

國立交通大學

應用化學研究所

碩士論文

以 PTT 黏彈模式對共押出進料區塊進行三
維有限元素模擬



Three-Dimensional Flow Simulation of
Coextrusion Feedblock with PTT Viscoelastic
Model

研究生：羅順鴻
指導教授：許千樹
吳建興

中華民國九十八年七月

以 PTT 黏彈模式對共押出進料區塊進行三維有限元素模擬

學生：羅順鴻

指導教授：許千樹教授

吳建興副教授

國立交通大學應用化學研究所碩士班

摘 要

本文旨在使用 Phan-Thien and Tanner 黏彈模型進行雙層共押出進料區塊內流動之三維有限元素模擬，探討共押出製程中之界面包覆，並在進料區塊壁面邊界採取滑動邊界設定。由模擬結果可看出，相對於不滑動邊界，滑動邊界設定使壁面接觸線可在壁面上移動，能有效預測流體界面彎曲變化情形，且不會忽略壁面之影響。本文藉由改變 PTT 黏彈模型中之 ξ 參數探討因第二正向應力差對界面的影響，可明顯看出第二正向應力差對於界面包覆現象之影響極大。同時也藉由改變 PTT 黏彈模型中之 ε 參數探討因伸展黏度對界面的影響，雖然不及第二正向應力差對界面的影響，但仍不能忽視其作用。本文可觀察到第二正向應力差的差值會對界面的形狀造成影響。

Three-Dimensional Flow simulation of coextrusion Feedblock with PTT viscoelastic model

Student : SHUN-HONG LUO

Advisor : Professor Chain-Shu Hsu

Professor Jiann-Shing Wu

Institute of Applied Chemistry
National Chiao Tung University

Abstract

In this study, the 3D finite element simulation of bicomponent coextrusion feedblock with Phan-Thien and Tanner viscoelastic model and slip boundary condition impose at the polymer/polymer/wall contact line were discussed. Results show that in contrast to no-slip boundary conditions, slip boundary conditions would allow displacement of the contact line along the wall and have a more precise prediction of interface distortion without discarding wall effects. The development of secondary flow due to the second normal stress difference is analyzed by varying the parameter ξ in the Phan-Thien and Tanner model, and it is obvious that the second normal stress difference have an great influence on the encapsulation phenomena. We also discuss the development of interface shape by changing the parameter ε which is concern in extensional viscosity ,although it has less influence compaing with the parameter ξ on development of interface shape .

This study shows that the difference of N_2 (DN_2) has influence on the development of interface shape.

誌謝

本論文是在 吳建興教授的悉心指導下完成，在老師的門下，除了學識得到了增長，在研究精神方面，更是為我演示了學習盡在生活當中，活到老學到老的態度，更是令我這個正在研讀碩士的人感到汗顏。而本論文得以完善，必須要感謝口試委員 東海大學化工系的王曄教授、清華大學化工系的張榮語教授、以及交通大學應化系的許千樹教授，在口試中對我論文的提點，讓我得以把缺點與不足的部份補足。而在研讀碩士這兩年期間，學長們(諭徽、柏豪、建超)不僅在學業上幫助許多，在生活上也頗加照顧。最後，必須要感謝父母對我的提攜之恩，可以說沒有他們就不會有現在的我，謹以此文獻給我摯愛的雙親。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
一、緒論	1
1.1 高分子押出與共押出製程	1
1.2 共押出製程問題	4
1.2.1 界面不穩定現象(Interfacial instability)	5
1.2.2 層間不均勻性(Layer-to-layer non-uniformity)	8
1.3 文獻回顧	9
1.3.1 界面不穩定文獻回顧	9
1.3.2 層間不均勻性文獻回顧	11
1.4 研究動機與目的	13
二、理論模式及研究方法	16
2.1 理論模式	16
2.1.1 統御方程式(Governing equation)	16
2.1.2 邊界條件	19

2.1.3	流體自由界面與壁面接觸線(contact line)處理	21
2.1.4	黏彈流體之無因次參數(Dimensionless numbers)	24
2.1.5	界面不穩定(Interfacial instability)分析	24
2.1.6	包覆現象(Encapsulation phenomena)分析	26
2.2	研究方法	29
2.2.1	網格處理	29
2.2.2	葛拉金有限元素法(Galerkin finite element method)	30
2.2.3	三維非線性系統解	31
2.2.4	進程方法(Evolution method)	31
2.2.5	流體自由界面位置計算	32
三、	結果與討論	34
3.1	操作條件	34
3.2	模擬結果分析	36
3.2.1	滑動係數之影響	36
3.2.2	流量比之影響	45
3.2.3	流變參數 ξ 之影響	54
3.2.4	流變參數 ε 之影響	70
四、	結論	85
	參考文獻	87

表 目 錄

表 3-1	PTT 模型流變參數.....	35
表 3-2	滑動係數設定之分析比較.....	37
表 3-3	不同流量比之分析比較.....	40
表 3-4	改變上層 ξ 值之分析比較.....	55
表 3-5	固定 ξ 比設定之分析比較.....	63
表 3-6	改變上層 ε 值之分析比較.....	71
表 3-7	固定 ε 比設定之分析.....	78



圖目錄

圖 1-1	多重分歧管模具(Multi-manifold die)示意圖.....	3
圖 1-2	共押出進料區塊/單歧管模具(Feedblock)示意圖.....	4
圖 1-3	界面不穩定對膜之清晰度影響.....	5
圖 1-4	界面不穩定現象 ^[8] (A)鋸齒形 (B)波浪形.....	6
圖 1-5	鋸齒形(zig-zag)不穩定現象示意圖.....	7
圖 1-6	界面包覆現象示意圖.....	8
圖 1-7	界面包覆發展示意圖.....	9
圖 1-8	界面不穩定時之 TNSD 變化.....	11
圖 1-9	界面包覆階段示意圖 ^[14] (A)初始界面 (B)流體重整 (C)包覆增加.....	12
圖 1-10	高分子塑料於方形流道中之二次流動現象.....	13
圖 2-1	進料區塊(feedblock)幾何形狀.....	19
圖 2-2	使用不滑動(no-slip)壁面假設之流體界面.....	21
圖 2-3	使用線性外插法處理壁面接觸線.....	22
圖 2-4	進料組合區塊匯流處示意圖(流速比 $Q_I : Q_{II} = 13.2 : 1$).....	25
圖 2-5	黏彈流體二次流動(secondary flow)現象.....	27
圖 2-6	雙層流體包覆現象示意圖.....	28
圖 2-7	包覆度(degree of encapsulation)定義.....	29
圖 2-8	進料區塊網格示意圖.....	30
圖 3-1	進料區塊幾何形狀網格圖.....	34
圖 3-2	Polystyrene 之黏度-剪切率關係圖(220°C).....	35
圖 3-3	不同滑動係數下之出口界面包覆度比較圖.....	37
圖 3-4	不同邊界設定下之包覆度比較圖.....	38
圖 3-5	不同邊界下之出口界面位置比較圖.....	38
圖 3-6	不同邊界設定下壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖.....	39
圖 3-7	出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=1\times 10^6$).....	40
圖 3-8	出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=3\times 10^6$).....	40
圖 3-9	出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=6\times 10^6$).....	41
圖 3-10	出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖(滑動係數改變).....	41

圖 3-11	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=1\times 10^6$)	43
圖 3-12	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=3\times 10^6$)	43
圖 3-13	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip}=6\times 10^6$)	44
圖 3-14	沿流動方向之上下層流體 DN_2 變化圖(滑動係數改變)	44
圖 3-15	不同流量比之包覆度比較圖	46
圖 3-16	不同流量比之出口界面位置比較圖	46
圖 3-17	進料區塊流體匯流處之速度向量圖($z=0$)	47
圖 3-18	不同流量比之壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖	48
圖 3-19	出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=15$)	49
圖 3-20	出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=10$)	49
圖 3-21	出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=6$)	50
圖 3-22	出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖(流量比改變)	50
圖 3-23	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=15$)	51
圖 3-24	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=10$)	52
圖 3-25	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=6$)	52
圖 3-26	沿流動方向之上下層流體 DN_2 變化圖(流量比改變)	53
圖 3-27	改變上層流體 ξ 值之界面包覆度比較圖	55
圖 3-28	改變上層流體 ξ 值之出口界面位置比較圖	56
圖 3-29	改變上層流體 ξ 之壁面($z/L=1$)接觸線位置比	56
圖 3-30	出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.52$)	57
圖 3-31	出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.52$)	58
圖 3-32	出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.52/0.52$)	58
圖 3-33	改變上層 ξ 值之出口界面的 DN_2 變化圖	59
圖 3-34	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.52$)	60
圖 3-35	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.52$)	61
圖 3-36	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.52/0.52$)	61
圖 3-37	改變上層 ξ 值之沿流動方向的 DN_2 變化圖	62
圖 3-38	固定 ξ 比值之界面包覆度增加比較圖	63
圖 3-39	固定 ξ 比值之出口界面位置比較圖	64
圖 3-40	固定 ξ 比值之壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖	64
圖 3-41	出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.26$)	65
圖 3-42	出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.39$)	66
圖 3-43	固定 ξ 比值之出口界面的 DN_2 變化圖	66
圖 3-44	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.26$)	67
圖 3-45	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.39$)	68
圖 3-46	固定 ξ 比值之沿流動方向的 DN_2 變化圖	68
圖 3-47	改變上層流體 ε 值之界面包覆度比較圖	71
圖 3-48	改變上層流體 ε 值之出口界面位置比較圖	72

圖 3-49	改變上層流體 ε 之壁面($z/L=1$)接觸線位置比.....	72
圖 3-50	出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=0.5/1.5$)	73
圖 3-51	出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.0/1.5$)	74
圖 3-52	出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.5/1.5$)	74
圖 3-53	改變上層 ε 值之出口界面的 DN_2 變化圖.....	75
圖 3-54	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=0.5/1.5$)	76
圖 3-55	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.0/1.5$)	76
圖 3-56	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.5/1.5$)	77
圖 3-57	改變上層 ξ 值之沿流動方向的 DN_2 變化圖.....	77
圖 3-58	固定 ε 比值之界面包覆度比較圖.....	79
圖 3-59	固定 ε 比值之出口界面位置比較圖.....	79
圖 3-60	固定 ε 比值之壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖.....	80
圖 3-61	出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=0.5/0.5$)	81
圖 3-62	出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.0/1.0$)	81
圖 3-63	固定 ε 比值之出口界面的 DN_2 變化圖.....	82
圖 3-64	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=0.5/0.5$)	83
圖 3-65	沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=1.0/1.0$)	83
圖 3-66	固定 ε 比值之沿流動方向的 DN_2 變化圖.....	84



一、緒論

1.1 高分子押出與共押出製程

押出製程為一主要之高分子塑料加工製程。高分子原料經由熔化(melting)、傳送(transportation)及模具成型(shaping)等步驟之連續製程可得到所要求之產品形狀、熱性質及機械性質等。目前常見的高分子加工方法有押出成型、射出成型、吹壓成型、熱壓成型、發泡成型、壓延加工、塗布等，依照不同的產品需求，選擇適當的加工方法與設備。押出成型是最常用的高分子加工方法，主要是利用押出機把粉狀、粒狀或丸狀的高分子材料與添加劑，加熱熔融後經由螺桿的輸送，再把這熔融物質從定型模頭裡連續不斷地擠出，經過冷卻以後，可以形成連續的產品。這些產品包括膠管、膠片、各種異型剖面製品等。押出成型包含薄膜押出、管材押出、板材押出及異型押出等。其中薄膜(film)為高分子重要產品之一，在工業上廣泛應用於食品包裝、藥品包裝等包裝薄膜，而各種薄膜產品依用途要求需具有阻水性(water barrier)、阻氧性(oxygen barrier)、抗紫外線(UV barrier)、高機械強度(high mechanical strength)、光澤或透明性等多種功能。共押出成型的目的是提升材料特性跟降低成本，雖然單一高分子塑料製作之單層薄膜無法同時滿足上述要求，但共押出製程則改善了此種狀況。

一般塑膠板、膜使用多層化之優點如下：

- (1)可提升材料組合顏色或透明度不同之塑料，以提升遮光或透視效果。
- (2)合不同塑料以達到特殊之性質要求。
- (3)層膜之一部分加以發泡或強化，可增加整體強度。

但亦有以下缺點及問題：

- (1)多層膜製造設備成本高於單層膜成形機。
- (2)多層膜之再生利用困難。
- (3)模具及成形法之專利很多。
- (4)不同塑料間之接著性。
- (5)多層膜之界面不穩定現象。

共押出製程(coextrusion)以單一模具同時押出兩種或兩種以上高分子塑料成為層狀結構(lamellar structure)之板材、薄膜或管材等產品，經由同時押出多種高分子塑料可得到獨特之產品特性以及減少成本花費，在高分子加工業上極受重視。共押出薄膜可由吹模製程(blown film)或平模製程(flat die)得到。本論文中僅探討平模製程之共押出流動問題，而平模製程製造多層板、膜時，大致上可分為兩種方法：

1. 多歧管模具(Multi-manifold)：

高分子熔膠分別流過各自歧管模具(manifold die)並形成所要求之形狀，之後匯流成層狀離開模口成形，如圖 1-1。此方法可針對不同高分子之流變性質及操作溫度分別設計其分歧管通道，避免不同層之高分子熔膠有較大之流體性質差異時，產生界面不穩定等問題。此方法有以下優缺點：

優點：

- (1) 可精準調整各層膜之厚度。
- (2) 適用流動特性差異極大(如分子量相差很大)之高分子塑料，因此可成形之材料範圍較廣。

缺點：

- (1) 各歧管間之絕熱設計不易克服。
- (2) 構造複雜且昂貴。特別是要製造超過5層以上之多層膜時，使用

下述之進料區塊較為有利。

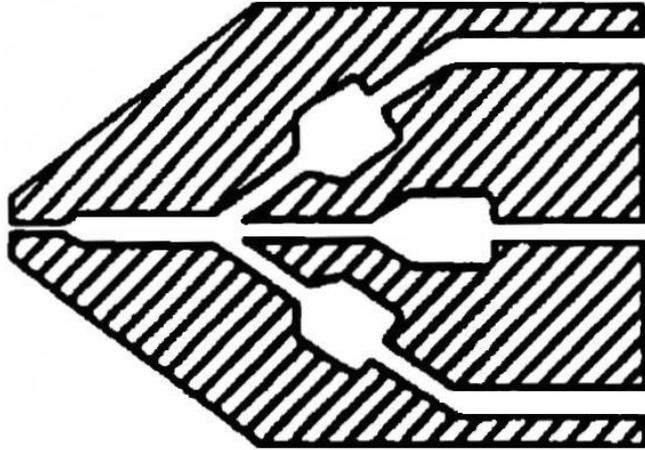


圖 1-1 多重分歧管模具(multi-manifold die)示意圖

2. 進料區塊(Feedblock)/單歧管模具^[2, 4]：

不同於前述方法，此方法將多層高分子熔膠預先經由進料區塊組合為層狀再進入歧管模具，如圖 1-2。此方法為使用舊有之傳統模具在前端接一進料區塊整合來自不同押出機之塑料再進入模具內成為多層共押出物，此進料區塊之作用在整合(combine)與分配(arrange)不同之高分子使之以均勻厚度通過模口，以提供多元共押出加工(coextrusion)生產多層板、膜時之調整彈性，如各層厚度等。此方法有以下優缺點：

優點：

- (1) 構造簡單且可沿用舊有之押出機及模具。
- (2) 極易增加層數。

缺點：

不同層高分子熔膠之流動特性不可相差太多(如黏度及剪切率等)，否則極易在多層板、膜之界面產生流動不穩定現象及失去厚度分佈均勻性(uniformity)。

因此共押出模具設計需要對於三維共押出流動有深入之了解^[4]。儘管有以上缺點，但進料區塊/單歧管模具比起多歧管仍然較為廣泛使用。

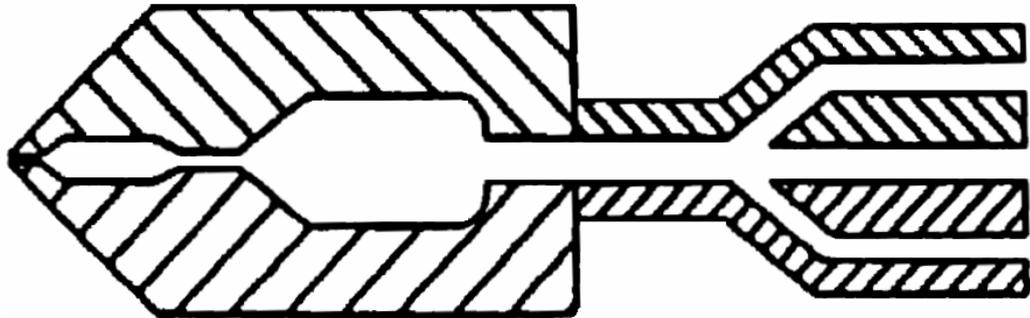


圖 1-2 共押出進料區塊/單歧管模具(feedblock)示意圖

1.2 共押出製程問題

多層膜之界面缺陷會大幅影響產品性質，如透明度(transparency)、層間接著力(layer adhesion)等，如圖 1-3^[29]。而塑料之基本流變性質及流動行為是決定界面缺陷產生之關鍵，但高分子在流動時，其黏度會隨著剪切力的改變而改變，並非是一個定值因此高分子流變性質對於設計共押出模具及進料區塊極為重要，且當選擇共押出產品之材料時必須考慮到塑料之流動行為，以減少界面缺陷之產生。一般傳統加工中，均是以經驗及試誤法(trial and error)調整加工參數來解決共押出製程之界面缺陷問題，相當費時費力及消耗成本，而且相關變數太多，很難在短時間就找出最佳化的製程條件，因此在要求高精密度之加工製程中，必須藉助模擬分析解決，而在共押出中成形中，最常遇見的問題，可分為以下兩類

- (1) 界面不穩定現象(Interfacial Instability)
- (2) 層間不均勻性(Layer-To-Layer Non-Uniformity)

以下我們將就這兩個問題探討：

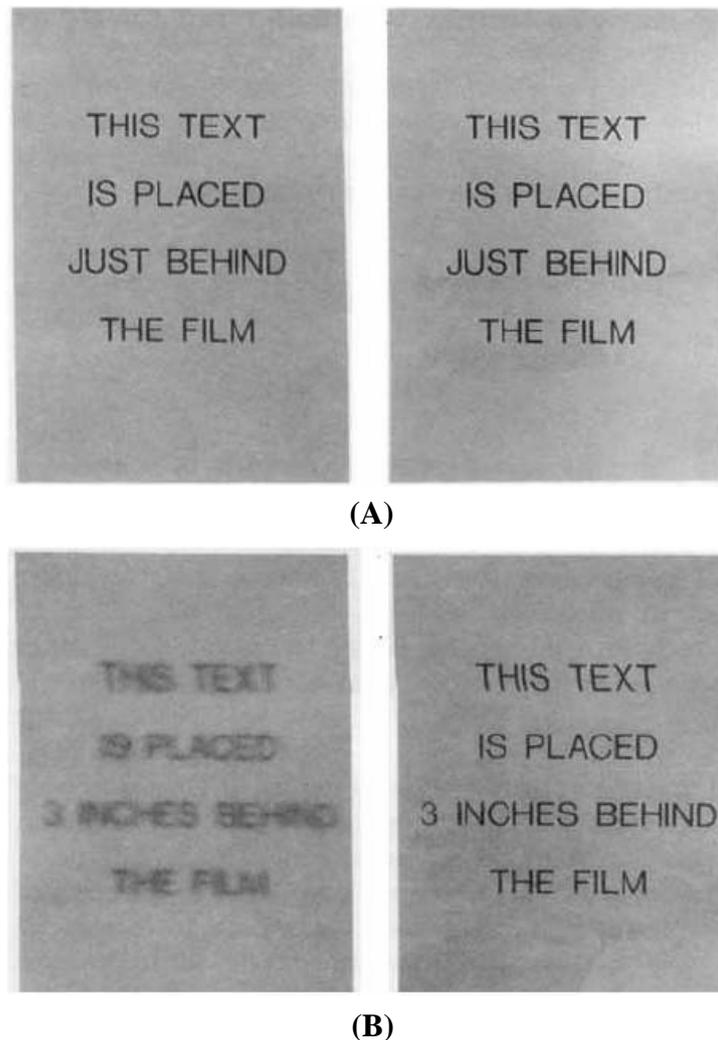
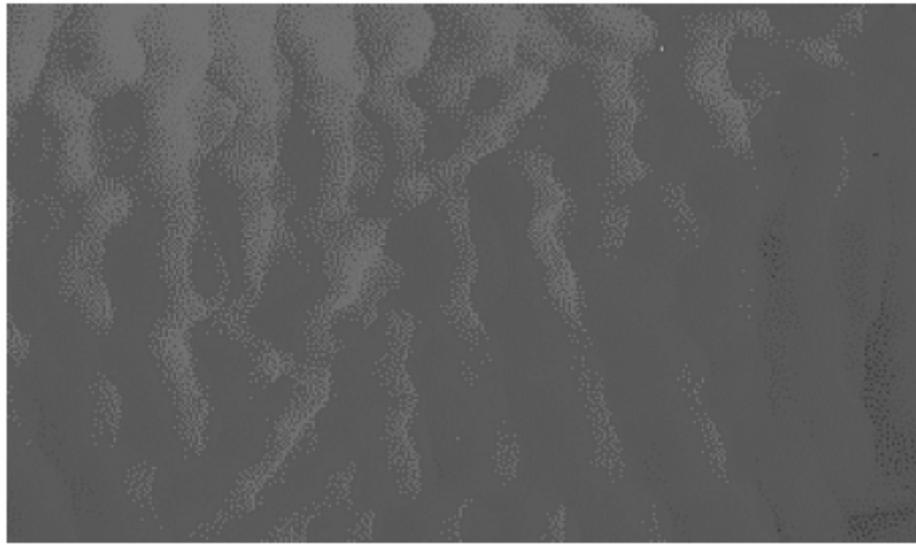


圖 1-3 界面不穩定對膜之清晰度影響^[29]
(A)近距離清晰度 (B)相隔 3 英吋遠清晰度

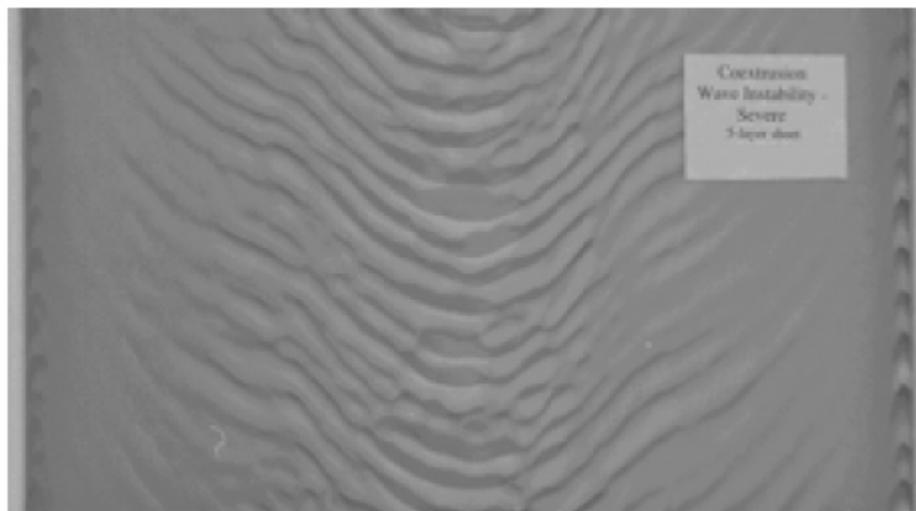
1.2.1 界面不穩定現象(Interfacial instability)

非牛頓流體之黏度為押出溫度及剪切率之函數，而押出溫度及剪切率之函數在模具內會不斷改變，特別是當塑料為靠近壁面處之外層塑料更會有極大之剪切率，因此也造成流動不穩定(flow instability)現象發生。流動

不穩定會造成流體界面扭曲，甚至於不同層塑料之內部混合(intermixing)。界面不穩定現象包括高度不規律之鋸齒形不穩定(zig-zag instability)及較規律之波浪形不穩定(wave instability)。鋸齒形不穩定為小振幅高頻率之界面缺陷，而波浪形不穩定為高振幅低頻率之界面缺陷，如圖 1-4^[8]。



(a)



(b)

圖 1-4 界面不穩定現象^[8](A)鋸齒形 (B)波浪形

最常見之界面不穩定現象為鋸齒形不穩定，其鋸齒尖端指向於流體流動方向。當流速極低時，界面相當平穩，無任何流動不穩定現象，如圖 1-

5_[6](A)。當流速增加，界面逐漸開始出現波浪般之震幅，但仍不明顯且可能不至於影響薄膜性質，如圖 1-5(B)。而當流速極大時，界面扭曲現象明顯變得極為嚴重。當愈多波浪形震幅發生，模具內之速度梯度會將波峰往前推擠成為似摺痕之狀況，愈多摺痕使流體界面愈雜亂甚至出現不同層塑料之內部混合，此現象稱為鋸齒形不穩定現象，如圖 1-5(C)。Schrenk_[5, 6]亦指出押出多層膜之鋸齒型不穩定是由界面間過大的剪切應力造成。

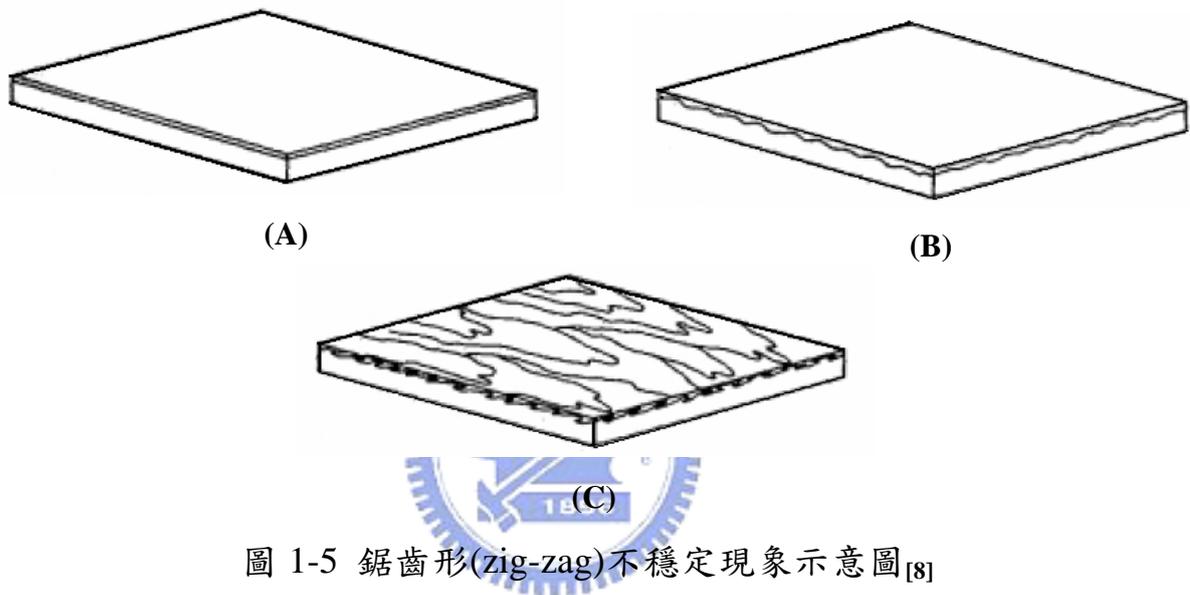


圖 1-5 鋸齒形(zig-zag)不穩定現象示意圖_[8]

界面初形成時，是波浪形不穩定是否發生之關鍵，因上下層不同塑料之流速及流變性質差異，使進料區塊內部流體匯合處發生波浪形不穩定現象。此不穩定現象如同一連串橫跨於寬度方向之拋物線，向流動方向凸出。當外層塑料厚度相對於內層塑料較薄時，波浪形不穩定更易發生。鄰近層間塑料之拉伸黏度差異亦是波浪形不穩定發生原因之一。流動系統或幾何之不對稱性更使得波浪形不穩定愈加嚴重。

1.2.2 層間不均勻性(Layer-to-layer non-uniformity)

由於不同高分子塑料擁有不同之流變參數，故其流動特性也不相同，當以兩種或兩種以上不同之高分子塑料同時押出時，流體界面會因上下層流體之流動特性差異而產生包覆現象，一般傳統加工皆是將成品邊緣裁切丟棄，如圖 1-6^[9]。黏度為影響包覆現象原因之一，低黏度之塑料會流向高剪切率之壁面並包覆高黏度之塑料。高分子彈性對於界面包覆現象之影響亦相當重要^[9,13]，彈性性質明顯之高分子塑料會產生垂直於押出方向之二次流動(secondary flow)，進而使流體界面產生包覆現象，且流動路徑愈長包覆程度愈加明顯至完全包覆，如圖 1-7^[14]。



圖 1-6 界面包覆現象示意圖^[9]

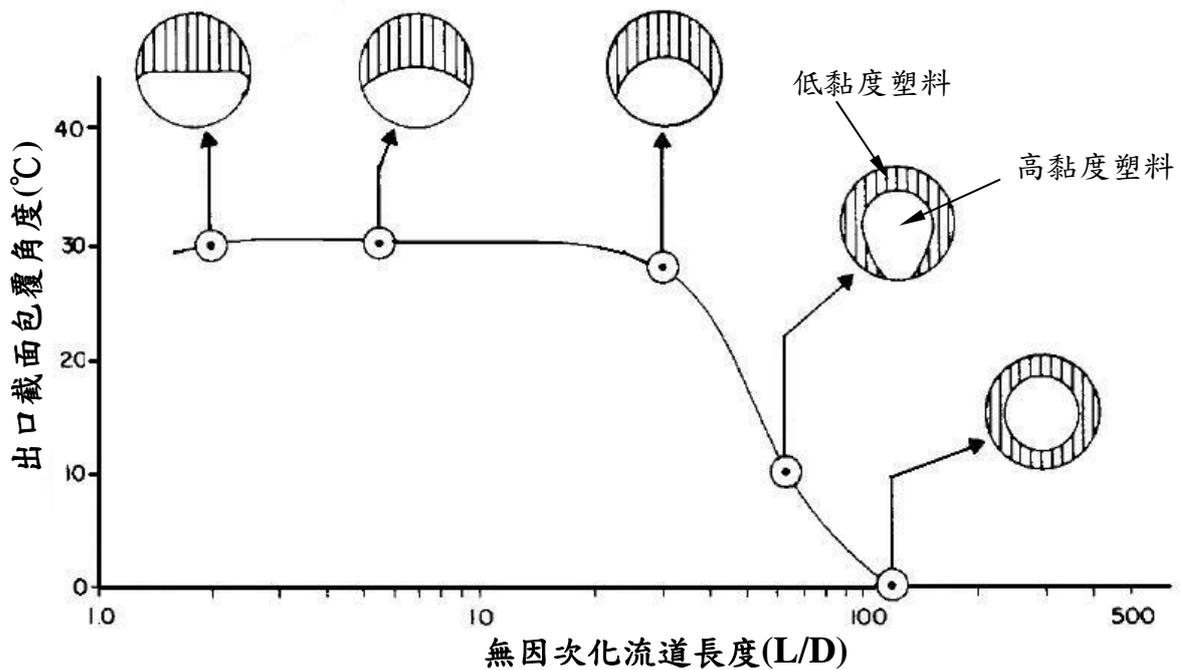


圖1-7 界面包覆發展示意圖[14]

1.3 文獻回顧

在過去已有許多研究人員從事於高分子兩相流之研究，主要研究模具內兩相流體可能造成界面不均勻及製程成本之界面變化現象[14-27]，以及會嚴重影響產品性質及價值之界面不穩定現象[5, 21]，這些研究皆著重在影響界面形狀變化及界面不穩定之兩相流體流動機制。

1.3.1 界面不穩定文獻回顧

Chisholm與Schrenk_[2]首先於 1971 年獲得共押出進料區塊(feedblock)專利。Schrenk_[5]並提出界面不穩定之發生與界面剪切應力之臨界值有關，當超過此臨界值即發生界面不穩定現象，藉由減少界面剪切應力可有效避免界面不穩定現象發生，而此研究所指為鋸齒形不穩定現象。Schrenk_[6]提出可採取以下措施減少界面剪切應力之影響：

- (1) 增加多層膜外層厚度(使界面位置離開有較高剪切應力之模壁面)。

(2) 加大模唇(die lip)出口尺寸(使模具內各處剪切應力下降)。

(3) 降低押出率(使模具內各處剪切應力下降)。

(4) 降低外層塑料黏度(使模具內各處剪切應力下降)。

上述之最後一項雖可降低剪切應力，但會造成不同高分子塑料之黏度差異並產生包覆現象而失去多層膜之界面均勻性，但在Schrenk_[6]之研究中使用幂次流體模型(power law fluid)無法觀察到此現象。

在Han_[22]之研究中指出Schrenk之臨界剪切應力理論會受層間重整(layer rearrangement)及厚度影響，其實驗並指出各層流體之黏度比及彈性比與界面不穩定現象有關。Mavridis及Shroff_[30]在其 1994 年之研究中提出藉由減少界面剪切應力及鄰近層間高分子彈性差異以緩和界面不穩定現象。Ramanathan_[8]等人在 1996 年首先將界面不穩定現象分為鋸齒形及波浪形，1996 年前則皆稱為“界面不穩定”或不規則(irregularity)現象。隨後在Zatloukal_[32-34]及Martyn_[35-37]等人之研究中，指出波浪形不穩定與高分子塑料拉伸性質及流體匯流處(merging area)之流體形變有關，並以TNSD(total normal stress difference)作為探討第一正向應力差對於波浪不穩定現象之指標，如圖 1-8。除上述主要之研究以外，另有其他許多關於黏度差_[25,38]、表面張力_[39]、臨界剪切應力_[6, 23]、流動模型之黏度參數_[40,41]以及彈性_[7,46-49]等對於界面不穩定影響之研究。

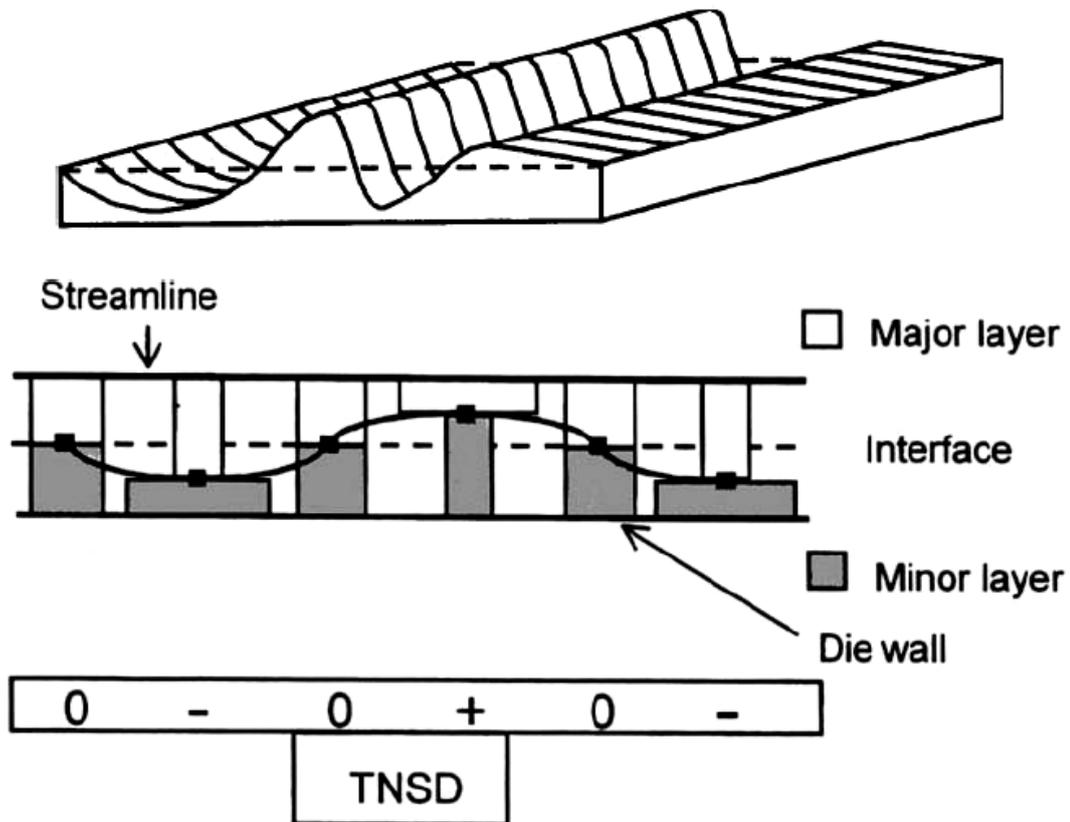


圖 1-8 界面不穩定時之TNSD變化^[20]

1.3.2 層間不均勻性文獻回顧

在許多實驗研究中^[14-15, 27-28, 52]皆指出高分子塑料之黏度差異會使得低黏度流體趨向包覆高黏度流體。Everage^[14]提出包覆現象可分為兩個部份：第一部分為靠近流體匯流處發生快速之流體重整(rapid fluid rearrangement)現象，如圖 1-9(B)，第二部份則為逐漸增加之包覆現象，如圖 1-9(C)，但在其研究中並未合理解釋包覆現象逐漸增加之原因。相對於黏度差異之影響，White^[51]指出擁有較高二次正向應力差(second normal stress difference)之流體會形成突起形狀(即是被另一流體包覆)，但其研究中並未考慮到黏度之影響。然而在Lee及White^[52]隨後之實驗研究中證實低黏度流體包覆高黏度流體之現象，但包覆現象與流體間之彈性差異無關，因此指出黏度差異為影響界面形狀之主要因素。Southern^[28]及Khan^[25]之研究中提出黏度比

對於包覆現象之影響更甚彈性比，但在其研究中使用了極多之假設，與實際共押出情況可能有差異。Gifford^[53]則針對雙層共押出牛頓流體通過矩形流道時，兩流體間之黏度比、流量比、模口形狀與分界面(separation plane)對三維共押出流體界面扭曲度(Degree of Distortion)之影響進行探討。

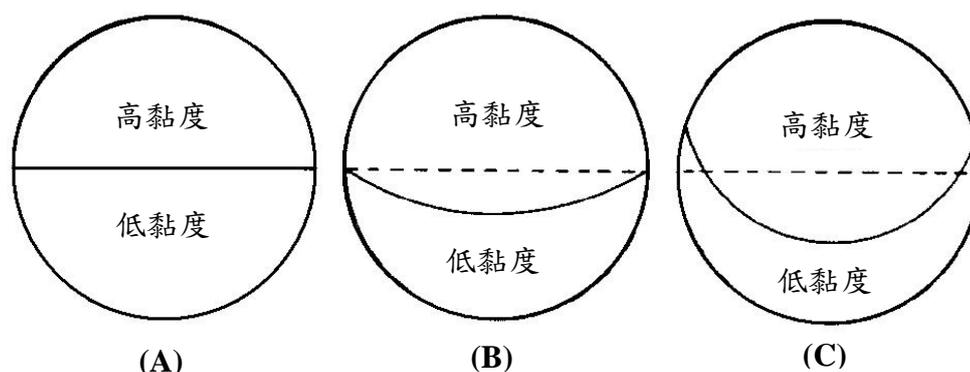


圖 1-9 界面包覆階段示意圖^[14](A)初始界面 (B)流體重整 (C)包覆增加

黏度對於界面不均勻性之影響已有較多之了解，近年來之研究則多著重於第二正向應力差。在Debbaut及Dooley^[9-13, 17]等人之研究中使用不同染色之相同高分子塑料討論第二正向應力差對於流動之影響，如圖 1-10，指出流體界面扭曲現象是因黏彈流體之二次流動所造成，而二次流動是由第二正向應力差造成，並以數值解與實驗結果對照。Uwaji及Legat^[54]使用黏彈模型進行三維分析，指出第二正向應力差可能影響界面形狀之發展。Takase^[64]等人使用三維黏彈數值模擬進料區塊之流動，並指出包覆現象不僅受流體黏性影響，亦受流體彈性及系統非線性影響。

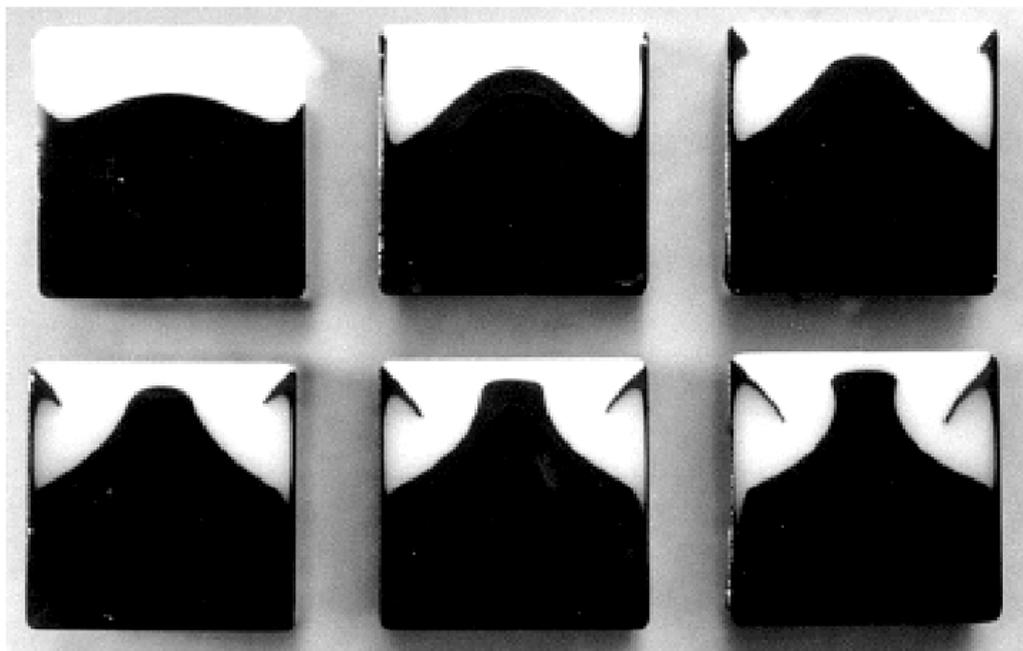


圖 1-10 高分子塑料於方形流道中之二次流動現象^[13]



1.4 研究動機與目的

熔融的高分子在流道中的流動是屬於黏彈性的行為(viscoelastic behavior)，同時具備有黏性(受剪切力會發生流動現象)與彈性(外力消失後形變會恢復)的特性，在日常生活中，水的流動是屬於典型的黏性流體，橡膠的形變是為彈性體。熔融之高分子流體應視為非牛頓流體，其流動行為乃是非線性微分方程之輸送現象問題，很難用解析解來解決流動的問題，尤其共押出製程之多層流問題更是複雜，因此用數值分析方法來求解輸送現象問題，越來越受重視。對於許多難解之問題，均可藉由電腦模擬計算，研究人員可輕易且快速的從數值模型所建立之數值模擬實驗，模擬出在許多不同物理模式與條件下所得的數據。Tanner^[58]就曾評論過有限

元素法(finite element method, FEM)對聚合物加工之應用為一相當適合之工具。

共押出製程中之高分子流體界面為一未知自由界面，對於數值計算及模擬而言相當複雜。Mitsoulis^[55]、Mavridis^[29]、Binding^[56]、Dheur^[57]以及Karagiannis^[59]在其研究中皆使用有限元素法模擬分析共押出製程流動問題及以迭代法求解流體界面位置變化。以上研究中皆可看出低黏度流體會包覆高黏度流體，但僅能觀察到極小之包覆現象。Karagiannis^[59]認為應是不適當之邊界設定及流道長度過短導致無法觀察到逐漸增加之包覆現象。實際上高分子塑料為具黏彈性之流體，因此本質方程式(constitutive equation)對於高分子塑料之流動描述及精確之模擬數值解相當重要，而以牛頓流體或泛牛頓流體等流動模型無法滿足所要求之精確結果，且無法觀察到完整之包覆現象，故必須以黏彈模型(viscoelastic model)處理，將高分子之黏彈性質考量其中。

另外，流體界面於模壁面接觸線(contact line)之邊界設定對於共押出模擬之準確度亦相當重要。過去之研究中，皆以不滑動邊界設定模壁面邊界。Dheur^[57]提出在有限元素計算中使用不滑動邊界配合外插法(extrapolation method)以處理流體界面靠近模壁面處之接觸線問題，其研究中使用線性外插法計算流體界面於壁面之接觸點(contact point)。在Karagiannis^[59]研究中則使用不滑動邊界設定配合二階外插法處理壁面接觸線問題。外插法是預測界面接觸線最簡單快速的方法，但無法正確預測出界面在模壁面處之變形及彎曲情形，亦忽略了模壁面對於流體界面之影響(wall effect)。Torres^[65]提出以滑動邊界設定接觸線之構想，但僅使用泛牛頓流體模型(generalized newtonian model)，忽略了重要之高分子黏彈性質。過去有關HDPE及LLDPE滑動邊界之影響已在Hatzikiriakos^[66-70]及Ramamurthy^[16]之研究中討論。Gifford^[53]則藉由改變壁面的光滑度探討平膜

押出之流量均勻性以提昇押出膜的品質及減少邊緣裁切的浪費。

有鑑於上述之問題，本論文將使用The Phan-Thien and Tanner_[3]黏彈模型進行進料區塊內流動之三維有限元素模擬，並於模壁面使用滑動邊界設定，使得高分子之黏彈性質及壁面對流場之影響能考慮其中，亦將比較滑動邊界設定流體界面於壁面接觸線位置預測之差異，同時本論文將分析第二正向應力差對包覆現象之影響及觀察流體匯流處之拉伸變形對於界面不穩定之影響。



理論模式及研究方法

2.1 理論模式

本論文使用polyflow[®]有限元素軟體來模擬分析雙層共押出高分子塑料在進料區塊(feedblock)中之流動情形，以三維黏彈流動模型(3D viscoelastic model)模擬探討雙層流體中之界面包覆現象(encapsulation phenomena)、界面不穩定(interfacial instability)現象(波浪形(wave)及鋸齒形(zig-zag))及流變參數對上述現象之影響。本論文對於高分子塑料之流動做以下基本假設：

1. 為不可壓縮(incompressible)和不互溶(immiscible)之黏彈性流體。
2. 等溫(isothermal)及穩態(steady state)流動。
3. 因高分子塑料黏度極大，相較之下可忽略重力(gravity)、慣性力(inertial force)及界面張力(interfacial surface tension)之影響。

2.1.1 統御方程式(Governing equation)

雙層共押出高分子塑料在進料區塊(feedblock)中之流動，包含流體通過各自流道之後匯流以及匯流後在矩形流道內之流動。對於各層黏彈流體(*I*：下層 *II*：上層)之流動行為使用連續方程式及運動方程式描述，假設流動為穩態流動並且忽略物體力(body force)：

連續方程式(equation of continuity)：

$$\nabla \cdot v_k = 0, \quad k = I, II \quad (2-1)$$

運動方程式(equation of motion)：

$$-\nabla p + \nabla \cdot \tau_k = 0, \quad k = I, II \quad (2-2)$$

其中 v_k 為各層之速度向量， τ_k 為各層之應力張量(extra stress tensor)， p 為壓力。

高分子塑料為具黏彈性之流體，因此本質方程式(constitutive equation)對於高分子塑料之流動描述及精確之模擬數值解相當重要。本論文之本質方程式使用The Phan-Thien and Tanner_[3]黏彈模型，PTT黏彈模型包含了對於流體第二正向應力差(second normal stress difference)影響的描述，可用來預測高分子塑料黏彈性質所造成之二次流動(secondary flow)，並有利於本論文對流體界面包覆現象之研究。PTT黏彈模型定義如下_[3]：

$$\left(1 + \frac{\varepsilon \lambda}{\eta_0} \text{tr} \tau\right) \tau + \lambda \left\{ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \nabla \tau + \frac{\xi}{2} \tau^\Delta \right\} = 2\eta_0 D \quad (2-3)$$

其中 λ 為鬆弛時間(relaxation time)， η_0 為高分子之零剪切率黏度(zero-shear rate viscosity)， ξ 是與第二正向應力差(the second normal stress difference)特性有關的參數， ε 是與延伸黏度(extensional viscosity)特性有關的參數， D 為變形率張量(rate of deformation tensor)。變形率張量之定義如下：

$$D = \frac{(\nabla v + \nabla v^T)}{2} \quad (2-4)$$

於應力張量上之三角形符號 Δ 代表下隨動座標操作子(lower convected time derivative operator)，其定義如下：

$$\tau^\Delta = \frac{\partial \tau}{\partial t} + v \cdot \nabla \tau + \nabla v \cdot \tau + \tau \cdot \nabla v^T \quad (2-5)$$

於應力張量上之倒三角形符號 ∇ 代表上隨動座標操作子(upper convected time derivative operator)，其定義如下：

$$\overset{\nabla}{\tau} = \frac{D\tau}{Dt} - \nabla v^T \cdot \tau - \tau \cdot \nabla v \quad (2-6)$$

其中 ∇v 為速度梯度， T 為矩陣之轉置(transpose)。隨動(或稱共旋)座標(convected coordinates)定義為此座標會隨著流體一起拉伸(co-stretching)、旋轉(co-rotation)及形變(co-deformation)，因此流體各點之座標值不會因流體拉伸、旋轉及形變而改變。

PTT 黏彈模型中，其第二正向應力係數(the second normal stress coefficient)不為零，且相對於第一正向應力係數而改變。而 ξ 控制流體第二正向應力差或係數(second normal stress difference or coefficient)對第一正向應力差或係數(first normal stress difference or coefficient)之比($N_2 = -\left(\frac{\xi}{2}\right)N_1$)，故 ξ 可代表流體之第二正向應力差性質。

同時，在文獻Takase et al.[64]中，使用了修正後PTT模型(Modified PTT model)，是把牛頓剪切黏度向量(Newtonian shear viscosity component)也歸入了總簡切黏度(total shear viscosity)中，其表示如下：

$$\tau = 2\eta_0 s D + E \quad (2-7)$$

$$\left(1 + \frac{\varepsilon\lambda}{\eta_0} trE\right) E + \lambda \left\{ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \overset{\nabla}{E} + \frac{\xi}{2} \overset{\Delta}{E} \right\} = 2\eta_0 (1-s) \overset{\Delta}{D} \quad (2-8)$$

其中 s 為物質參數(material parameter)。修正型 PTT 模型(Modified PTT model)可將速度與應力場分開計算；而本文所使用的 PTT 模型則是將兩者同時計算。

2.1.2 邊界條件

本論文使用之進料區塊(feedblock)幾何形狀及邊界條件如圖2-1所示。I、II分別為下層及上層流體，高分子塑料出押出機後分別從不同流道(channel)進入進料區塊，隨後匯流產生一流體界面。由於系統為對稱流場，故只取一半流場做分析，以減少計算量及縮減模擬時間。幾何邊界條件設定如圖2-1：

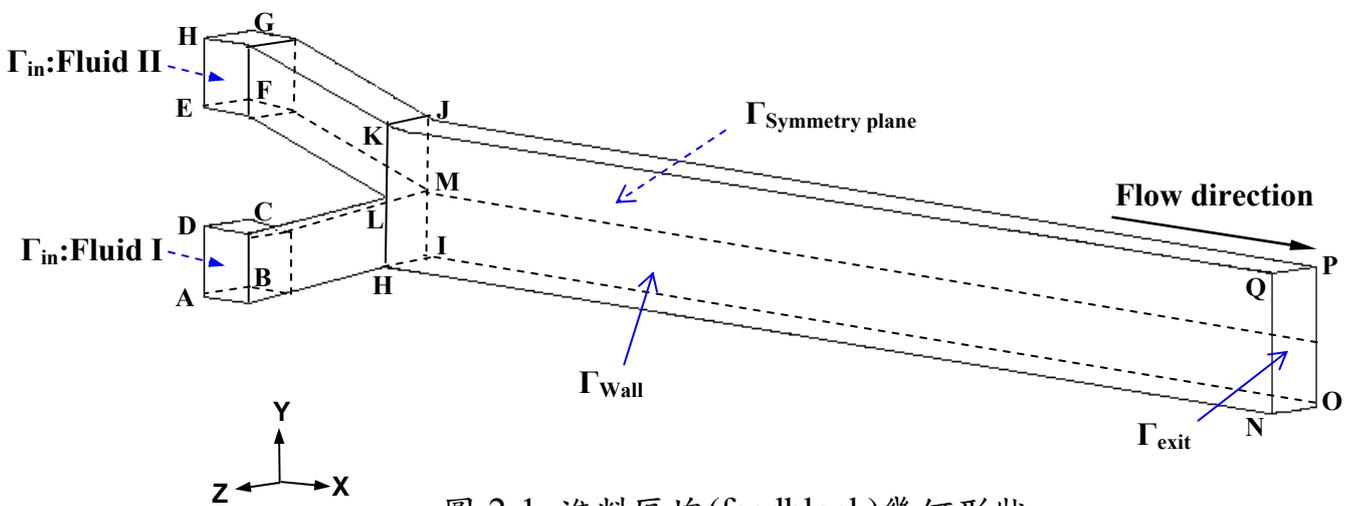


圖 2-1 進料區塊(feedblock)幾何形狀

- (1) Γ_{in} (面ABCD及面EFGH)：入口邊界給一入口流量 Q_{in} ，假設其為全展流狀態(fully-developed flow)。
- (2) Γ_{exit} (面NOPQ)：出口邊界亦假設為全展流狀態，忽略出口效應影響。
- (3) $\Gamma_{Symmetry\ plane}$ (面BIOPJGFM)：幾何對稱面。
- (4) Γ_{Wall} (面AHLD、面ELKH及面HNQK)：為有效觀察流體界面彎曲情況，在雙層流體匯流後之矩形流道壁面假設為滑動邊界(slip boundary)，使流體界面與壁面之接觸線(contact line)不會固定在壁面上，流體匯流前之壁面則使用不滑動邊界。

除了上述幾何區域之邊界條件外，雙層流體於HIJK平面匯流後形成一流體自由界面，對此界面做以下假設：

- (1) 運動學狀態(Kinematic condition)：運動學狀態用來描述流體自由界面之運動狀態。假設流體切線速度(tangential velocities)在界面上為連續，即為假設雙層流體在界面上無相對滑動(relative slip)；另外流體不穿透界面，故流體在界面上之法線速度(normal velocities)為零。

$$t_1 \cdot V^I = t_1 \cdot V^{II}$$

$$t_2 \cdot V^I = t_2 \cdot V^{II}$$

$$n \cdot V^I = n \cdot V^{II} = 0$$

其中 V^I 及 V^{II} 分別為下層及上層流體在界面位置之速度， t 為界面上之單位切線向量(unit tangential vector)， n 為界面上之單位法線向量(unit normal vector)。

- (2) 動力學狀態(Dynamic condition)：由於高分子塑料黏度極大，故忽略界面之表面張力(surface tension)效應；且在界面上流體之法向應力(normal stress)及切向應力(tangential stress)為平衡狀態，其表示法向應力及切向應力在界面上為連續。

$$n \cdot \sigma^I = n \cdot \sigma^{II}$$

$$t_1 \cdot \sigma^I = t_1 \cdot \sigma^{II}$$

$$t_2 \cdot \sigma^I = t_2 \cdot \sigma^{II}$$

$$\sigma_k = -p_k + \tau_k, \quad k = I, II$$

其中 σ^I 及 σ^{II} 分別為下層及上層流體之總應力張量(total stress tensor)， n 為界面上之單位法線向量(unit normal vector)， t 為界面上之單位切線向量(unit tangential vector)。

2.1.3 流體自由界面與壁面接觸線(contact line)處理

在共押出模擬中，最大的難處之一是壁面接觸線之邊界設定。接觸線定義為雙層流體界面與壁面之交叉線。一般在壁面使用不滑動(no-slip)邊界，會造成在壁面形成無限大之剪切應力，流體在壁面速度消失，使得運動學狀態(kinematic condition)也隨之消失，無法正確預測出界面在壁面處之變形及彎曲情形，更影響三維界面包覆現象之觀察。如圖2-2，界面與壁面接觸線(流體/流體/壁面邊界)無法移動，造成流體界面在壁面附近產生摺疊現象(bending)。

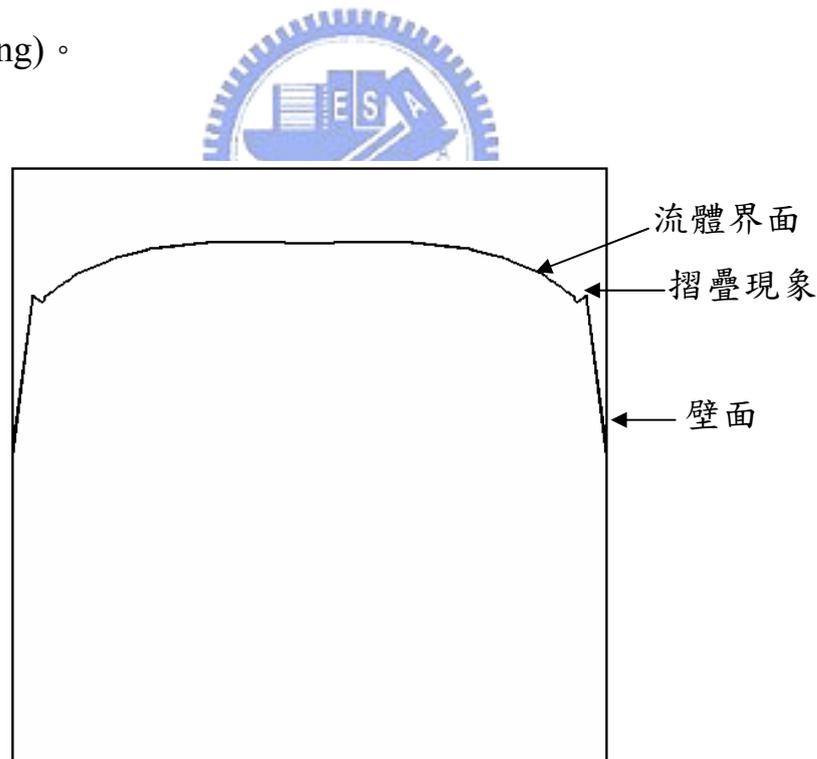


圖 2-2 使用不滑動(no-slip)壁面假設之流體界面

在過去文獻之研究中，提出幾個方法以處理接觸線之問題，包括外插法及滑動邊界；Dheur、Karagiannis_[59]、Gifford_[53]等人使用外插法(extrapolation method)預測接觸線位置，此方法優點是用外插法來計算接觸

線位置可以避免因使用非滑動面(no-slip)所造成的難以收斂的問題，同時也是預測界面接觸線最簡單快速的方法，但卻忽略了壁面(wall effects)造成的界面扭曲及其對接觸線附近流體流動情形之影響。如圖2-3_[59]，A為接觸點位置，A'為使用外插法得到之接觸點位置。

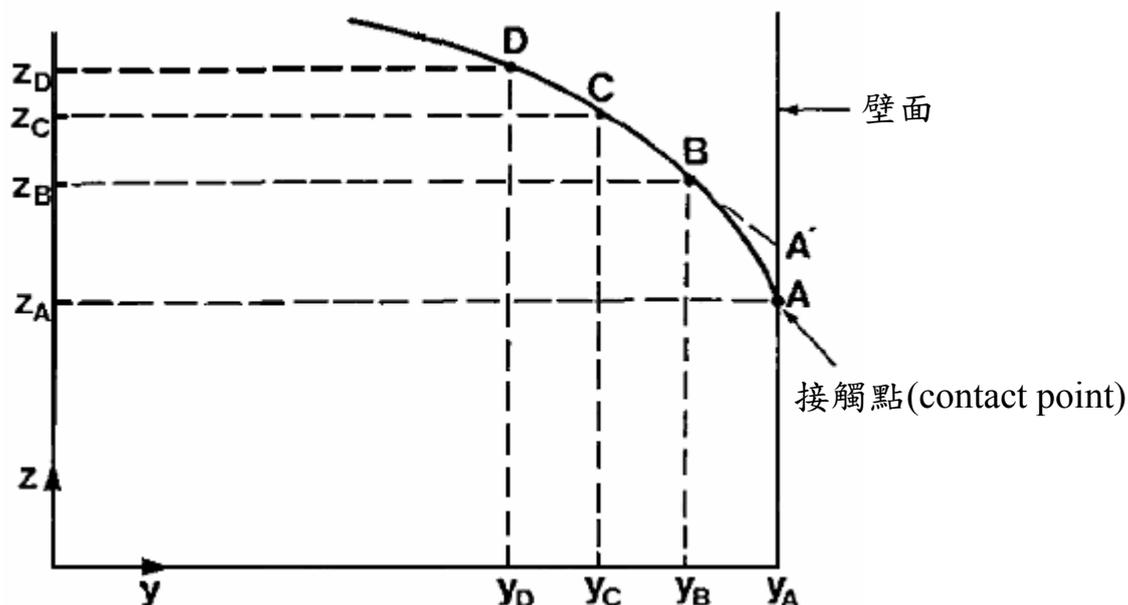


圖 2-3 使用線性外插法處理壁面接觸線_[59]

線性外插法如下：

$$z_c - z_A = (z_B - z_A)(y_c - y_A) / (y_B - y_A) \quad (2-9)$$

相對於以下之二階外插法，線性外插法僅用 B、C 兩點作外插求取流體界面在壁面之接觸點位置。而二階外插法如下：

$$z_A = ay_A^2 + by_A + c \quad (2-10)$$

二階外插法可由 B、C、D 三點得到 a、b、c 係數後，進而求取流體界面在壁面之接觸點 z_A 。在數學觀點上，二階外插法應能得到較準確之接觸點 (contact point) 位置。

因為用外插法會難以描述流體在壁面之流動行為，故本論文使用滑動邊界設定壁面(Γ_{wall})，使流體自由界面接觸線(contact line)可在壁面上移動，且壁面對流動系統之影響(wall effect)不會被忽略。

滑動模型為描述流體在壁面滑動之關係式，本論文使用generalized Navier's law_[71]設定壁面(Γ_{wall})之滑動邊界，其表示式如下：

$$f_t = F_{slip} (v_{wall} - v_t) |v_t - v_{wall}|^{\epsilon_{slip} - 1} \quad (2-11)$$

其中 f_t 為高分子塑料接觸壁面產生之摩擦力； F_{slip} 及 ϵ_{slip} 為滑動參數(slip parameter)；當 $F_{slip}=0$ 時，流體在壁面產生完全滑動(full slip)，亦即無壁面摩擦力；當 $F_{slip} \rightarrow \infty$ 時，壁面邊界趨近於不滑動(no slip)狀態，亦即壁面摩擦力趨近無限大； $\epsilon_{slip}=1$ 時，(2-11)式為線性式， $0 < \epsilon_{slip} < 1$ 時，(2-11)式為冪次模型(power law model)； v_t 為流體在壁面之切線速度，其速度值假設為極小； v_{wall} 為壁面切線速度(壁面速度 v_{wall} 設定為零)。

由於在文獻中並未有關滑動係數之量測值，在決定滑動係數上本論文以逐漸增加滑動係數之方式並做以下幾項假設來求取適當之滑動係數 F_{slip} ：

- (1) 假設壁面摩擦力極大而造成極大之流體剪切應力，且流體在靠近壁面之速度約為平均速度 $\langle v \rangle$ 的1%左右，以準確模擬出真實流動系統於壁面之流動行為。
- (2) 由於(1)之假設，故只需求出流體在靠近壁面之速度即可得到所求之滑動係數，因此模擬時將流體界面固定以縮減計算量，並可避免由於自由界面迭代之影響造成發散。

本論文取上述假設(流體在靠近壁面之速度約為1%之平均速度)，由於不同的滑動係數會造成壁面摩擦力不同而使得壁面速度不同，在之後的討

論我們將取多個滑動係數 F_{slip} 來探討不同滑動係數值對於共押出進料區塊模擬結果之影響。

2.1.4 黏彈流體之無因次參數(Dimensionless numbers)

無因次參數常用來描述流體力學問題之特性，如雷諾數(Reynolds number)定義為慣性力對黏性力之比，是判斷流體流動型態之指標。流體的黏彈性質則可用 We (Weissenberg number)數來描述， We 數為流體鬆弛時間對特定程序時間(specific process time)之比， We 數定義如下：

$$We = \lambda \langle v \rangle / H \quad (2-12)$$

其中 λ 為鬆弛時間(relaxation time)， $\langle v \rangle$ 為平均速度， H 為特徵長度(characteristic length)，即為進料區塊匯流處前各自流道之高度。

We 數描述由形變造成之非等向性程度及順向性。當流體系統為低 We 數時，泛牛頓模型(generalized Newtonian model)即足夠描述流體之流動特性；若為高 We 數時，則需要黏彈模型(viscoelastic model)來描述流體之彈性效應(elastic effect)。同時，高 We 數也表示系統為高度非線性，在數值解上需耗費較多資源及時間。

2.1.5 界面不穩定(Interfacial instability)分析

界面不穩定現象為共押出製程中各層高分子塑料界面呈現之不規則現象，會影響產品透明度與外觀，常見之界面不穩定現象包括波浪形(wave)及鋸齒形(zig-zag)。為分析界面不穩定現象，須先知道不穩定現象發生之位置及原因，在過去之研究文獻中，可歸納出以下兩種可能發生界面不穩定現象之位置：

A. 雙層流體匯流處(Merging area)

進料區塊匯流處引發之不穩定現象為波浪形不穩定。高分子塑料出押出機後分別經由不同流道進入進料區塊(feedblock)，而高分子塑料在各自流道壁面受到極大的剪切應力，造成流體產生拉伸變形，而後進入截面積較大之矩形流道，雙層高分子塑料因應力釋放會試圖恢復原狀而產生膨脹，若此恢復力道過大，界面即產生不穩定[31]。

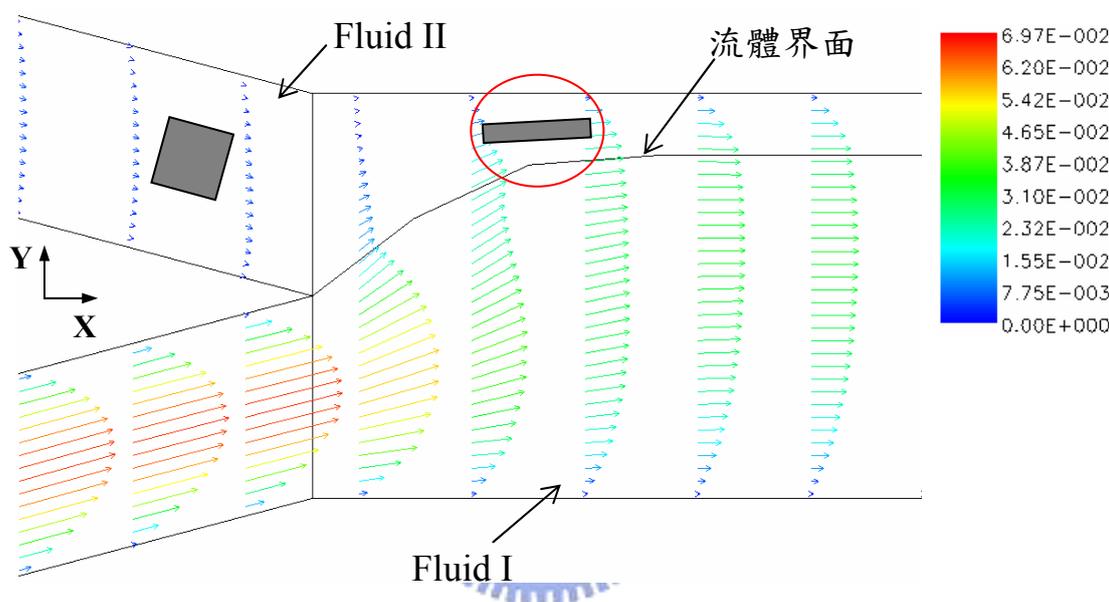


圖 2-4 進料組合區塊匯流處示意圖(流速比 $Q_I : Q_{II} = 13.2 : 1$) [61]

如圖 2-4，在此匯流處雙層高分子塑料因膨脹而互相擠壓使塑料產生拉伸變形，流體速度也因塑料之互相推擠產生加速或減速情況，界面位置也隨著產生劇烈變化，之後則回復為平穩之界面。在雙層高分子塑料匯流之後進入矩形流道，因塑料之彈性(elasticity)性質及記憶效應，塑料會因應力釋放而產生正向應力，而因上下雙層塑料所產生之正向應力不相同，導致界面產生了如波浪形(wavelike)之不穩定現象。

B. 阻流區(Die land)

在模具出口前之阻流區(die land)，通常是壁面會產生最高剪切率及剪切應力之處，過去之研究如鯊魚皮現象(sharkskin phenomena)即是因此原因發生。界面自初形成至離開模具之過程中，剪切應力在阻流區達到最大，易使界面發生鋸齒形不穩定。改善對策則以降低阻流區之界面剪切應力為目標，而在文獻中對於發生鋸齒形不穩定現象之界面剪切應力臨界值有相當之研究。

2.1.6 包覆現象(Encapsulation phenomena)分析

雙層高分子塑料出押出機後分別經由不同流道進入進料區塊，在匯流處產生流體自由界面，因雙層高分子塑料之流變性質或流動狀態不同而產生包覆現象，影響界面之均勻性。在過去之研究中，黏度低之流體會趨向包覆黏度高之流體，形成一彎曲之流體界面，已被認為是影響包覆現象之主要因素。

Everage_[14]之研究中指出包覆現象可分為兩個步驟，第一步驟是發生在流體匯流處因流體重整(fluid rearrangement)產生之初始界面包覆現象；第二步驟則是隨著流道增長而逐漸增加之包覆度。其中，流體重整是因雙層高分子塑料在各自流道壁面產生極大拉伸變形後，進入較寬廣之進料區塊雙層流道匯流處，使得雙層高分子塑料因應力釋放而如彈性固體般試圖恢復原形。此黏彈性行為是因高分子塑料在熔融狀態時，分子鏈呈現雜亂捲曲型態，當受到外力作用時，將允許分子鏈移動或滑動。然而，相互糾纏之分子鏈當施加外力或解除外力時會表現出彈性固體般的行為。在應力釋放後，分子鏈會承受一恢復應力，使分子鏈回到雜亂捲曲之平衡狀態。流體重整現象使得流體產生顯著之正向應力，其中第一正向應力差(N_1)即為造成波浪形不穩定之原因(如 2.1.5 節)，而因第二正向應力差(N_2)之影響，

流體產生二次流動(secondary flow)之迴流現象，此時擁有較低第二正向應力差之流體會趨向包覆擁有較高第二正向應力差之流體，如圖 2-5。而隨著流道長度增加，二次流動對流體界面之影響越大，使得包覆程度亦隨之增加，如圖 2-6。在White及Debbaut^[51]研究中亦指出第二正向應力差可能是造成界面包覆增加之原因。

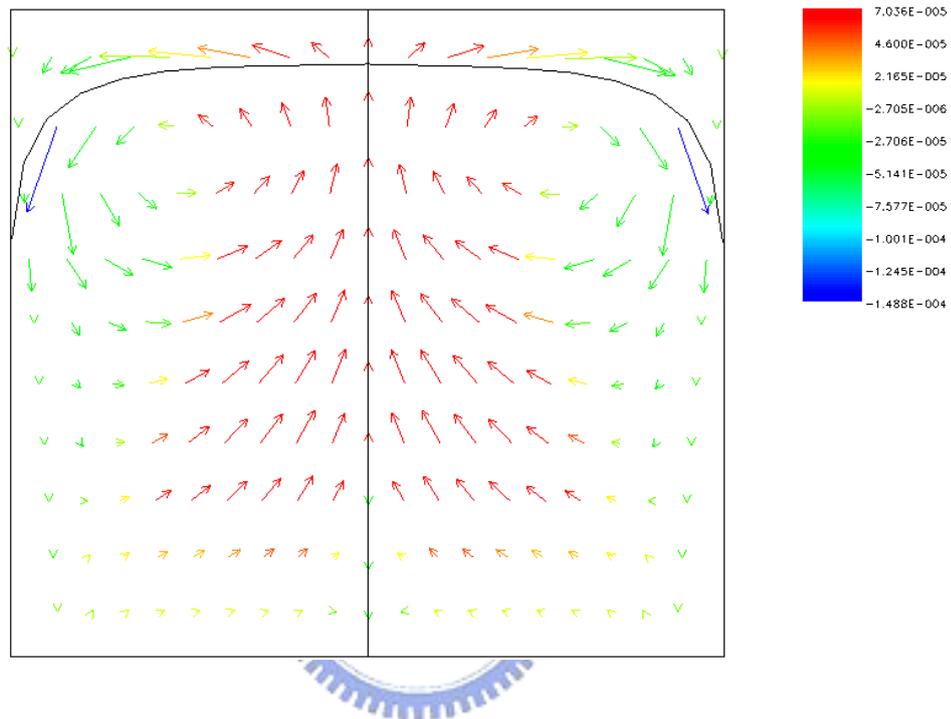


圖 2-5 黏彈流體二次流動(secondary flow)現象 [61]

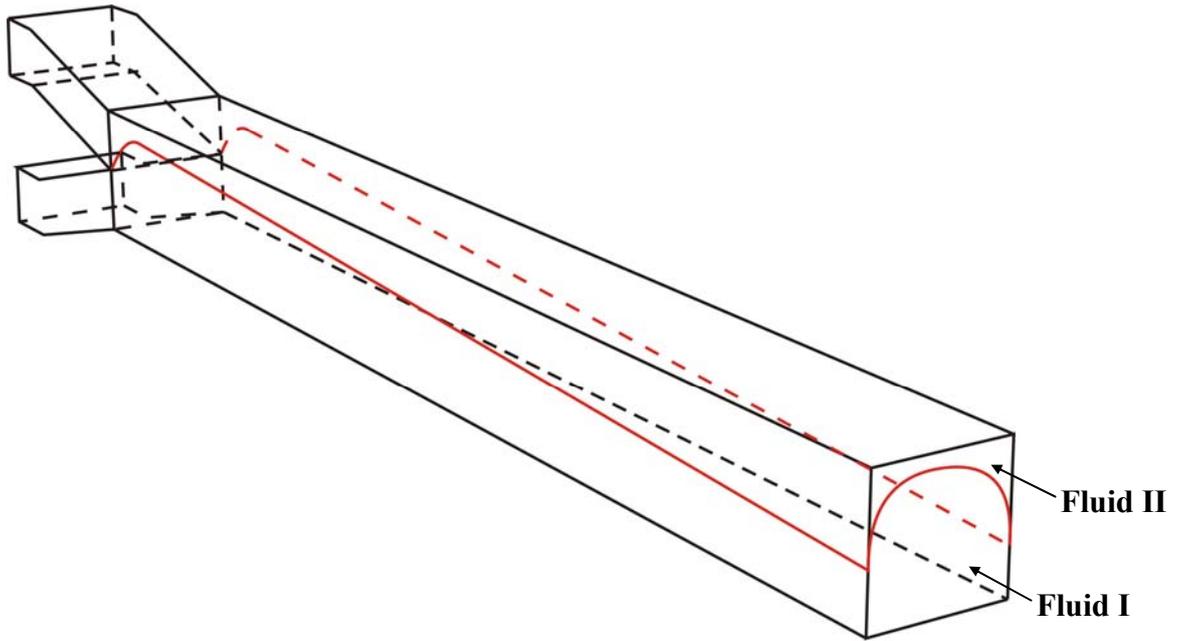


圖 2-6 雙層流體包覆現象示意圖^[61]

高分子塑料剛離開各自流道之後發生流體重整現象，隨後界面即達平衡穩定之形狀，若僅使用簡單的牛頓流體或泛牛頓流體模型描述，界面包覆即不會再繼續增加。本論文使用 PTT 黏彈模型模擬共押出進料區塊之流動，PTT 黏彈模型包含對流體彈性性質之描述，其第二正向應力差不為零，並配合滑動邊界設定使計算不會忽略壁面之影響(wall effect)，因此可有效模擬流體之二次流動現象以及可明顯觀察到流體界面包覆之增加。

為了有效並定量地觀察流體之包覆程度，本論文使用包覆度(degree of encapsulation, DE)分析包覆現象，包覆度定義如下：

$$DE = \frac{|y_w - y_c|}{2L} \times 100\% \quad (2-4)$$

其中 y_w 為流體界面在壁面之高度，即為界面之最低點； y_c 為流體界面在幾何對稱面的高度，即為界面之最高點； $2L$ 為特徵長度，即為進料區塊之矩形流道高度，如圖 2-7。

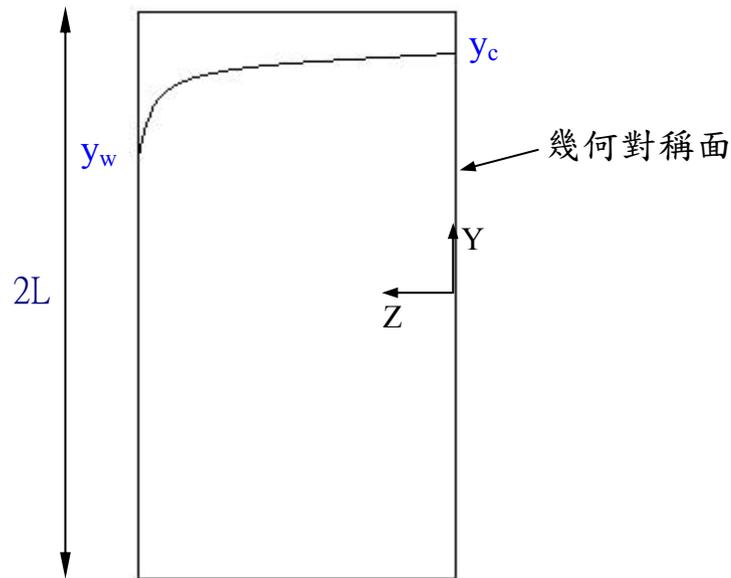


圖 2-7 包覆度(degree of encapsulation)定義

2.2 研究方法

本論文使用Polyflow[®]有限元素軟體分析雙層共押出高分子塑料在進料區塊(feedblock)中之流動情形，再將有限元素法計算結果做界面不穩定及三維包覆現象分析，以下簡介Polyflow[®]中所使用之有限元素離散法及非線性系統解法。

2.2.1 網格處理

網格在有限元素法中佔極重要的地位，包含計算準確度、計算時間、計算收斂性等皆受到網格極大之影響。本論文使用 Gambit 進行網格前處理，並使用矩形網格(quadrilateral mesh)分析進料區塊之流動情形、界面不穩定及界面包覆現象。為了準確預測界面位置及彎曲變形狀況，本論文加密界面位置處之網格，如圖 2-8。

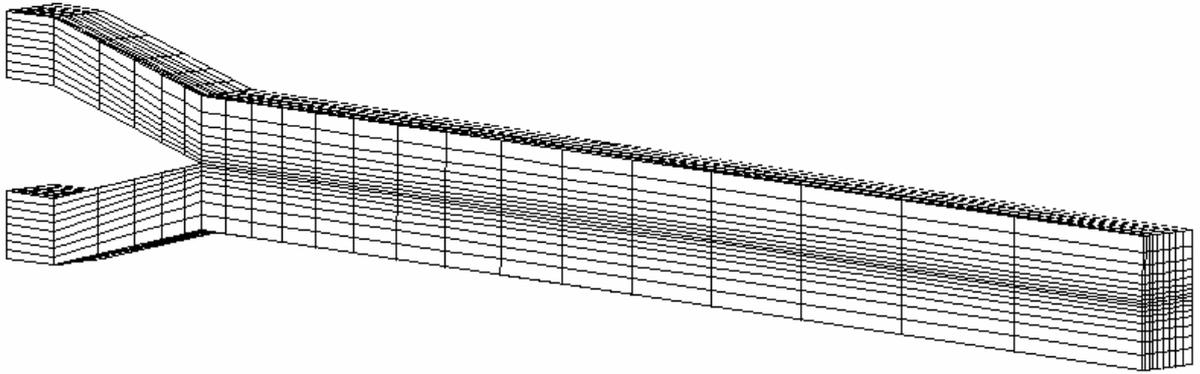


圖 2-8 進料區塊網格示意圖

2.2.2 葛拉金有限元素法(Galerkin finite element method)

連續方程式及運動方程式配合邊界狀態設定，可由 Galerkin 有限元素法求解。(2-1)及(2-2)式經由 Galerkin 有限元素法離散後得到下式，

$$\int_V (\nabla \cdot \mathbf{v}_k) N_p^i = 0, \quad k = I, II \quad (2-5)$$

$$\int_V (-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_k) N^i = 0, \quad k = I, II \quad (2-6)$$

其中 N^i, N_p^i 為定義在節點上之二次及線性內插函數(quadratic and linear interpolation function)，而節點上之速度、壓力、應力近似值可表示如下：

$$\mathbf{v}_k = \sum_i N^i \mathbf{v}_k^i \quad (2-7)$$

$$p = \sum_i N_p^i p^i \quad (2-8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_i N^i \boldsymbol{\tau}^i \quad (2-9)$$

其中 $\mathbf{v}_k^i, p^i, \boldsymbol{\tau}^i$ 為網格節點上之速度、壓力、應力值。

由於黏彈模型之本質方程式為高度非線性方程式及因流體自由界面迭代之影響，計算極易產生發散。為了增加數值計算之穩定，本論文使用 EVSS(elastic viscous stress splitting)方法將應力張量分為彈性項及黏性項，在有限元素法中，相較於傳統的 MIX 離散法，EVSS 提供較穩定及正確之解，EVSS 定義如下所示：

$$\tau = S + 2\eta D \quad (2-10)$$

其中 S 為修正應力張量(modified extra stress tensor)， D 為變形率張量(rate of deformation tensor)。

2.2.3 三維非線性系統解

大型三維有限元素系統分析需耗費相當多時間及電腦資源，包括矩陣建立(construction)、組裝(assembly)、非線性系統迭代(nonlinear system iteration)以及求解(solve)最後之大型矩陣。因此，為了得到良好的模擬效率，必須在解之正確性及求解效率下做選擇。

為求解經由有限元素法離散化後得到之非線性方程組，本論文使用耦合法(couple method)同時求解全部的變數，並利用 Newton-Raphson 迭代法來求解非線性系統。相對於 Picard 迭代法，Newton-Raphson 迭代法只需較少迭代次數即可達到收斂值。因此，相較於退耦法(uncouple method)使用耦合法需耗費較多的電腦資源，但配合使用 Newton-Raphson 法可得到較快的收斂速率(二階收斂速率)及較少的迭代次數。本論文收斂誤差值(包括流體自由界面座標、速度、壓力及應力張量)設定在 10^{-4} 。

2.2.4 進程方法(Evolution method)_[72]

由於黏彈流體模型之非線性項極易造成流場計算發散，故初始值設定

對於迭代計算相當重要，本論文將從 $\lambda_k(\text{relaxation time})=0$ (即為牛頓流體， $We=0$)逐漸增加至流體實際流變參數值 λ ，使得流體黏彈性質逐漸顯現(高 We)，本質方程式(governing equation)亦開始呈現高度非線性。進程方法乃將前一步所算出之有限元素近似值作為下一步之初始值以進行迭代，可藉此得到較佳之初始值以避免計算發散，整個流程至 $\lambda_k=\lambda$ 時完成計算。其鬆弛時間 λ 增加之方式如下：

$$\lambda_k = \lambda S_k = \lambda(S_{k-1} + dS) \quad (2-11)$$

其中 λ 為每次迭代所使用之鬆弛時間； S_k 為每次迭代使用之進程參數值(evolution parameter)， $0 \leq S_k \leq 1$ ； S_{k-1} 為前次迭代之進程參數值； dS 為每次迭代之進程參數增加值。當前次迭代($\lambda_{k-1} = \lambda_1 S_{k-1}$)收斂時， dS 值會小量增加以減少計算時間($dS_{next} = 1.5dS$)，接著以新的鬆弛時間值 $\lambda_k = \lambda_1(S_{k-1} + dS)$ 進行新的計算，但若 dS 值過大使 λ 過大造成計算發散，則小量減少 dS 值($dS_{next} = 0.5dS$)得到較小之 λ 再重新計算，直至收斂為止。

2.2.5 流體自由界面位置計算

共押出系統中之流體界面為一未知自由界面，因此流體界面位置亦必須藉由迭代計算得到。其計算是經由自由界面之動力學狀態(dynamic condition)得到界面上之速度及應力值後，再以運動學狀態(kinematic condition)可得到新界面位置座標。界面位置座標與速度、壓力及應力張量在每次流場計算時皆以 Newton-Raphson 迭代法同時求解，而此流體自由界面也以進程法(evolution method)逐漸增加運動學狀態之影響，至界面位置收斂為止。

在流場迭代計算前需假設一初始界面座標值(一般使用一開始之幾何形狀界面)，計算完成後可得到新流體界面位置座標，若此新流體界面位置座

標與初始假設相同且系統速度、壓力及應力值場亦收斂，則以此新流體界面位置座標作為初始值進行下一步之進程計算。若新流體界面位置座標與初始界面位置座標不同，表示自由界面迭代發散，須以上一節之方法減少進程參數值 S_k 並重新計算。



三、結果與討論

為使模擬結果符合實際高分子塑料之黏彈流動行為，本論文採用 PTT 黏彈模型(The Phan-Thien and Tanner model)進行進料區塊(feedblock)中雙層共押出高分子塑料之三維有限元素流動模擬分析。此黏彈模型可有效預測高分子塑料黏彈性質造成之二次流動(secondary flow)現象，因此採用此黏彈模型有利於本論文對流體界面包覆現象之研究。圖 3-1 為本論文模擬採用之進料區塊幾何形狀網格圖，由於系統為對稱流場，為了節省運算時間，故僅取半邊幾何形狀進行分析。

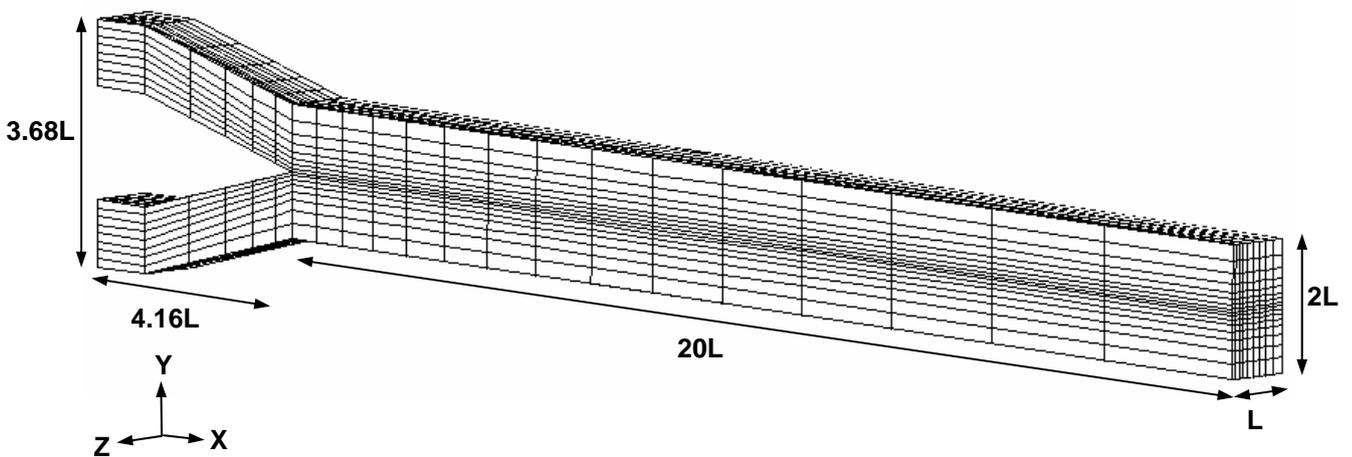


圖 3-1 進料區塊幾何形狀網格圖

3.1 操作條件

本論文使用之下層高分子塑料為 polystyrene(Dow Styron 678E, Fluid I)，而上層高分子塑料為 polystyrene(Dow Styron 472, Fluid II)，圖 3-2 為其黏度(viscosity)對剪切率(shear rate)於 220°C 量測之關係圖^[59]。表 3-3 為其 PTT 黏彈模型之流變參數值^[2]。

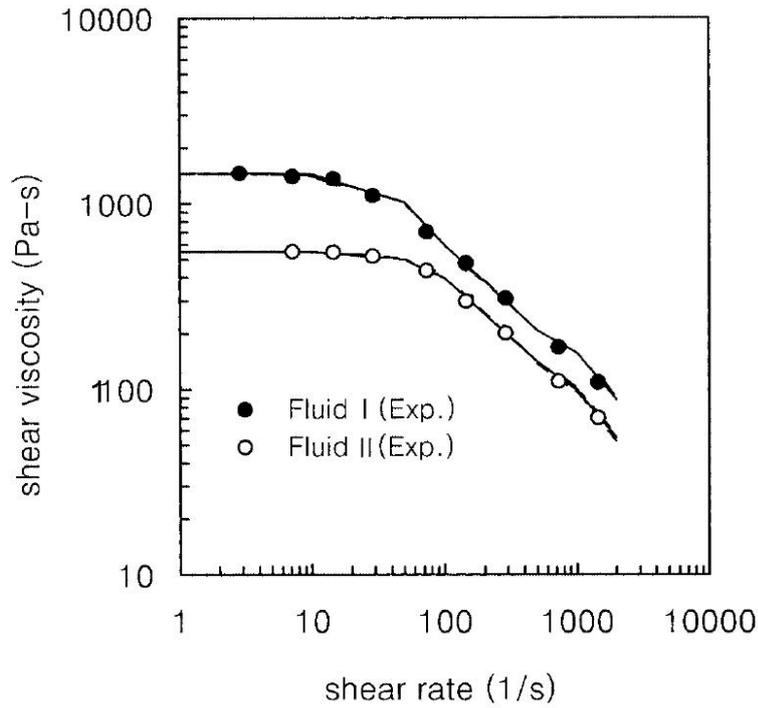


圖 3-2 Polystyrene 之黏度-剪切率關係圖(220°C)_[59]



表 3-1 PTT 模型流變參數_[2]

	下層 (Fluid I)	上層 (Fluid II)
ξ	0.45	0.25
ε	1.5	1.5
$\eta_0(\text{Pa-s})$	1210	440
$\lambda(\text{s})$	0.02	0.01

PTT Model :

$$\left(1 + \frac{\varepsilon\lambda}{\eta_0} \text{tr}\tau\right) \tau + \lambda \left\{ \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \nabla \tau + \frac{\xi}{2} \Delta \tau \right\} = 2\eta_0 D$$

3.2 模擬結果分析

本節將分析雙層共押出高分子塑料在進料區塊(feedblock)中產生之界面包覆現象(encapsulation phenomena)及探討滑動邊界設定、流量比、流變參數對共押出製程問題之影響，希望能藉此了解高分子流體在進料區塊中之流動機制；並將討論第二正向應力差與界面形狀之間的關係，探討導致共押出製程問題發生之原因。

3.2.1 滑動係數之影響

在共押出製程模擬中，由前述研究可知不同的滑動係數造成在壁面有不同的速度，近而導致不同的剪切應力值，影響流體界面在壁面的接觸線。本論文使用的滑動模型是冪次式滑動模型generalized Navier's law表示式如下：

$$f_t = F_{slip} (v_{wall} - v_t) |v_t - v_{wall}|^{\varepsilon_{slip} - 1} \quad (3-1)$$

其中， f_t 為高分子塑料接觸壁面產生之摩擦力、 F_{slip} 及 ε_{slip} 為滑動參數(slip parameter)，而在此上下層塑料之 ε_{slip} 皆設定為 0.6。

圖 3-3 為不同滑動係數下進料區塊(feedblock)之出口界面包覆度比較圖，由圖可看出當滑動係數越大時，界面的彎曲程度越大，包覆度也越大；

圖 3-4 中，滑動係數的改變會影響包覆度的大小，其包覆度定義如下：

$$\text{Degree of Encapsulation} \quad DE = \frac{|y_w - y_c|}{2L} \times 100\%$$

由圖 3-5 可看出當滑動係數越大時其包覆度也越大；圖 3-5 說明當滑動係數越大時，其出口處的壁面接觸點(contact point)越低，由圖 3-6 也可看出當滑動係數越大時，其壁面接觸線(contact line)越低；圖 3-4 至圖 3-6 可明顯看出由於滑動係數的不同導致不同程度的界面包覆現象。

表 3-2 為模擬結果整理，可看出隨著滑動係數的增加，界面的包覆度也隨著增加，而出口處的第二正向應力差的差值(DN₂)也越小，在本論文中，DN₂定義為上下層流體第二正向應力差之差值，其定義如下

$$DN_2 = (N_2)_{\text{fluid I}} - (N_2)_{\text{fluid II}}$$

3-2 滑動係數設定之分析比較

	Wall Boundary Condition (Slip coeff.)		
	1.0×10^6	3.0×10^6	6.0×10^6
Outlet Encapsulation(%)	28.99	35.61	37.25
Outlet DN ₂ (Kpa)	-7.19	-8.47	-8.62

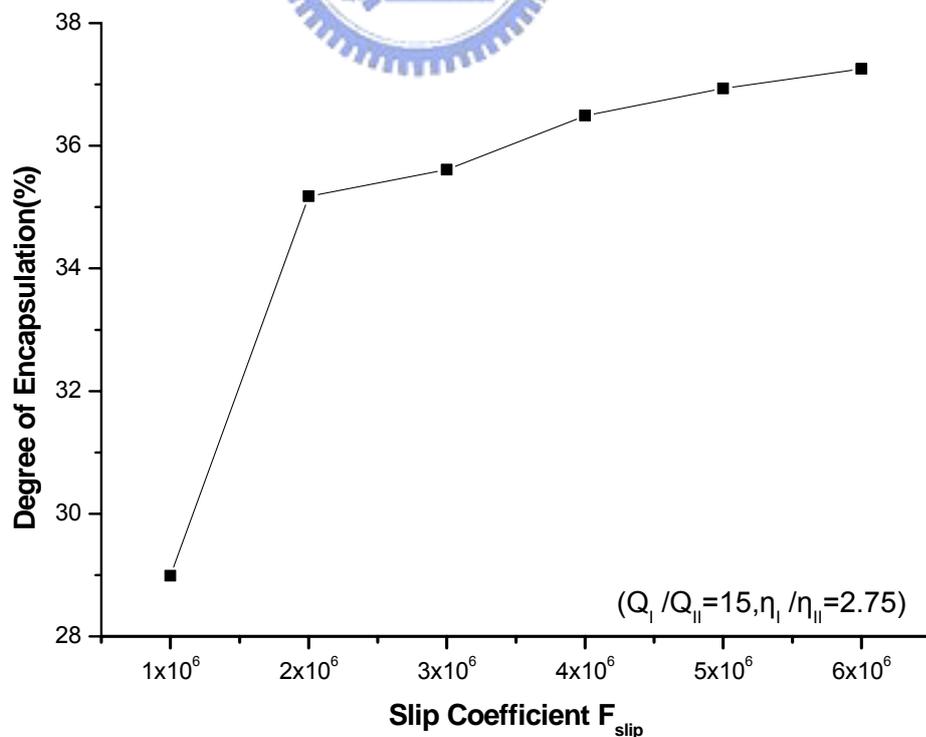


圖 3-3 不同滑動係數下之出口界面包覆度比較圖

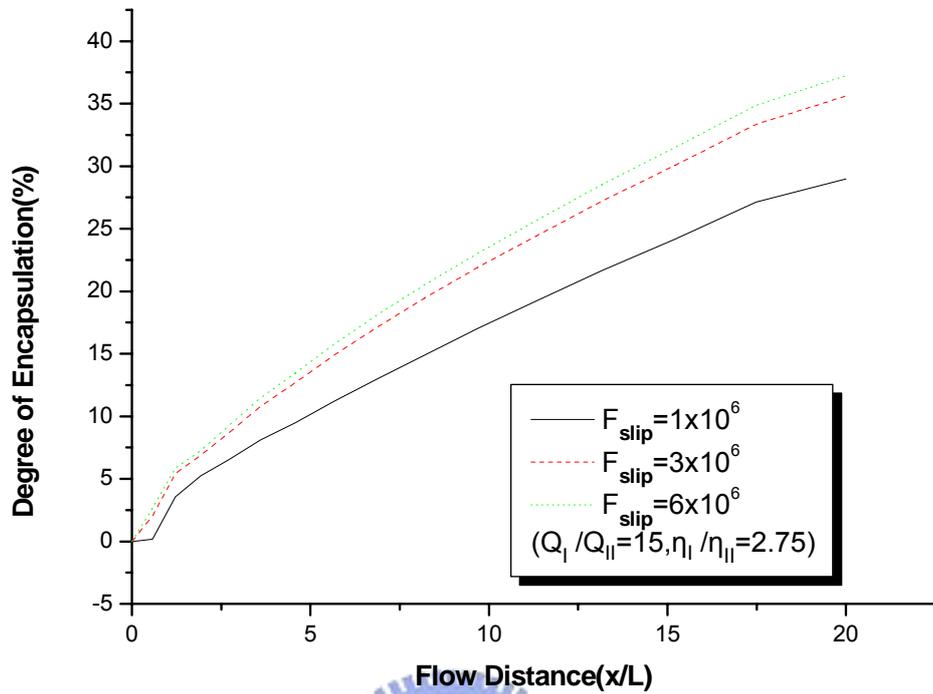


圖 3-4 不同滑動係數設定下之包覆度比較圖

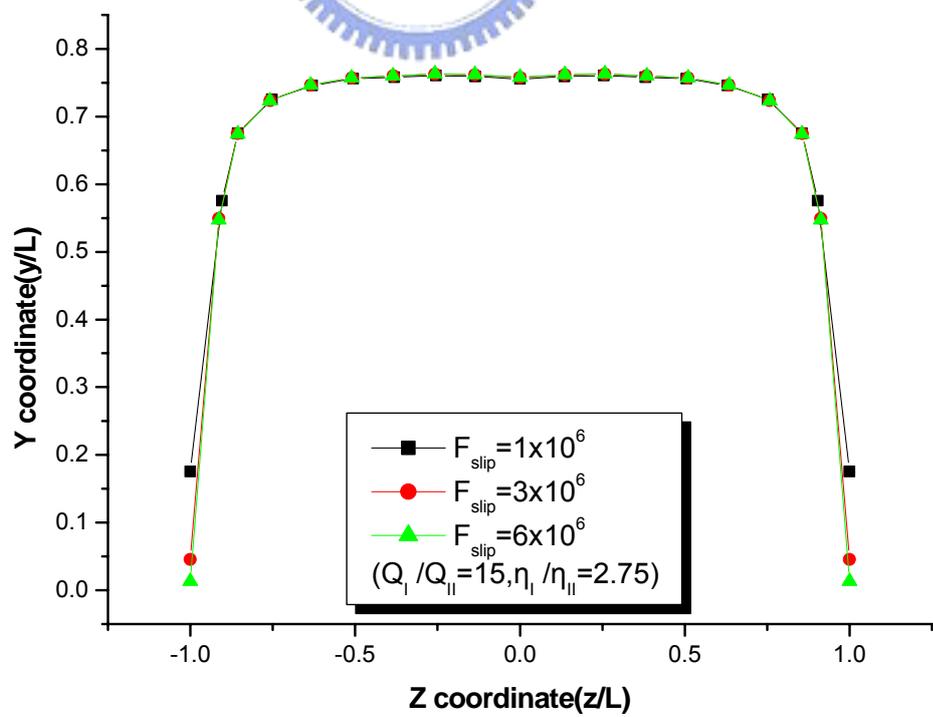


圖 3-5 不同邊界下之出口界面位置比較圖

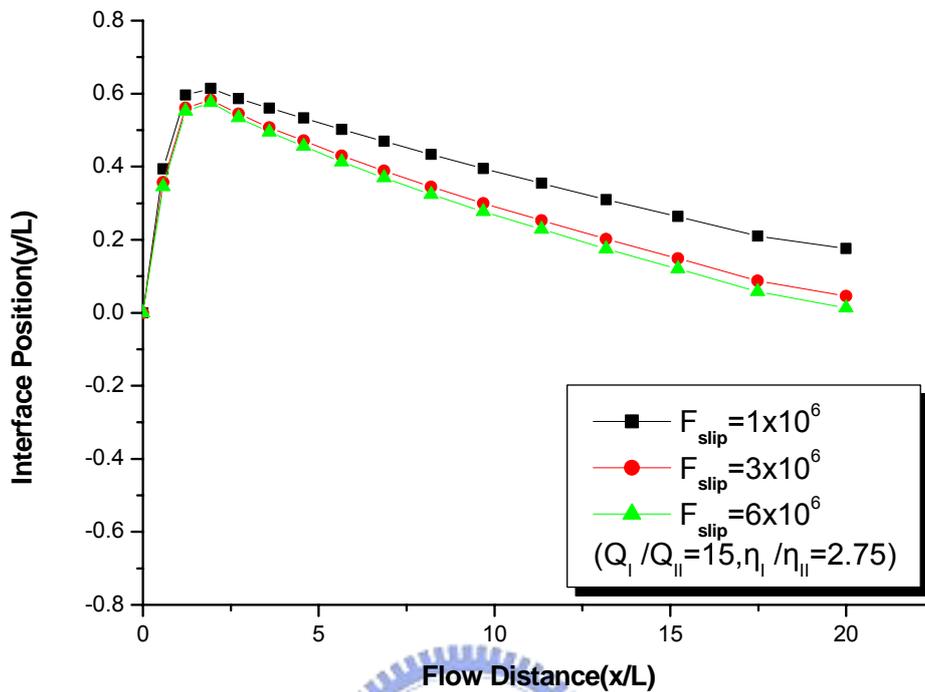


圖 3-6 不同邊界設定下壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖

圖 3-7 至圖 3-9 分別為不同滑動係數下的上下層流體於進料區塊 (feedblock) 出口之第二正向應力差 (N_2) 變化圖，可看出上層流體 (Fluid II) 的第二正向應力差，在中間 ($z/L=0$) 時，約略小於下層流體 (Fluid I) 的第二正向應力差，但是在越靠近壁面 ($z/L=1$)，可以明顯的看出，上層流體 (Fluid II) 的第二正向應力差大於下層流體 (Fluid I) 的第二正向應力差；圖 3-10 為不同滑動係數下之出口界面的 $DN_2 (= (N_1)_{fluid I} - (N_1)_{fluid II})$ 比較圖，由圖可觀察到當滑動係數越大時，其 DN_2 也越大，比較圖 3-4 與圖 3-10，不難看出，包覆度的大小，與靠近壁面 ($z/L=1$) DN_2 的大小，有著相當密切的關係；當包覆度越大，與其對應的是越小的 DN_2 值。

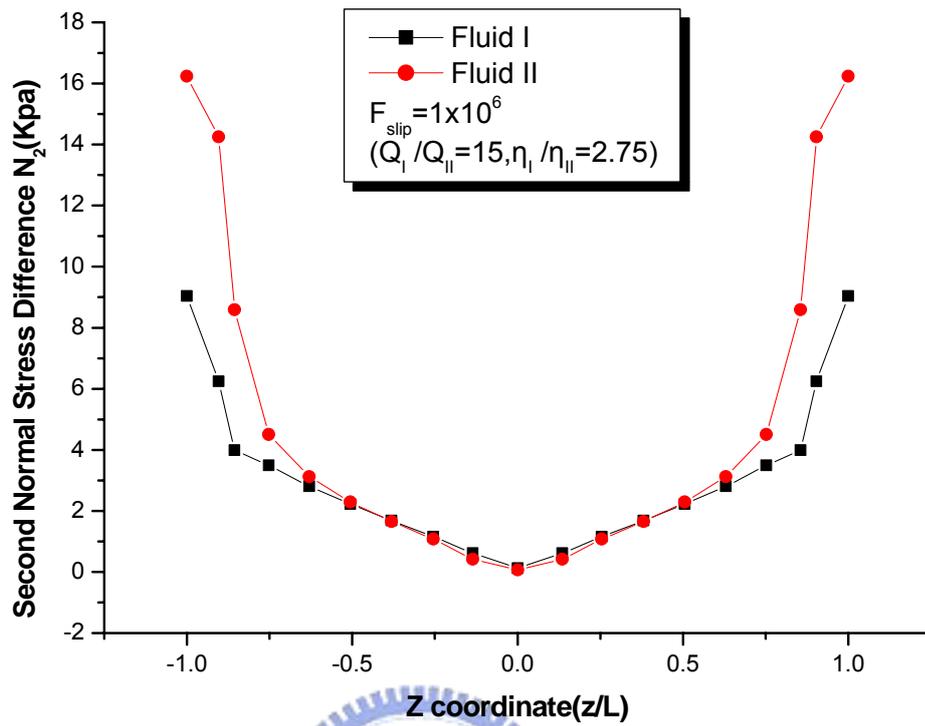


圖 3-7 出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 1 \times 10^6$)

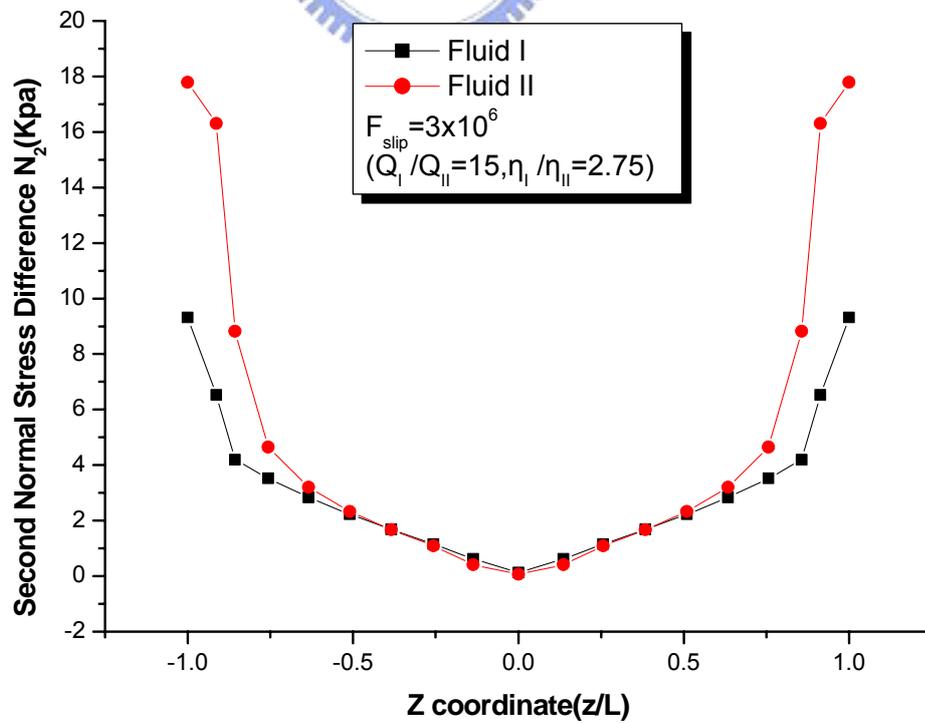


圖 3-8 出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 3 \times 10^6$)

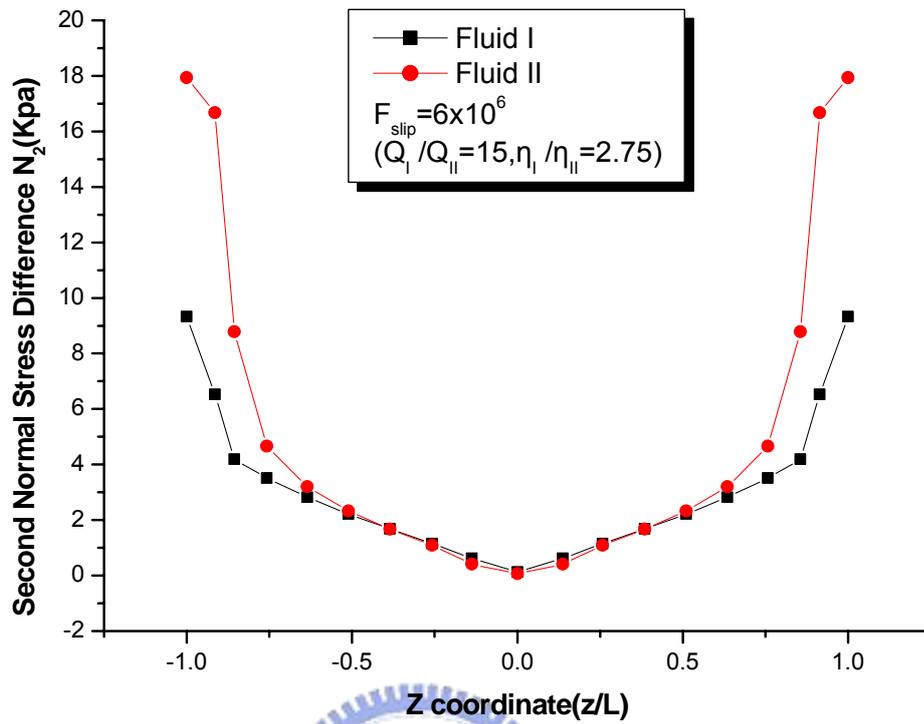


圖 3-9 出口界面之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 6 \times 10^6$)

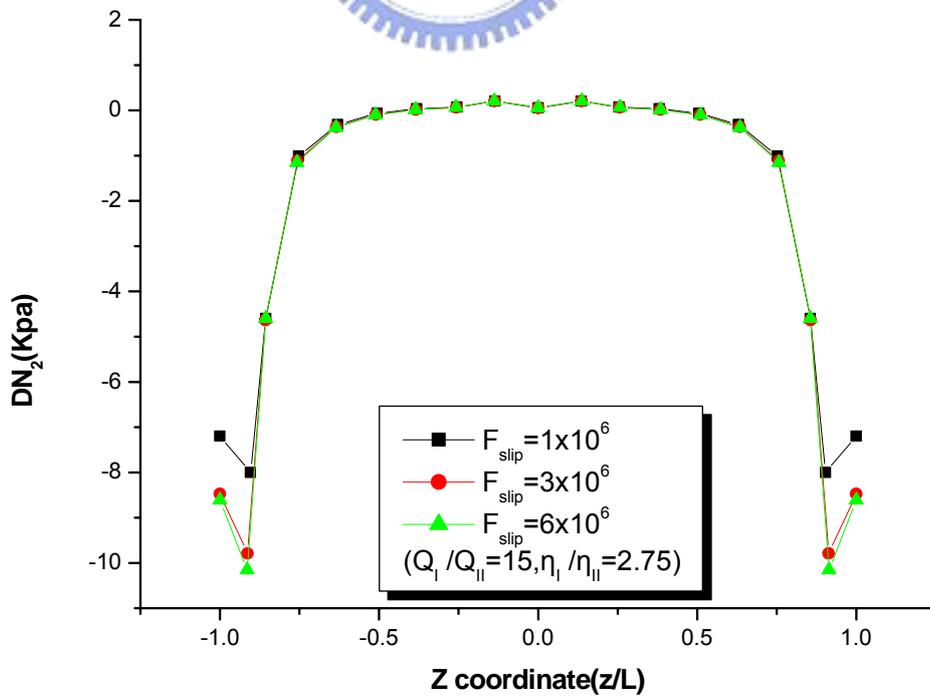


圖 3-10 出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖(滑動係數改變)

圖 3-11 至圖 3-13 分別為不同滑動係數沿流動方向之上下層的第二正向應力差(N_2)變化圖，在匯流處($x/L=0$)可以看出上層流體(Fluid II)的第二正向應力差，會小於下層流體(Fluid I)的第二正向應力差，這是因為兩者間流量的差異所造成的；而後在匯流處附近($x/L<2.5$)，兩層的第二正向應力差皆緩緩上升是因為高分子流體在剛出各自流道後，應力釋放會試圖恢復原狀而產生正向應力；最後是在離匯流處有一定的長度後($x/L>2.5$)，上層流體的第二正向應力差有持續增長，然而下層流體的第二正向應力差大致維持水平，這是因為經過這一段距離後，因為匯流所造成的影響力已經變小，在之後對第二正向應力差影響最大的為流變參數的影響，這也符合我們所說的黏度大的流體會被黏度小的流體所包覆。圖 3-14 為不同滑動係數沿流動方向之 DN_2 比較圖，除了剛出各自流道後，因 DN_2 與滑動係數的關係有些紊亂；隨著流道長度增加，可看出當滑動係數越小時，其 DN_2 的絕對值越小，代表上下層流體在界面附近差異越小，可避免界面不穩定的情況發生。

由此小節之研究可知，藉由增加上下壁面之光滑度使流體在壁面產生滑移，因流體所受壁面阻力減少，流體所受拉伸變形亦減小，而相較於粗糙壁面，流體表現出不同之流動特性，雙層流體間之第二正向應力差皆因此降低，在共押出製程中可藉此避免流體界面不穩定現象發生。

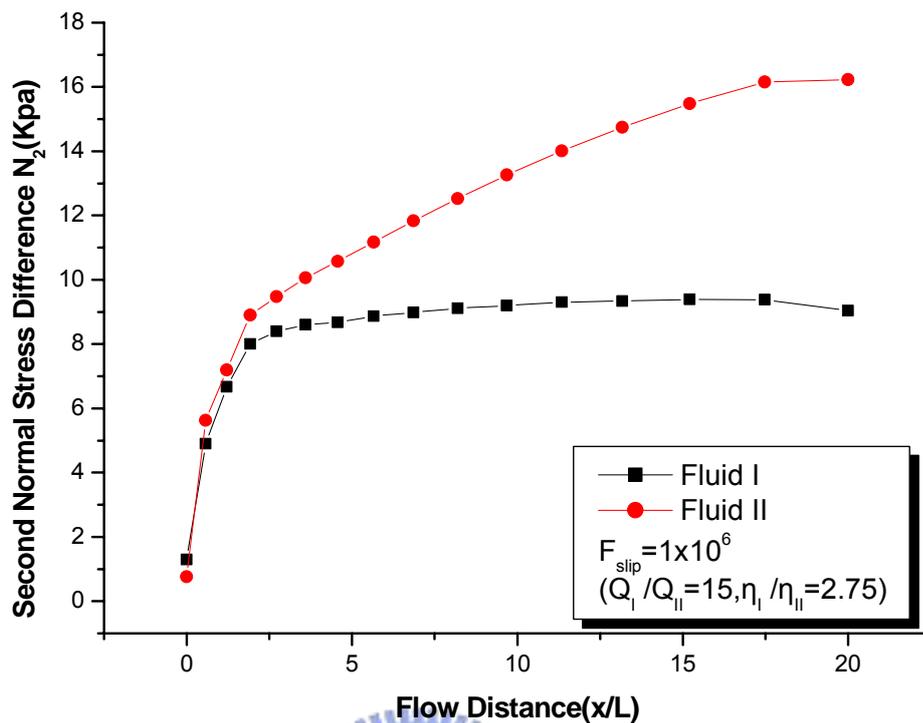


圖 3-11 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 1 \times 10^6$)

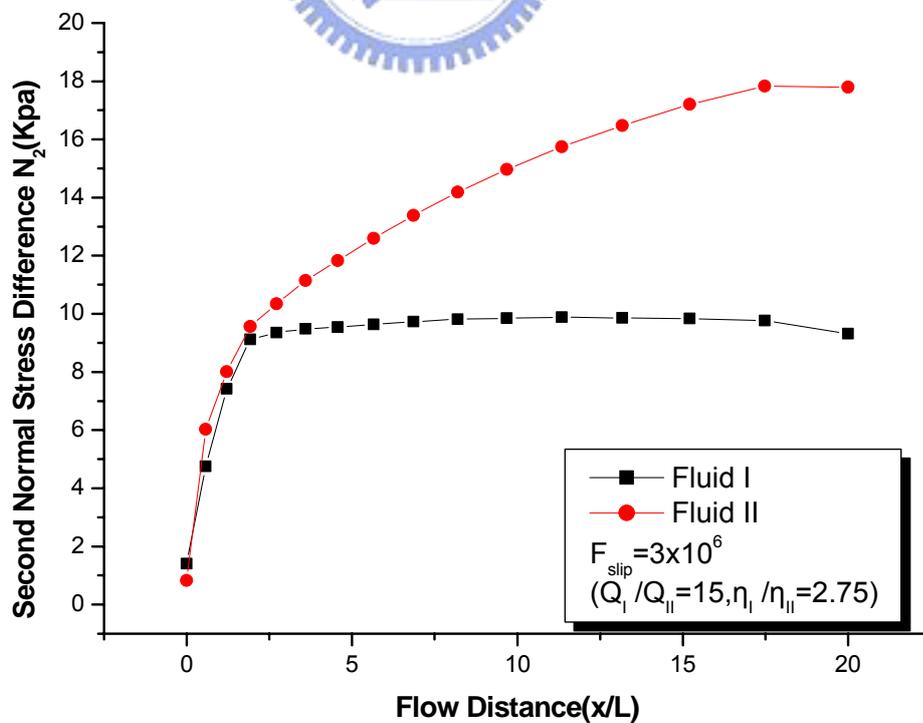


圖 3-12 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 3 \times 10^6$)

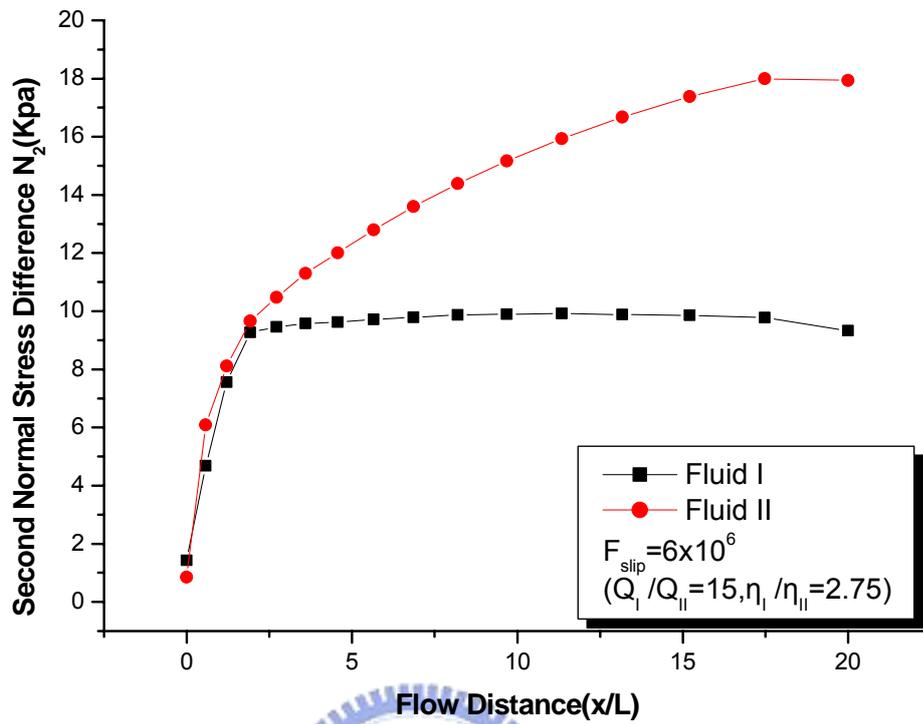


圖 3-13 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($F_{slip} = 6 \times 10^6$)

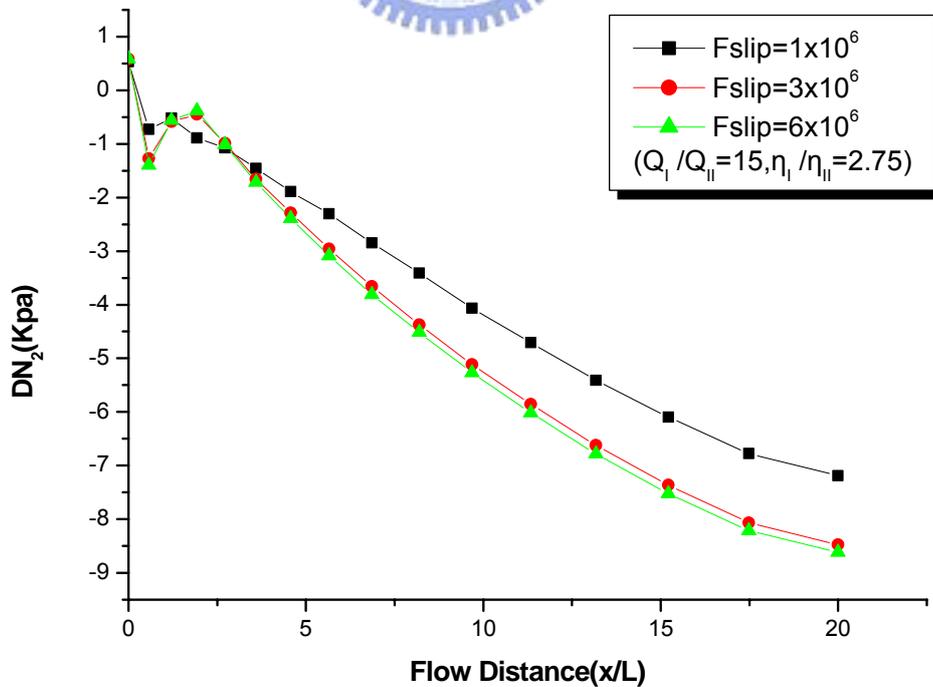


圖 3-14 沿流動方向之上下層流體 DN_2 變化圖(滑動係數改變)

3.2.2 流量比之影響

此小節將討論上下層塑料流體流量比對進料區塊(feedblock)內流動之影響，以期能藉此了解此製程操作條件與共押出製程問題之關係。

圖 3-15 和圖 3-16，分別為不同流量比下之界面包覆度及壁面接觸線位置比較圖，由圖 3-16 可看出當流量比越高，其界面彎曲包覆程度越低，是因為高流量比時，壁面附近之流體界面被下層流體往上推擠，而使界面彎曲變形趨向減緩，所以由包覆度的定義，圖 3-15 可看出當流量比越高時，其包覆度越低。圖 3-17 及圖 3-18，則為不同流量比下進料區塊匯流處之速度向量及壁面接觸線位置圖，可觀察的到當流量比越高時，流體界面往上偏移的程度越高，上層流體被壓縮的程度也越厲害，在經由匯流處後的流體重整後，因匯流流量不同所產生的效應減少，上下層流變參數的影響逐漸顯著，而流體界面也逐漸往下。表 3-3 為改變流量比之的模擬結果整理。



表 3-3 不同流量比之分析比較

	Flow Ratio (Q_I/Q_{II})		
	15	10	6
Outlet Encapsulation (%)	36.49	40.29	45.40
Outlet DN_2 (kPa)	-8.56	-9.50	-11.13

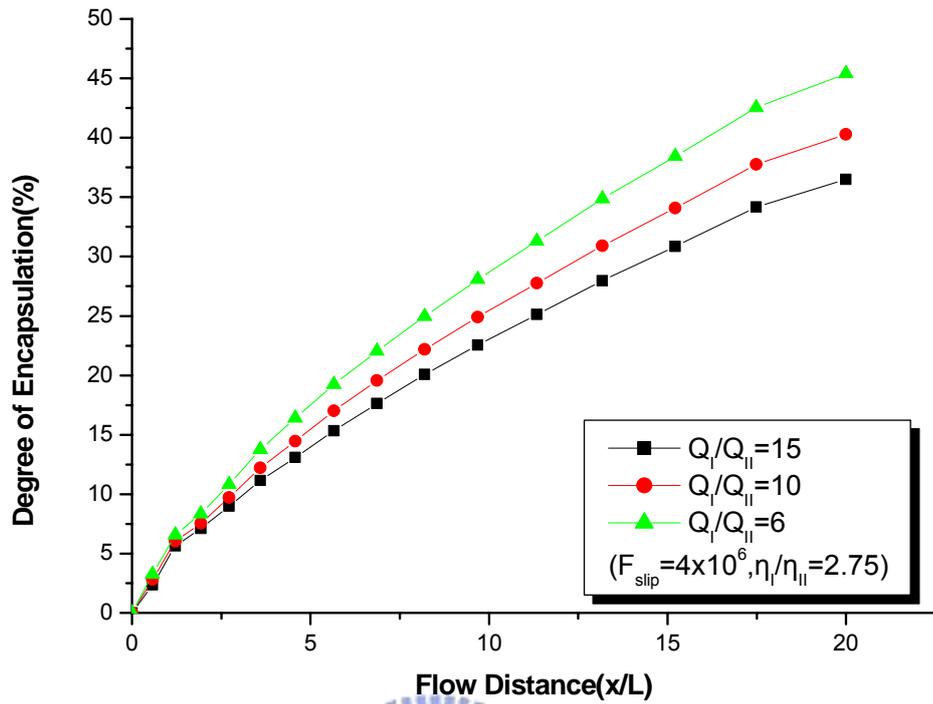


圖 3-15 不同流量比之包覆度比較圖

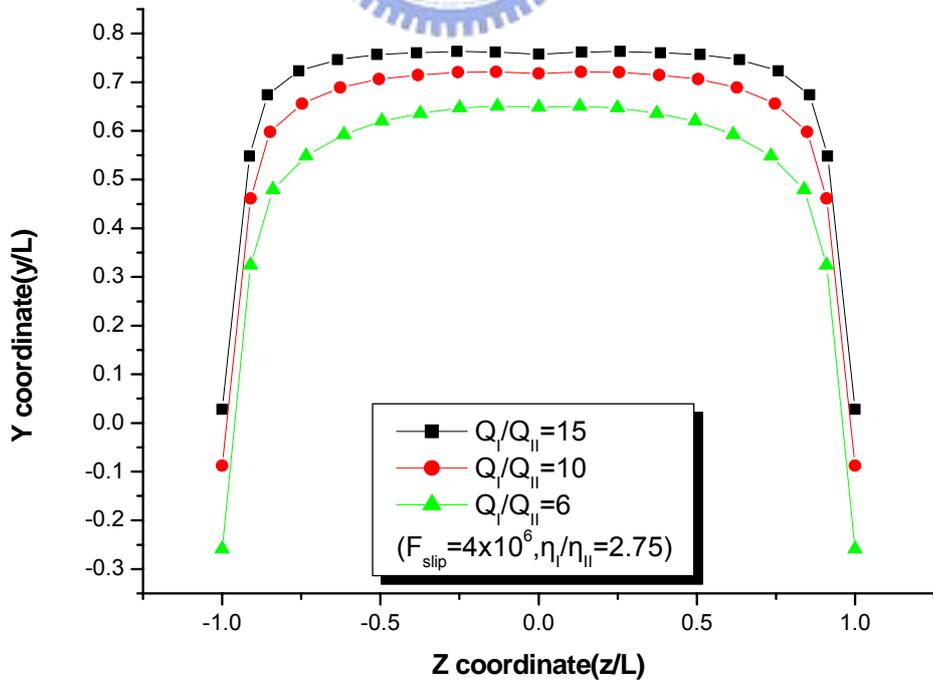


圖 3-16 不同流量比之出口界面位置比較圖

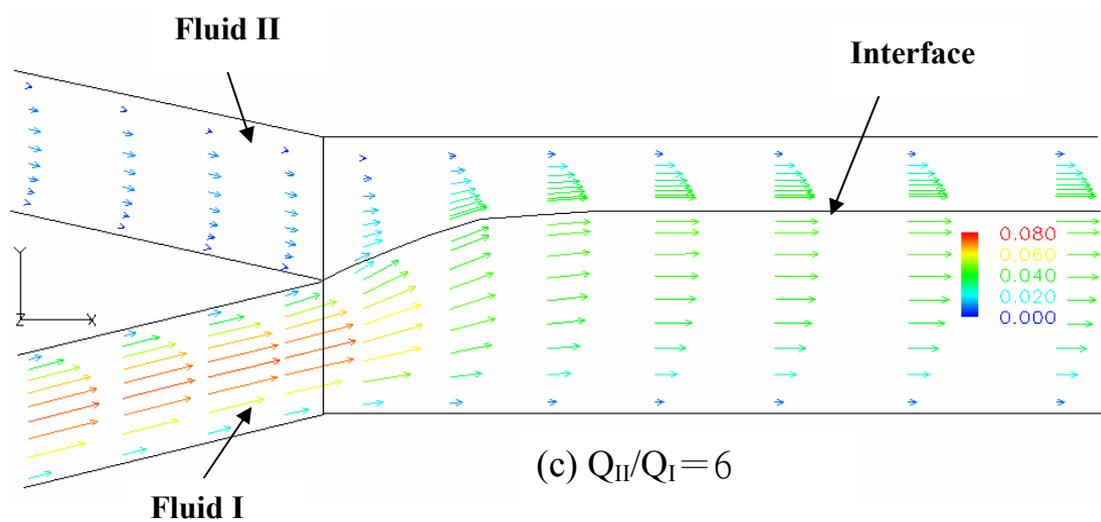
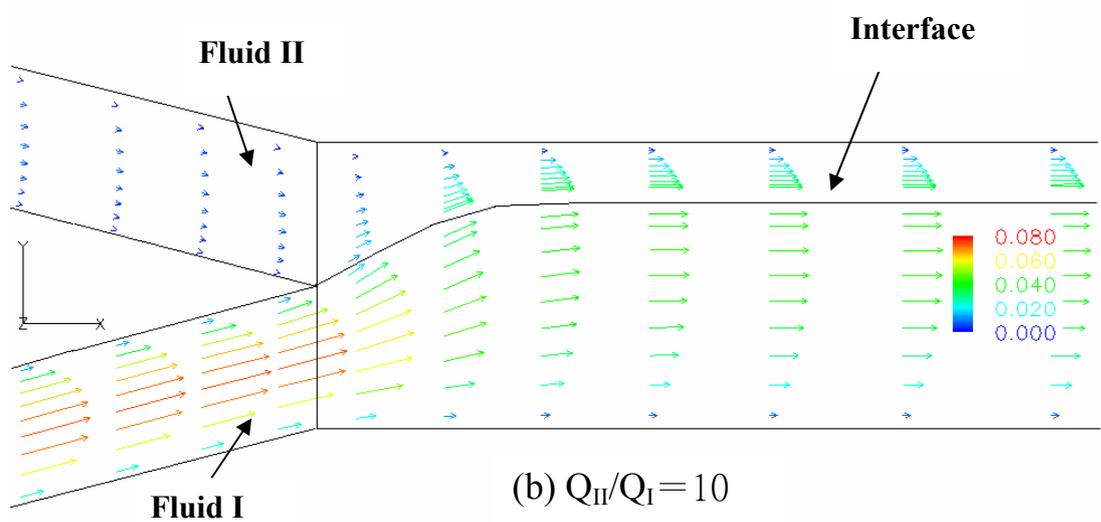
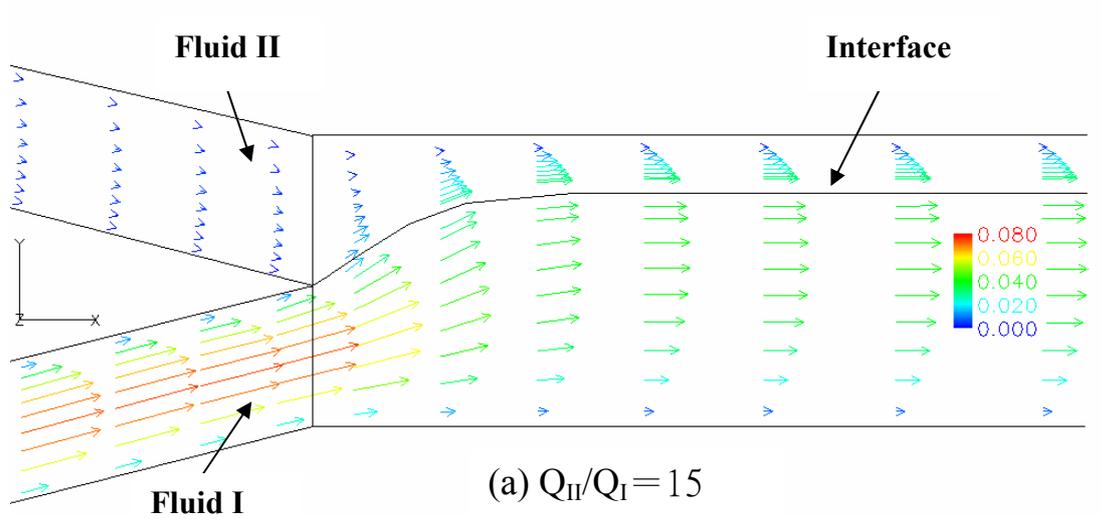


圖 3-17 進料區塊流體匯流處之速度向量圖($z=0$)

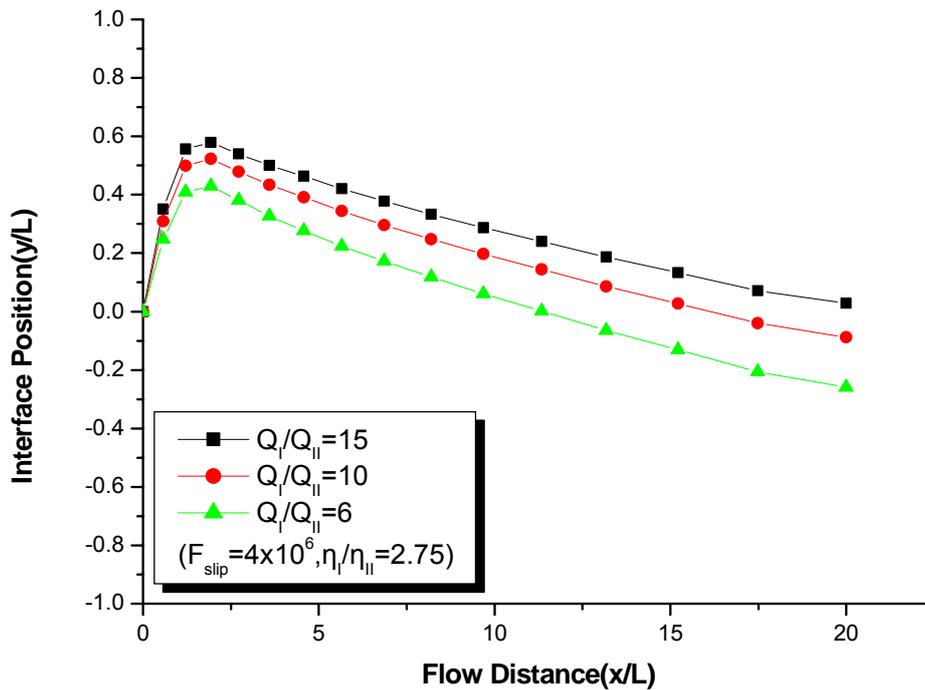


圖 3-18 不同流量比之壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖

圖 3-19 至圖 3-21 分別為分別為不同流量比時上下層流體於上下層流體於進料區塊(feedblock)出口之第二正向應力差(N_2)變化圖，可看出在流道中間時($z/L=0$)，上下層流體的第二正向應力差的差異並不大；但當漸逐漸靠近壁面時，上下層流體的第二正向應力差的差異就變得相當大，可明顯看出，上層流體(Fluid II) 第二正向應力差大於下層流體(Fluid I) 第二正向應力差；圖 3-22 為不同流量比時出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖，可觀察的到流量比越高時，其上下兩層之二正向應力差越低。

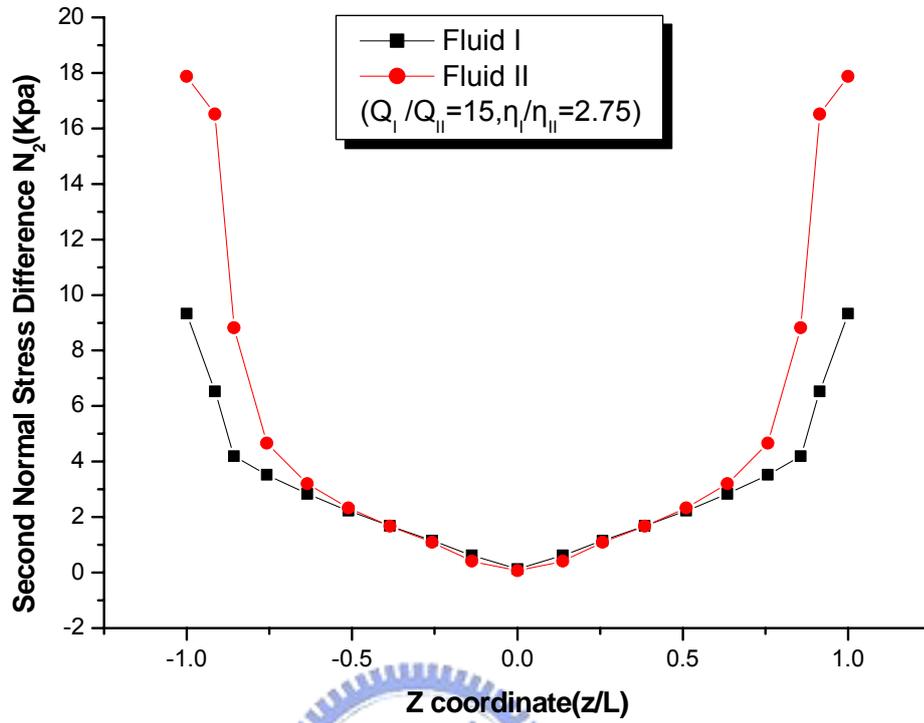


圖 3-19 出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=15$)

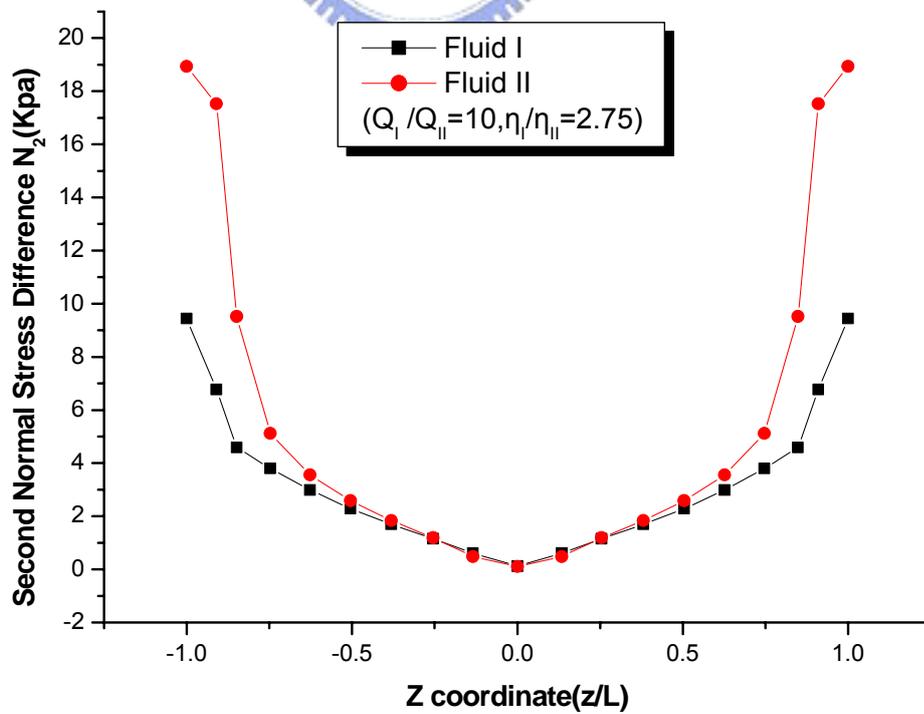


圖 3-20 出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=10$)

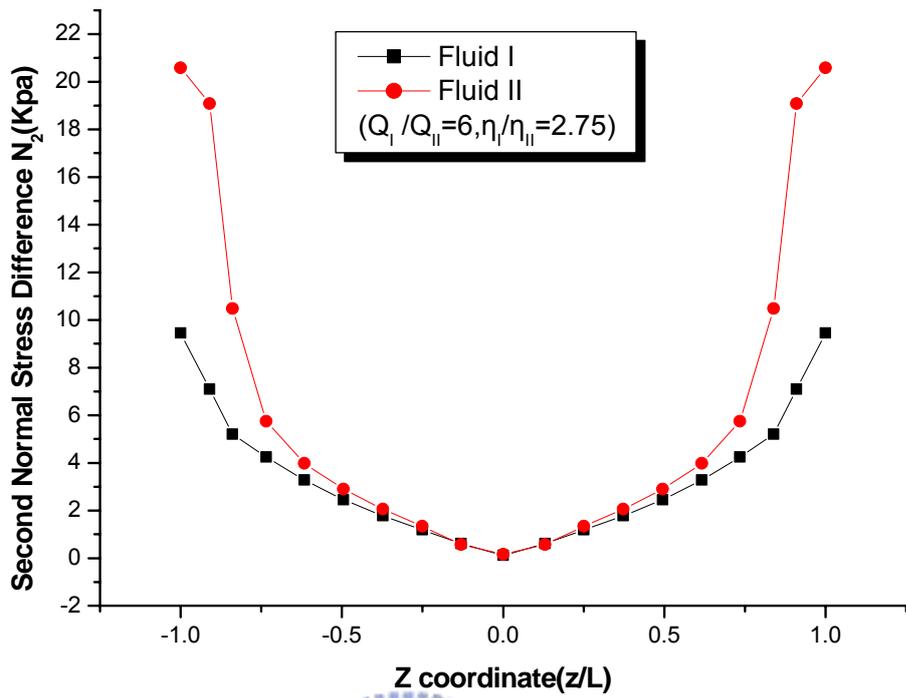


圖 3-21 出口界面之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=6$)

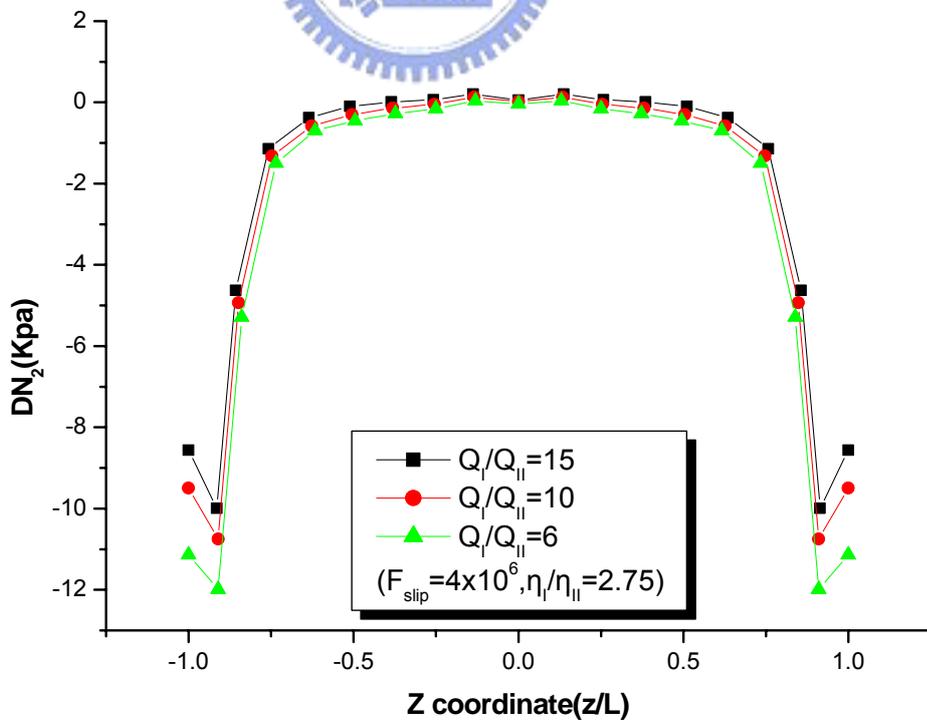


圖 3-22 出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖(流量比改變)

圖 3-23 至圖 3-25 分別為不同流量比時上下層流體沿流道方向於流體界面附近之第二正向應力差(N_2)變化圖，可看出在進料區塊匯流處($x/L=0$)，下層高分子流體的第二正向應力差略大於上層高分子流體，但隨著流道長度增加，上層流體之第二正向應力差變為比下層流體高。而且可以看出，在流道的中間至後面，當流量比越高時，下層流體的第二正向應力差大小可維持接近水平；但當流量比降低時，下層流體的第二正向應力差有逐漸變小的趨勢。圖 3-26 為不同流量比沿流動方向之 DN_2 比較圖，觀察到流量比越高，上下兩層的第二正向應力差的差異越低可避免界面不穩定的情況發生。

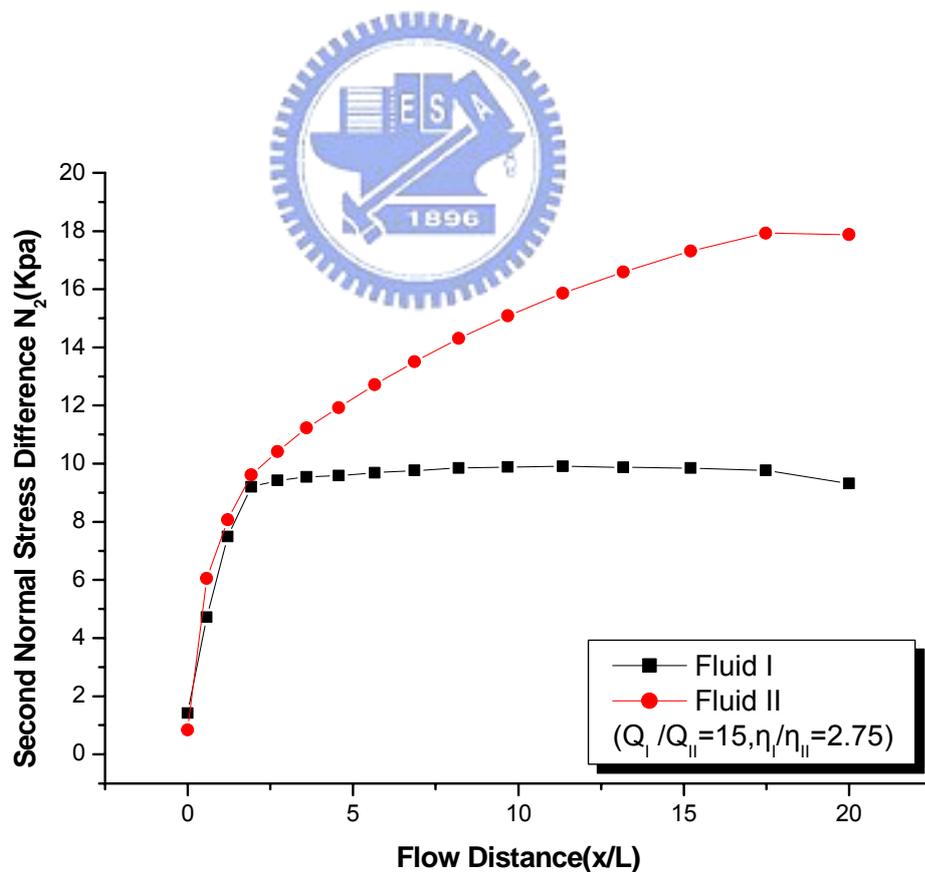


圖 3-23 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=15$)

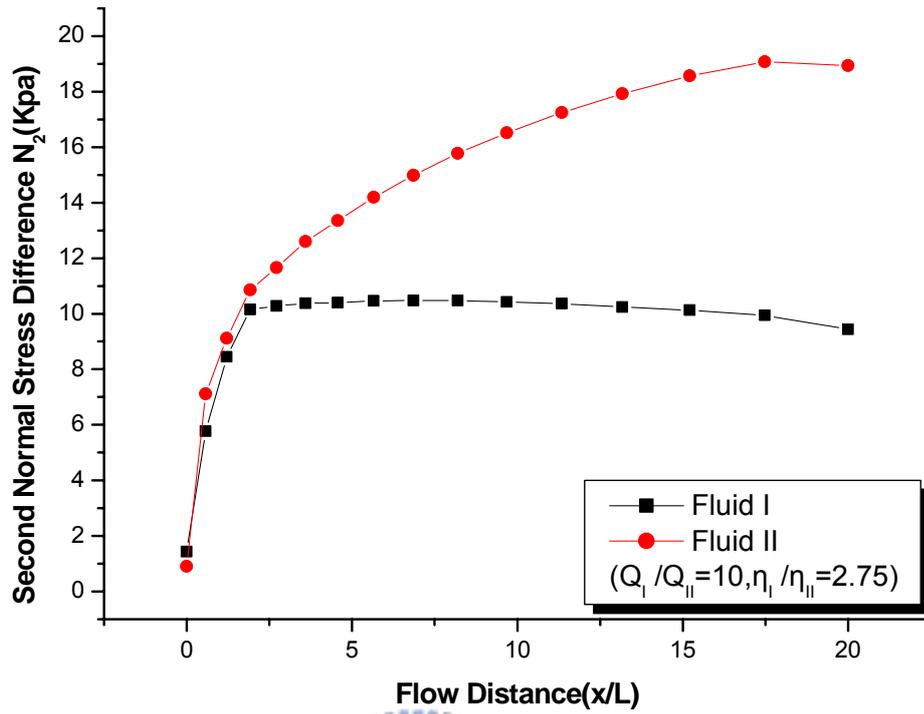


圖 3-24 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=10$)

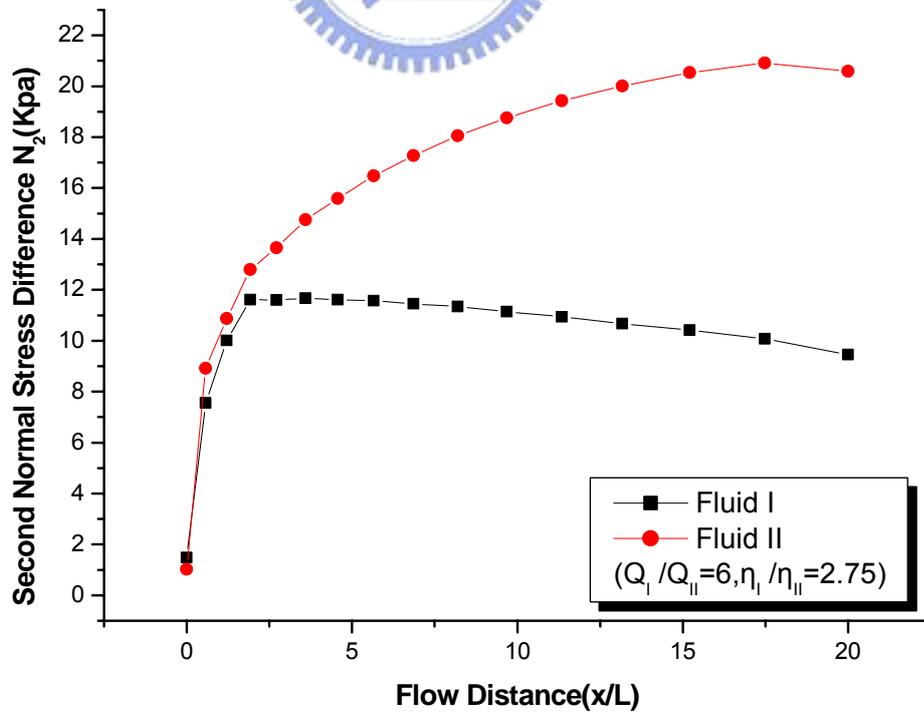


圖 3-25 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($Q_I/Q_{II}=6$)

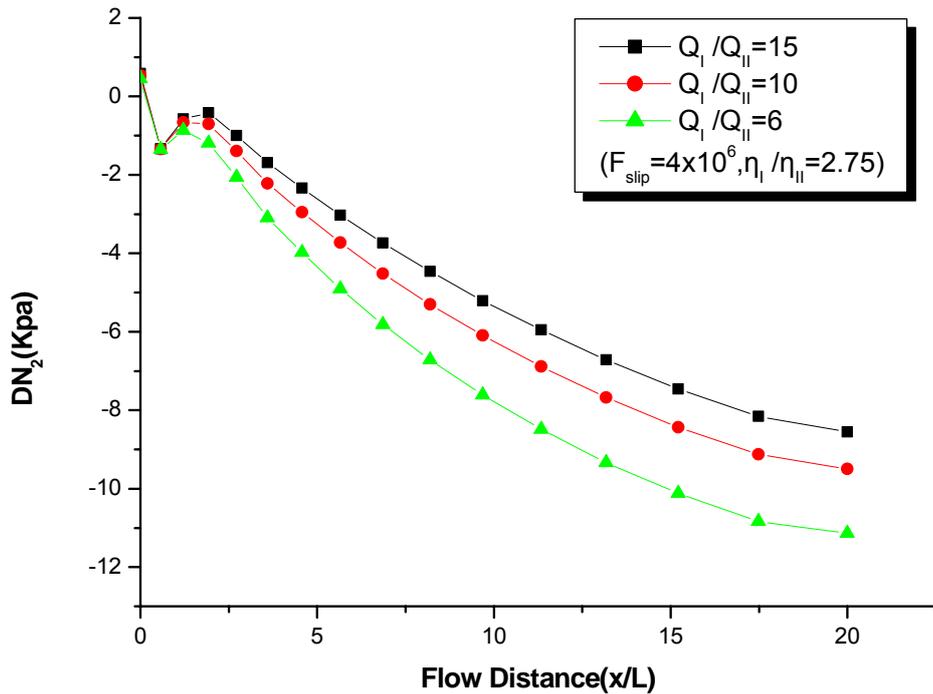


圖 3-26 沿流動方向之上下層流體 DN₂ 變化圖(流量比改變)

由上述研究可看出，當流量比越低時，代表上層高分子塑料流量較高，所以因流量差異所造成的影響會降低，但因上下兩層不同的流變參數是造成界面上不同的第二正向應力的主要因素。且須注意的是低流量比時，界面彎曲包覆程度會較嚴重，故應使用較短之流道長度以避免此逐漸增加之包覆現象。

3.2.3 流變參數 ξ 之影響

此節將討論 PTT 模型中之流變參數 ξ 對進料區塊內流動之影響， ξ 代表流體之第二正向應力差(second normal stress difference)性質，由於在 PTT 模型中還有另一個流變參數 ε ，在本小節中，將固定下層的 ξ 並令兩層的值為一樣，只改變上層流體 ξ 值以藉此了解第二正向應力差對於共押出製程問題之關係。當塑料流體流變參數 ξ 值越高，表示此塑料會表現出更大的第二正向應力，而上下兩層因流變參數不同，會使得進料區塊中之雙層流體界面因 ξ 值差異而呈現突起的狀況。此節將針對上下層高分子塑料流體之 ξ 比來探討對於界面包覆現象之影響。

(1) 改變上層流體 ξ 值

圖 3-27 為改變上層 ξ 比之界面包覆度比較圖，因上下層高分子流體之黏度比與流量比皆相同，故界面包覆度之變化僅隨 ξ 比不同而改變，由圖可看出當上層流體(Fluid II)的 ξ 越小時，其包覆度越大。

圖 3-28 為改變上層 ξ 比之出口界面位置比較圖，由圖可觀察到當上層流體與下層流體的 ξ 值差越大時，其出口處的壁面接觸點(contact point)越低，低黏度流體包覆高黏度流體的現象也越明顯。圖 3-29 是則為改變上層 ξ 比時壁面接觸線位置圖，由圖中可看出在矩形流道的進料區塊匯流處，流體於此處匯流產生一流體界面，而因流量差異極大使得流體界面產生往上偏移，其影響遠大於第二正向應力差產生之二次流動，在這之後由於上下層流體的 ξ 值不同，會有不同程度的上層流體包覆下層流體的現象，當上下層流體之 ξ 值差異越大時，此現象就越明顯，同時可看出壁面的接觸線也會越往下移。

表 3-4 為上述模擬結果整理，可明顯看出 ξ 值差異越大，其出口界面包覆度及 DN_2 都隨之上升。

表 3-4 改變上層 ξ 值之分析比較

ξ_{II}/ξ_I (ratio)	Numerical Results ($Q_I/Q_{II}=15, \eta_I/\eta_{II}=2.75$)	
	Outlet Encapsulation (%)	Outlet DN_2 (Kpa)
0.26/0.52(1/2)	48.57	-12.61
0.39/0.52(3/4)	44.93	-11.11
0.52/0.52(1)	40.85	-9.31

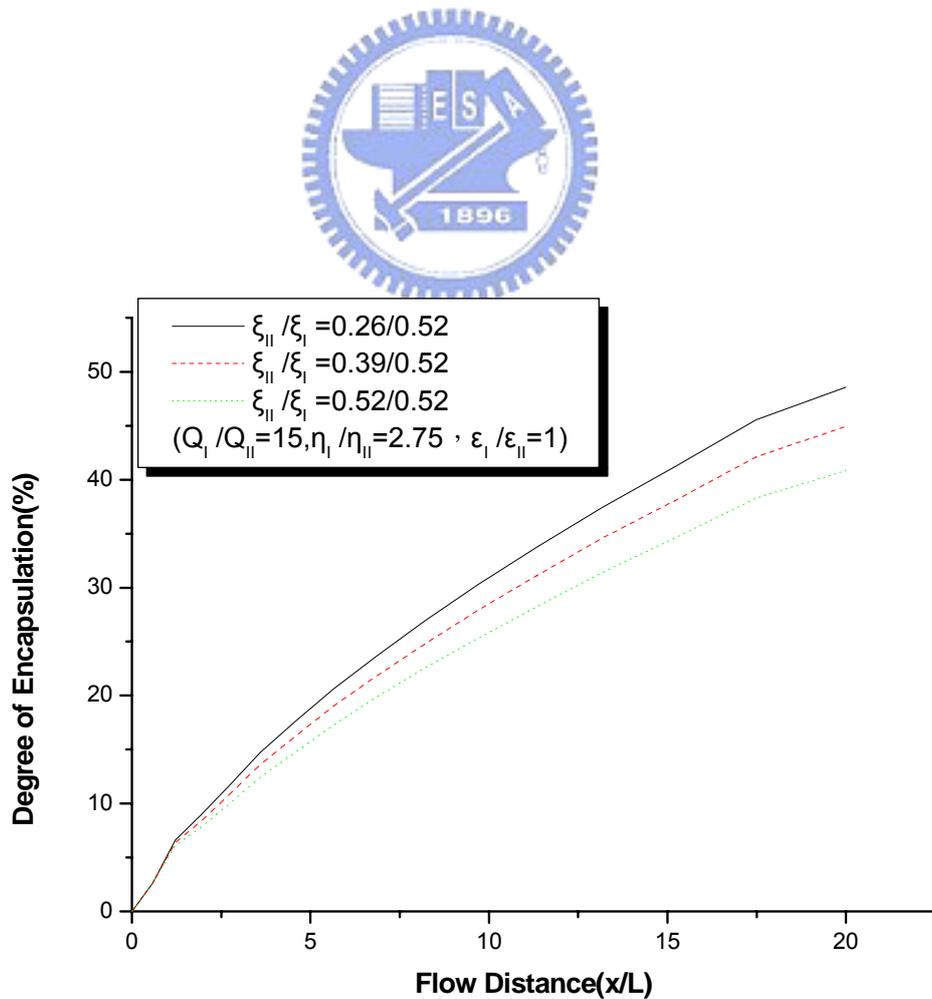


圖 3-27 改變上層流體 ξ 值之界面包覆度比較圖

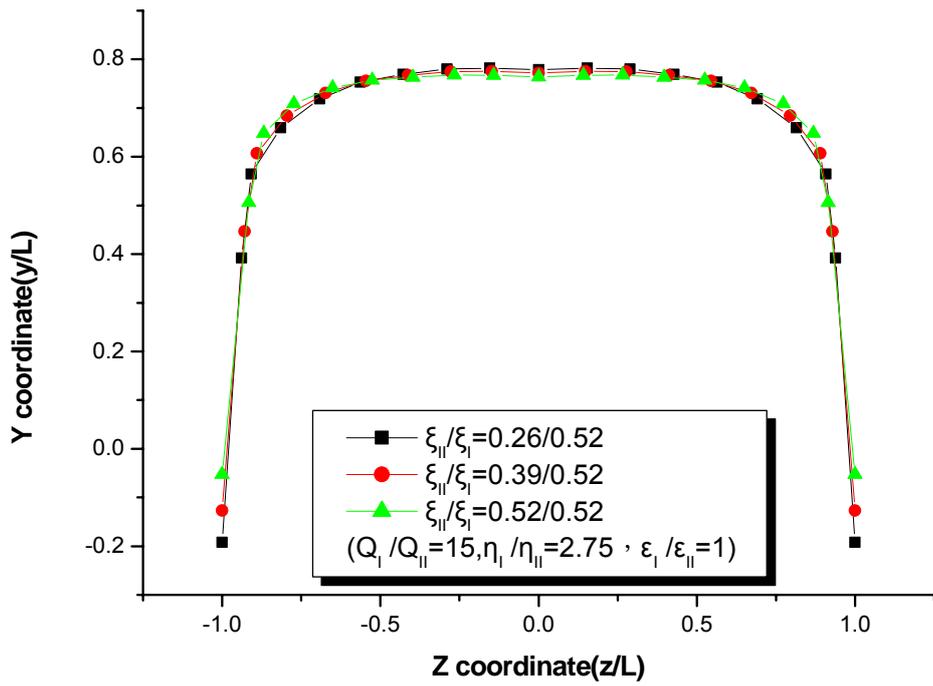


圖 3-28 改變上層流體 ξ 值之出口界面位置比較圖

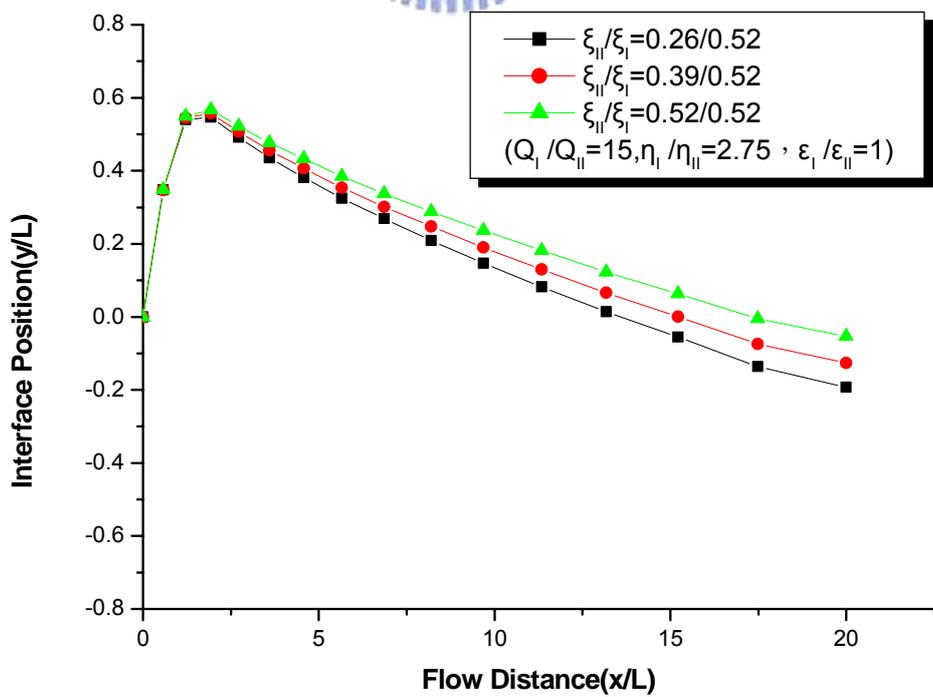


圖 3-29 改變上層流體 ξ 之壁面 ($z/L=1$) 接觸線位置比

圖 3-30 至圖 3-32 分別為不同 ξ_{II} 值的流體於進料區塊(feedblock)出口之第二正向應力差(N_2)變化圖，可看出當上層流體(Fluid II)的 ξ 值變大時，上層流體的 N_2 值會逐漸變小，而下層流體的 N_2 值並沒有很大的改變；圖 3-33 為改變上層 ξ 比時出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖，由圖可以看出上層流體的 ξ 值差異越大時，其上下兩層各別的第二正向應力差(N_2)的差異也越大，所以也造成 DN_2 的差值越大。比較圖 3-28 及圖 3-33，可觀察的到出口界面在壁面上的接觸點與 DN_2 值有所關聯，當 DN_2 的絕對值越大，其接觸點也會越往下移。

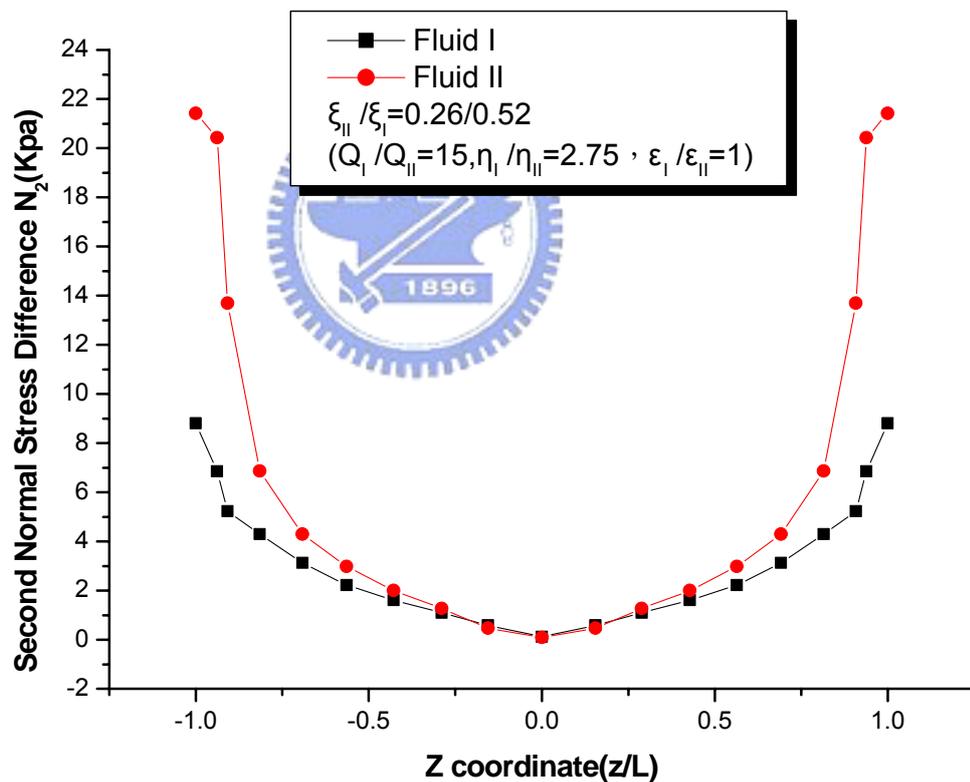


圖 3-30 出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.52$)

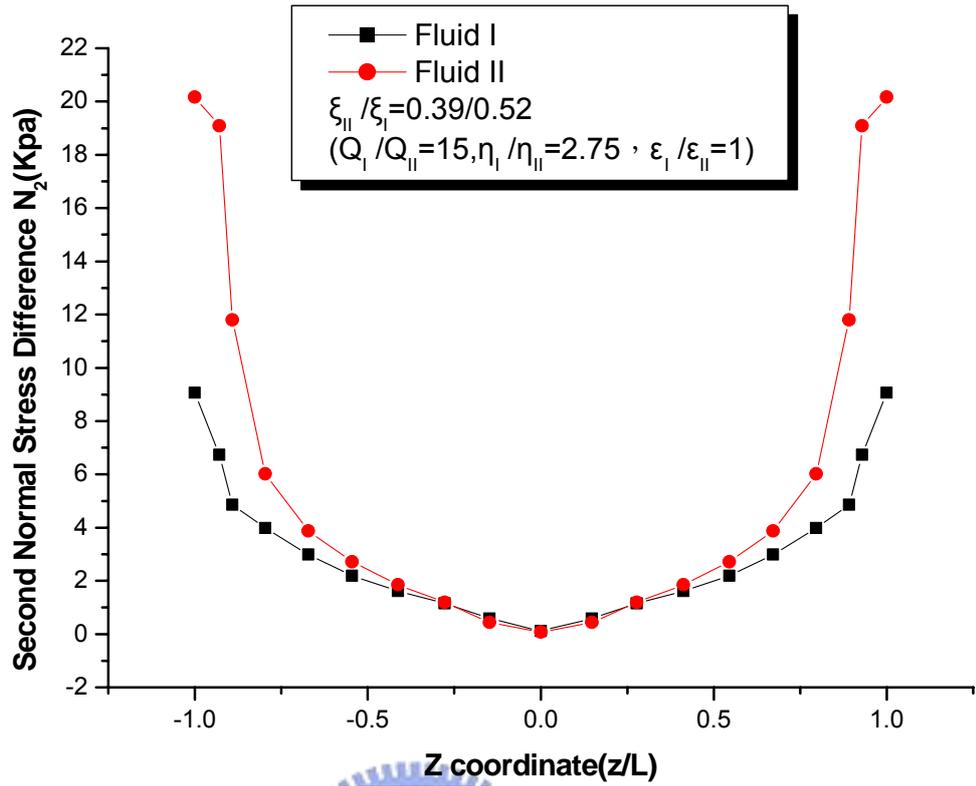


圖 3-31 出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.52$)

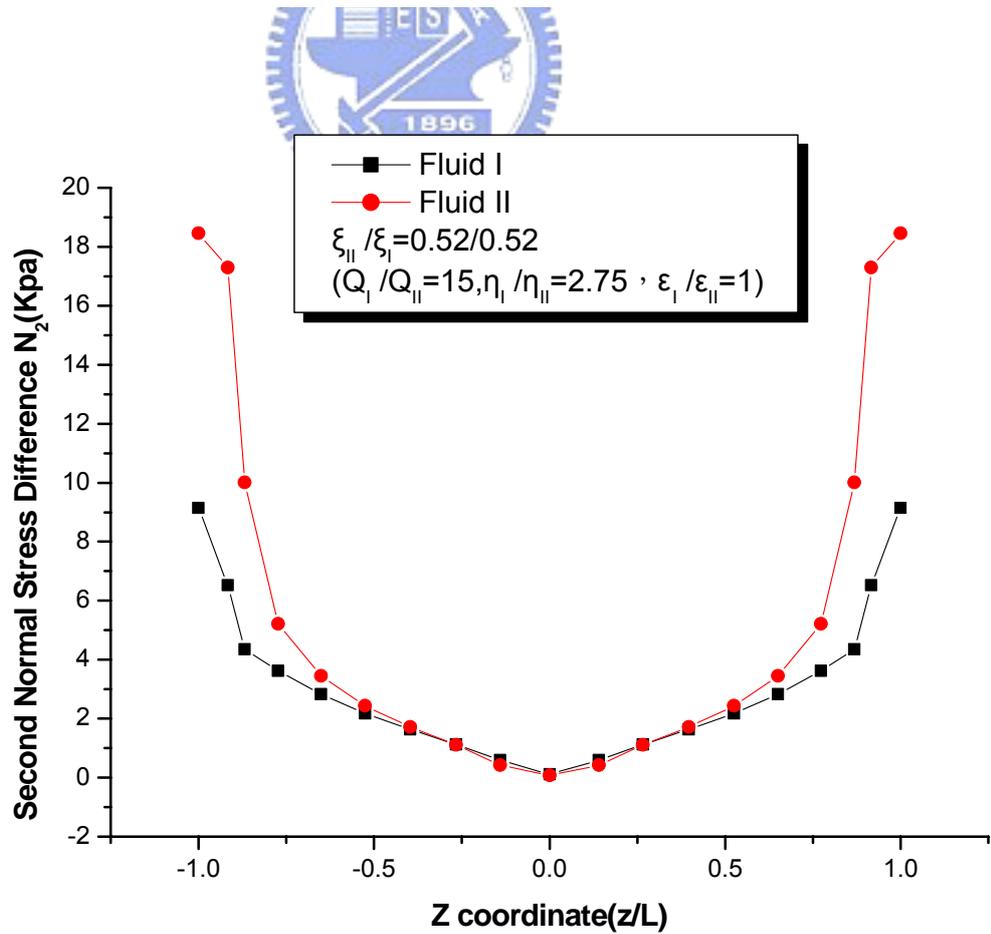


圖 3-32 出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.52/0.52$)

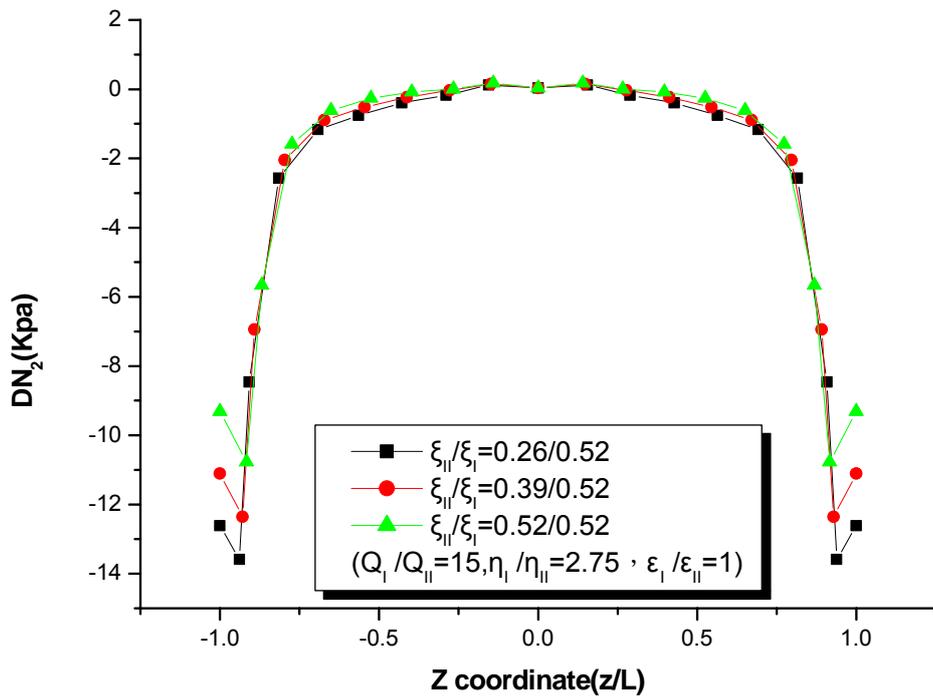


圖 3-33 改變上層 ξ 值之出口界面的 DN_2 變化圖

圖 3-34 至圖 3-36 分別為不同 ξ_{II} 值的流體沿流道方向於流體界面附近之第二正向應力差(N_2)變化圖，由圖中可看出當在進料區塊匯流處 ($x/L=0$)，下層高分子流體的第二正向應力差略大於上層高分子流體，但隨著流道長度增加，上層流體之第二正向應力差變為比下層流體高。

圖 3-37 則為改變上層 ξ 比時沿流動方向之上下層流體 DN_2 變化圖，由圖可看出在區塊匯流處，其 DN_2 為正值，代表下層流體的 N_2 值大於上層的，這是因為流量的差異所帶來的結果；匯流處後，由於上下層有著不同的 ξ 差異，所以會導致不同的 DN_2 值，由這兩圖可看出當上下兩層的 ξ 差異大，其 DN_2 的差值也越大，與圖 3-28 比較也可看出當接觸線出匯流處後會有先往上升而後下降的情況，看圖 3-37 可看出當上升時，其 DN_2 的值會逐漸變大，也就是說上下兩層的 DN_2 差值越來越小，所以由第二正向應力所造成的二次迴流變小，界面因此而往上升；過了某一點後，由於上

下兩層的 DN_2 差值越來越大，所以第二正向應力所造成的二次迴流也越來越明顯，所以會使得界面逐漸的往下移動

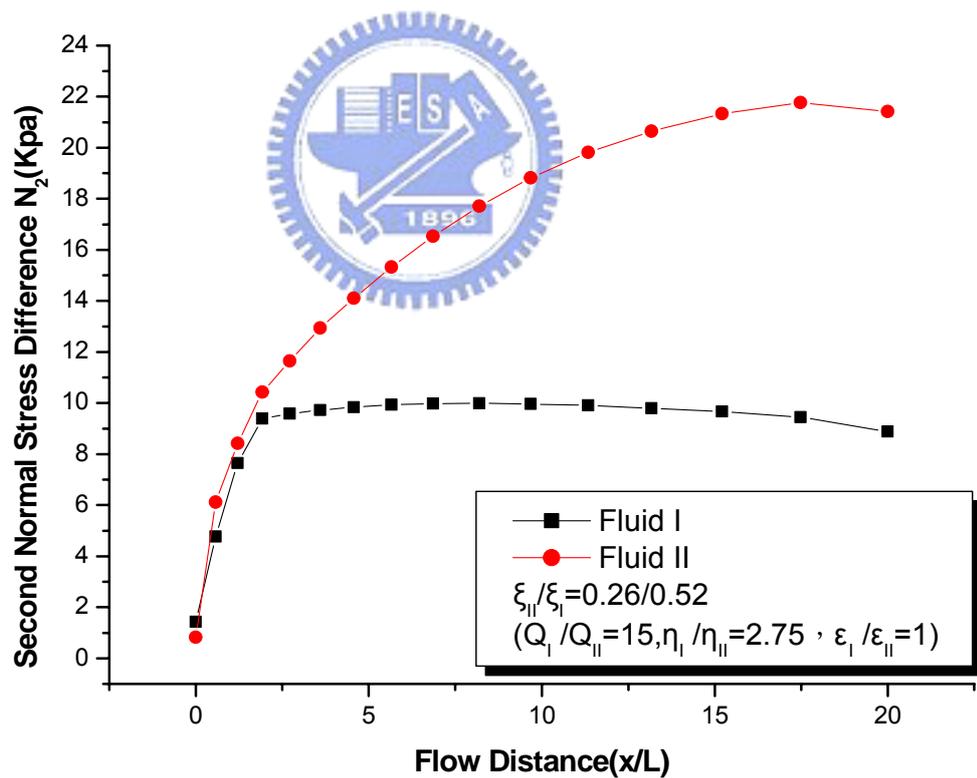


圖 3-34 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.52$)

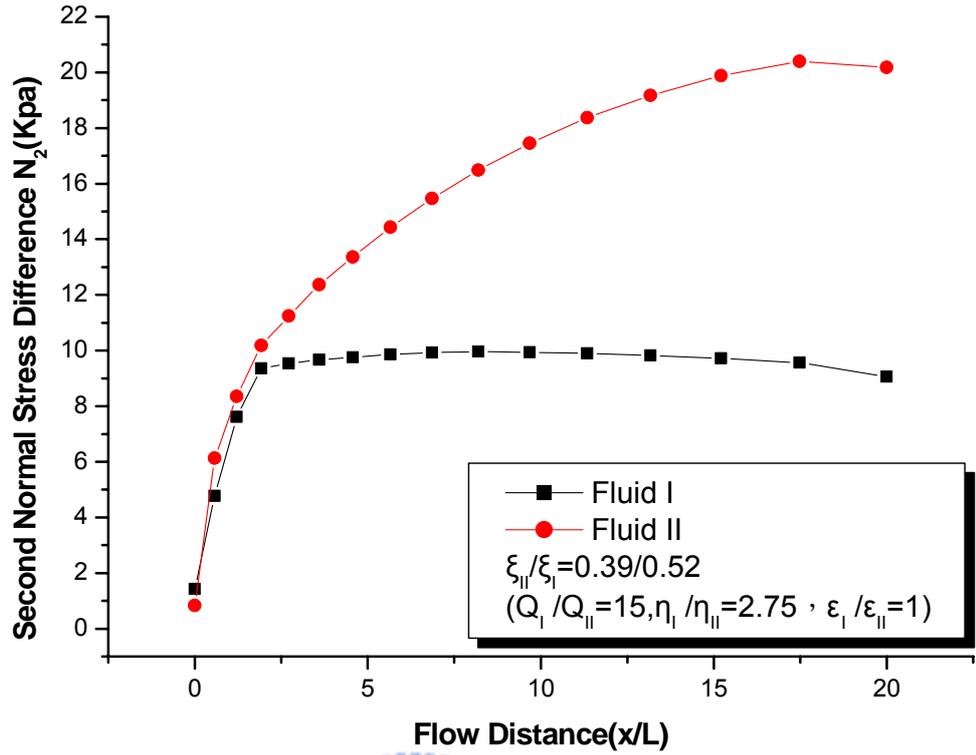


圖 3-35 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.39/0.52$)

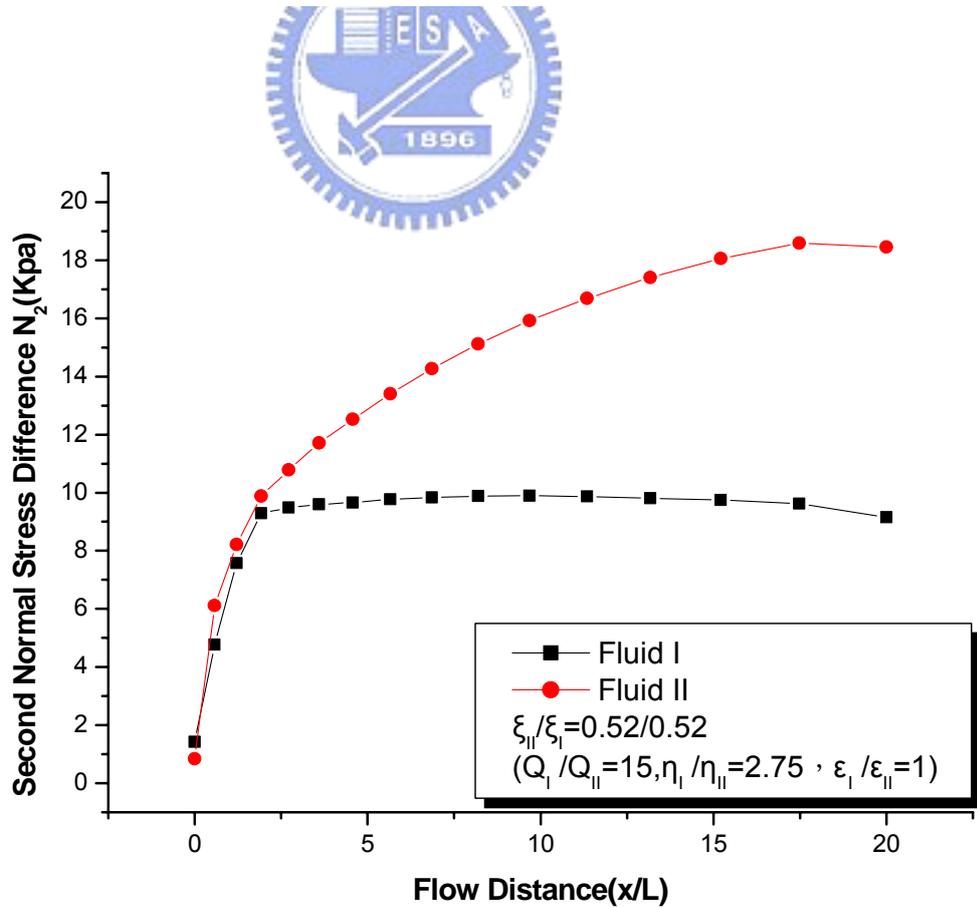


圖 3-36 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.52/0.52$)

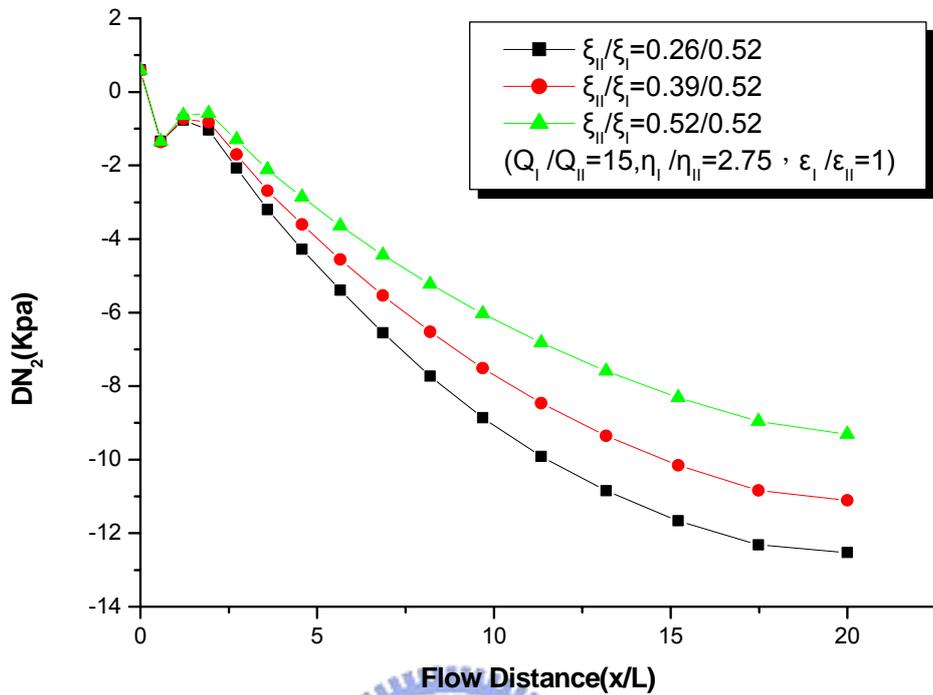


圖 3-37 改變上層 ξ 值之沿流動方向的 DN_2 變化圖

(2) 固定上下層流體 ξ 比

PTT 黏彈模型中之 ξ 參數代表流體第二正向應力差之性質， ξ 值越大流體表現出之 N_2 值越大。由前述研究可知上下層流體 ξ 值差異越大使得進料區塊內之 DN_2 的絕對值也越大，此小節將固定上下層流體 ξ 比以探討 ξ 值對於界面彎曲包覆的影響。

圖 3-38 為固定上下層塑料流體之 ξ 比值並藉由改變 ξ 值探討其對包覆現象之影響，可看出即使上下流體之 ξ 值比沒有差異，但 ξ 值越大仍使得界面包覆程度上升，其流體於出口界面位置如圖 3-39 所示。因 ξ 在 PTT 黏彈模型中代表第二正向應力差之性質，為流體第二正向應力差或係數 (second normal stress difference or coefficient)對第一正向應力差或係數(first normal stress difference or coefficient)之比，因此即使上下流體 ξ 值相等，高 ξ 值仍會造成較大的 DN_2 的差值，造成較高的界面包覆現象。圖 3-40 為

固定 ξ 比值之壁面 ($z/L=1$) 接觸線位置比較圖，由圖可看出在匯流區由於流量的影響，下層流體會將上層流體擠壓，當經過了匯流區後，因第二正向應力的作用，上層流體會逐漸包覆下層流體，所以界面接觸線會往下移動。表 3-5 上述模擬結果整理。

表 3-5 固定 ξ 比設定之分析比較

ξ_{II}/ξ_I	Numerical Results ($Q_I/Q_{II}=15, \eta_I/\eta_{II}=2.75$)	
	Outlet Encapsulation (%)	Outlet DN_2 (Kpa)
0.26/0.26	23.80	-5.48
0.39/0.39	33.27	-7.76
0.52/0.52	40.85	-9.31

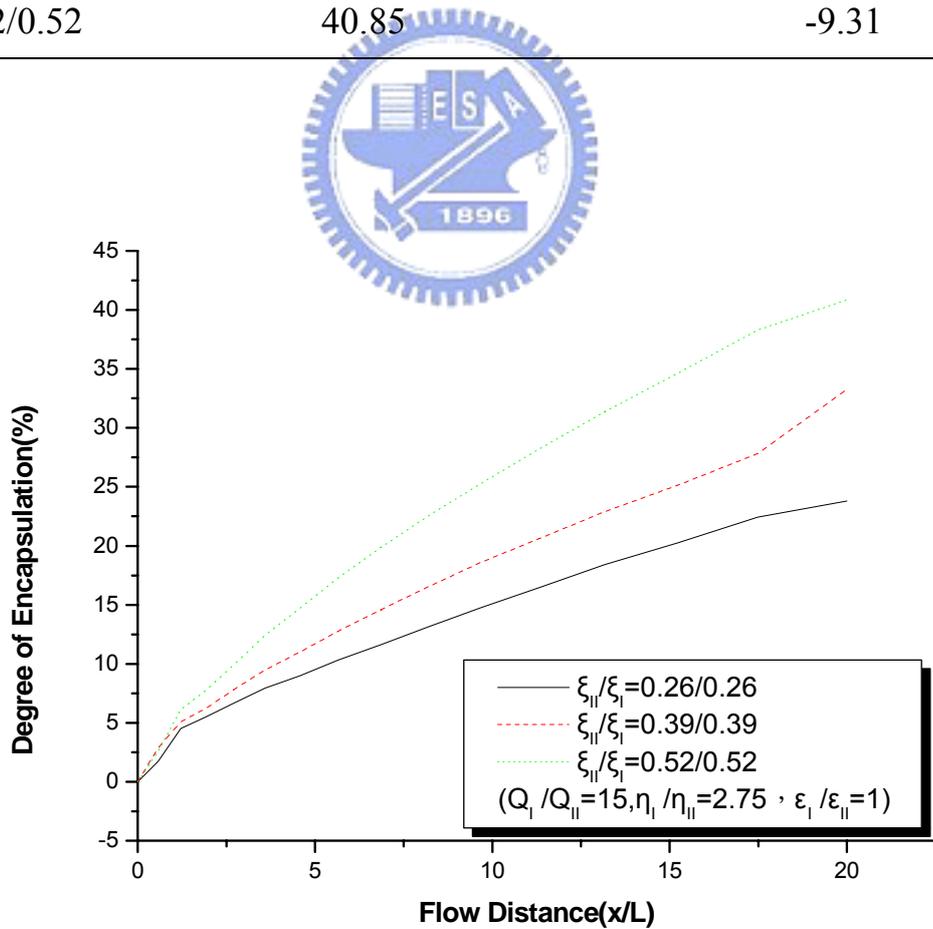


圖 3-38 固定 ξ 比值之界面包覆度增加比較圖

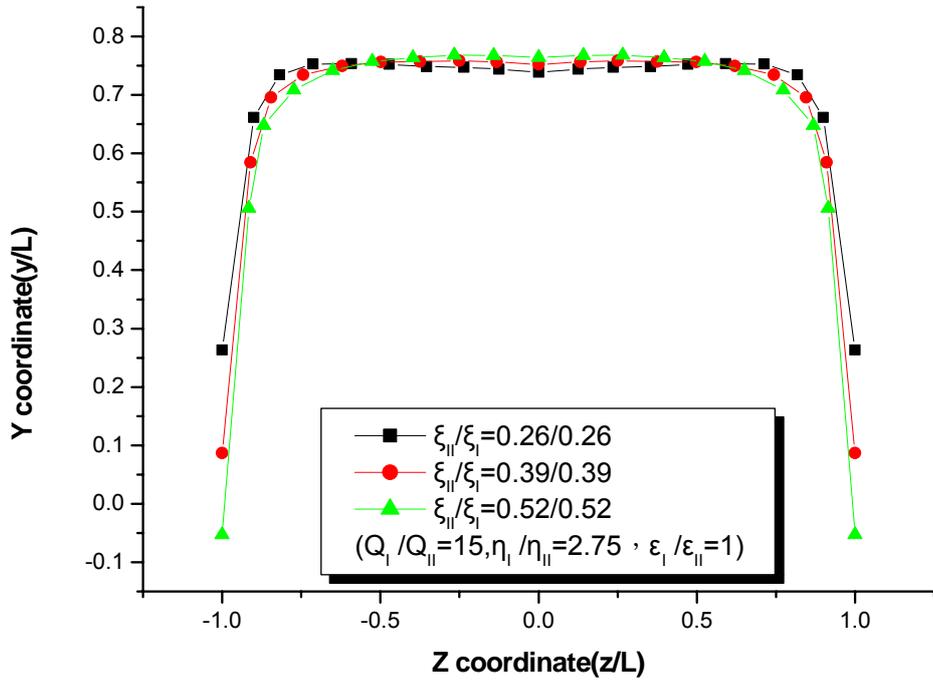


圖 3-39 固定 ξ 比值之出口界面位置比較圖

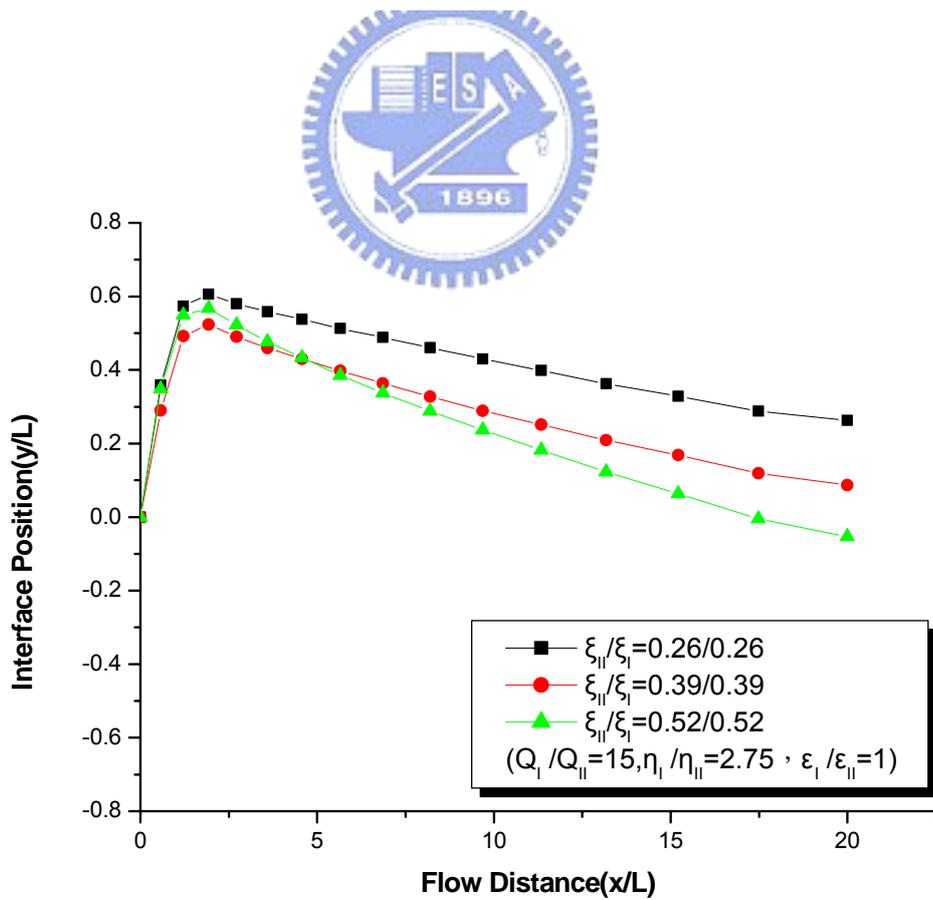


圖 3-40 固定 ξ 比值之壁面 ($z/L=1$) 接觸線位置比較圖

圖 3-32、圖 3-41 和圖 3-42 分別為固定 ξ 值的流體於進料區塊 (feedblock) 出口之第二正向應力差(N_2)變化圖，當在中間部份時，下層的 N_2 值會略大於上層的 N_2 值，但隨著 ξ 值變大，兩者差距會變小；而在靠近壁面時，則是會隨著 ξ 值的變大而上層的 N_2 值會有明顯變大的趨勢。

圖 3-43 為固定 ξ 比值之出口界面的 DN_2 比較圖，由圖可觀察到當 ξ 值越大，其所相對應的上下層的 N_2 差值越大，也就是 DN_2 的絕對值越大，並與圖 3-38 比較可得，當在壁面的 DN_2 絕對值越大時，會有較大的包覆度。

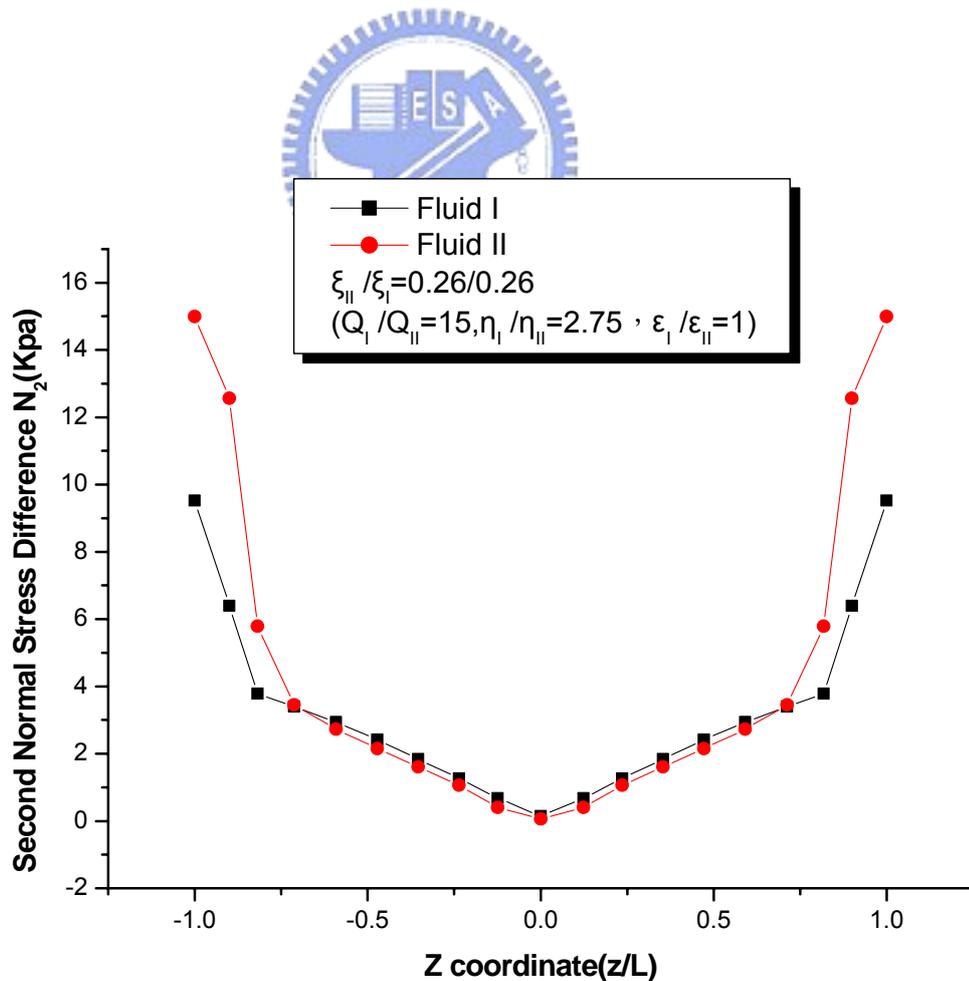


圖 3-41 出口界面之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.26$)

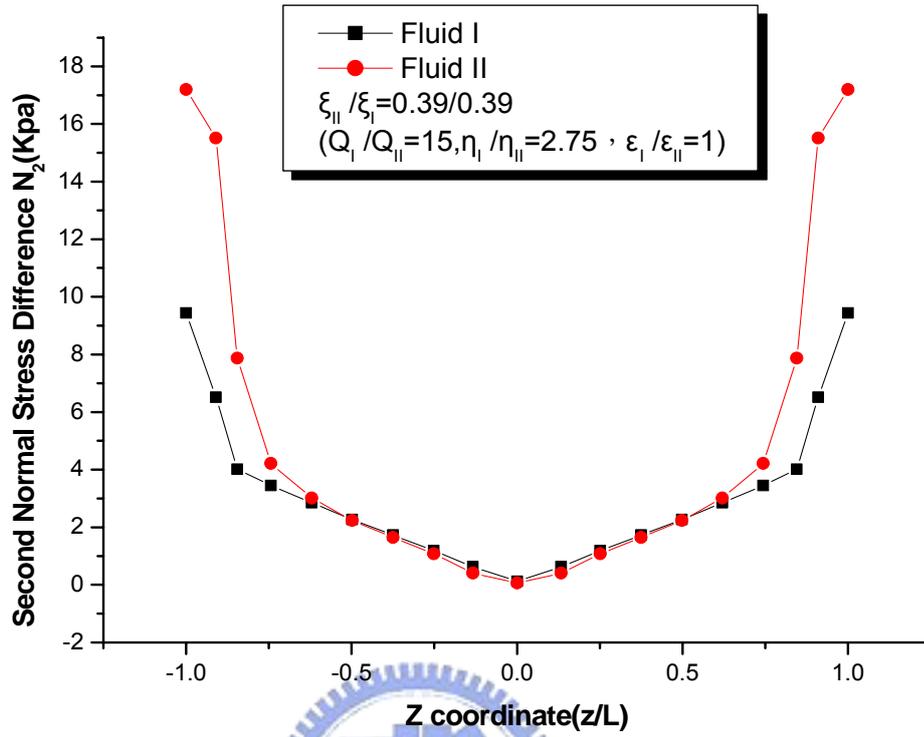


圖 3-42 出口界面之第二正向應力差變化圖

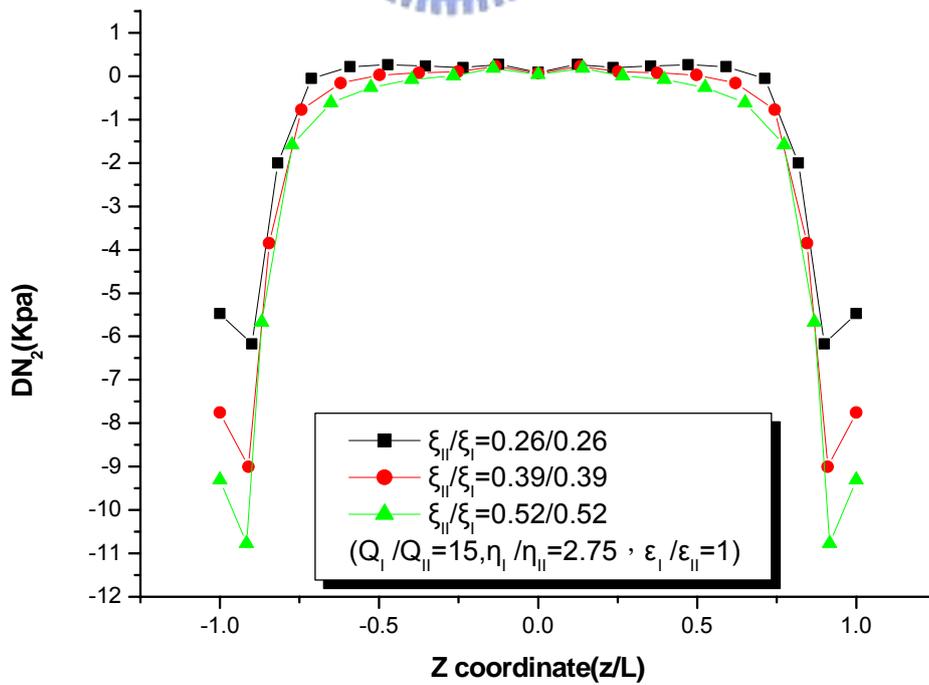


圖 3-43 固定 ξ 比值之出口界面的 DN_2 變化圖

圖 3-36、圖 3-44 與圖 3-45 分別為固定 ξ 值的流體沿流道方向於流體界面附近之第二正向應力差(N_2)變化圖，由圖中可看出當在進料區塊匯流處($x/L=0$)，下層高分子流體的第二正向應力差略大於上層高分子流體，但隨著流道長度增加，上層流體之第二正向應力差變為比下層流體高。

圖 3-41 則為固定 ξ 比值之沿流動方向的 DN_2 比較圖，由圖可看到，在在區塊匯流處下層流體的 N_2 值大於上層流體的 N_2 ，造成此現象的原因是上下兩層流量的差異造成的，在匯流處後的流道，便可看見上層流體的 N_2 大於下層流體的 N_2 ，且在此圖也可看出當 ξ 值越大，其 DN_2 的絕對值也越大。

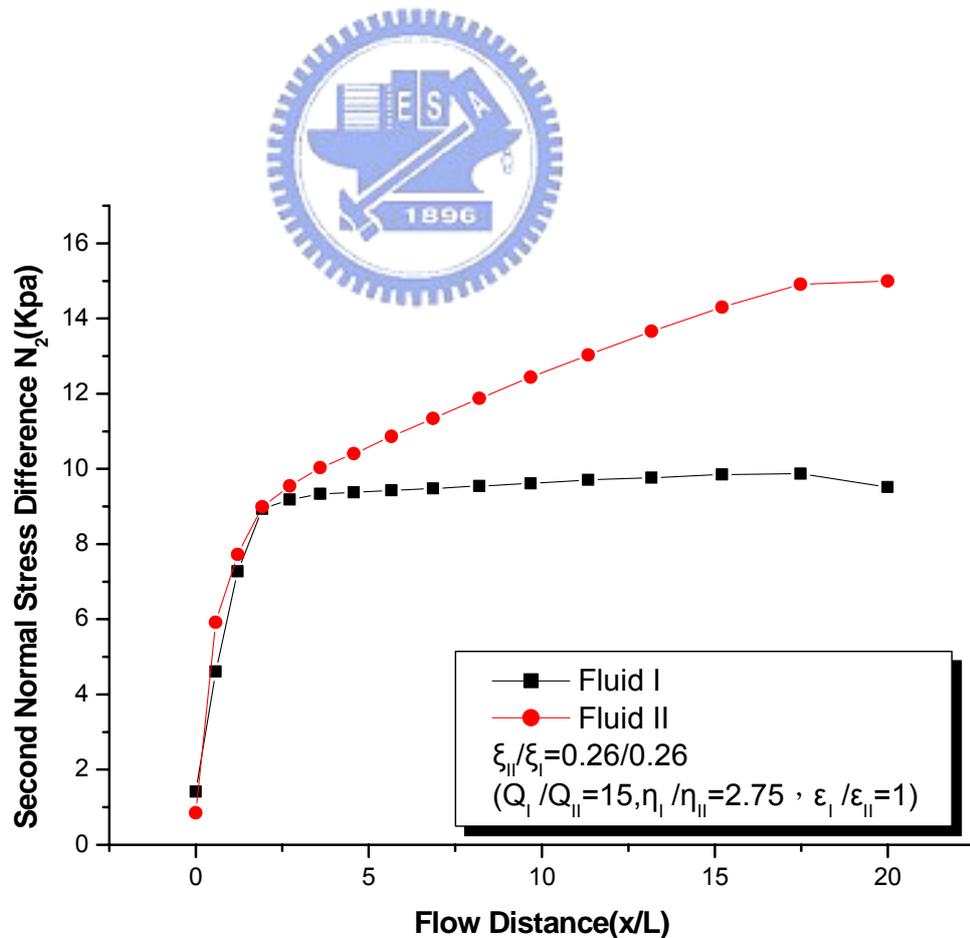


圖 3-44 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\xi_{II}/\xi_I=0.26/0.26$)

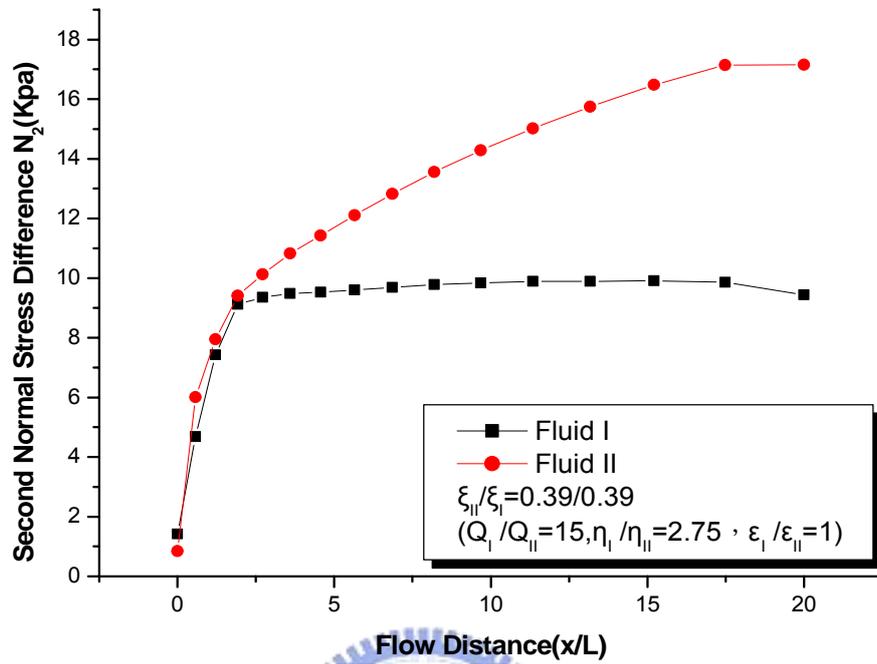


圖 3-45 沿流動方向之第二正向應力差變化圖

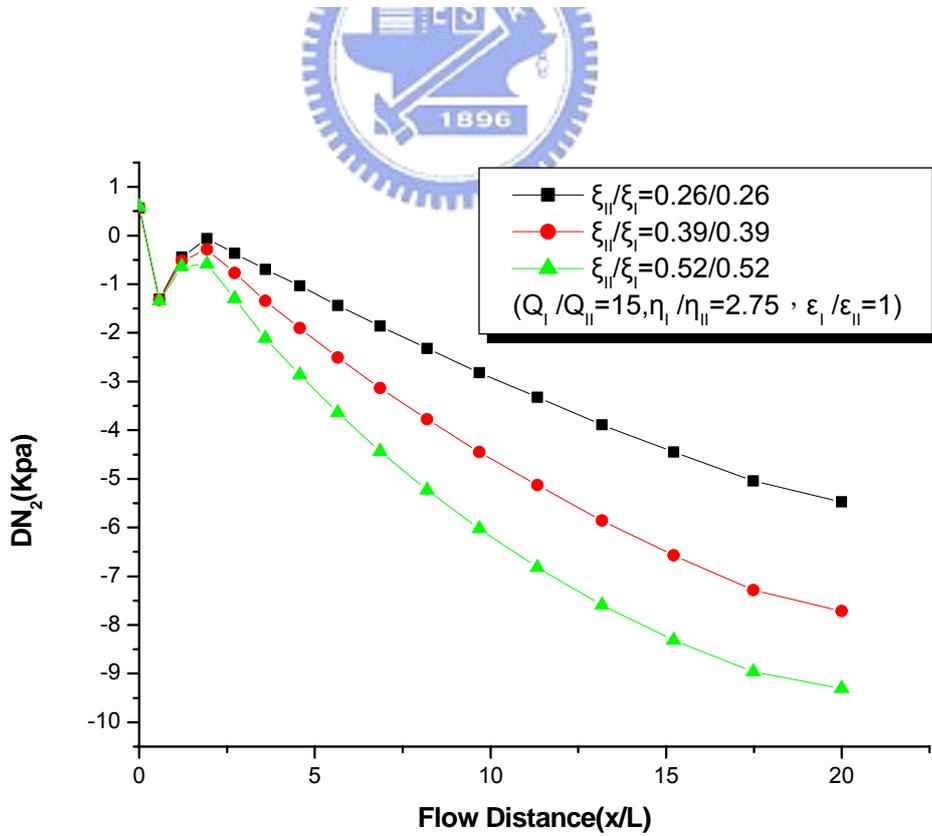


圖 3-46 固定 ξ 比值之沿流動方向的 DN_2 變化圖

由此節之研究可清楚看出第二正向應力差對於雙層共押出流體界面之影響，亦證實 White 及 Debbaut_[51]提出第二正向應力差可能是造成界面包覆增加之論點。當 PTT 黏彈模型中之流變參數 ξ 越大，流體之第二正向應力差性質越明顯，且若上下層流體之 ξ 值相差越大，則此現象越更加明顯。因此在進行高分子共押出時，需對於塑料之流變特性有相當的了解，以避免界面不均勻性之問題產生。



3.2.4 流變參數 ε 之影響

此節將討論 PTT 模型中之流變參數 ε 對進料區塊內流動之影響， ε 代表流體之延伸黏度(extensional viscosity)性質，因為在上節已經討論了 ξ ，所以在本小節中，將固定上下層的 ξ 值並令兩層的值為一樣，只改變上下層流體 ε 值以藉此了解延伸黏度對於共押出製程問題之關係。由上節中我們可以知道第二正向應力對流體的包覆度有很大的影響，而此節將針對上下層高分子塑料流體之 ε 比來探討對於界面包覆現象之影響。

(1) 改變上層流體 ε 值

圖 3-47 為改變上層 ε 比之界面包覆度比較圖，因上下層高分子流體之黏度比與流量比皆相同，故界面包覆之變化僅隨 ε 比不同而改變，由圖中可觀察到當固定下層流體 $\varepsilon_I (=1.5)$ ，使上層流體 ε_{II} 值越大時，包覆度越大，所以 ε 值的改變確實會影響包覆度的變化。

圖 3-48 為改變上層 ε 比之出口界面位置比較圖。由圖中可看出當上層的 ε 值越大，壁面上的接觸點會越低，包覆度也較高。圖 3-49 是則為改變上層 ε 比時壁面接觸線位置圖，由圖中可看出在矩形流道的進料區塊匯流處，流體於此處匯流產生一流體界面，而因流量差異極大使得流體界面產生往上偏移，過了匯流區後，上下層流體的 ε 值不同，會有不同程序的上層流體包覆下層流體的現象。圖 3-49 可觀察到當上下層 ε 值差異越大，壁面上的接觸線會越高。表 3-6 上述模擬結果整理。

表 3-6 改變上層 ε 值之分析比較

$\varepsilon_{II} / \varepsilon_I$ (ratio)	Numerical Results ($Q_I/Q_{II} = 15, \eta_I/\eta_{II} = 2.75$)	
	Outlet Encapsulation (%)	Outlet DN_2 (Kpa)
0.5/1.5(1/3)	34.75	-7.28
1.0/1.5(2/3)	35.65	-7.92
1.5/1.5(1)	36.49	-8.56

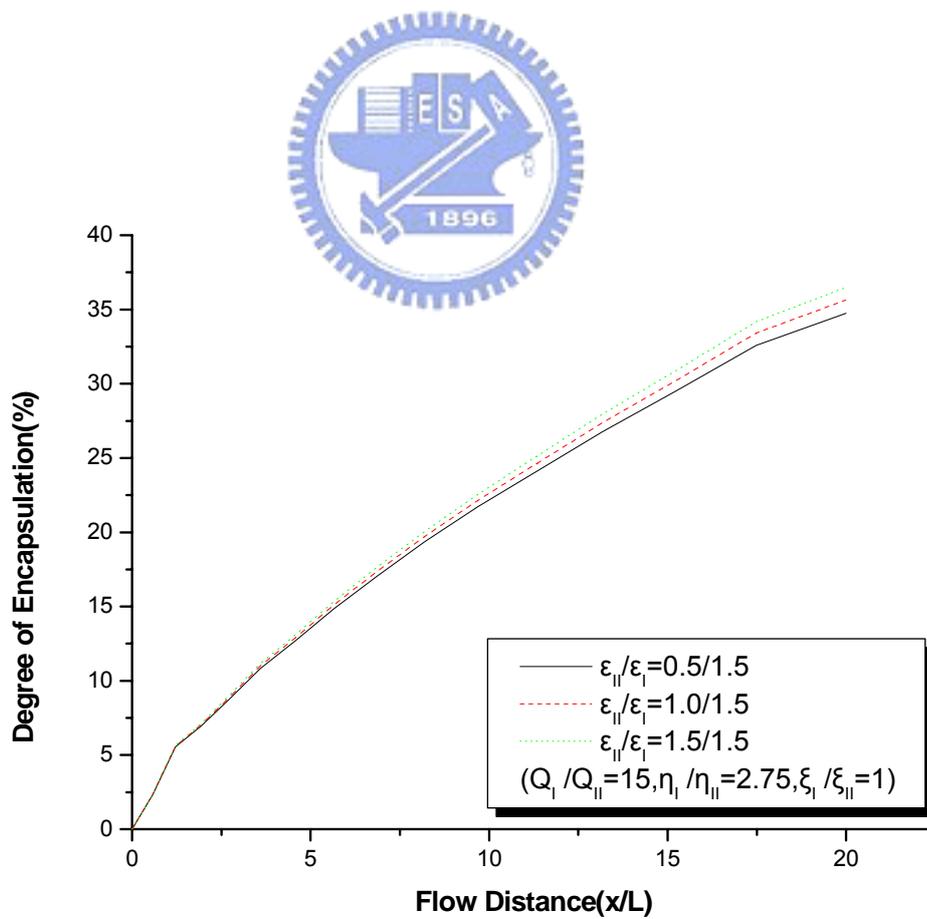


圖 3-47 改變上層流體 ε 值之界面包覆度比較圖

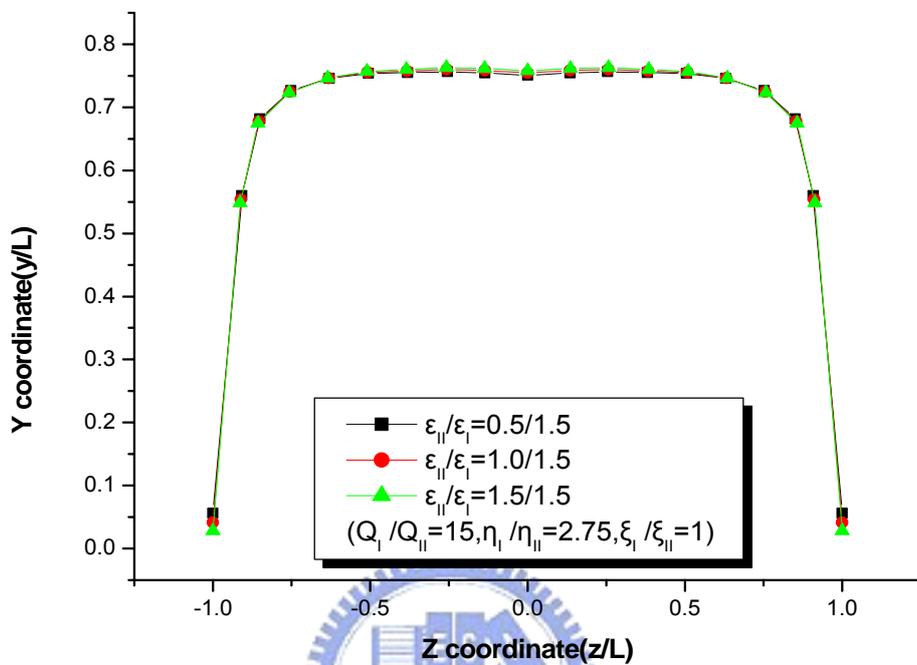


圖 3-48 改變上層流體 ϵ 值之出口界面位置比較圖

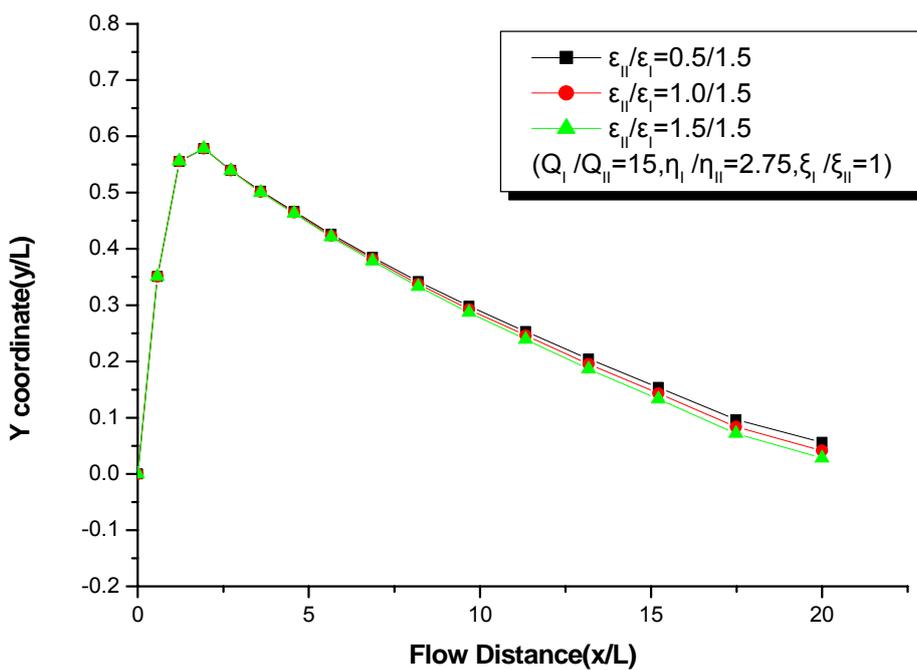


圖 3-49 改變上層流體 ϵ 之壁面 ($z/L=1$) 接觸線位置比

圖 3-50 至圖 3-52 為改變上層 ε 值的流體於進料區塊(feedblock)出口之第二正向應力差(N_2)變化圖，由圖可看出當上層 ε 值越大時，其第二正向應力差也越大，而下層的 N_2 值改變並不大。

圖 3-53 為改變上層 ε 時出口界面之上下層流體 DN_2 變化圖，由圖可看出當上層的 ε 越大時，其 DN_2 的絕對值越大，這代表除了 ξ 值是直接影響第二正向應力外， ε 也會影響第二正向應力差(N_2)。觀察圖 3-48 與 3-53，可以看到當在壁面的 DN_2 的絕對值越大時，界面在壁面的接觸點會越低，包覆度也越大。

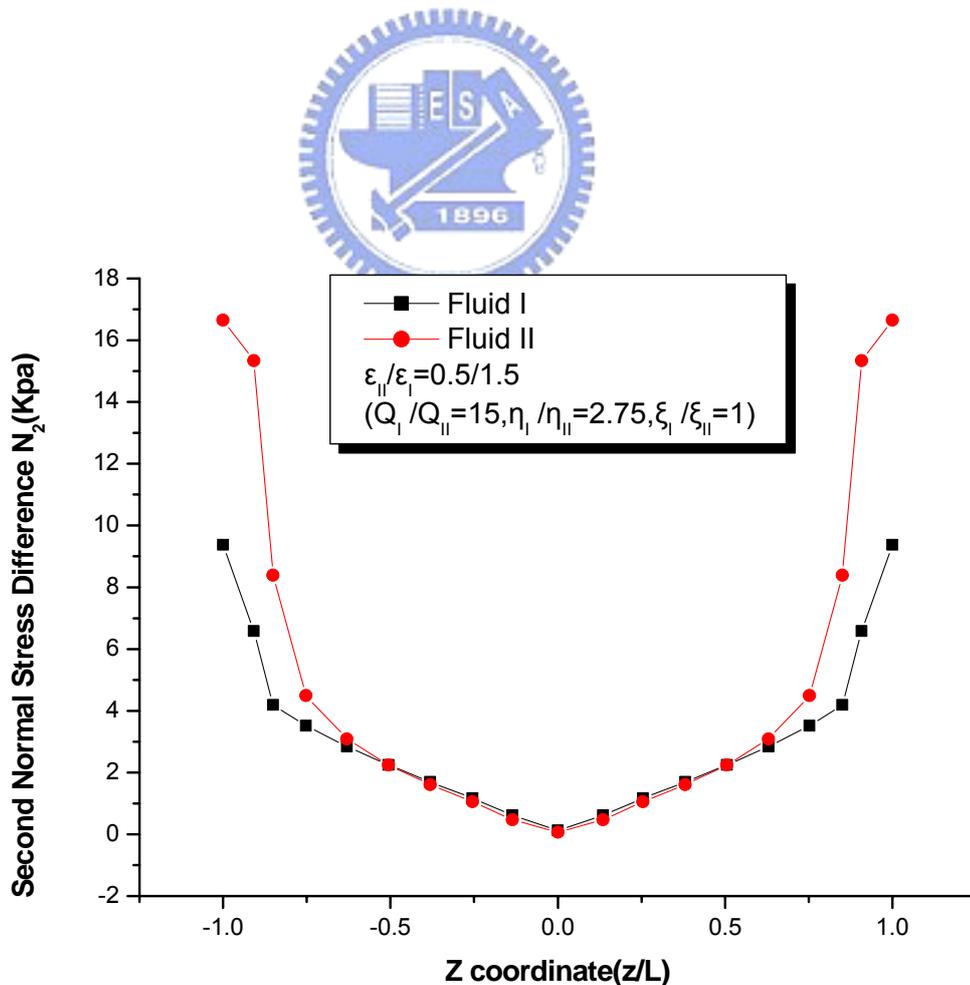


圖 3-50 出口界面之第二正向應力差變化圖($\varepsilon_{II}/\varepsilon_I=0.5/1.5$)

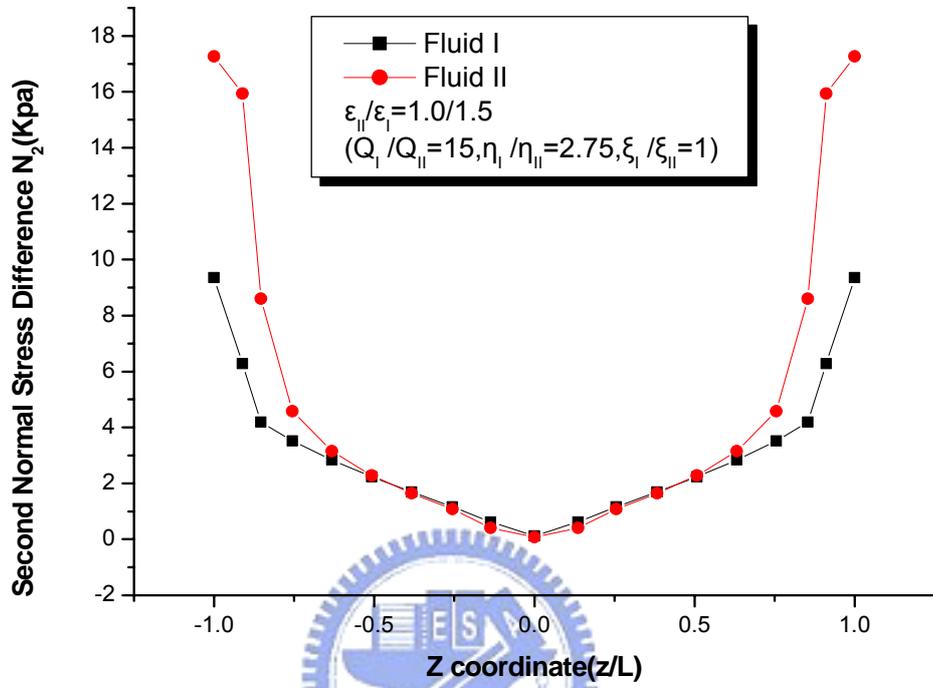


圖 3-51 出口界面之第二正向應力差變化圖($\epsilon_{II}/\epsilon_I=1.0/1.5$)

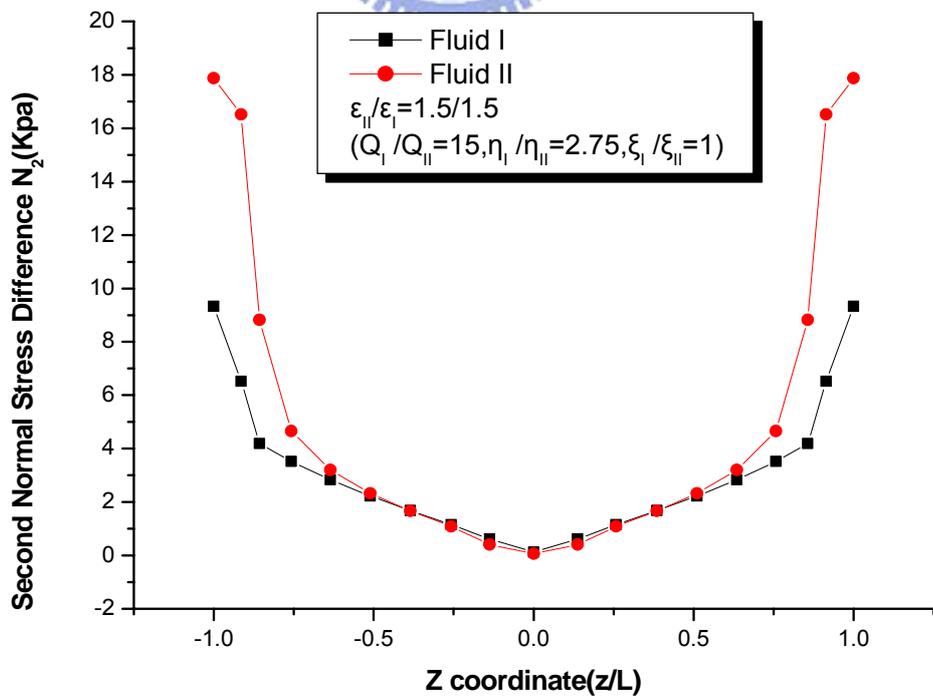


圖 3-52 出口界面之第二正向應力差變化圖

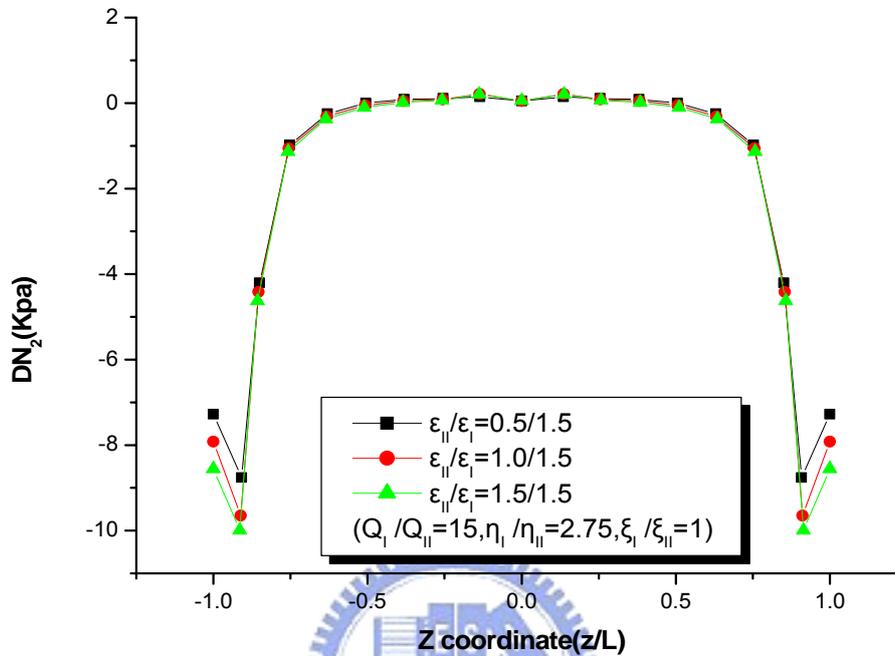


圖 3-53 改變上層 ε 值之出口界面的 DN_2 變化圖

圖 3-54 至圖 3-56 分別為不同 ε_{II} 值的流體沿流道方向於流體界面附近之第二正向應力差(N_2)變化圖，由圖中可看出當在進料區塊匯流處 ($x/L=0$)，下層高分子流體的第二正向應力差略大於上層高分子流體，但隨著流道長度增加，上層流體之第二正向應力差變為比下層流體高；圖 3-57 為改變上層 ε 時沿流動方向之上下層流體 DN_2 變化圖，由圖可看出當在匯流區時， DN_2 值會有先小後大在逐漸變小的情況，這是由於剛進匯流區因上下層流體的流量不同所導致的，等過了匯流區後，可看到 DN_2 值會逐漸變小，會有上層流體逐漸包覆下層流體的情形；由圖也可觀察到當上層的 ε 值越大時，其 DN_2 的絕對值越大，與圖 3-49 比較可得此時的界面接觸線的位置會比較高

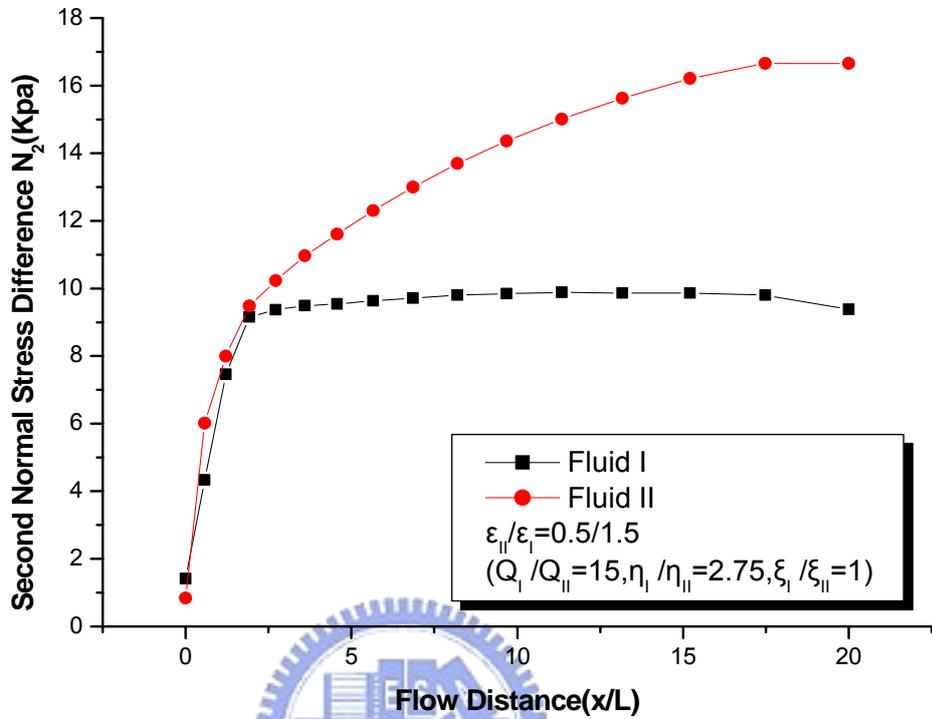


圖 3-54 沿流動方向之第二正向應力差變化圖

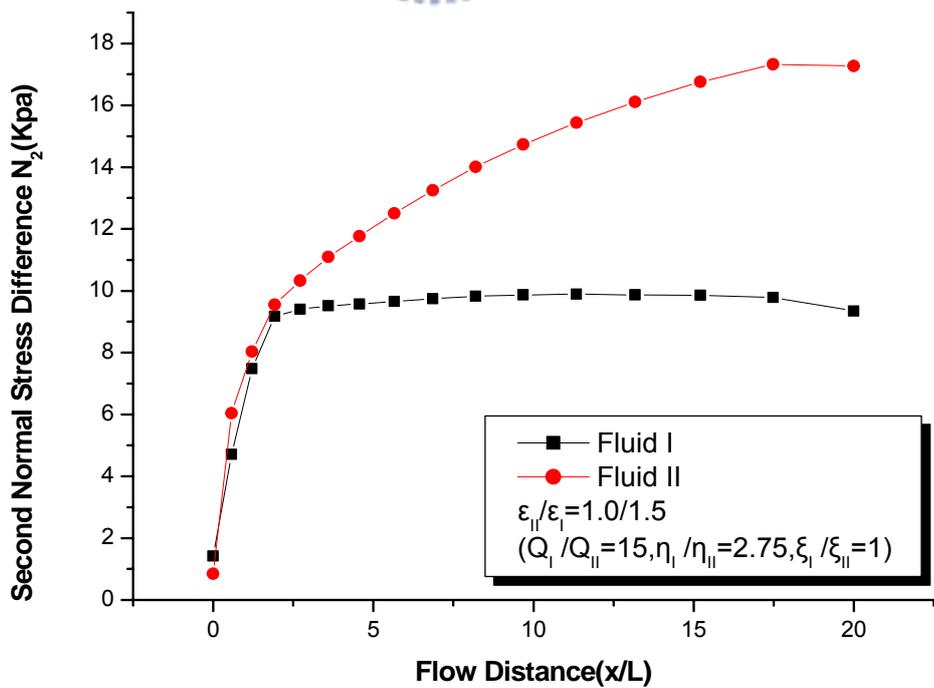


圖 3-55 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\epsilon_{II}/\epsilon_I = 1.0/1.5$)

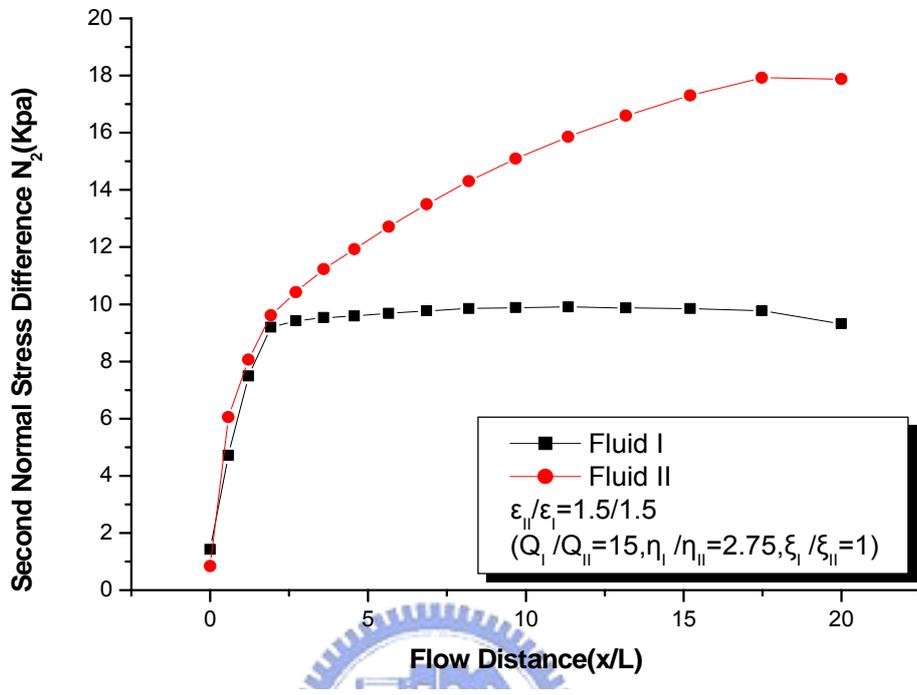


圖 3-56 沿流動方向之第二正向應力差變化圖($\epsilon_{II}/\epsilon_I=1.5/1.5$)

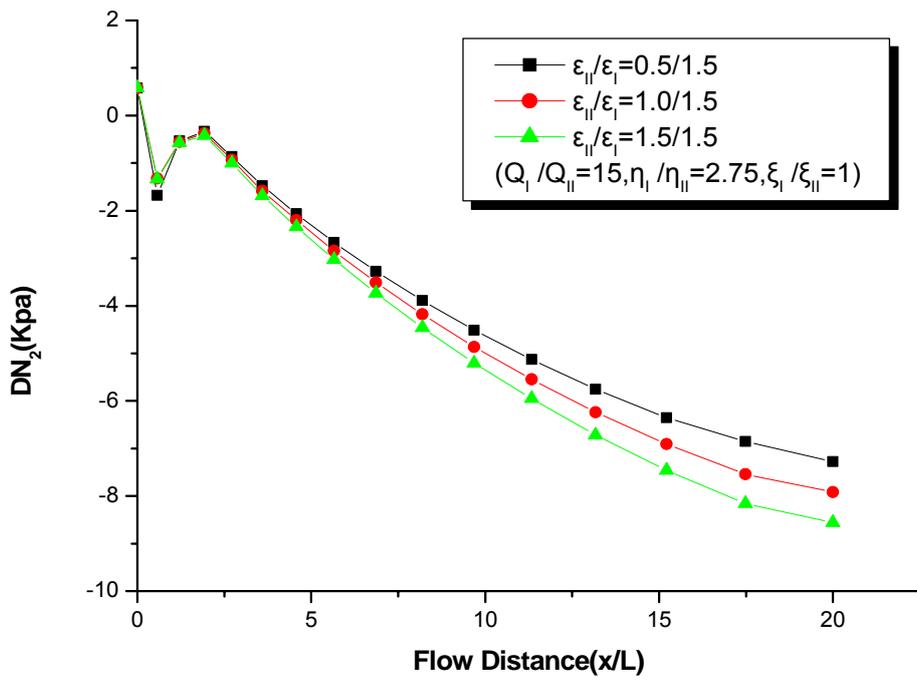


圖 3-57 改變上層 ξ 值之沿流動方向的 DN_2 變化圖

(2) 固定上下層流體 ε 比

PTT 黏彈模型中之 ε 參數代表流體延伸黏度之性質，由前述研究可知上層流體 ε 值越大使得進料區塊內之 DN_2 的絕對值也越大，此小節將固定上下層流體 ε 比值以探討 ε 值對於界面彎曲包覆的影響。

圖 3-58 為固定上下層塑料流體之 ε 比值並藉由改變 ε 值探討其對包覆現象之影響，可觀察到上下流體之 ε 比值沒有差異，但 ε 值越大仍使得界面包覆程度下降；其流體於出口界面位置如圖 3-59 所示，圖中可看出當 ε 值越大時，界面彎曲包覆的程序越小，在壁面上的接觸點(contact point)也越高。圖 3-60 為固定 ε 比值之壁面($z/L=1$)接觸線位置比較圖，當在匯流處時，因為上下層流量不同，下層流量大於上層，因此流體界面會有往上移動的現象發生，但離匯流區有一段的距離後，由於流體性質的不同，會有上層流體包覆下層流體的現象，又因為流變參數 ε 的不同，會造成包覆的程度不一，當 ε 越大時，其壁面接觸線(contact line)會有往上移動的趨勢。表 3-7 上述模擬結果整理。

表 3-7 固定 ε 比設定之分析

$\varepsilon_{II} / \varepsilon_I$	Numerical Results ($Q_I/Q_{II}=15, \eta_I/\eta_{II}=2.75$)	
	Outlet Encapsulation (%)	Outlet DN_2 (Kpa)
0.5/0.5	40.07	-8.93
1.0/1.0	38.08	-8.76
1.5/1.5	36.49	-8.56

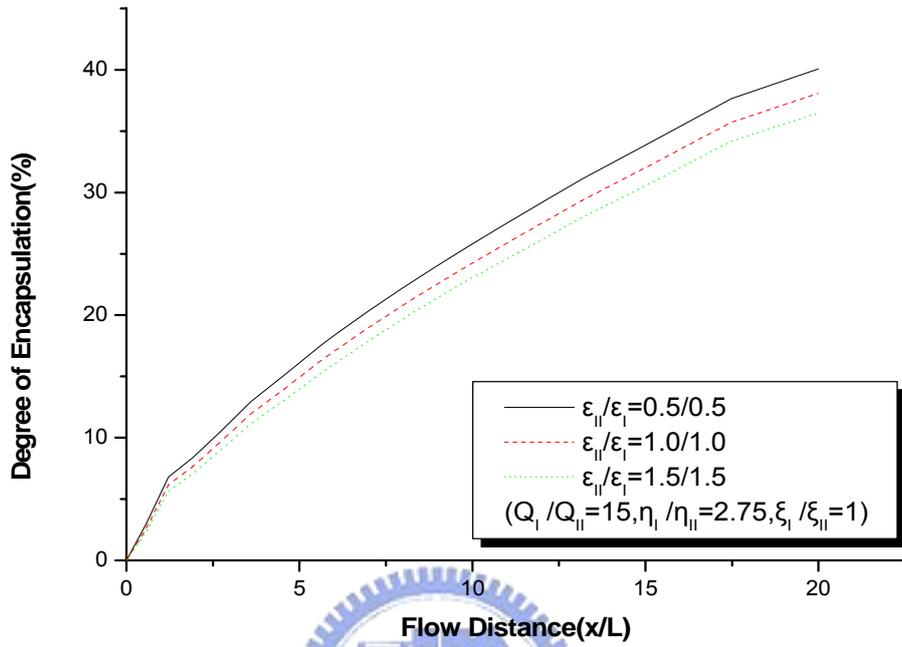


圖 3-58 固定 ϵ 比值之界面包覆度比較圖

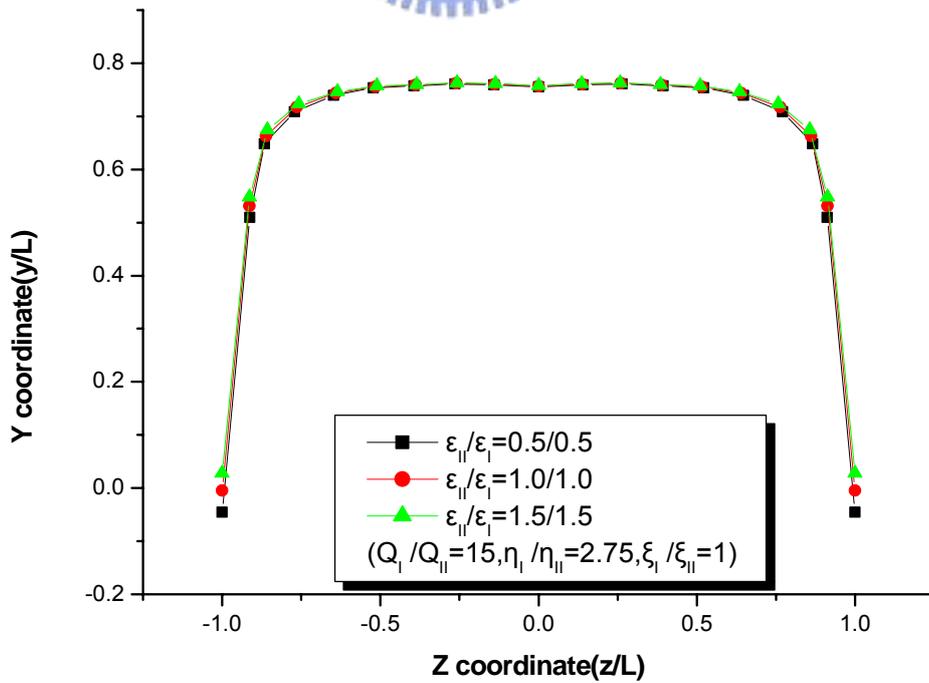


圖 3-59 固定 ϵ 比值之出口界面位置比較圖

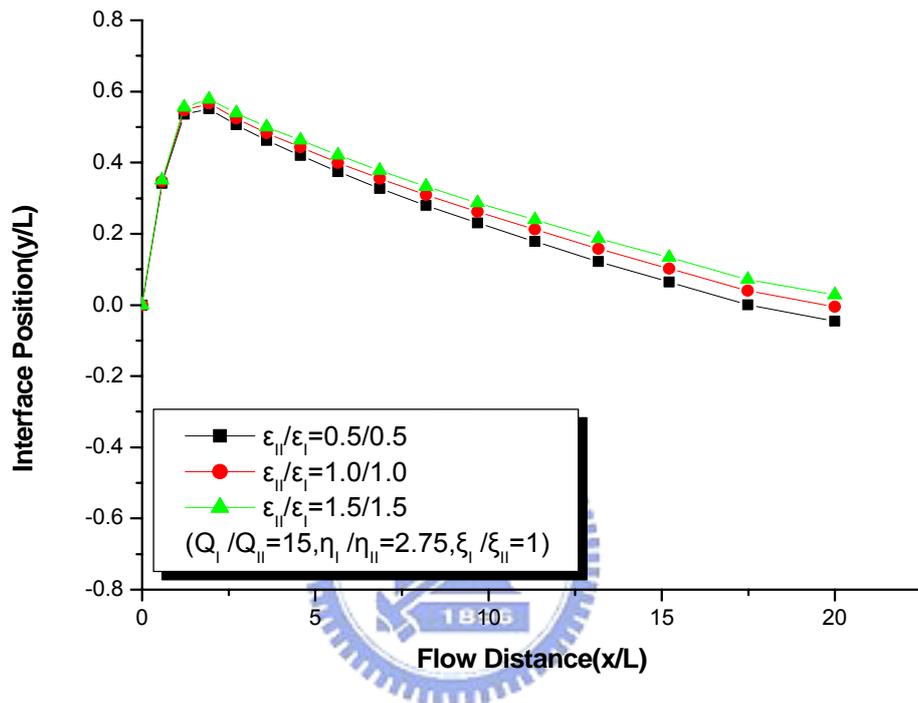


圖 3-60 固定 ϵ 比值之壁面 ($z/L=1$) 接觸線位置比較圖

圖 3-52、圖 3-61 和圖 3-62 分別為固定 ϵ 值的流體於進料區塊 (feedblock) 出口之第二正向應力差 (N_2) 變化圖，為於中間部份時，下層的 N_2 值會略大於上層的 N_2 值。

圖 3-63 為固定 ϵ 比值之出口界面的 DN_2 比較圖，由圖可觀察到當 ϵ 值越大，其 DN_2 的絕對值越小，而與圖 3-58 相比可發現，當在壁面的 DN_2 絕對值越大時，會有較大的包覆度。

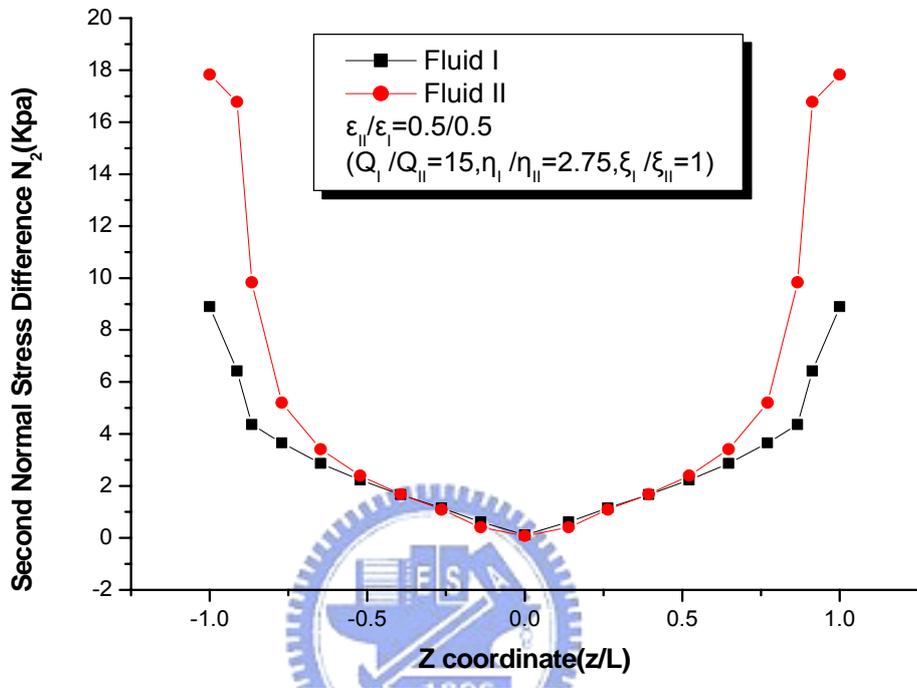


圖 3-61 出口界面之第二正向應力差變化圖

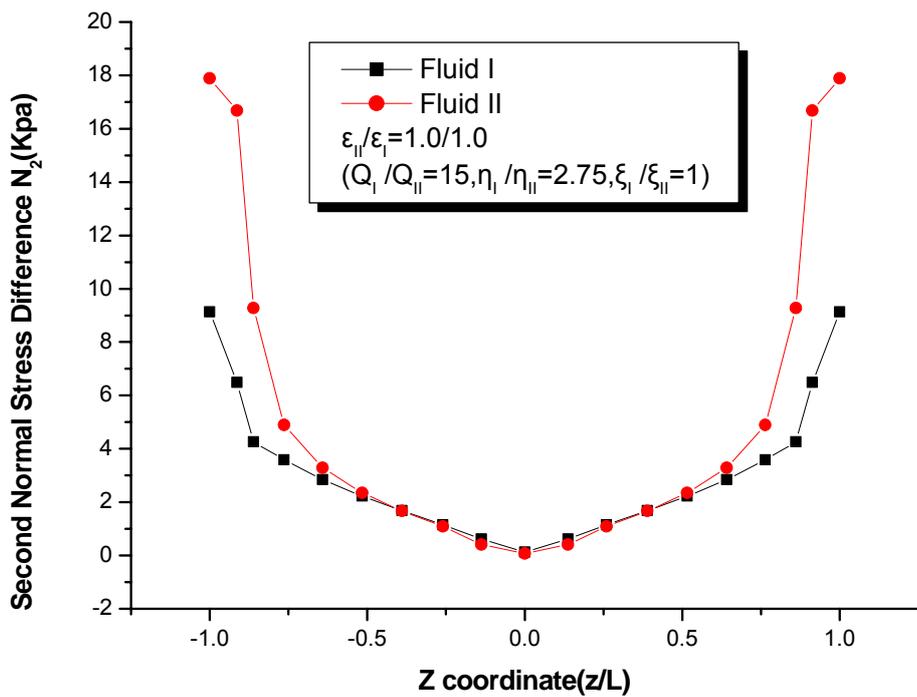


圖 3-62 出口界面之第二正向應力差變化圖

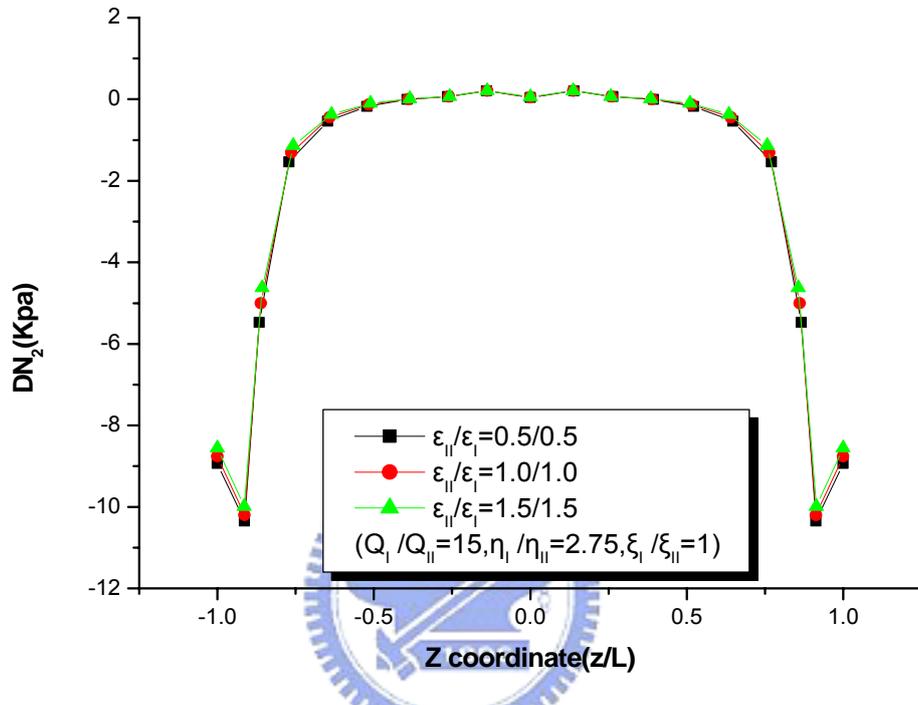


圖 3-63 固定 ϵ 比值之出口界面的 DN_2 變化圖

圖 3-56、圖 3-64 與圖 3-65 分別為固定 ϵ 值的流體沿流道方向於流體界面附近之第二正向應力差(N_2)變化圖，由圖中可看出當在進料區塊匯流處($x/L=0$)，下層高分子流體的第二正向應力差略大於上層高分子流體，但隨著流道長度增加，上層流體之第二正向應力差變為比下層流體高。

圖 3-66 則為固定 ϵ 比值之沿流動方向的 DN_2 比較圖，由圖可看到，除了在區塊匯流處 DN_2 值為正數，代表下層的 N_2 值大於上層的 N_2 值，造成此現象可能原因是在此處下層流體流量大於上層流體流量，而在匯流處後的流道，便可看見上層流體的 N_2 大於下層流體的 N_2 ，並且可觀察到當 ϵ 值越大時，其 DN_2 的絕對值越小。

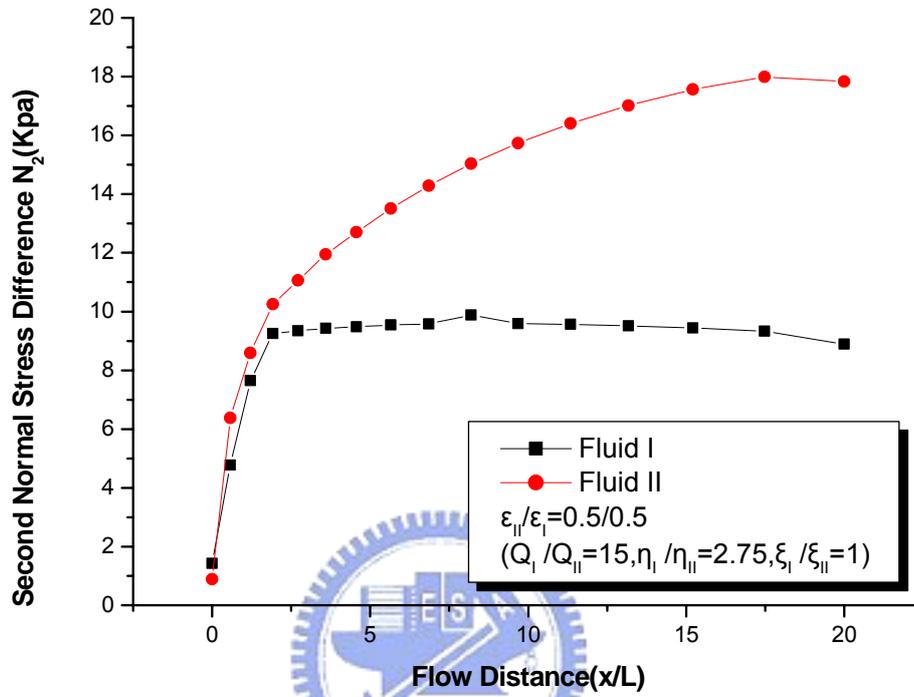


圖 3-64 沿流動方向之第二正向應力差變化圖

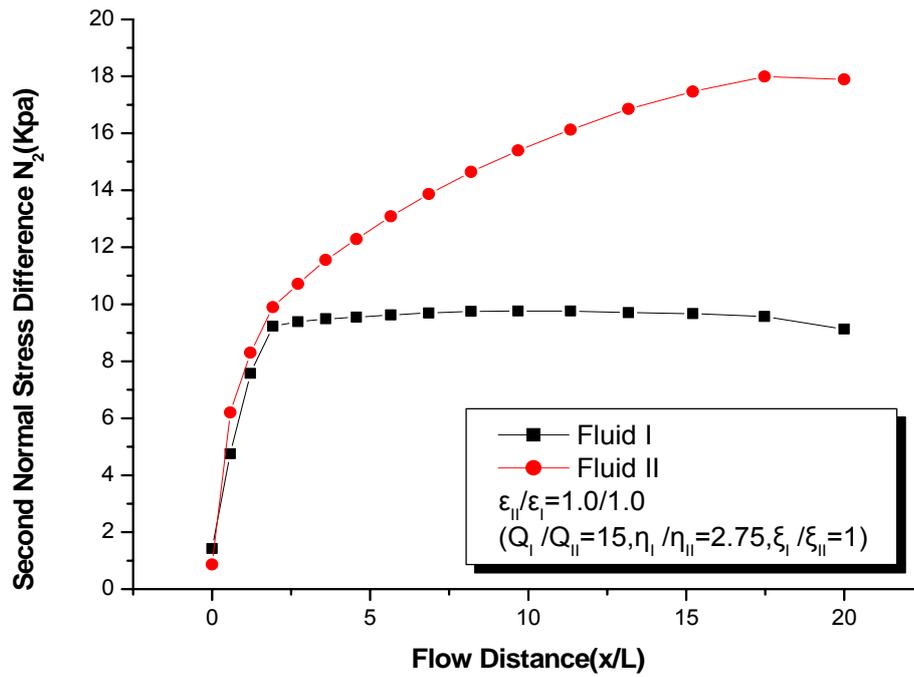


圖 3-65 沿流動方向之第二正向應力差變化圖

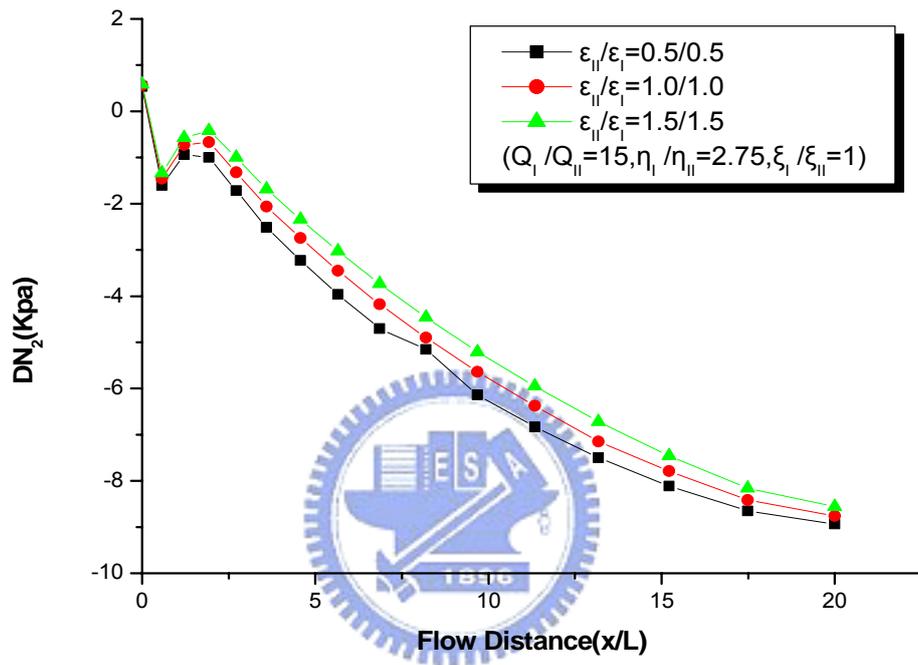


圖 3-66 固定 ε 比值之沿流動方向的 DN_2 變化圖

由本小節及上節之研究可清楚看出第二正向應力差對於雙層共押出流體界面之影響，然而雖然 ε 值並非是影響第二正向應力差的主要因素，但改變 ε 值確實會使得第二正向應力差有所改變，。

當 PTT 黏彈模型中之流變參數 ε 越大，流體之第二正向應力差之差值(DN_2)的絕對值會變小；而當上層流體之 ε 值越大， DN_2 的絕對值也會變大。

四、結論

本論文進行進料區塊(feedblock)內流動之三維有限元素模擬，並於模壁面使用滑動邊界設定，而相對於使用牛頓流體或泛牛頓流體模型，本論文採用 The Phan-Thien and Tanner 黏彈模型(PTT model)將高分子塑料黏彈性質之影響考慮其中，更有效的模擬出了高分子流體之黏彈流動特性。本論文亦針對共押出製程中之三項主要製程問題及缺陷進行一系列之討論。

本論文所使用之滑動模型為冪次式滑動模型(power law slip model)，藉由改變壁面滑動係數來探討壁面光滑度對於雙層流體間之界面形狀及第二正向應力差的影響。研究發現隨著滑動係數減小，雙層流體間之第二正向應力差皆隨著降低，因此藉由增加上下壁面之光滑度使流體在壁面產生滑移，可減少共押出製程中進料區塊雙層流體間之第二正向應力差，以避免流體界面不穩定現象發生。

本論文亦發現流量比對共押出有極大影響，當流量比越低時，上層流量增加進而推擠流體界面位置往下偏移，使上層流體(Fluid II)厚度增加且上下兩層的第二正向應力差之差值的絕對值也越大，包覆度上升，同時界面不穩定的情況也上升了。而當流量差異極大時，流體在匯流處因互相擠壓而產生拉伸形變，在界面附近會造成上下流體有不同的正向應力，此不同之正向應力即為造成波浪形不穩定發生之原因。但須注意的是低流量比時，界面彎曲包覆程度會較嚴重，而若整體押出量增加，會造成模具內剪切應力上升及流體黏彈性質越顯著，造成界面鋸齒形不穩定現象及流體界面包覆現象越嚴重。

本論文亦針對 PTT 黏彈模型中代表流體第二正向應力差性質之流變參數 ξ 進行一系列之討論，由本論文之研究可清楚看出第二正向應力差(second normal stress difference)對於雙層共押出流體界面之影響，亦證實文

獻中之論點。當 PTT 黏彈模型中之流變參數 ξ 越大，流體之第二正向應力差性質越明顯，且若上下層流體之 ξ 值相差越大，則此現象越更加明顯，而此性質造成逐漸增加之界面包覆現象越為嚴重，大大影響界面之均勻性。因此在進行高分子共押出時，需對於塑料之流變特性有相當的了解，以避免界面不均勻性之問題產生。

同時本論文也針對 PTT 黏彈模型中代表流體伸展黏度(extensional viscosity)性質之流變參數 ε 進行討論；當上下層 ε 值不同時，兩者相差越大，其包覆度會越小；當上下層 ε 值相同時， ε 值越大，其包覆度會越小。所以改變 ε 值，會改變界面的發展狀況，但影響力並未有像改變黏度比或者改變 ξ 值那麼大。伸展黏度若在平板押出所使用的模具 T-die 中會佔有重要的角色。



參考文獻

1. Hickox, C.E., Instability Due to Viscosity and Density Stratification in Axisymmetric Pipe Flow, *Physics of Fluids*, 14, 251, 1971.
2. Sunwoo, K.B., et al., Three-dimensional viscoelastic simulation of coextrusion process: comparison with experimental data, *Rheologica Acta*, 41, 144-153, 2002.
3. Phan-Thien N, Tanner RI (1977) A new constitutive equation derived from the network theory. *J Non-Newtonian Fluid Mech* 2:353 – 365
4. Schrenk, W.J., Multilayer Film From a Single Die, *Plastics Engineering*, 30, 65-68, 1974.
5. Schrenk, W.J. and Alfrey, T., *Coextruded Multilayer Polymer Films and Sheets*, Polymer Blends, Academic Press, New York.1978.
6. Schrenk, W.J., Bradley, N.L., Alfrey, T.J., and Maack, H., Interfacial Flow Instability in Multilayer Coextrusion, *Polymer Engineering & Science*, 18, 620-623, 1978.
7. Su, Y.Y. and Khomami, B., Interfacial Stability of Multilayer Viscoelastic Fluids in Slit and Converging Channel Die Geometries, *Journal of Rheology*, 36, 357-387, 1992.
8. Ramanathan, R., et al., 'Wave' Pattern Instability in Multilayer Coextrusion - An Experimental Investigation, *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 1, 224-228, 1996.
9. Dooley, J., Hyun, K.S., and Hughes, K., An Experimental Study on the Effect of Polymer Viscoelasticity on Layer Rearrangement in Coextruded Structures, *Polymer Engineering and Science*, 38, 1060-1071, 1998.
10. Dooley, J., Hyun, K.S., and Hughes, K., An Experimental Study on the Effect of Polymer Viscoelasticity on Layer Rearrangement in Coextruded Structures, *Polymer Engineering and Science*, 38, 1060-1071, 1998.
11. Dooley, J. and Hilton, B.T., Layer Rearrangement in Coextrusion,

Plastics Engineering, 50, 25-27, 1994.

12. Dooley, J. and Dietsche, L., Numerical Simulation of Viscoelastic Polymer Flow - Effects of Secondary Flows on Multilayer Coextrusion, *Plastics Engineering*, 52, 37-&, 1996.
13. Dooley, J. and Rudolph, L., Viscous and Elastic Effects in Polymer Coextrusion, *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 19, 111-122, 2003.
14. Everage, A.E., Jr., Theory of Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts. II. Interface Motion in Transient Flow, *Transactions of the Society of Rheology*, 19, 509-522, 1975.
15. Everage, A.E., Jr., Theory of Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts. I. Equilibrium Newtonian Tube Flow, *Transactions of the Society of Rheology*, 17, 629-646, 1973.
16. Ramamurthy, A.V., Wall Slip in Viscous Fluids and Influence of Materials of Construction, *Journal of Rheology*, 30, 337-357, 1986.
17. Debbaut, B., Avalosse, T., Dooley, J., and Hughes, K., On the Development of Secondary Motions in Straight Channels Induced by the Second Normal Stress Difference: Experiments and Simulations, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 69, 255-271, 1997.
18. Debbaut, B. and Dooley, J., Secondary Motions in Straight and Tapered Channels: Experiments and Three-Dimensional Finite Element Simulation with a Multimode Differential Viscoelastic Model, *Journal of Rheology*, 43, 1525-1545, 1999.
19. Debbaut, B. and Dooley, J., Secondary Motions in Straight and Tapered Channels: Experiments and Three-Dimensional Finite Element Simulation with a Multimode Differential Viscoelastic Model, *Journal of Rheology*, 43, 1525-1545, 1999.
20. Debbaut, B. and Dooley, J., Secondary Motions in Straight and Tapered Channels: Experiments and Three-Dimensional Finite Element Simulation with a Multimode Differential Viscoelastic Model, *Journal of Rheology*, 43, 1525-1545, 1999.
21. Han, C.D., *Multiphase Flow in Polymer Processing*, Academic Press.1981.

22. Han, C.D., Kim, Y.J., and Chin, H.B., Rheological Investigation of Interfacial Instability in Two-Layer Flat-Film Coextrusion, *Polymer engineering reviews*, 4, 177-200, 1984.
23. Han, C.D. and Rao, D.A., Studies on Wire Coating Extrusion. II. The Rheology of Wire Coating Coextrusion, *Polymer Engineering and Science*, 20, 128-139, 1980.
24. Han, C.D. and Rao, D.A., Studies on Wire Coating Extrusion. II. The Rheology of Wire Coating Coextrusion, *Polymer Engineering and Science*, 20, 128-139, 1980.
25. Khan, A.A. and Han, C.D., Study on Interfacial Instability in Stratified Flow of Two Viscoelastic Fluids through a Rectangular Duct, *Transactions of the Society of Rheology*, 21, 101-131, 1977.
26. Khan, A.A. and Han, C.D., On the Interface Deformation in the Stratified Two-Phase Flow of Viscoelastic Fluids, *Transactions of the Society of Rheology*, 20, 595-621, 1976.
27. Southern, J.H. and Ballman, R.L.i., Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts in a Tube, *Applied Polymer Science*, 20, 175-189, 1973.
28. Southern, J.H. and Ballman, R.L., Additional Observations on Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts in a Tube, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 13, 863-869, 1975.
29. Mavridis, H., Hrymak, A.N., and Vlachopoulos, J., Finite-Element Simulation of Stratified Multiphase Flows, *AIChE Journal*, 33, 410-422, 1987.
30. Mavridis, H. and Shroff, R.N., Multilayer Extrusion - Experiments and Computer-Simulation, *Polymer Engineering and Science*, 34, 559-569, 1994.
31. Tzoganakis, C. and Perdikoulis, J., Interfacial Instabilities in Coextrusion Flows of Low-Density Polyethylenes: Experimental Studies, *Polymer Engineering and Science*, 40, 1056-1064, 2000.
32. Zatloukal, M., Tzoganakis, C., Vlcek, J., and Saha, P., Numerical Simulation of Polymer Coextrusion Flows - A Criterion for Detection

- of "Wave" Interfacial Instability Onset, *International Polymer Processing*, 16, 198-207, 2001.
33. Zatloukal, M., Vlcek, J., Tzoganakis, C., and Saha, P., Viscoelastic Stress Calculation in Multi-Layer Coextrusion Dies: Die Design and Extensional Viscosity Effects on the Onset of 'Wave' Interfacial Instabilities, *Polymer Engineering and Science*, 42, 1520-1533, 2002.
 34. Zatloukal, M., Martyn, M.T., Coates, P.D., and Saha, P., Wave Interfacial Instabilities at Coextrusion in Flat Dies: Simulation and Experimental Results, *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 1, 295-299, 2003.
 35. Martyn, M.T., et al., Experimental Observations and Analysis of LDPE Melt Flow in Coextrusion Geometries, *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 1, 300-304, 2003.
 36. Martyn, M.T., et al., Experimental Observations of LDPE Melt Flow in Coextrusion Geometries, *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 1, 205-209, 2004.
 37. Martyn, M.T., Spares, R., Coates, P.D., and Zatloukal, M., Visualisation and Analysis of Interfacial Instability in Coextrusion of LDPE Melt, *Plastics, Rubber and Composites*, 33, 27-35, 2004.
 38. Yih, C.S., Instability Due to Viscosity Stratification, *Journal of Fluid Mechanics*, 27, 337, 1967.
 39. Hooper, A.P. and Boyd, W.G.C., Shear-Flow Instability at the Interface between Two Viscous Fluids, *Journal of Fluid Mechanics*, 128, 507-528, 1983.
 40. Khomami, B., Interfacial Stability and Deformation of Two Stratified Power Law Fluids in Plane Poiseuille Flow. Part I. Stability Analysis, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 36, 289-303, 1990.
 41. Khomami, B., Interfacial Stability and Deformation of Two Stratified Power Law Fluids in Plane Poiseuille Flow. Part II. Interface deformation, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 37, 19-36, 1990.
 42. Khomami, B. and Ranjbaran, M.M., Experimental Studies of

Interfacial Instabilities in Multilayer Pressure-Driven Flow of Polymeric Melts, *Rheologica Acta*, 36, 345-366, 1997.

43. Khomami, B., Renardy, Y., Su, K.C., and Clarke, M.A., An Experimental/Theoretical Investigation of Interfacial Instabilities in Superposed Pressure-Driven Channel Flow of Newtonian and Well Characterized Viscoelastic Fluids Part II: Nonlinear Stability, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 91, 85-104, 2000.
44. Khomami, B. and Su, K.C., An Experimental/Theoretical Investigation of Interfacial Instabilities in Superposed Pressure-Driven Channel Flow of Newtonian and Well Characterized Viscoelastic Fluids Part I: Linear Stability and Encapsulation Effects, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 91, 59-84, 2000.
45. Waters, N.D., The Stability of Two Stratified "Power-Law" Liquids in Couette Flow, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 12, 85-94, 1983.
46. Wilson, G.M. and Khomami, B., An Experimental Investigation of Interfacial Instabilities in Multilayer Flow of Viscoelastic Fluids : Part I. Incompatible Polymer Systems, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 45, 355-384, 1992.
47. Wilson, G.M. and Khomami, B., An Experimental Investigation of Interfacial Instabilities in Multilayer Flow of Viscoelastic Fluids .2. Elastic and Nonlinear Effects in Incompatible Polymer Systems, *Journal of Rheology*, 37, 315-339, 1993.
48. Wilson, G.M. and Khomami, B., An Experimental Investigation of Interfacial Instabilities in Multilayer Flow of Viscoelastic Fluids .3. Compatible Polymer Systems, *Journal of Rheology*, 37, 341-354, 1993.
49. Su, Y.Y. and Khomami, B., Purely Elastic Interfacial Instabilities in Superposed Flow of Polymeric Fluids, *Rheologica Acta*, 31, 413-420, 1992.
50. Ganpule, H.K. and Khomami, B., An Investigation of Interfacial Instabilities in the Superposed Channel Flow of Viscoelastic Fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 81, 27-69, 1999.

51. White, J.L., Ufford, R.C., Dharod, K.R., and Price, R.L., Experimental and Theoretical Study of the Extrusion of Two-Phase Molten Polymer Systems, *Journal of Applied Polymer Science*, 16, 1313-1330, 1972.
52. Lee, B.-L. and White, J.L., An Experimental Study of Rheological Properties of Polymer Melts in Laminar Shear Flow and of Interface Deformation and Its Mechanisms in Two-Phase Stratified Flow, *Transactions of the Society of Rheology*, 18, 467-492, 1974.
53. Gifford, W.A., A Three-Dimensional Analysis of Coextrusion, *Polymer Engineering and Science*, 37, 315-320, 1997.
54. Uwaji, T. and Legat, V., Numerical Analysis on Wrap Around Phenomena of Stratified Two Phase Flow, *JSP'97 Symp Papers*, 1997.
55. Mitsoulis, E., Extrudate Swell in Double-Layer Flows, *Journal of Rheology*, 30, S23-S44, 1986.
56. Binding, D.M., Walters, K., Dheur, J., and Crochet, M.J., Interfacial Effects in the Flow of Viscous and Elastoviscous Liquids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 323, 449-&, 1987.
57. Dheur, J. and Crochet, M.J., Newtonian Stratified Flow through an Abrupt Expansion, *Rheologica Acta*, 26, 401-413, 1987.
58. Tanner, R.I., Computer Simulation of Plastics Extrusion, 59-63, 1986.
59. Karagiannis, A., Hrymak, A.N., and Vlachopoulos, J., Three-Dimensional non-isothermal extrusion flow, *Rheologica Acta*, 28, 121-133, 1989.
60. Karagiannis, A., Hrymak, A.N., and Vlachopoulos, J., Three-Dimensional Studies on Bicomponent Extrusion, *Rheologica Acta*, 29, 71-87, 1990.
61. 楊世豪, 共押出進料區塊之三維有限元素法模擬, 應用化學系, 2007, 國立交通大學

62. 童柏豪, 以三維有限元素法對共押出進料區塊之非等溫流動模擬, 應用化學系, 2008, 國立交通大學
63. Zhang, M., Jia, Y., Sun, S., and Zhao, G., Three-dimensional nonisothermal simulation of multi-layer extrusion processes of polymer melts, *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 45, 1257-1262, 2006
64. Takase, M., Kihara, S., and Funatsu, K., Three-Dimensional Viscoelastic Numerical Analysis of The Encapsulation Phenomena in Coextrusion, *Rheologica Acta*, 37, 624-634, 1998.
65. Torres, A., et al., Boundary Conditions for Contact Lines in Coextrusion Flows, *Rheologica Acta*, 32, 513-525, 1993.
66. Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M., Wall Slip of Molten High-Density Polyethylene .I. Sliding Plate Rheometer Studies, *Journal of Rheology*, 35, 497-523, 1991.
67. Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M., Wall Slip of Molten High-Density Polyethylenes II. Capillary Rheometer Studies, *Journal of Rheology*, 36, 703-741, 1992.
68. Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M., Role of Slip and Fracture in the Oscillating Flow of Hdpe in a Capillary, *Journal of Rheology*, 36, 845-884, 1992.
69. Hatzikiriakos, S.G., A Slip Model for Linear-Polymers Based on Adhesive Failure, *International Polymer Processing*, 8, 135-142, 1993.
70. Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M., Effects of Interfacial Conditions on Wall Slip and Sharkskin Melt Fracture of HDPE, *International Polymer Processing*, 8, 36-44, 1993.
71. Navier, C.L.M.H., Sur les lois du mouvement des fluides, *Mem. Acad. R. Sci. Inst. Fr.*, 6, 389-440, 1827.
72. Polyflow User's Manual 3.10.0, Fluent. Inc, Lebanon, NH, USA