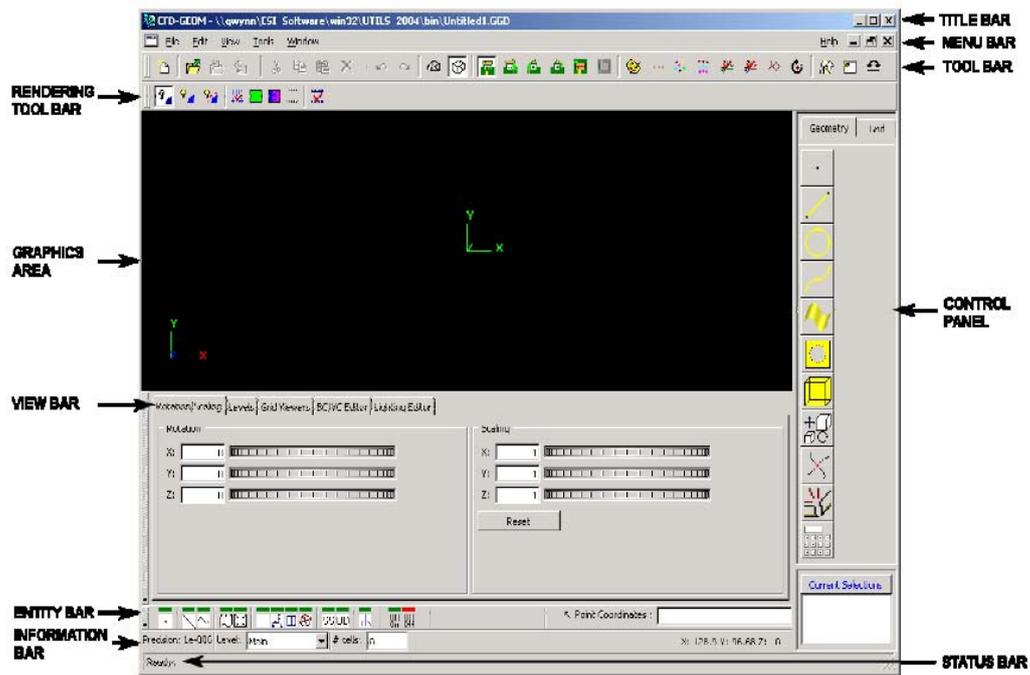


圖 3-1 CFD-GEOM 操作畫面

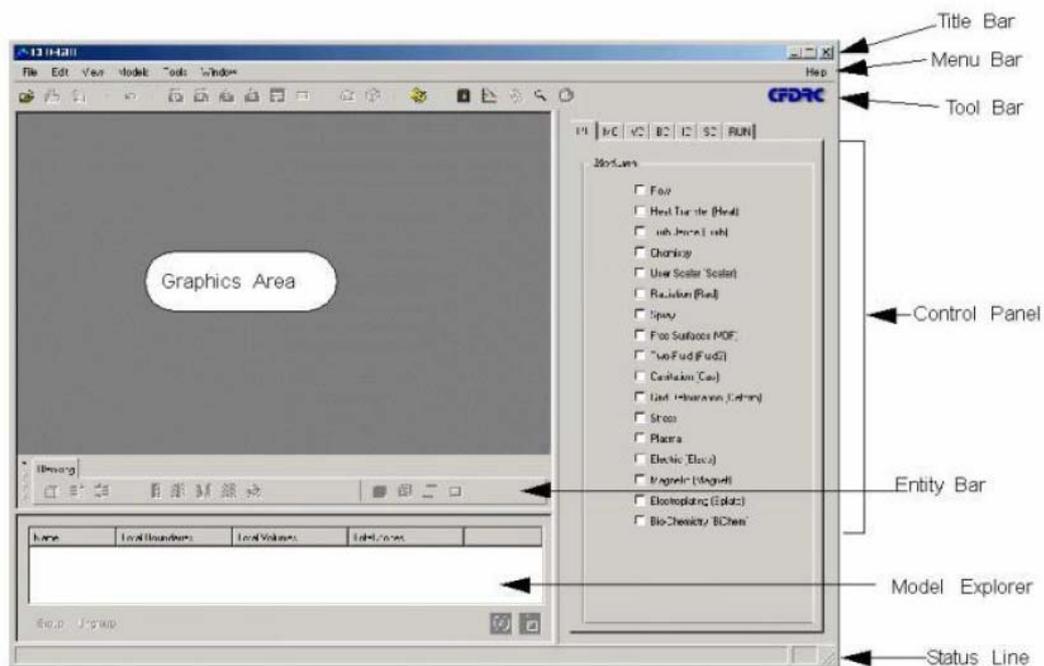


圖 3-2 CFD-ACE 操作畫面

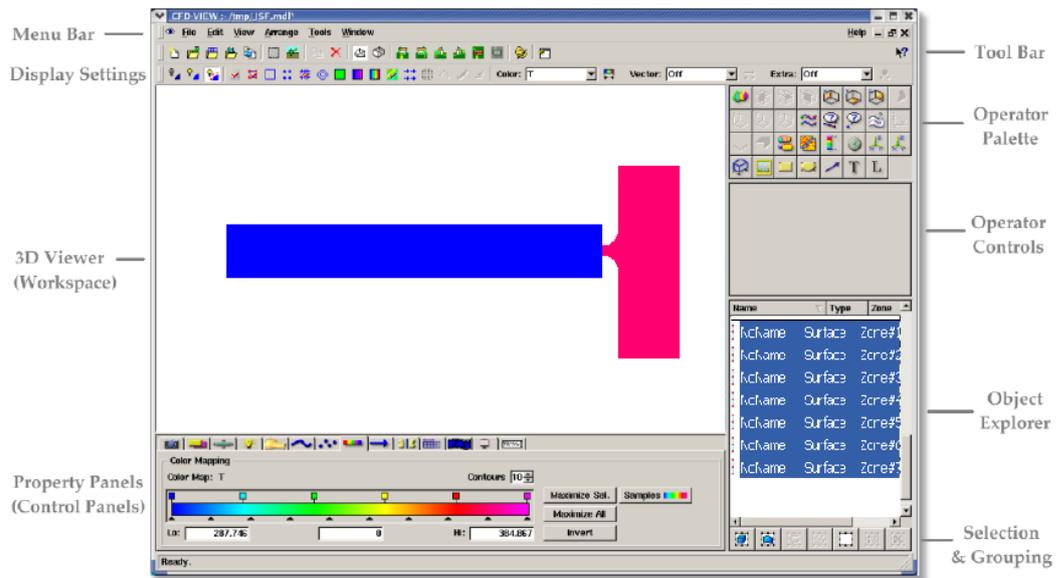


圖 3-3 CFD-VIEW 操作畫面



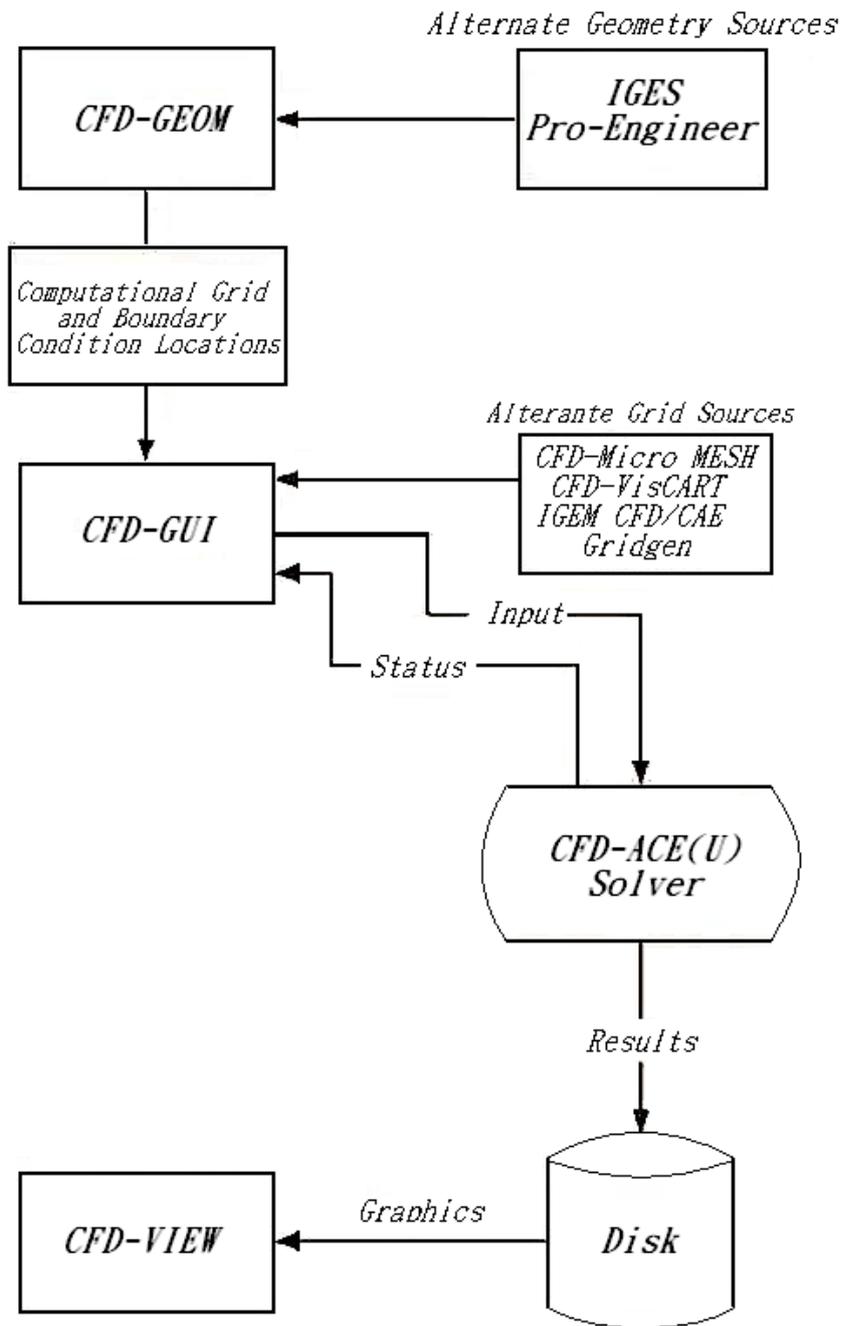


圖 3-4 CFD-RC 的概要使用流程圖

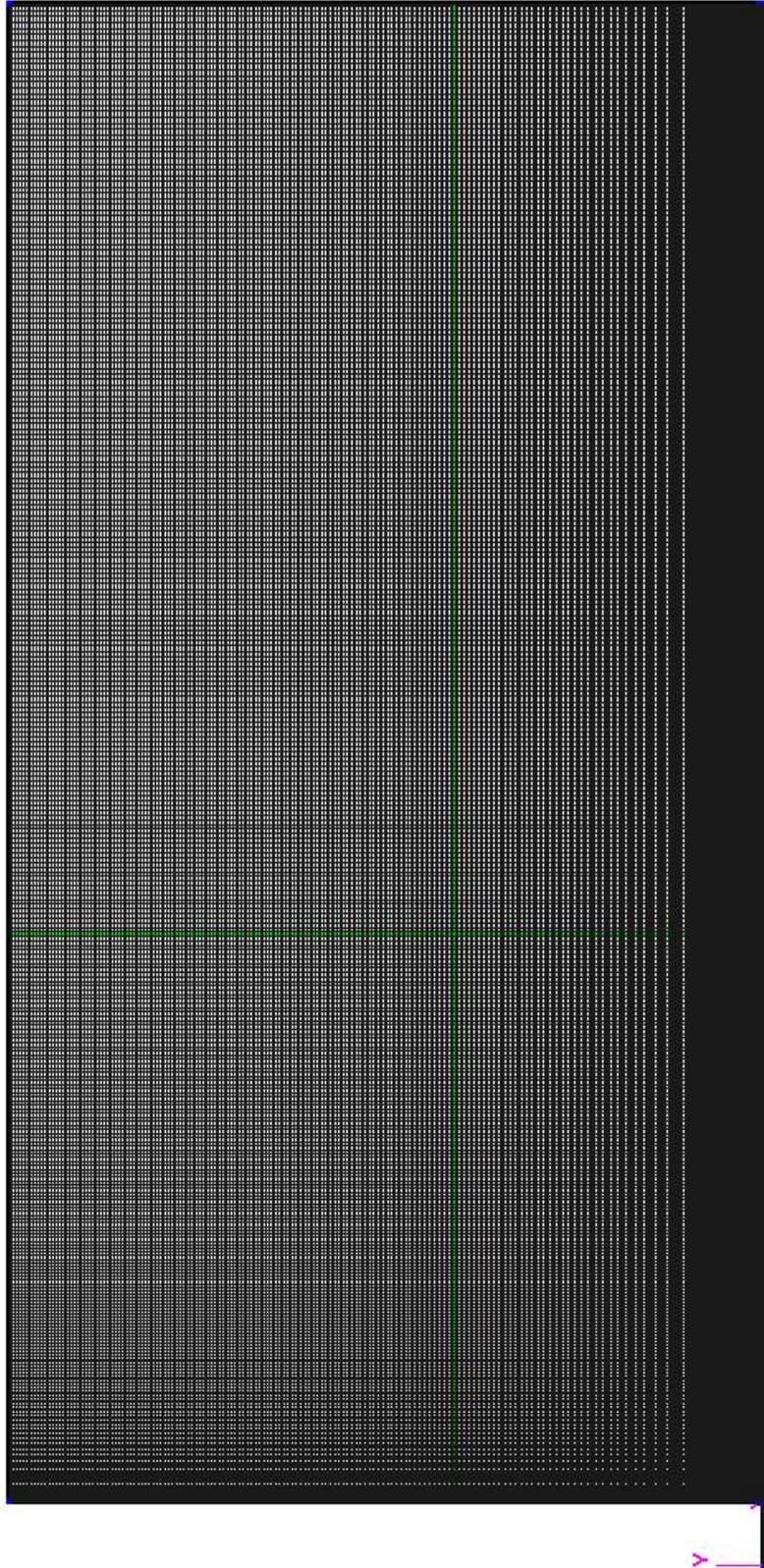


圖 3-5 建立外流場與噴孔片的模型

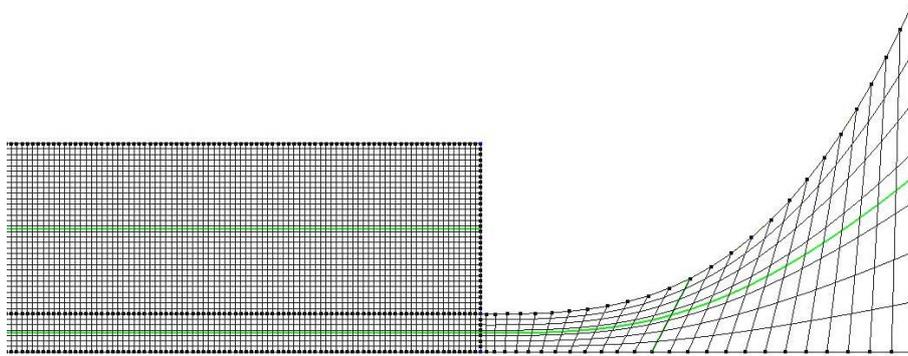


圖 3-6 噴口處與液滴飛行的外流場處等細微部分再做微小分割

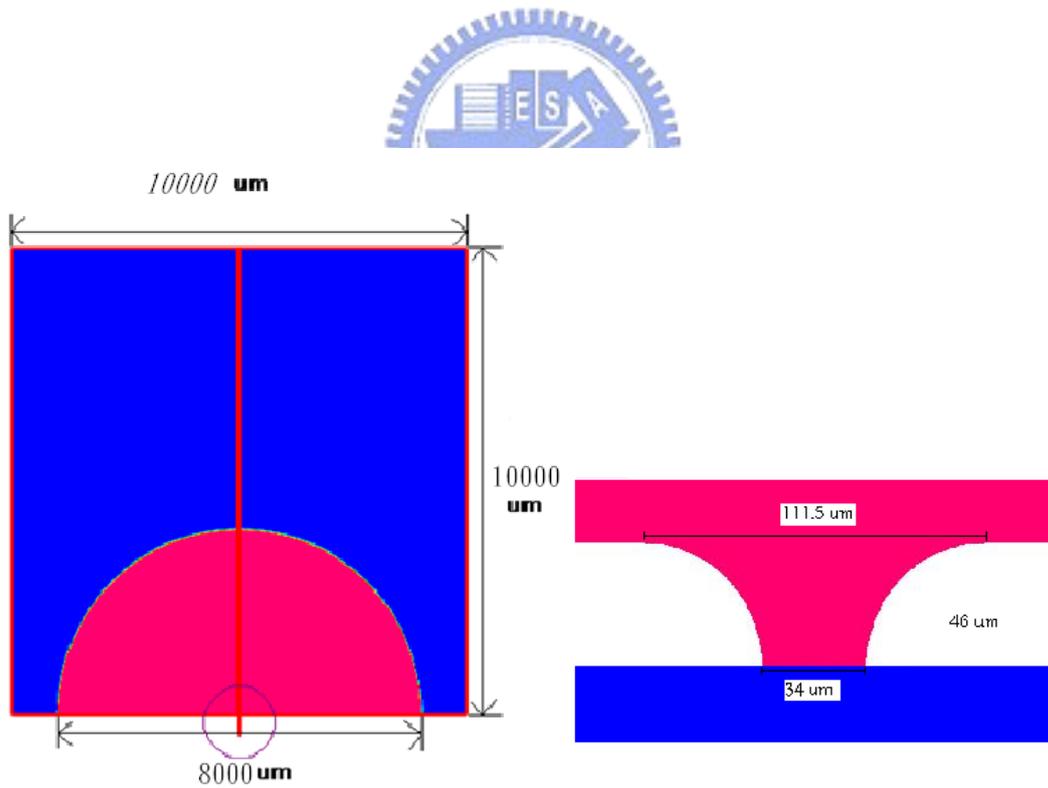


圖 4-1 驗證案例的幾何尺寸

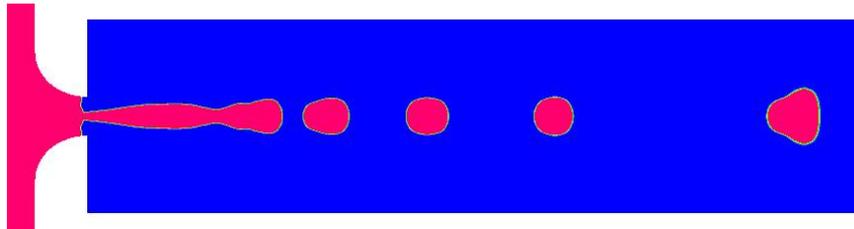
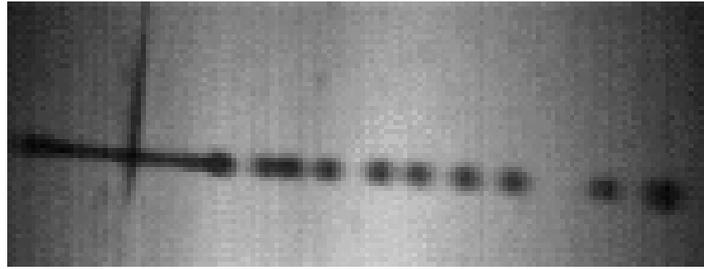


圖 4-2 震盪片孔徑 $34\ \mu\text{m}$ 實驗拍攝與模擬畫面(驗證案例)

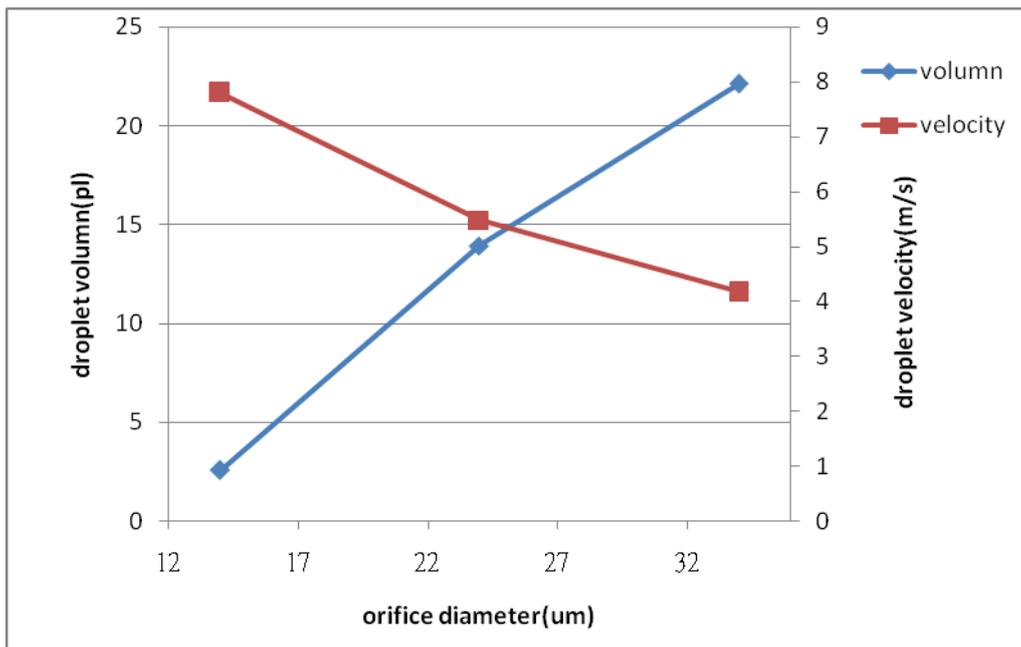


圖 4-3 震盪片噴孔孔徑與液滴體積、速度圖



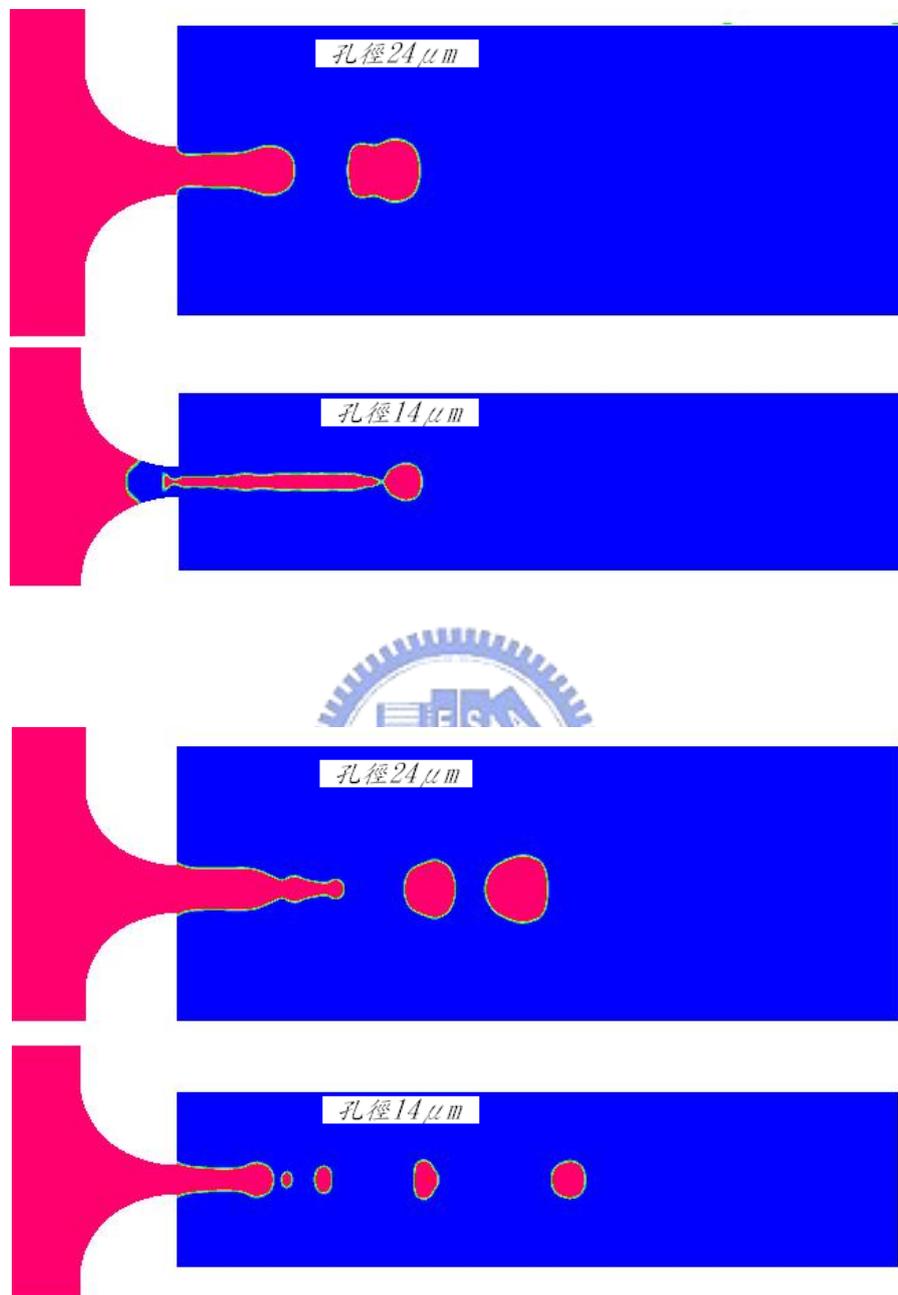


圖 4-4 震盪片噴孔孔徑 $24\mu\text{m}$ 、 $14\mu\text{m}$ 噴射過程圖

Flow channel curvature

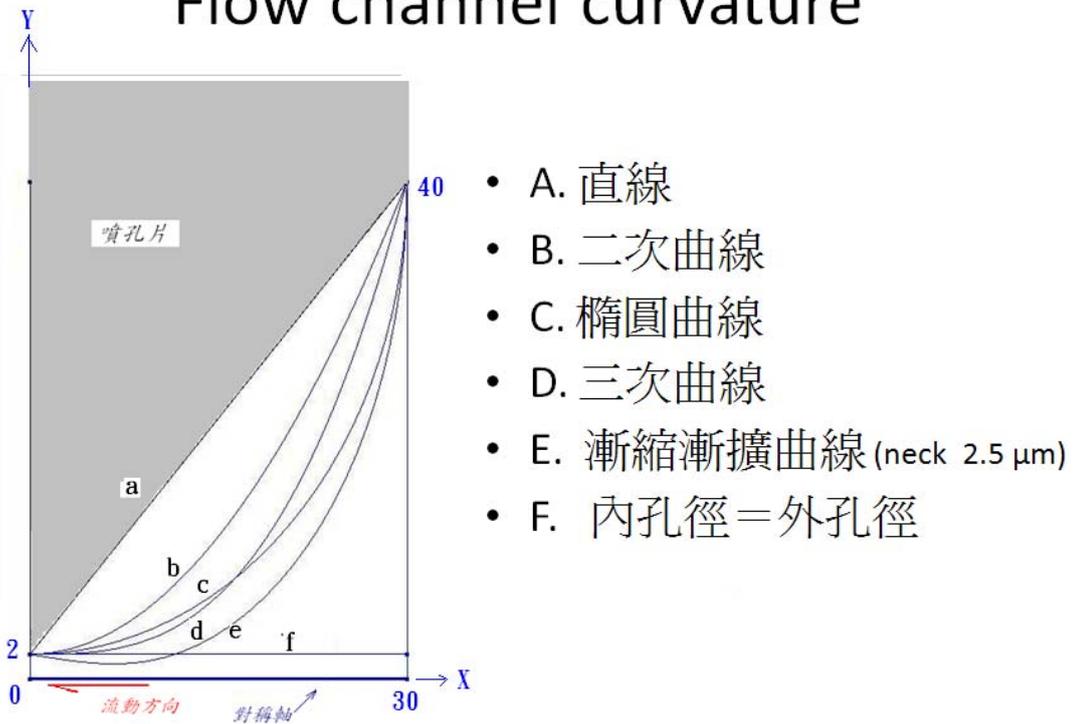


圖 4-5 流道曲率示意圖

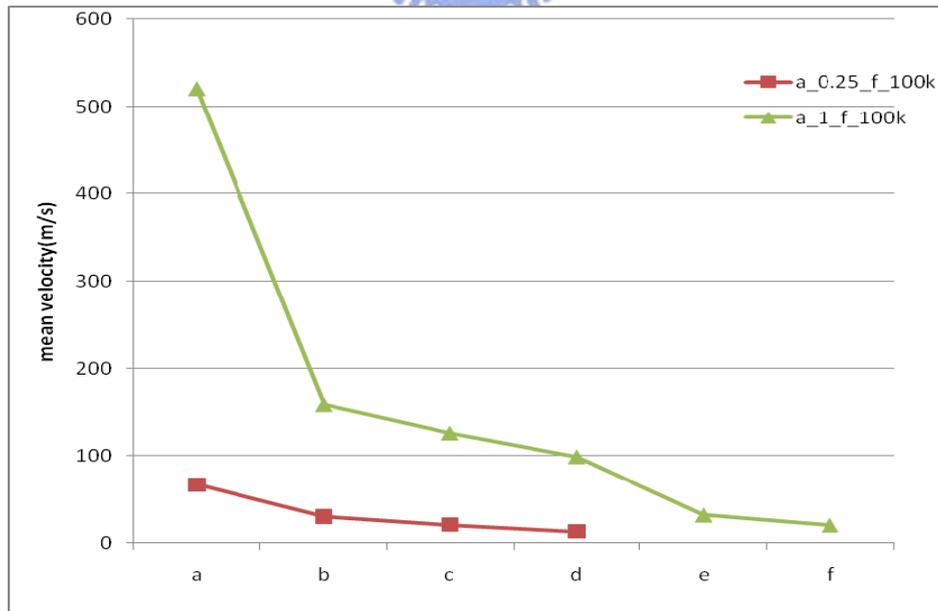


圖 4-6 流道曲率與速度關係圖

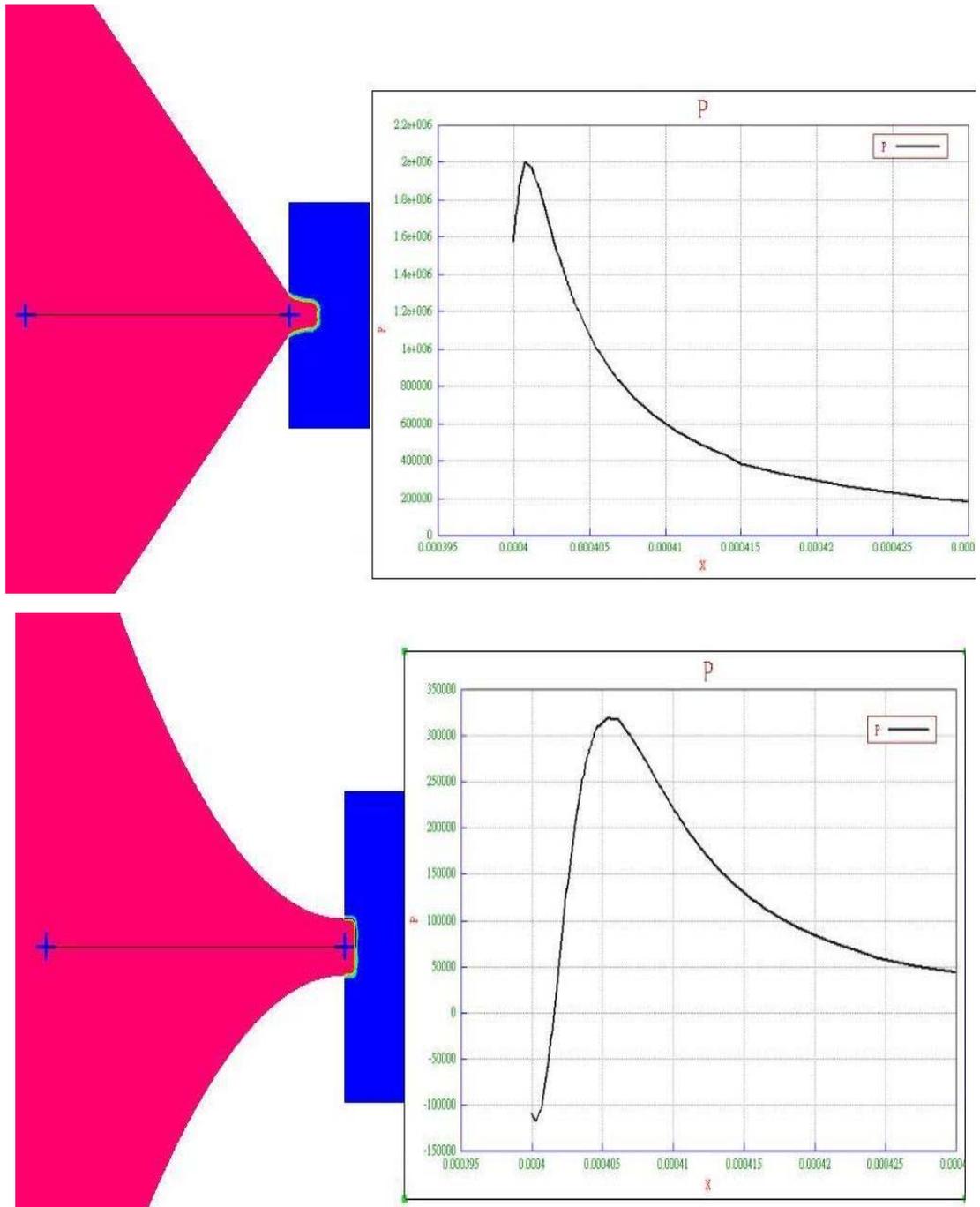


圖 4-7 a 流道與 b 流道壓力分佈圖

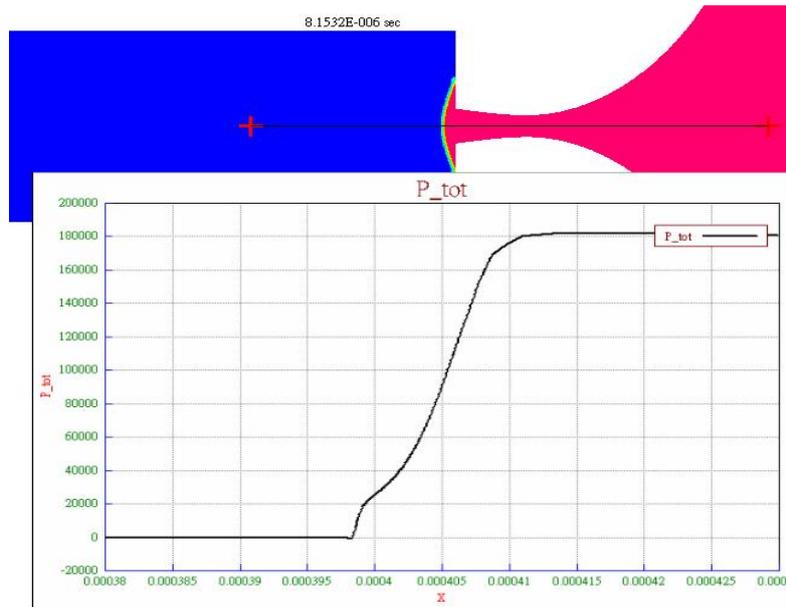


圖 4-8 流道壓力分佈圖(流道 e)

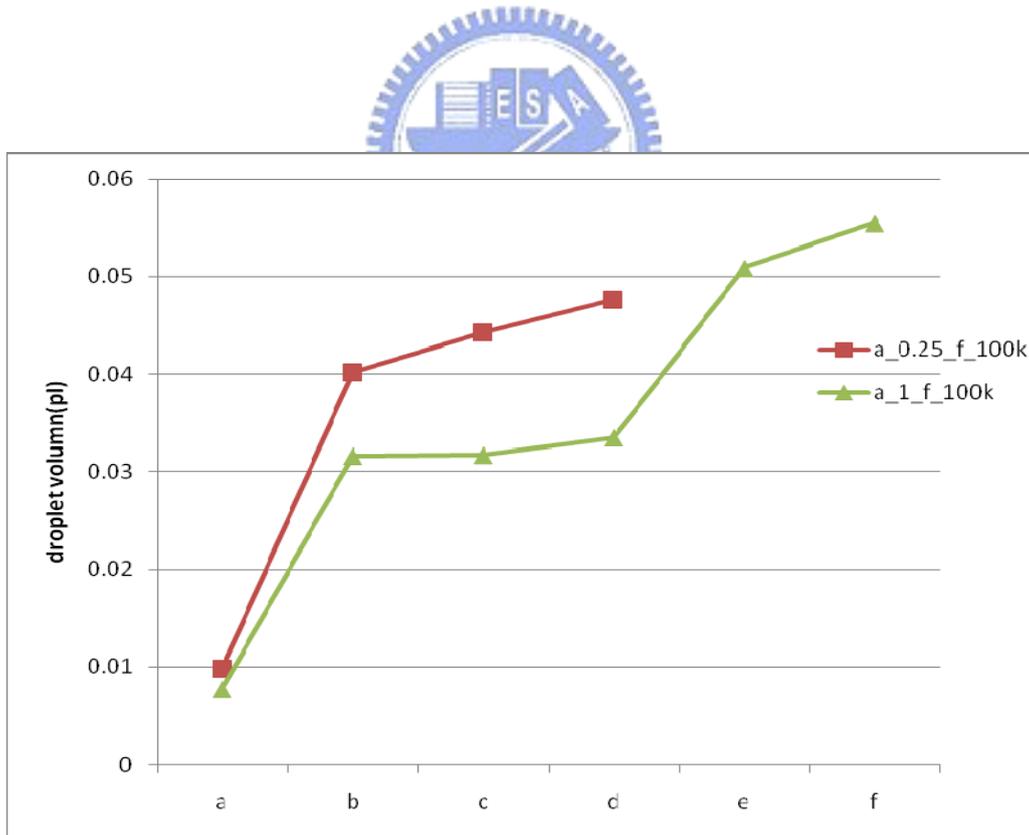


圖 4-9 流道曲率與主液滴體積關係圖

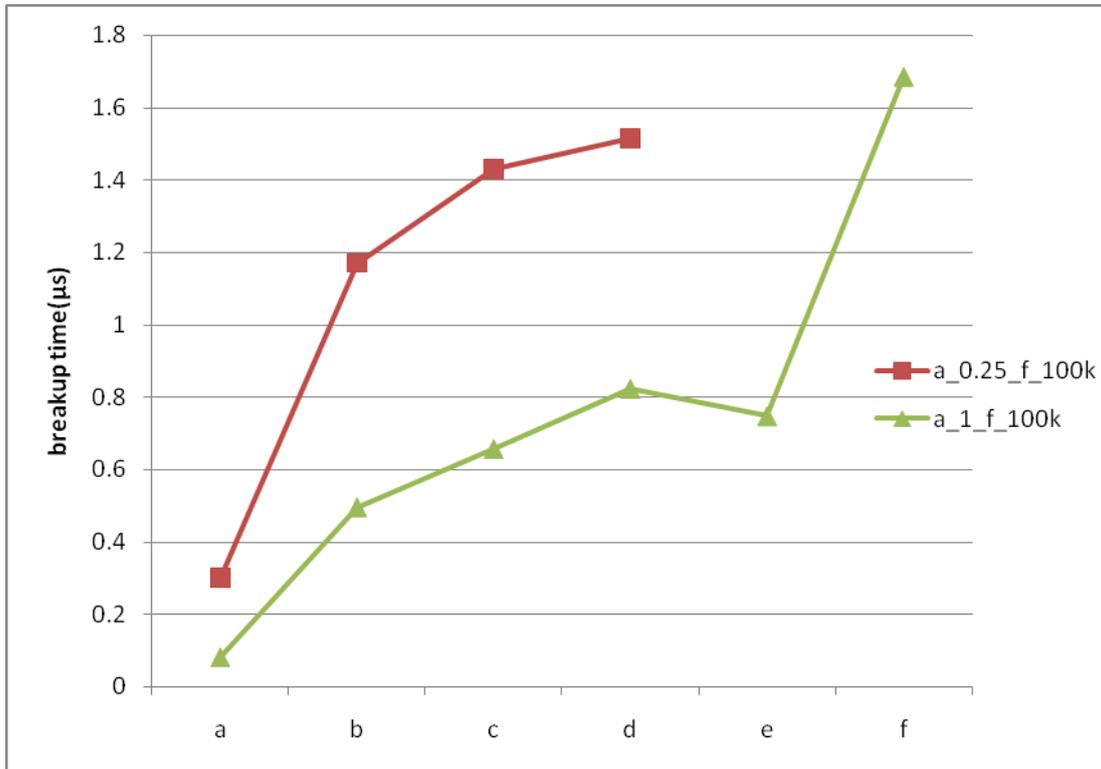


圖 4-10 流道曲率與斷裂時間關係圖

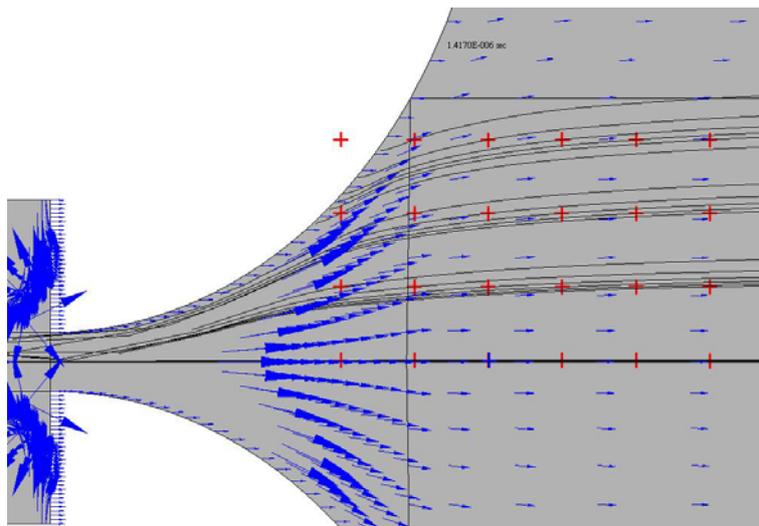
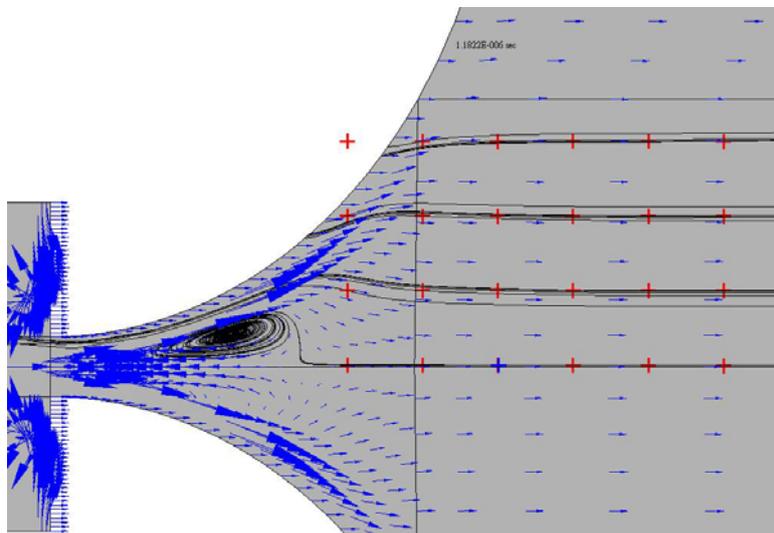
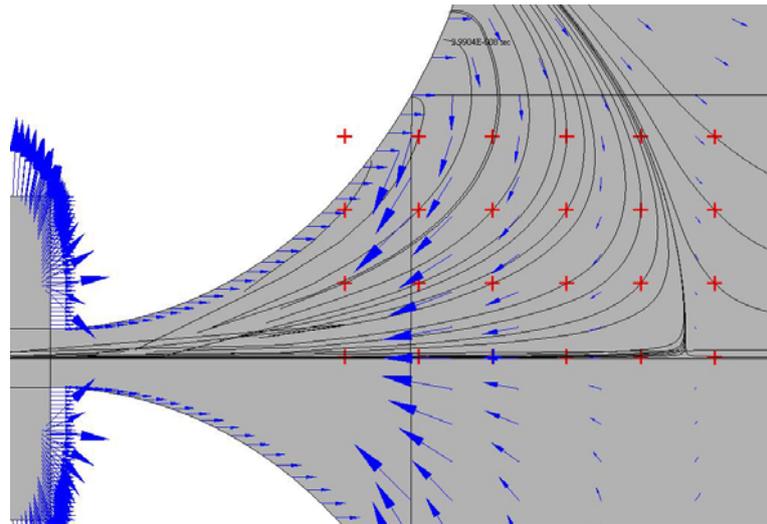


圖 4-11 內流線分佈圖(c 流道)

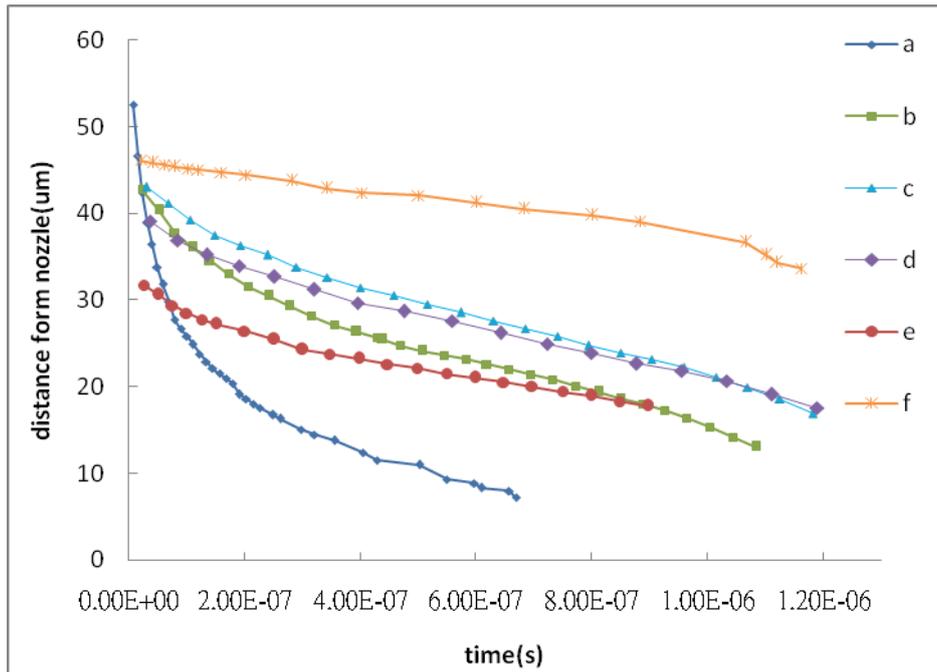


圖 4-12 振動幅度 $0.25 \mu\text{m}$ 的回流位置分佈圖

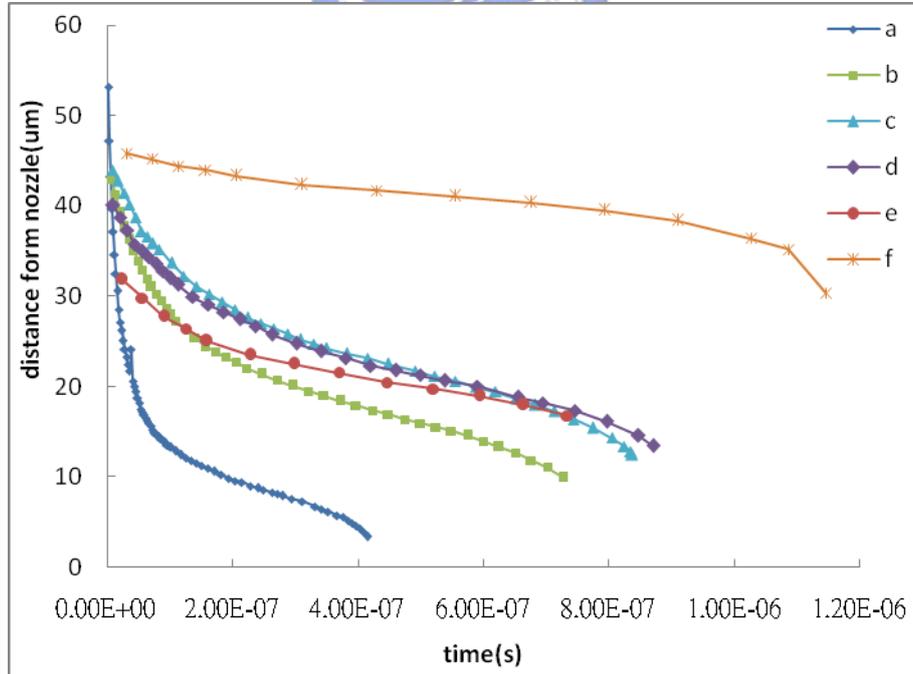


圖 4-13 振動幅度 $1 \mu\text{m}$ 的回流位置分佈圖

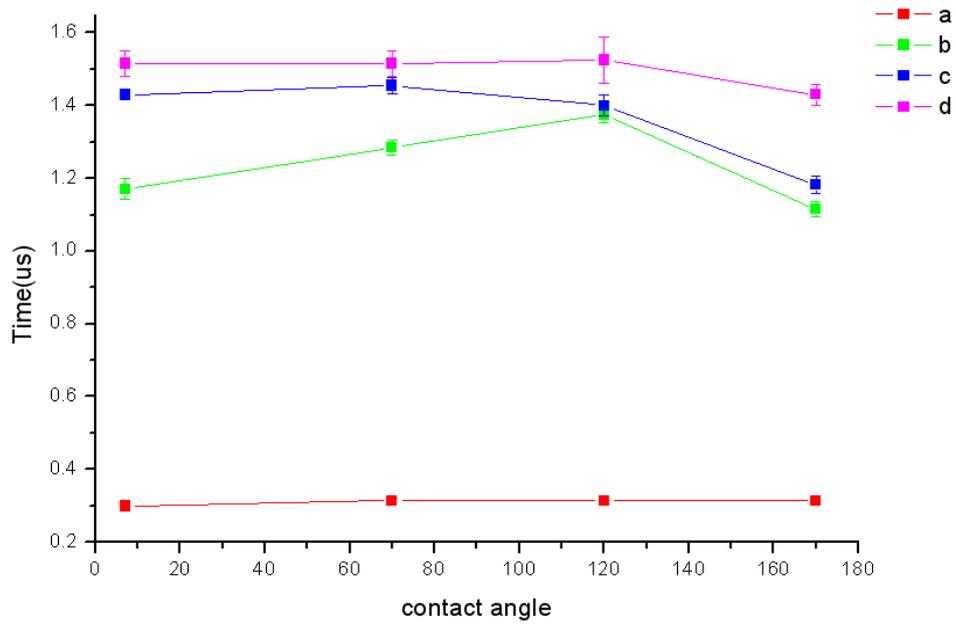


圖 4-14 不同接觸角的主液滴斷裂時間關係圖

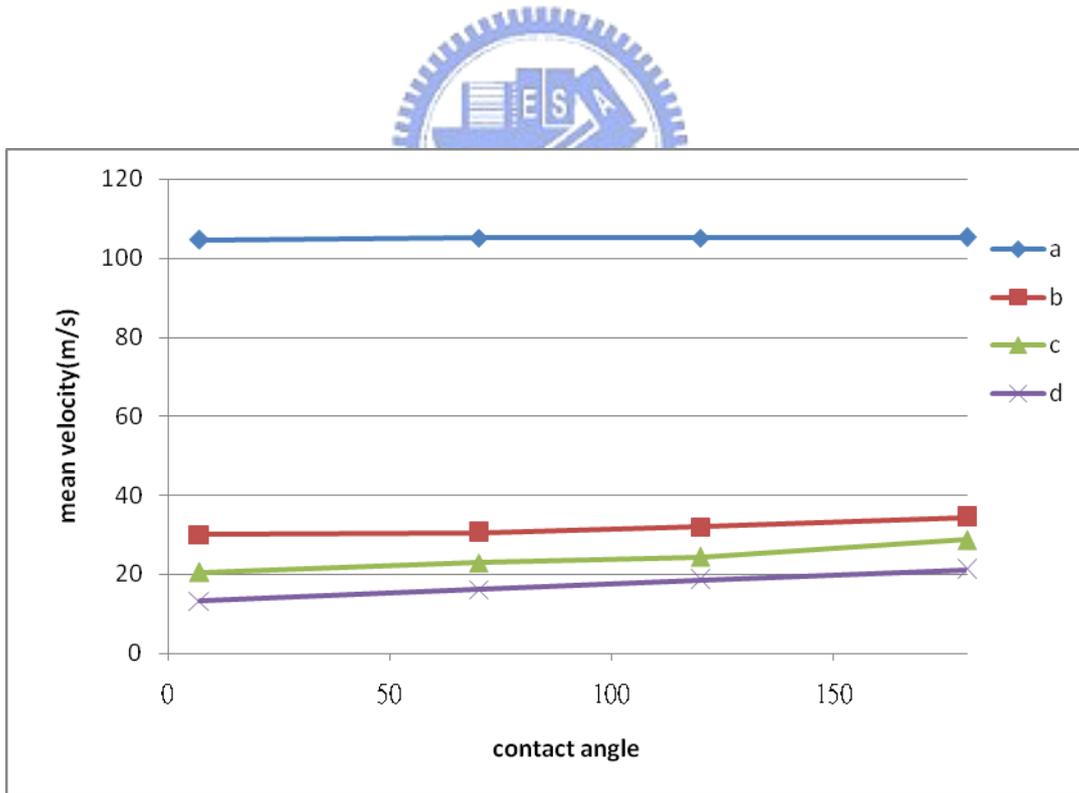


圖 4-15 不同接觸角的主液滴飛行速度關係圖

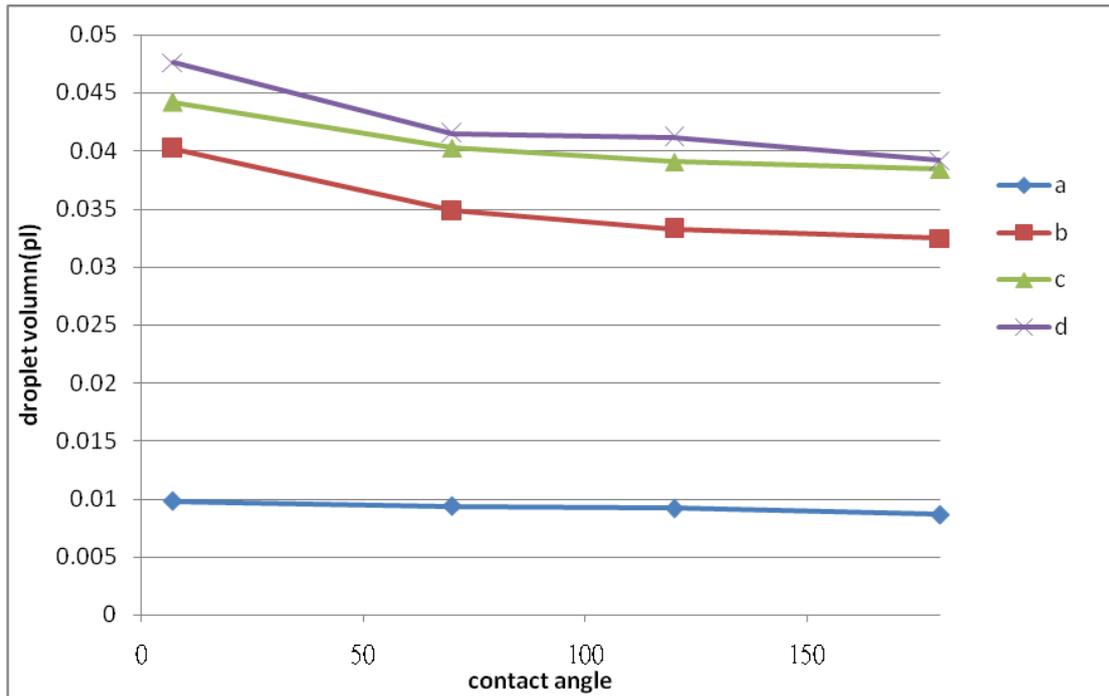


圖 4-16 不同接觸角的主液滴體積關係圖

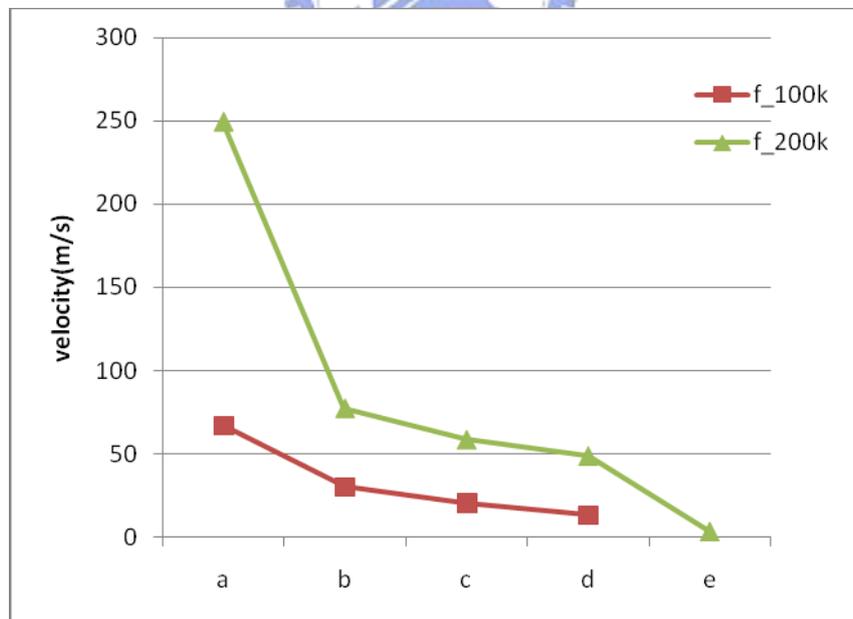


圖 4-17 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴速度關係圖

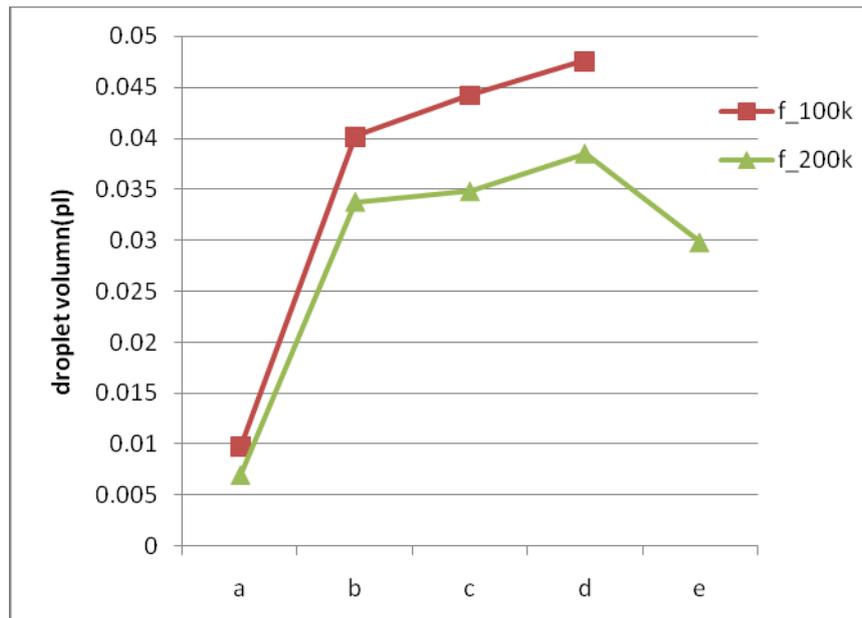


圖 4-18 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴體積關係圖

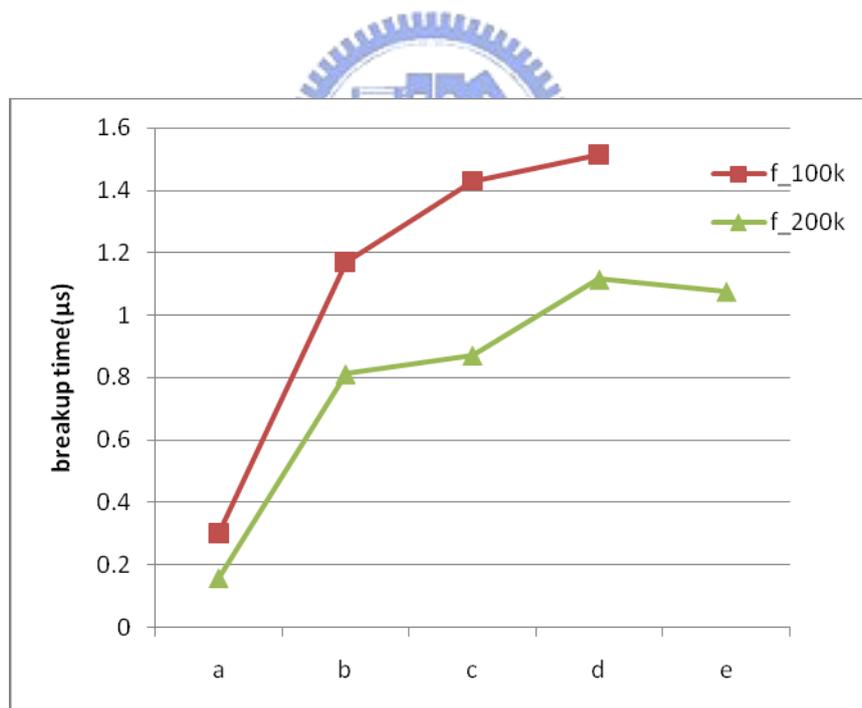


圖 4-19 不同振動頻率下不同曲率流道的主液滴斷裂時間關係圖

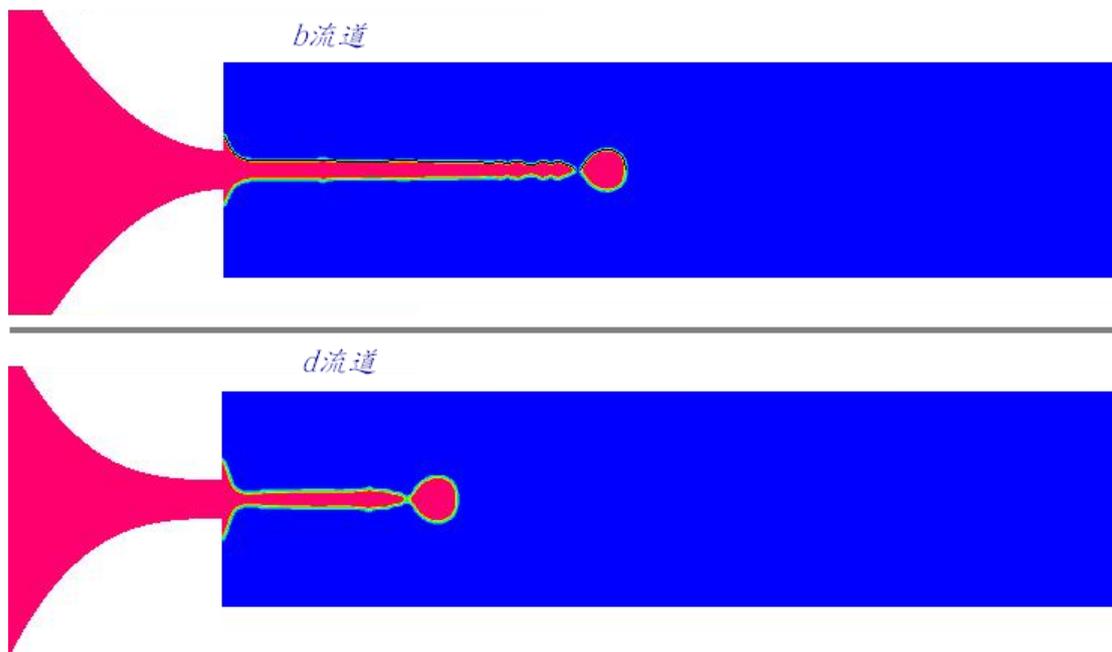


圖 4-20 b 流道與 d 流道的液柱長度比較

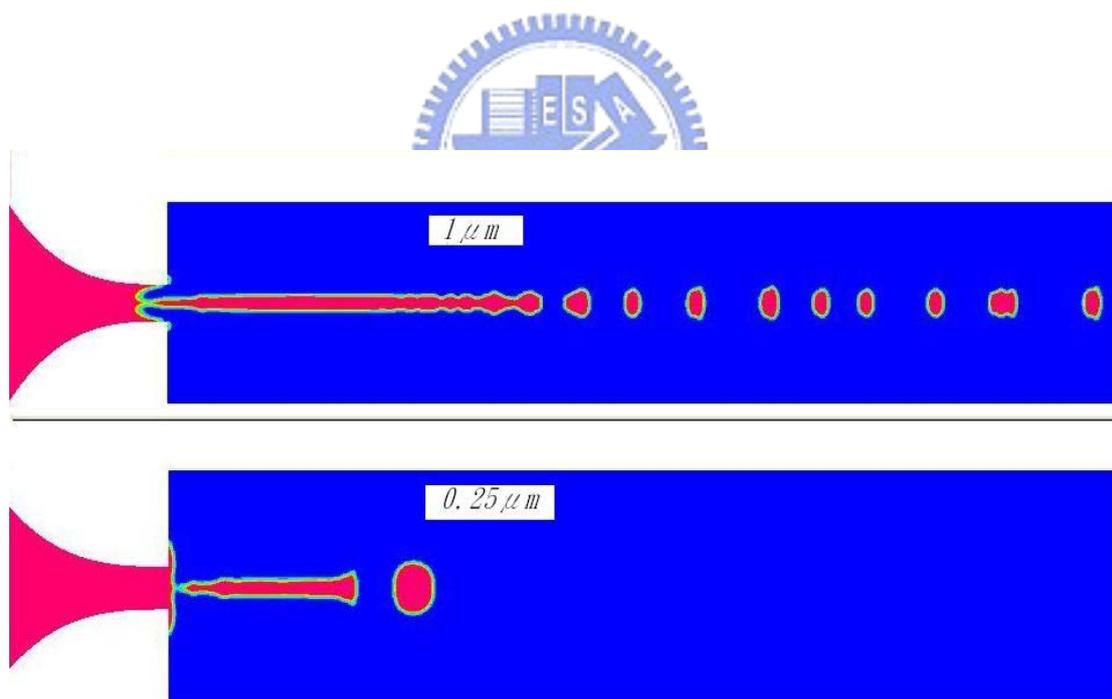


圖 4-21 振動幅度 $1 \mu m$ 與 $0.25 \mu m$ 的斷裂圖(c 流道)

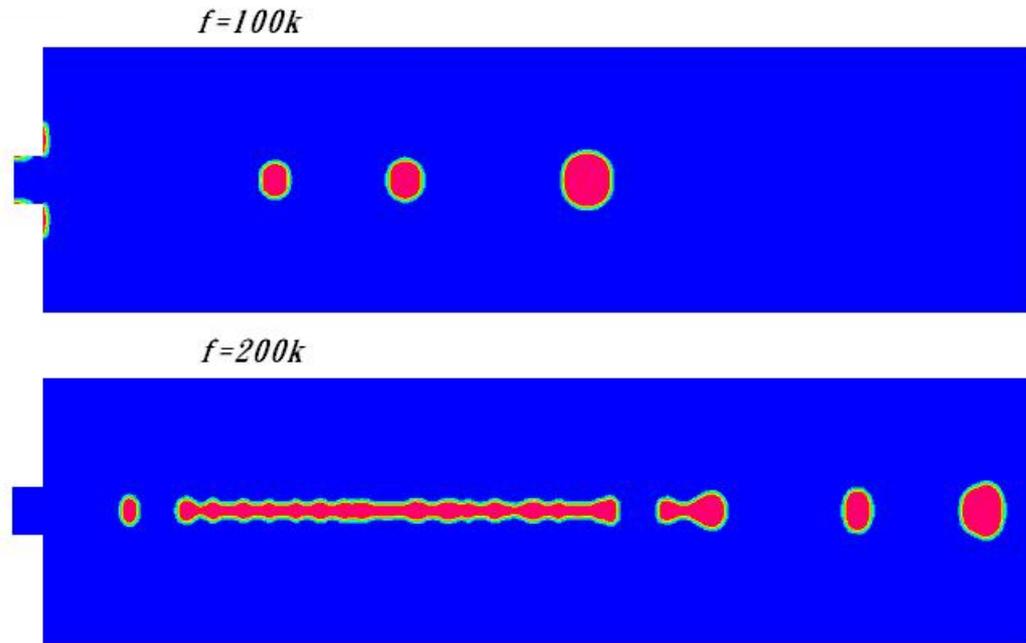


圖 4-22 振動頻率 100k 與 200k 斷裂圖(c 流道)

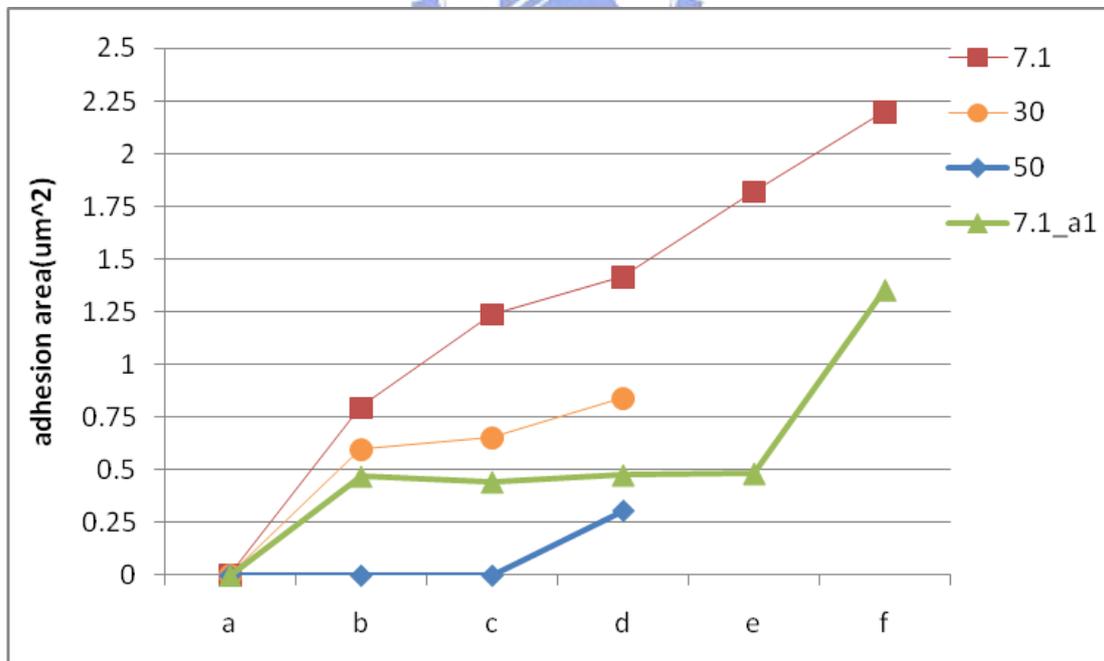


圖 4-23 流道曲率與殘液關係圖