

第三章 結果與討論

3.1 高分子材料性質與螺桿操作設定

本研究之高分子材料選用常用於押出成型之低密度聚乙烯LDPE，進行分配式混合元件之最佳化設計，茲將其材料流變性質列於表 1 [33]。

表 1 . LDPE 之物理性質及流變參數

(A) 物理性質	
熔體密度 ρ_m (Kg/m ³)	770
熔體之熱傳係數 K_m (W/m-K)	0.182
溶體之比熱 C_m (J/Kg-K)	2272
(B) 流變參數	
$m_0(T_0) \times 10^{-8}$ (Pa · s ⁿ)	1.96
T_0 (K)	383
$a \times 10^2$ (1/K)	2.33
$\dot{\gamma}_0$ (1/s)	1.00
n (dimensionless)	0.5
Truncated Power Law Model :	
$\eta = \begin{cases} \eta_0 e^{-a(T-T_0)} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} & (\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0) \\ \eta_0 e^{-a(T-T_0)} & (\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0) \end{cases}$	
$\eta_0 = m_0 \dot{\gamma}_0^{n-1}$	

本研究針對螺桿計量區末端 4 牙進行混合區之模擬分析(如前述圖 7)，

茲將尚未安裝混合元件之螺桿幾何參數與操作條件詳列於表 2。

表 2. 螺桿幾何參數及操作條件

套筒內徑 D_b (cm)	6.3
螺距 L_s (cm)	6.3
溝深 H (cm)	0.45
溝寬 W (cm)	5.67
牙寬 W_s (cm)	0.63
入口流量 (Kg/hr)	45
螺旋角 Θ_b ($^\circ$)	17.66
套筒溫度 T_b ($^\circ\text{C}$)	200
螺桿轉速 (RPM)	80

3.2 傳統式螺桿之混合分析

一般而言，高分子流體在螺桿內的流動通常會受到二種驅動力，一是由於溝道內高分子流體相互擠壓所產生的壓力流（pressure flow），另一是套筒轉動對高分子流體產生拖曳造成的拖曳流（drag flow）。對套筒轉速而言愈高的轉速會帶來愈高的拖曳力，一方面也增加高分子流體往前推進（pumping）的能力，反之，背壓所造成的壓力流則會迫使熔融高分子產生迴流。綜合上述二點，故高分子流體在溝道內會呈現一螺旋狀的流動，而由於這樣往覆式的流動在流場內亦造成流體粒子於空間中位置的移動，如同先前所提之整體擴散，進而達到混合的目的。

首先，先針對一般傳統式單螺桿計量區末端 4 牙在未增置任何混合元件下去討論其流動情形（如圖 11 所示），此處之入口截面及出口截面為軸向而非寬度之方向，並以此作為後續研究之對照組。在流道入口截面之中心位置取一質點，觀察質點在流道內之流線分析示意圖，如圖 12 所示。由於此傳統式螺桿在計量區沒有增設混合元件，故流體流動較不受阻礙，流線大致呈現平滑之螺旋狀流動。

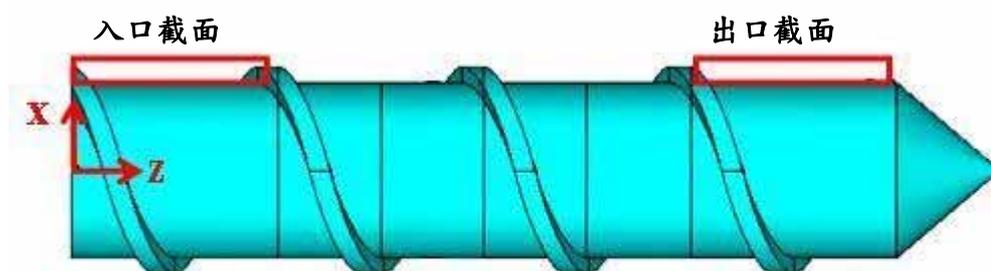


圖 11. 傳統式螺桿幾何示意圖

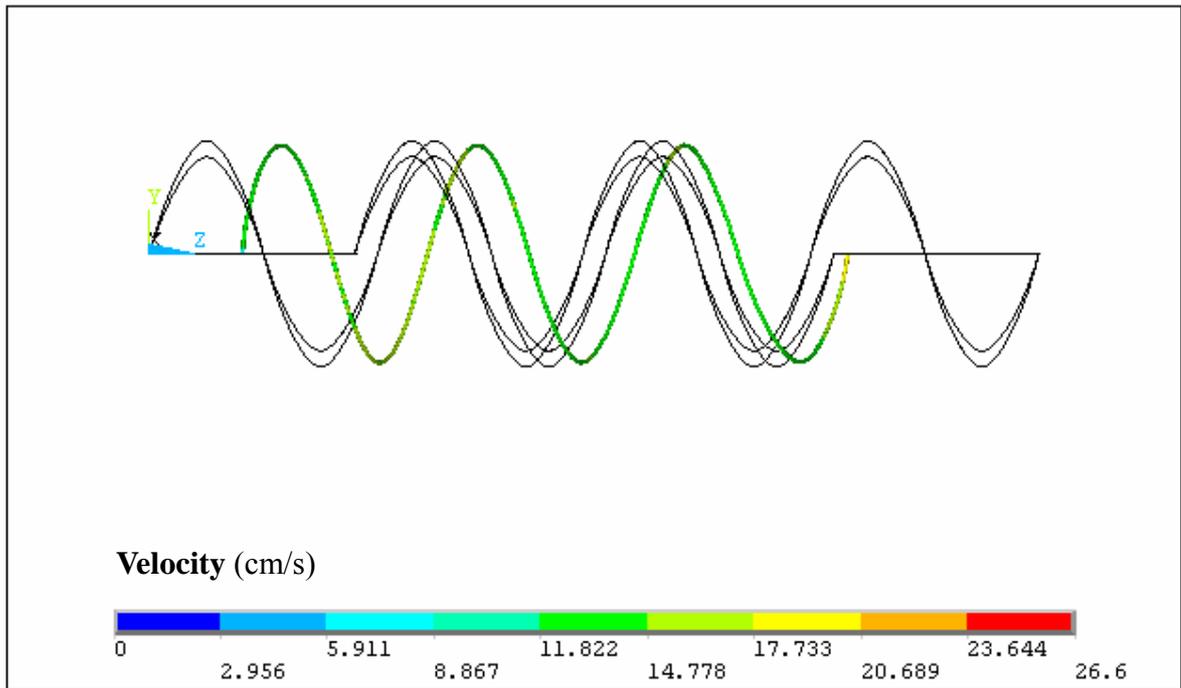


圖 12. 傳統式螺桿之流道與流線示意圖

在流道入口截面處平均選取四個質點(如圖 13 所示, 即 Trace 13、Trace 18、Trace 33 及 Trace 38), 觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化, 如圖 14 所示。由圖中可看出, 界面面積增加率對流動時間作圖之斜率大致呈現平穩且緩慢的增加, 無突然轉折之現象。再根據前述 2.2.2 節所述之方法, 可計算得到 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率達 106.79。

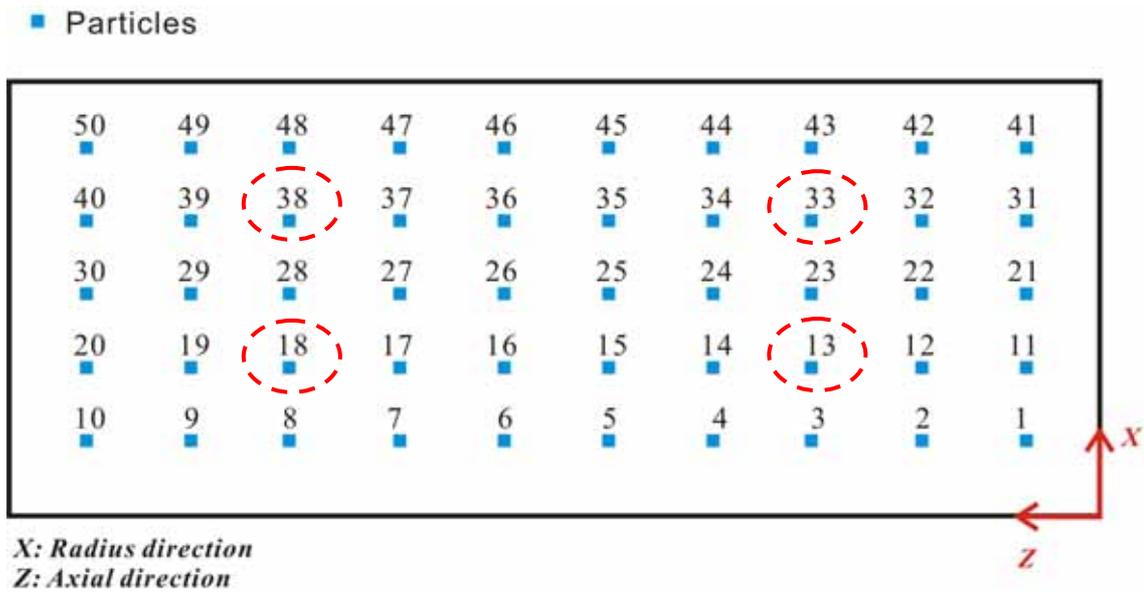


圖 13. 流道入口截面處平均選取四個質點之示意圖

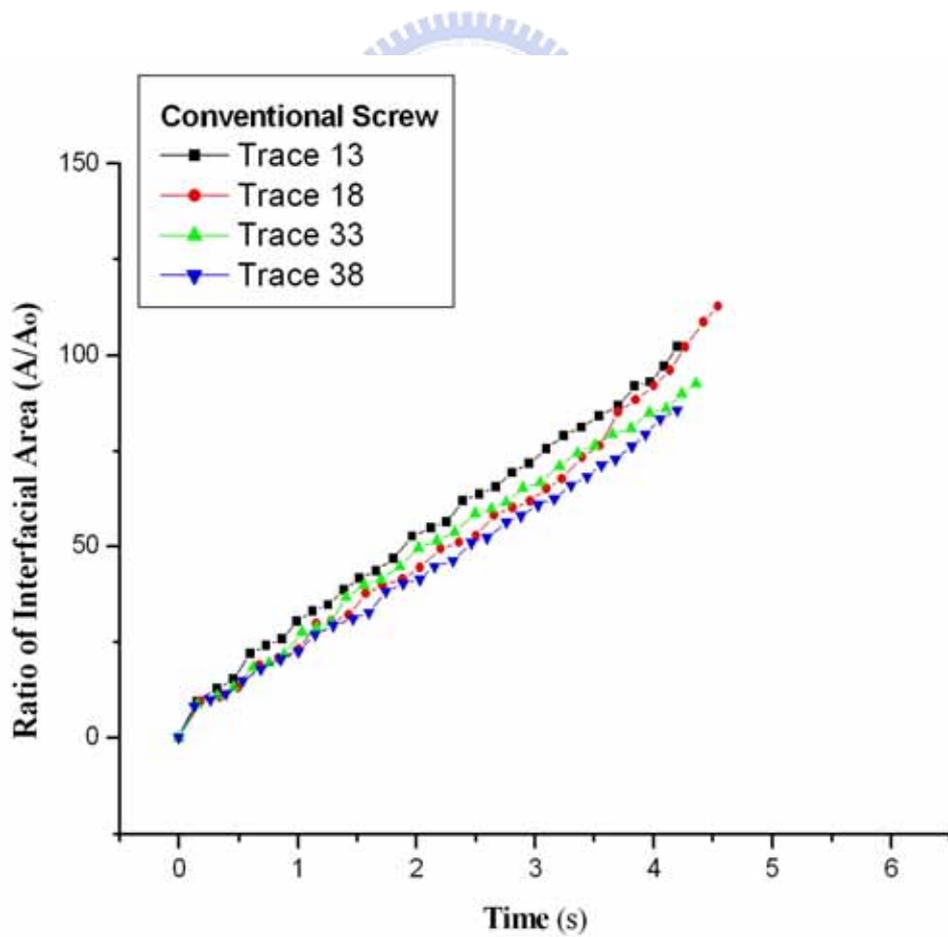


圖 14. 傳統式螺桿四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

此外，為了比較各混合區在流場中之壓力變化，故先計算一般傳統式單螺桿混合區入口至出口截面之壓力增加值，其值為 1.17Mpa，以此作為對照組，作後續之比較分析。

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 3 所示。顯示了色彩均勻度值隨著四個橫切面有緩慢上升的趨勢，也代表著隨著色彩均勻度值會隨著流動路徑增長而緩慢上升。

表 3. 傳統式螺桿各切面之色彩均勻度值

Conventional Screw	Color Homogeneity			
	Slice 1	Slice 2	Slice 3	Slice 4
	0.52	0.54	0.58	0.61

3.3 插栓型混合區之混合分析

影響插栓型混合區其混合性能之最大因素為插栓混合元件之幾何形狀、橫截面安裝數量和元件彼此間軸向間距，因此本研究將分別加以探討。

3.3.1 改變元件幾何形狀之分析比較

首先，於螺桿計量區末端 4 牙之混合區中，自入口截面起之軸向距離 1.5 牙開始至 2.5 牙結束，增設插栓型混合元件，如圖 15 所示。探討改變元件之幾何形狀對混合性能之影響，並固定其他幾何條件如下：橫截面安裝 6 支混合元件、軸向排列為 3 排、軸向間距為 $1/6D$ (D 為螺桿直徑)。

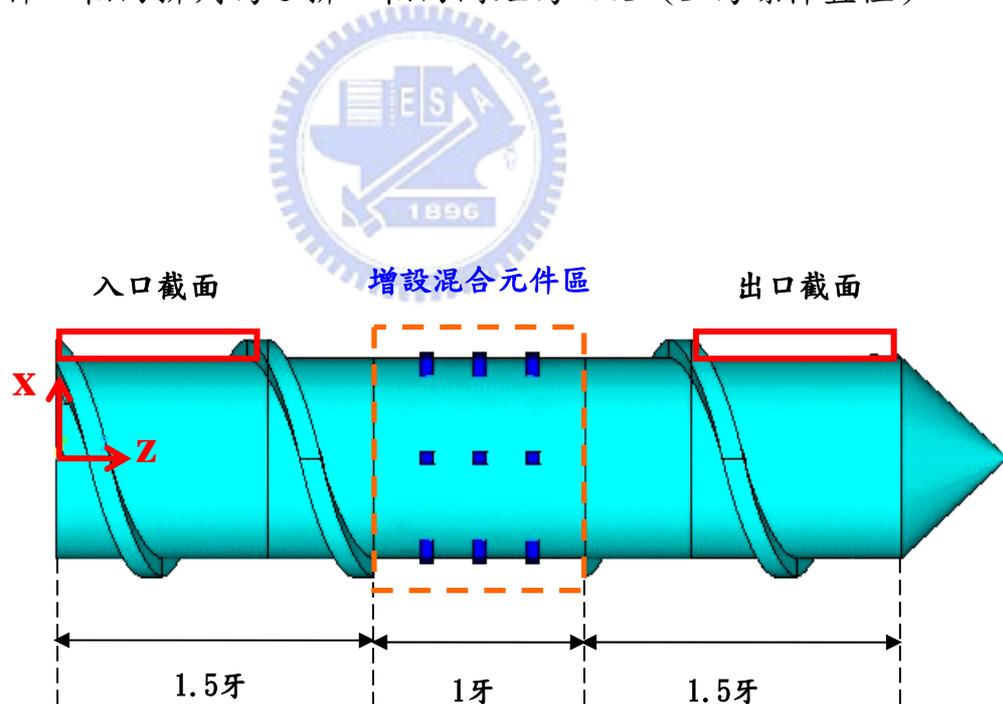


圖 15. 混合區中增設混合元件之相對位置示意圖

本研究之 Pineapple、Pins 及 Blockhead 混合元件幾何形狀之尺寸設計，

如圖 16 所示。

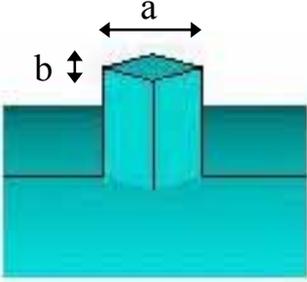
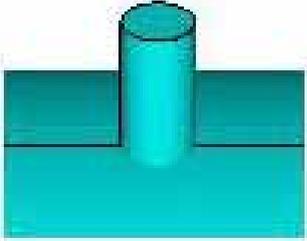
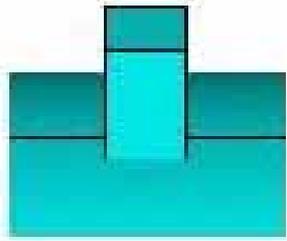
(a) Pineapple type	(b) Pins type	(c) Blockhead type
		
<p>a : 0.6 cm</p> <p>b : 0.3 cm</p> <p>Height : 0.45 cm</p>	<p>Radius : 0.2 cm</p> <p>Height : 0.45 cm</p>	<p>Length : 0.2 cm</p> <p>Height : 0.45 cm</p>

圖 16. Pineapple、Pins 及 Blockhead 混合元件其幾何形狀之尺寸設計

在各混合區其流道入口截面之中心位置取一質點，如圖 12 中之質點 25，觀察質點在流道內之流線分析示意圖，分別如圖 17、圖 18 及圖 19 所示。由圖 17 至圖 19 可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有迴流現象產生。

圖 17 中，可明顯觀察出流線在靠近 Pineapple 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。此外於其他不同質點位置所做的流線追蹤分析來看，會發現在通過 Pineapple 混合元件時會有些許迴流及渦流的情形發生。

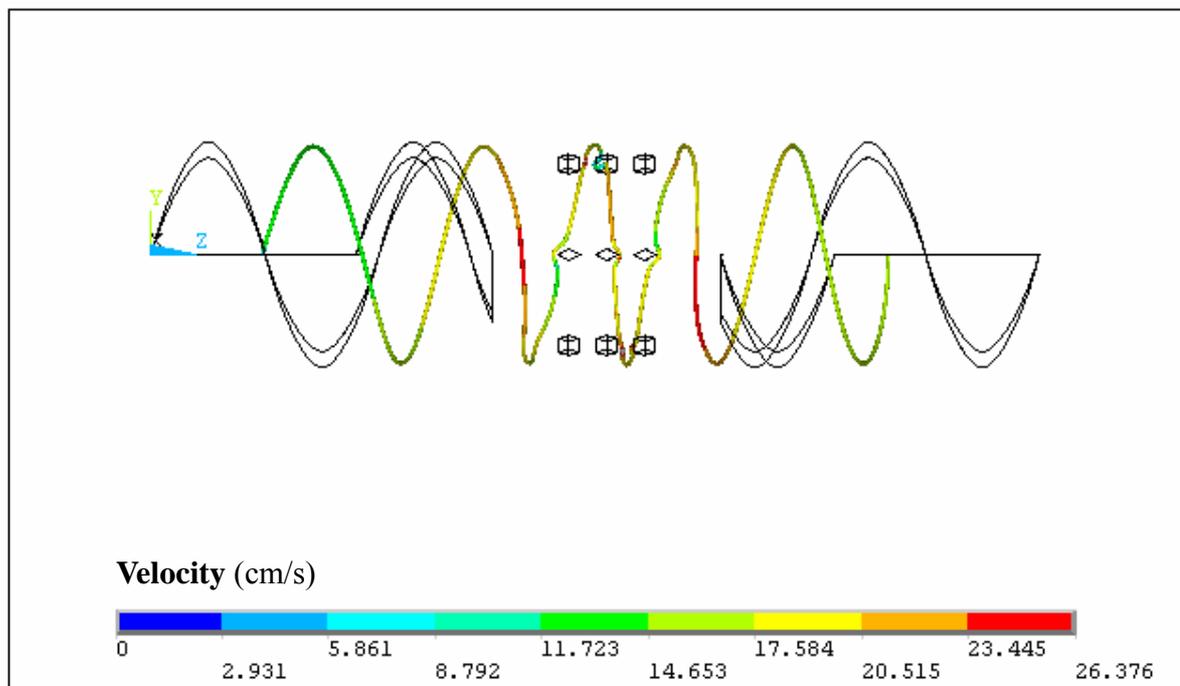


圖 17. Pineapple 混合區之流道與流線示意圖

圖 18 中，可明顯觀察出流線在靠近 Pins 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。由於 Pins 混合元件無較多的尖角處，以致於流體在通過時較為平順，因而流線的擾動不大，故造成迴流及渦流的情形也不大，也不易造成太多死角的發生，在分配效果上不會有太大的阻礙。

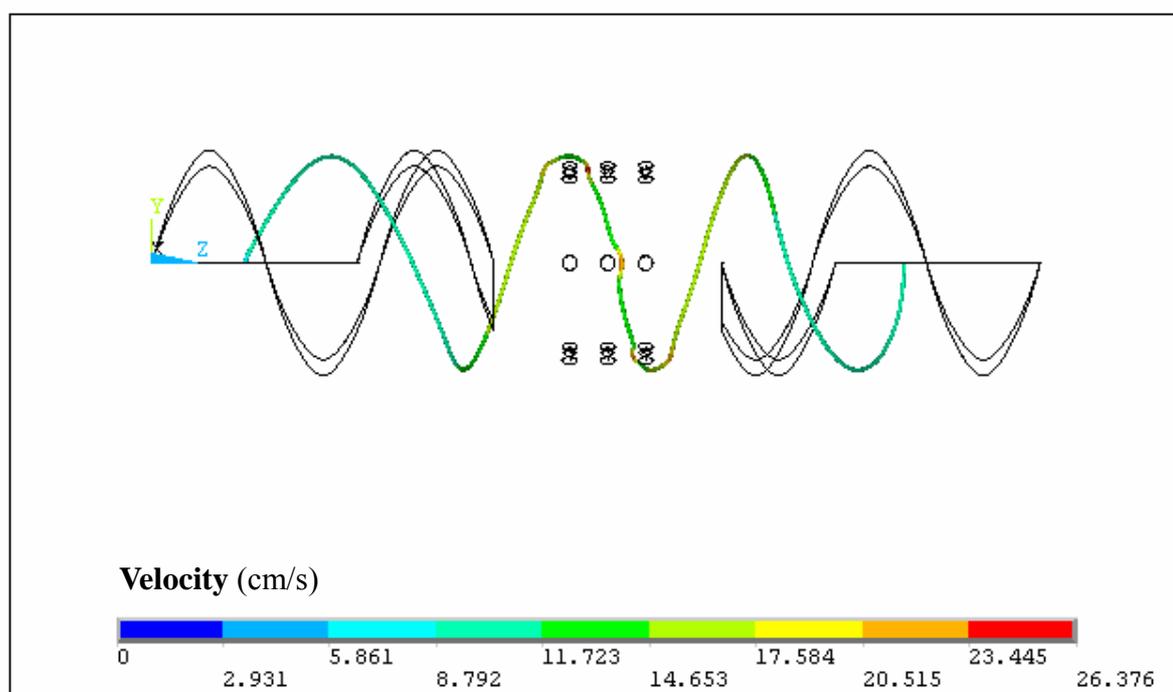


圖 18. Pins 混合區之流道與流線示意圖

圖 19 中，可明顯觀察出流線在靠近 Blockhead 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。由於 Blockhead 混合元件有較多尖角處，流線在元件接角處易形成不流暢的情形，故容易在四周形成渦流造成死角，但此不穩定的流動，也讓速度梯度產生變化造成界面面積增加率的上升，也促成了流體在區域內相互混合的目的。

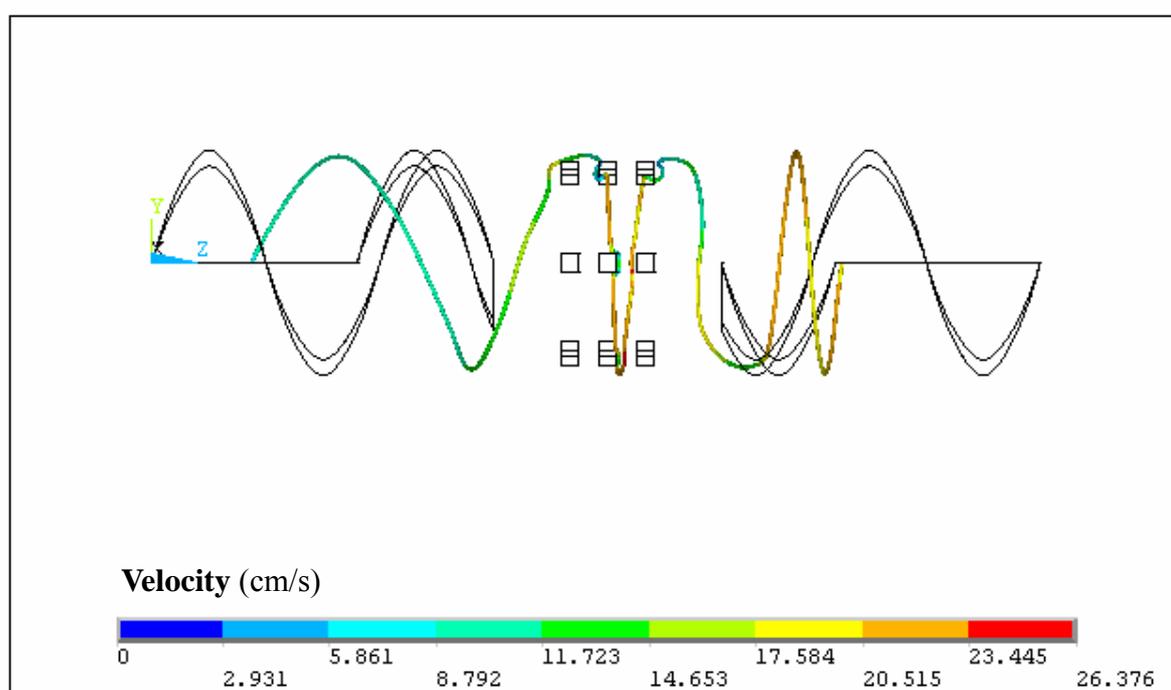


圖 19. Blockhead 混合區之流道與流線示意圖

不同的混合元件形狀，在流場中會產生不同大小的死角或停滯區，由於停滯區通常在速度慢的區域出現，因此以速度最慢的區域大小來做判別。各混合區之軸向中心位置之流道橫切面示意圖，則分別如圖 20、圖 21 及圖 22 所示。由以上圖示可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有滯流現象產生。

由圖 20 至圖 22 中可比較出，Blockhead 混合元件速度最慢的區域最大，Pineapple 及 Pins 混合元件速度最慢的區域差不多，可知 Blockhead 混合區較易造成滯留之現象，以及死角之產生，降低混合的程度。

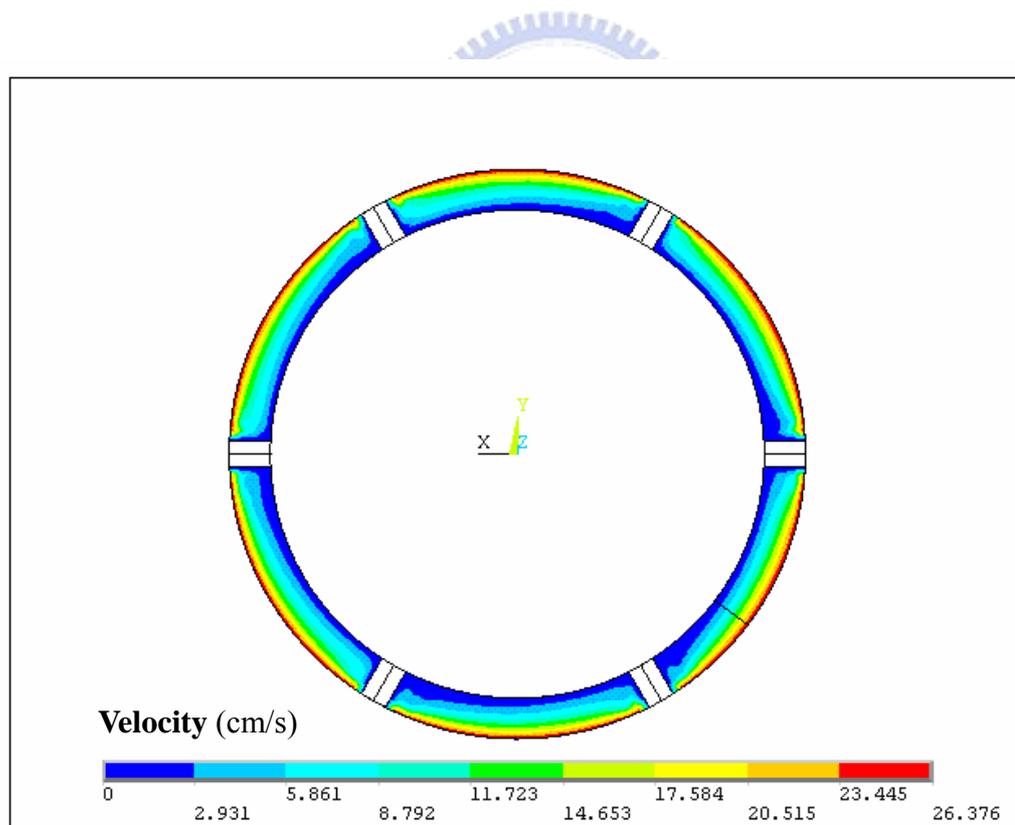


圖 20. Pineapple 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

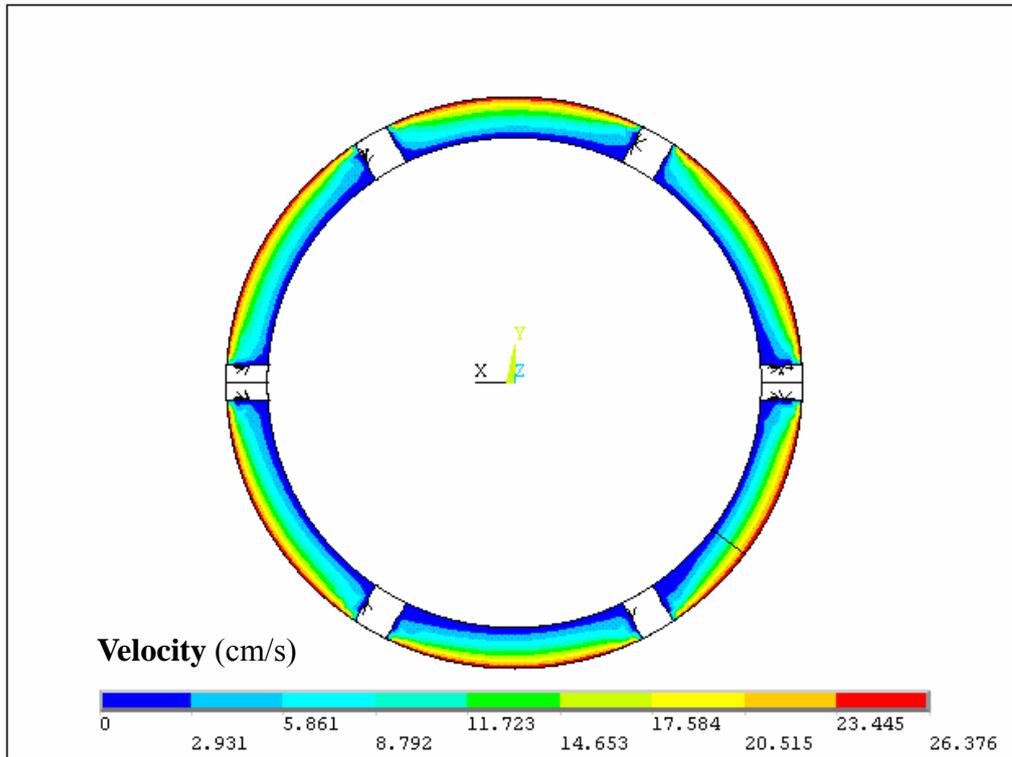


圖 21. Pins 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

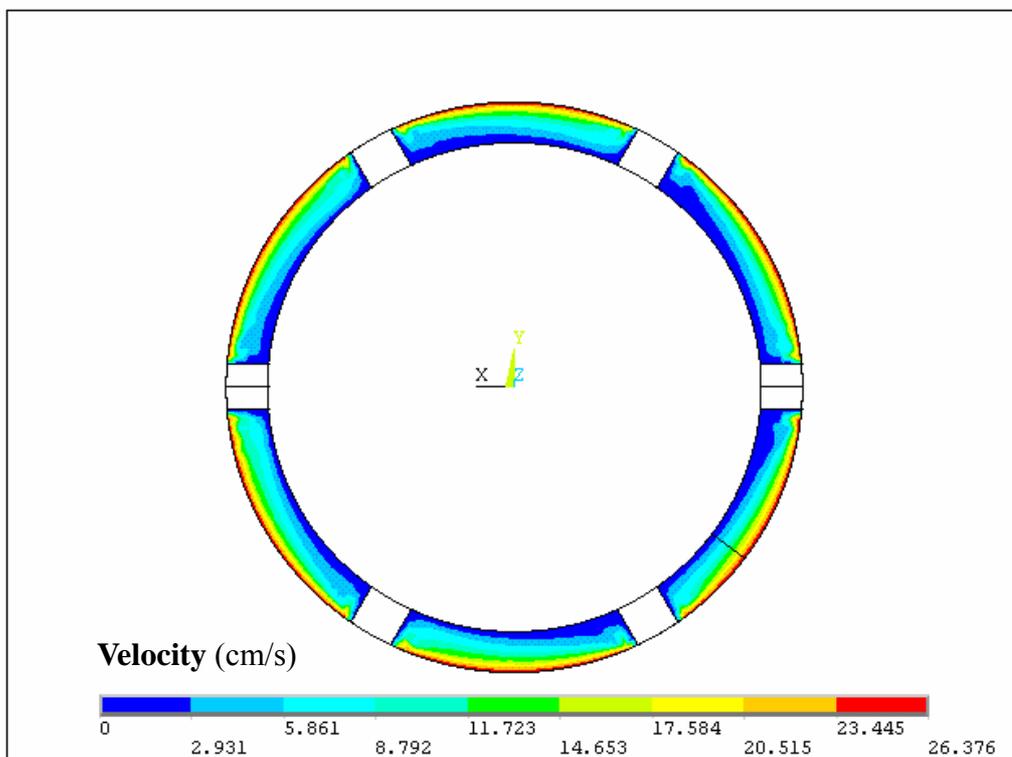


圖 22. Blockhead 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

在各混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 23、圖 24 及圖 25 所示。

由圖 23 至圖 25 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。圖 23 中，Trace 13 流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，可觀察出在流動時間為 3.3 秒時斜率出現轉折處，對應其流線位置，發現此時即為流線要開始進入混合元件區段，此後斜率快速上升，至流動時間為 4 秒時流線通過混合元件，故其斜率明顯減緩許多。

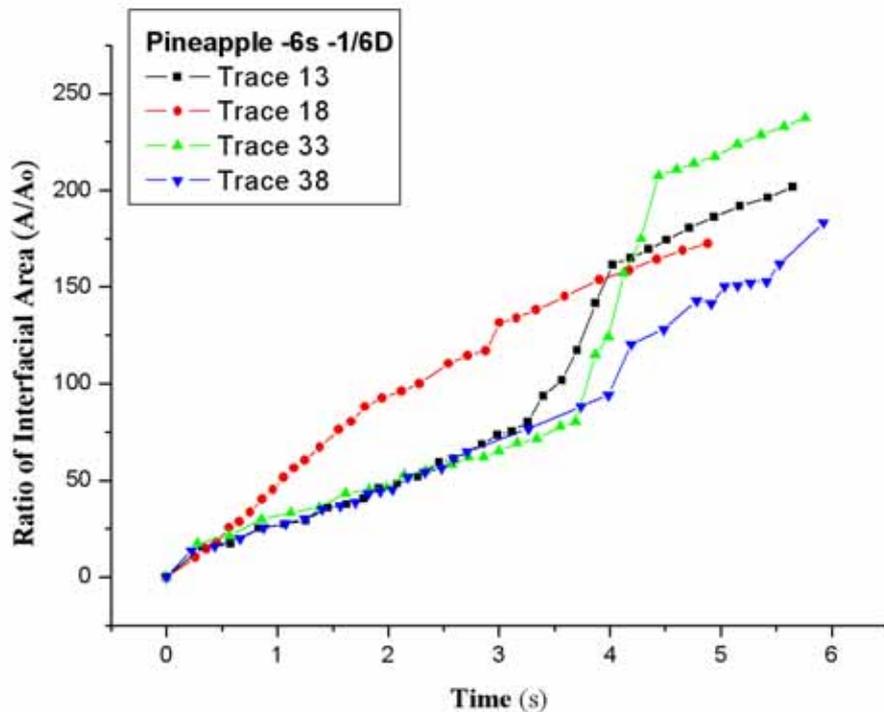


圖 23. Pineapple 混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

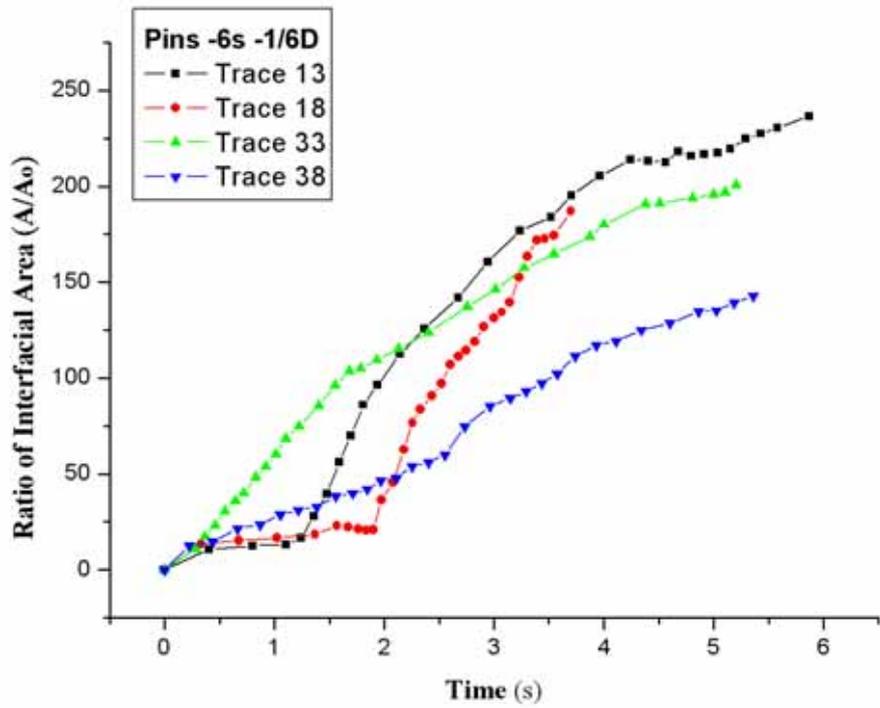


圖 24. Pins 混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

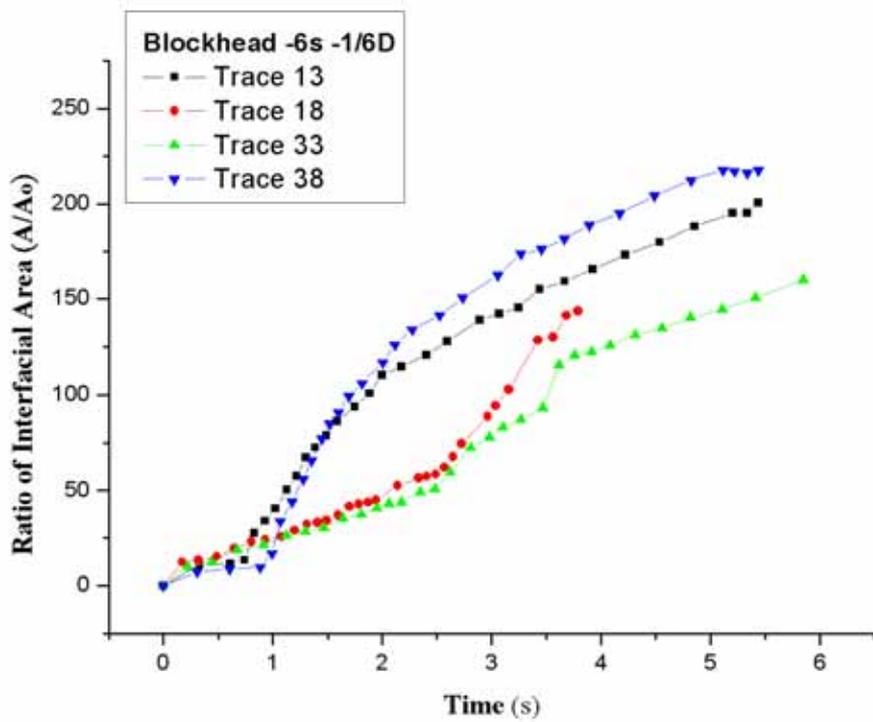


圖 25. Blockhead 混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，Pineapple 混合區之總體平均界面面積增加率值可達 216.13；Pins 混合區之總體平均界面面積增加率值可達 194.00；Blockhead 混合區之總體平均界面面積增加率值可達 178.54。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，其計算壓降之相對位置如圖 9 之 Cross Section 1 至 Cross Section 4，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 4 所示)，若壓降太大將導致計量區末端(即進入模頭前)背壓太低，犧牲押出量。表 4 中，可觀察出 Blockhead Mixing Section 消耗壓降最大，Pins Mixing Section 消耗壓降次之，Pineapple Mixing Section 消耗壓降最小。

表 4. Pineapple、Pins 及 Blockhead 各混合區其混合元件前後之壓降比較

	ΔP (MPa)
Pineapple Mixing Section	0.34
Pins Mixing Section	0.36
Blockhead Mixing Section	0.43

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 5 所示

表 5. Pineapple、Pins 及 Blockhead 混合區各橫切面之色彩均勻度值

	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
Pineapple Mixing Section	0.69	0.78	0.85	0.92
Pins Mixing Section	0.60	0.73	0.75	0.74
Blockhead Mixing Section	0.55	0.63	0.73	0.74

由表 5 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故區域上的質點顏色還未達到較好的分配，其色彩均勻度的值偏低，隨著四個橫切面沿 z 方向的增加，有明顯上升的趨勢，即每經過一次橫截面上的混合元件，就造成了一次的流場分割，改變了流體的行進方向，造就了較好的分配效果，也代表其紅色及藍色兩種顏色質點在八個區域的配置上，有越來越平均分配的現象，因此質點在某個區域出現之或然率以及在該區域下顏色質點出現之或然率大大的提升，因此色彩均勻度的值也就相對提高。Pins Mixing Section 以及 Blockhead Mixing Section 其色彩均勻度值隨四個橫切面，上升的幅度並不大，可知此兩種混合元件在此四個橫切面區域上藍、紅質點的配置，還未達到較好的均勻分配現象。

總合上述 3.3.1 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

Pineapple、Pins、Blockhead 與傳統式螺桿之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 26 所示。圖 26 中，可清楚的比較在裝設以上三種不同幾何形狀之混合元件，其總體平均界面面積增加率值皆比傳統式螺桿要高的多，代表增設混合元件的確有助混合效益的提升。

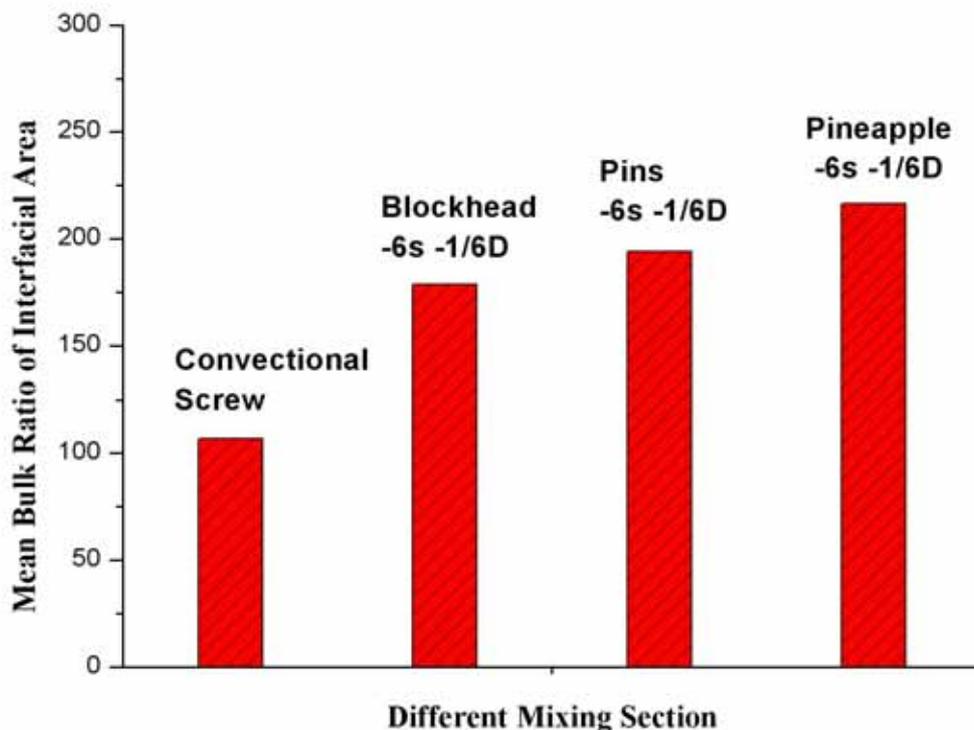


圖 26. Pineapple、Pins、Blockhead 混合區與傳統式螺桿之總體平均界面面積增加率比較圖

而以上三種不同幾何形狀之混合元件，由總體平均界面面積增加率值的結果看來，以 Pineapple Mixing Section 最佳，Pins Mixing Section 次之，

Blockhead Mixing Section 為最差。這是由於不同幾何形狀之混合元件，會使流場產生不同程度的擾動，即不同程度的速度梯度之變化，也會產生不同程度的迴流、渦流現象產生，以及造成死角的機率。因此，在流體的流線分析上 Pineapple Mixing Section 會產生較大的擾動，導致流體粒子不斷的碰觸混合元件而改變行進路線，使高分子熔融體能獲得重新的流動方向，以利於添加成分均勻地分佈在主成分中，有效的提升了混合效益。

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

Pineapple、Pins、Blockhead 與傳統式螺桿之色彩均勻度比較，如圖 27

所示。

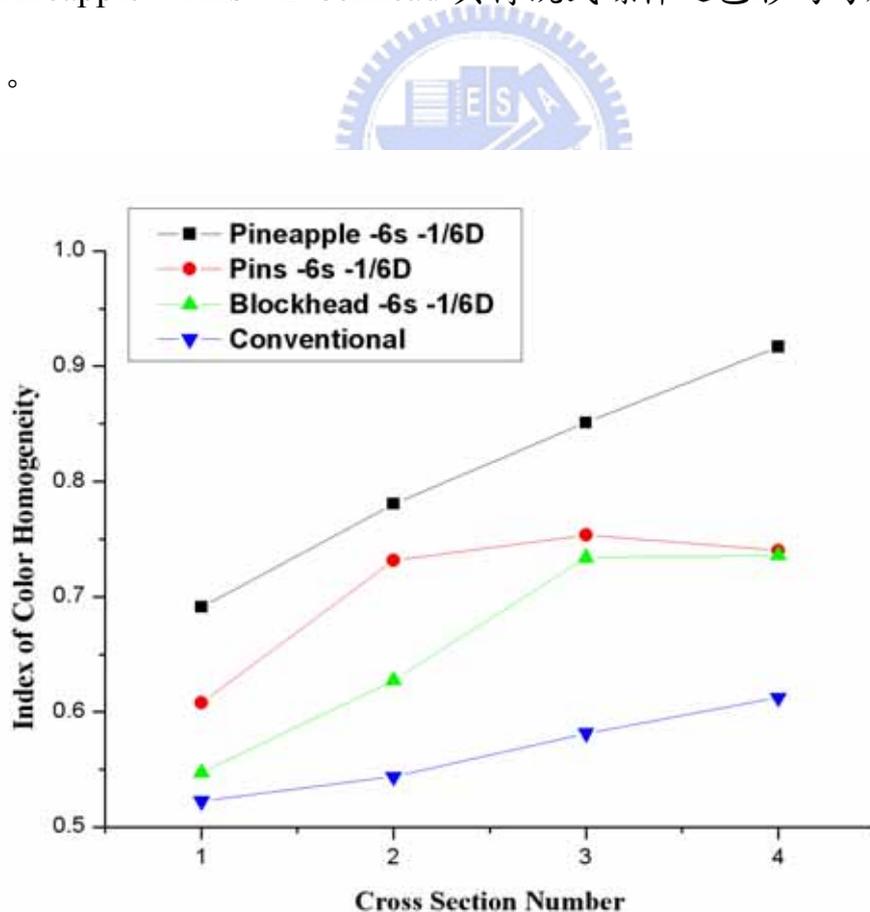


圖 27. Pineapple、Pins、Blockhead 混合區與傳統式螺桿各橫切面之色彩均勻度變化比較

圖 27 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，以 Pineapple Mixing Section 最佳，Pins Mixing Section 次之，Blockhead Mixing Section 為最差。但 Pins Mixing Section 與 Blockhead Mixing Section 之色彩均勻度值相距不遠，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

由以上兩種混合指標之混合分析結果，應選擇混合效益最佳之 Pineapple Mixing Section 為插栓型混合元件之最佳幾何形狀。



3.3.2 改變橫截面元件安裝數量之分析比較

以 3.3.1 節所選擇之 Pineapple 混合區為最佳幾何形狀基準，其橫截面元件安裝數量為 6 支，本小節則再改變橫截面元件安裝數量（包括 3 支與 9 支），以進行分析比較。

在橫截面元件安裝 3 支元件與橫截面元件安裝 9 支元件兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 28 及圖 29 所示。

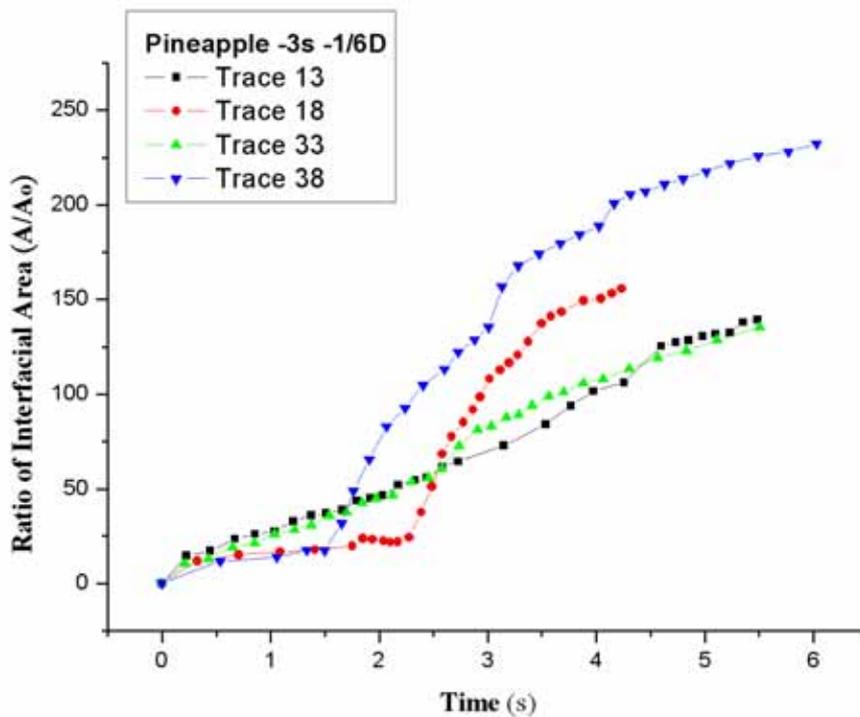


圖 28. 橫截面安裝 3 支 Pineapple 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

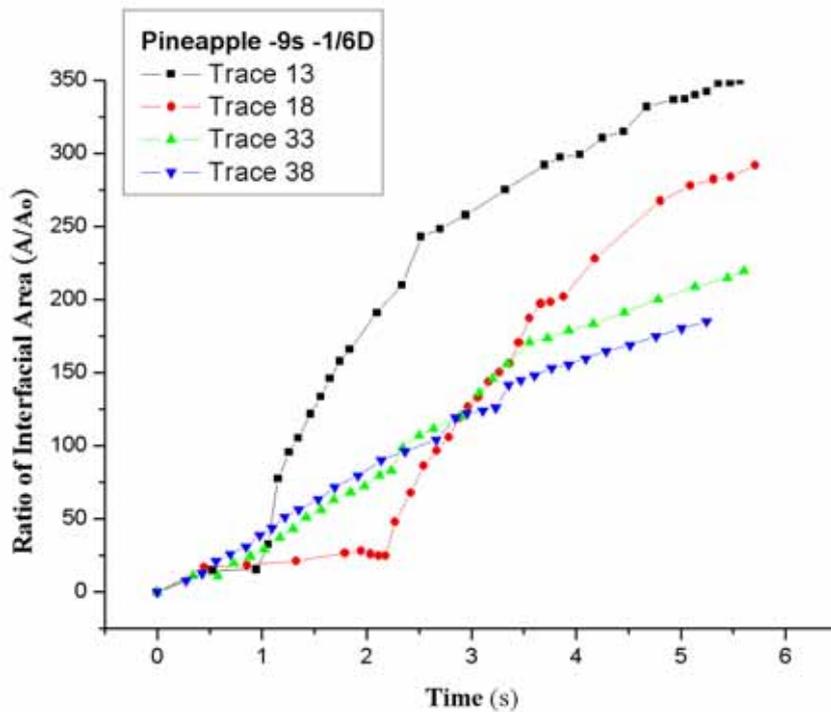


圖 29. 橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件其混合區四質點流線
其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

由圖 28 及圖 29 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。圖 28 中，由於在橫截面混合元件的數量較少，流動的阻礙降低，流線很快就通過了混合元件，流線路徑明顯短了許多，也因此降低了混合效益。圖 29 中，由於增加了混合元件在橫截面上之數量，導致元件間的空隙變小，流動空間減少，流體通過時受到元件阻擋的機會變高，發現流線受到擾動的情形增加許多，提高了流體被切割的機會，故流線在經過混合區時速度梯度的改變非常明顯，明顯提升了混合效益。

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，橫截面安裝 3 支 Pineapple 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 178.23；橫截面安裝 6 支 Pineapple 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 216.31；橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 255.68。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 6 所示)，若壓降太大將導致計量區末端(即進入模頭前)背壓太低，犧牲押出量。表 6 中，可觀察出橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件消耗壓降最大，橫截面安裝 6 支 Pineapple 混合元件消耗壓降次之，橫截面安裝 3 支 Pineapple 混合元件消耗壓降最小，可知橫截面元件安裝數量越多，其所消耗的壓降越大。

表 6. 橫截面安裝 3 支、6 支及 9 支 Pineapple 各混合區
其混合元件前後之壓降比較

Pineapple Mixing Section 橫截面安裝元件數量	ΔP (MPa)
3 Elements	0.33
6 Elements	0.34
9 Elements	0.35

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 7 所示。

表 7. 橫截面安裝 3 支、6 支及 9 支 Pineapple 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Pineapple Mixing Section 橫截面安裝元件數量	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
3 Elements	0.61	0.77	0.82	0.80
6 Elements	0.69	0.78	0.85	0.92
9 Elements	0.77	0.82	0.90	0.94

由表 7 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故區域上的質點顏色還未達到較好的分配，其色彩均勻度的值偏低，隨著四個橫切面沿 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。橫截面安裝 3 支及 9 支 Pineapple 混合元件其色彩均勻度值上升幅度並非呈現持續的上升，有此震盪的趨勢可推測在此四個橫切面區域上藍、紅質點的配置，在經過混合元件時會有些不穩定的現象，但與第一個橫切面（及未通過混合區）比較，則還是呈現上升的趨勢。

總合上述 3.3.2 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

橫截面安裝 3 支、6 支、9 支 Pineapple 混合元件之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 30 所示。圖中，可清楚比較以橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率值最佳。

可得知橫截面安裝數量越多其混合效益越好，因為增加橫截面安裝數量可提高流體被切割的機會，由於流體流動的空間減少，流體會以被擠壓的方式通過混合元件的空隙，進入到較寬廣的區域進行拉伸，可有效的增加分配混合效率。

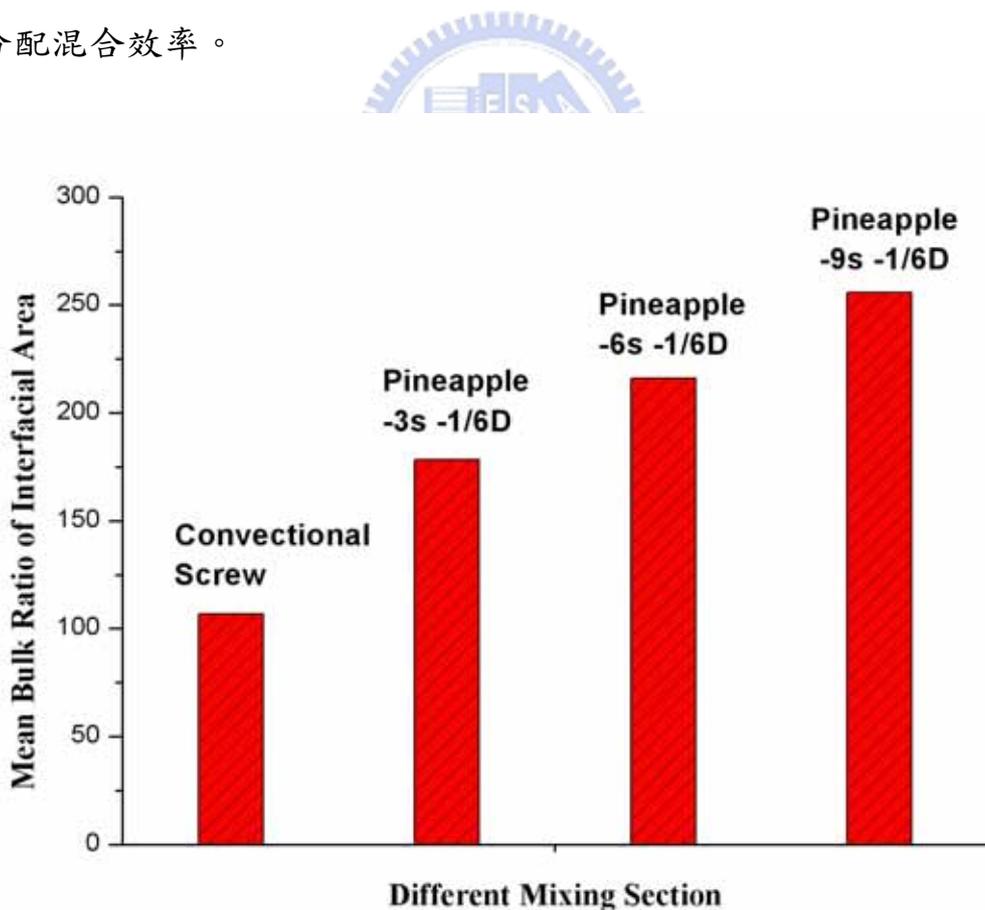


圖 30. 橫截面安裝 3 支、6 支、9 支 Pineapple 與傳統式螺桿混合區之總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

橫截面安裝 3 支、6 支、9 支 Pineapple 混合元件之色彩均勻度比較，如圖 31 所示。圖 31 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，橫截面安裝九支 Pineapple 混合元件其色彩均勻度值最佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

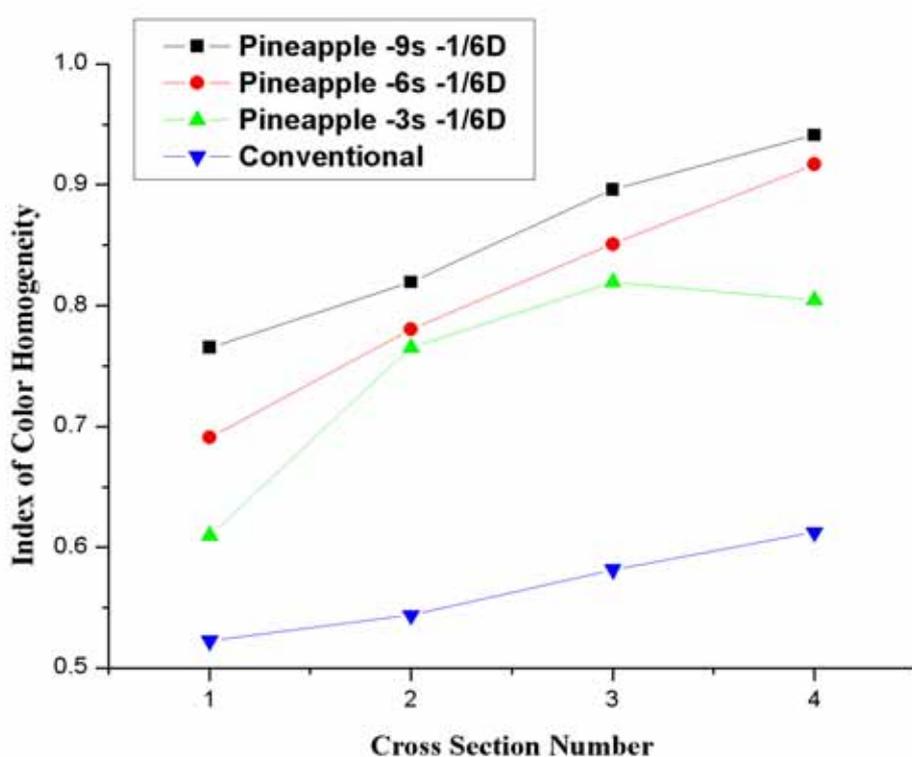


圖 31. 橫截面安裝 3 支、6 支、9 支 Pineapple 與傳統式螺桿混合區各橫切面之色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件作為最佳設計條件。

3.3.3 改變元件軸向間距之分析比較

以 3.3.2 節所選擇之橫截面安裝 9 支 Pineapple 混合元件為最佳設計條件，其元件軸向間距為 $1/6D$ ，本小節則再改變元件軸向間距（包括 $1/8D$ 與 $1/4D$ ），以進行分析比較。

在元件軸向間距 $1/4D$ 與元件軸向間距 $1/8D$ 兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 32、圖 33 所示。

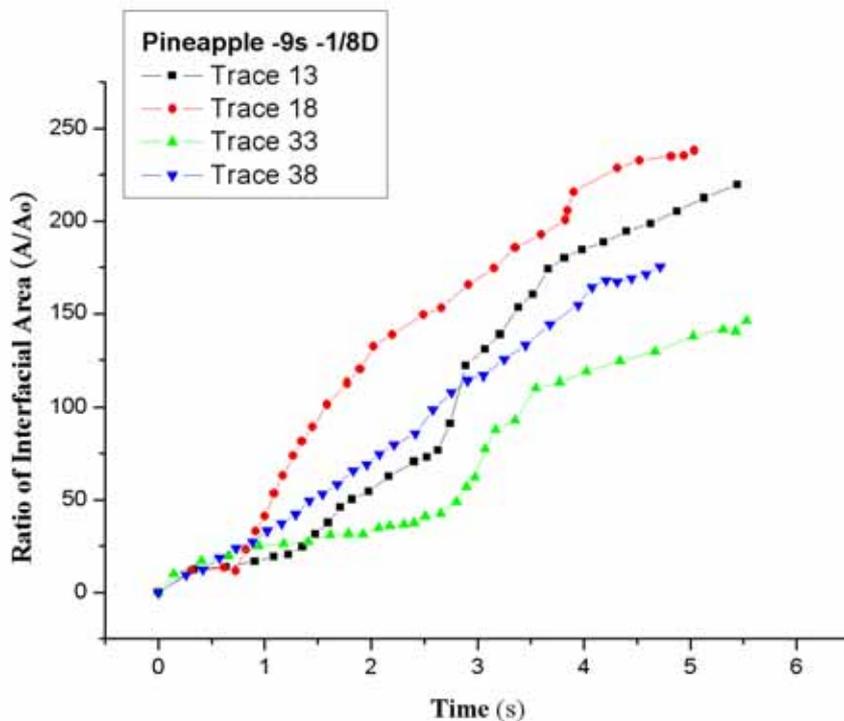


圖 32. 軸向間距 $1/8 D$ 之 Pineapple 混合元件其混合區四質點流線

其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

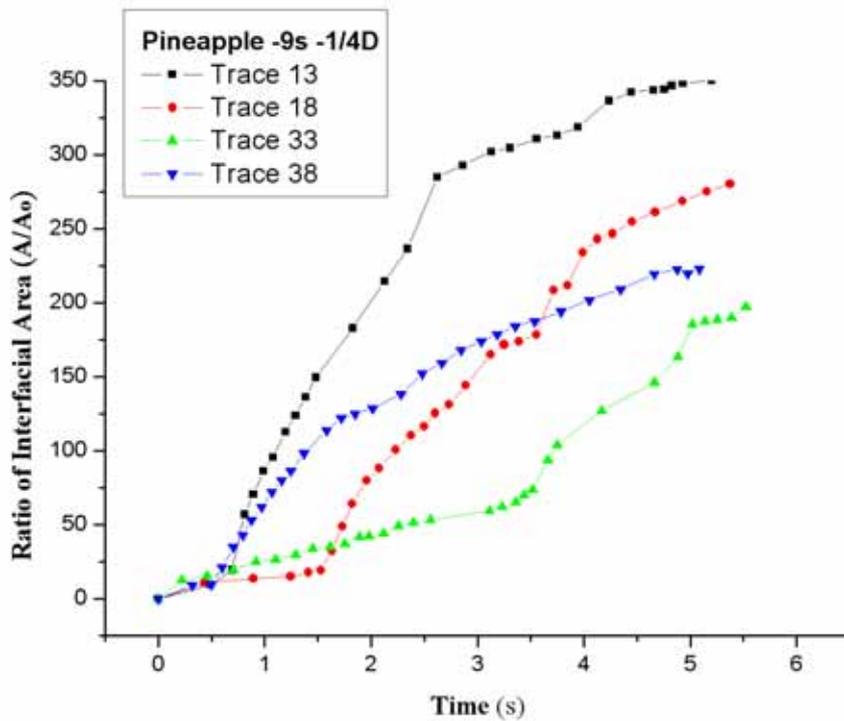


圖 33. 軸向間距 1/4 D 之 Pineapple 混合元件其混合區四質點流線

其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

由圖 32 及圖 33 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。圖 32 中，由於混合元件之軸向間距較小，導致流線流經元件時不易通過，容易一次越過兩支元件，使流線受到擾動的情形減少許多，也就降低了混合效果。圖 33 中，由於增加了混合元件之軸向間距，則會增加流體之橫向流動，提高流體受到切割與重新排列的機會，提升了混合效果，可看出其轉折後的斜率趨勢比之前的情形都要高的多，明顯提升了混合的效果。

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，軸向間距 $1/8 D$ 之 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 197.31；軸向間距 $1/6 D$ 之 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 255.68；軸向間距 $1/4 D$ 之 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 266.07。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 8 所示)，若壓降太大將導致計量區末端(即進入模頭前)背壓太低，犧牲押出量。表 8 中，可觀察出元件軸向間距 $1/8D$ 之 Pineapple 混合元件消耗壓降最大，元件軸向間距 $1/6D$ 之 Pineapple 混合元件消耗壓降次之，元件軸向間距 $1/4D$ 之 Pineapple 混合元件消耗壓降最小，可知元件軸向間距越小，元件排列較密，其所消耗壓降越大。

表 8. 元件軸向間距 $1/8D$ 、 $1/6D$ 及 $1/4D$ 之 Pineapple 各混合區其混合元件前後之壓降比較

Pineapple Mixing Section Axial Distance	ΔP (MPa)
$1/8 D$	0.39
$1/6 D$	0.36
$1/4 D$	0.35

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 9 所示。

表 9. 元件軸向間距 1/8D、1/6D 及 1/4D 之 Pineapple 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Pineapple Mixing Section Axial Distance	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
1/8 D	0.73	0.77	0.75	0.80
1/6 D	0.77	0.82	0.90	0.94
1/4 D	0.79	0.89	0.90	0.94

由表 9 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故區域上的質點顏色還未達到較好的分配，其色彩均勻度的值偏低，隨著四個橫切面沿 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。元件軸向間距 1/6D 及 1/4D 之 Pineapple 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值皆較元件軸向間距為 1/8D 高很多，代表四個橫切面區域上藍、紅質點的配置有較好的均勻分配現象。

總合上述 3.3.3 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

軸向間距 $1/8$ 、 $1/6$ 、 $1/4 D$ 之 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率之比較，如圖 34 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，以軸向間距 $1/4 D$ 之 Pineapple 混合元件其總體平均界面面積增加率值最佳。

因為軸向間距太小會造成流體不經過元件產生分流切割，而直接由元件間隙通過，導致混合效果不佳及裂解現象，至於增加軸向間距，則能增加流體橫向流動以取得切割及再取向之機會。

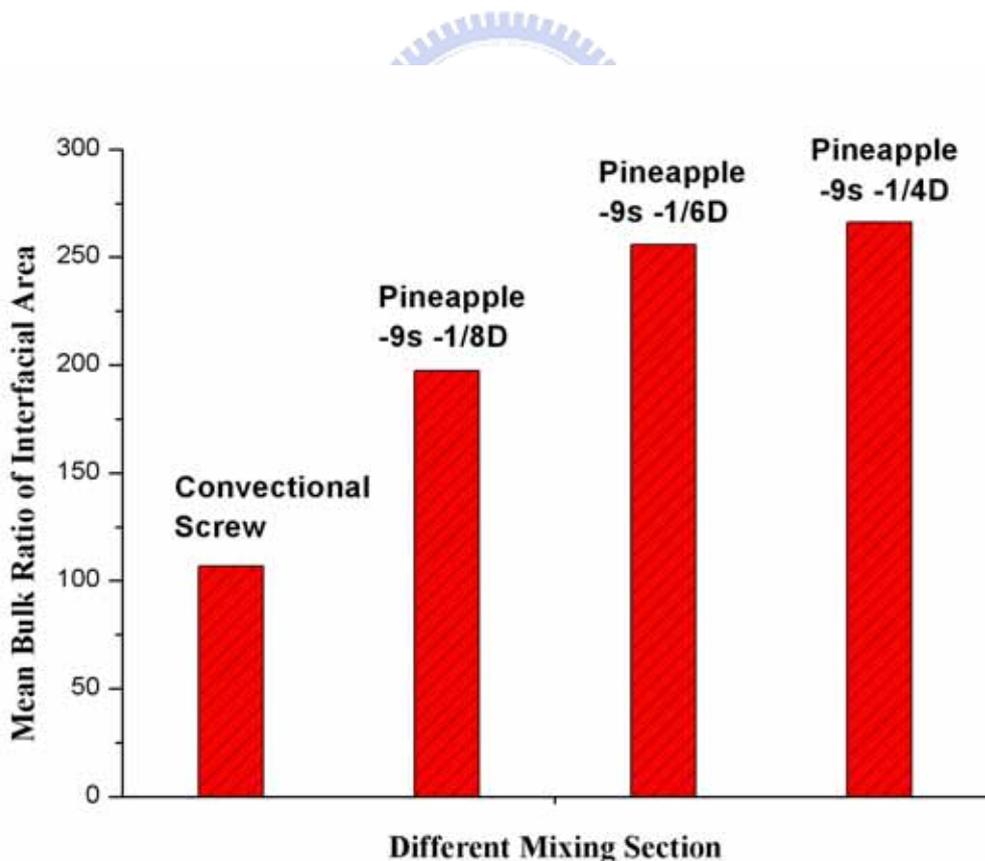


圖 34. 軸向間距 $1/8D$ 、 $1/6D$ 、 $1/4 D$ 之 Pineapple 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

軸向間距 $1/8D$ 、 $1/6D$ 、 $1/4D$ 之 Pineapple 混合元件其色彩均勻度比較，如圖 35 所示。圖 35 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，軸向間距 $1/4D$ 之 Pineapple 混合元件其色彩均勻度值最佳，但與 $1/6D$ 之值差距不大，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

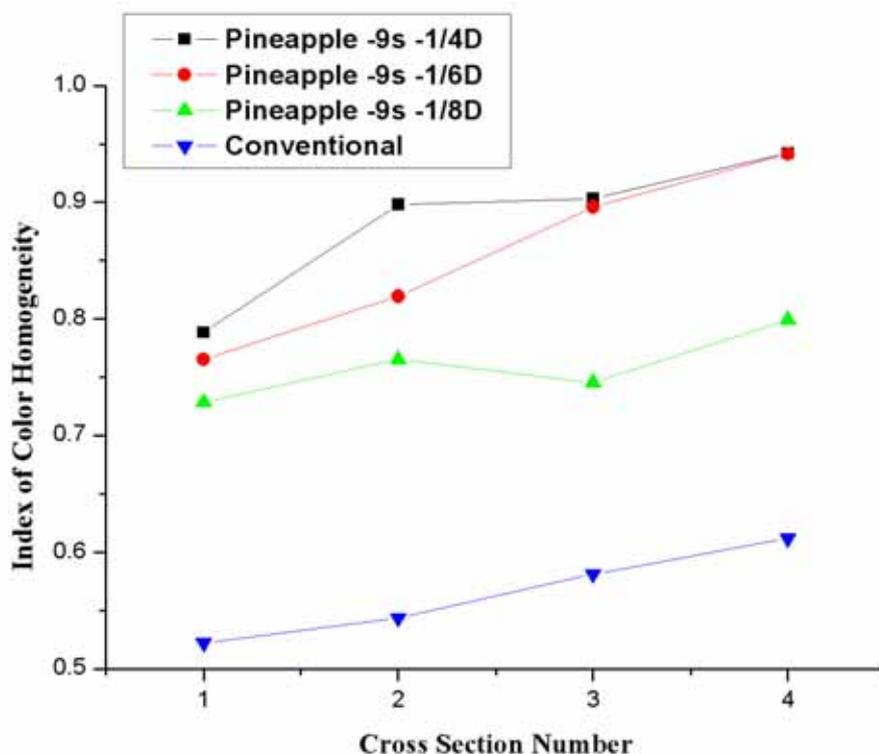


圖 35. 軸向間距 $1/4D$ 、 $1/6D$ 、 $1/8D$ 之 Pineapple 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之軸向間距 $1/4D$ 之 Pineapple 混合元件作為其最佳化設計條件。

3.3.4 插栓型混合區之最佳化設計

由 3.3.1 至 3.3.3 之比較分析，考量了混合元件之幾何形狀、橫截面安裝數量和元件彼此間軸向間距，綜合以上分析，選擇了橫截面安裝 9 支元件且軸向間距為 $1/4D$ 之 Pineapple 混合元件為最佳化設計條件。



3.4 楔型之混合區之混合分析

楔型混合元件以 Dulmage 及 Slotted 兩種型式最被重視，因此本研究將探討此二種楔型混合元件所組成之混合區，其幾何形狀設計參數對混合性能之分析與討論。

3.4.1 Dulmage type 混合區之混合分析

Dulmage 混合元件所組成之混合區，其最重要的幾何設計參數在元件角度、單圈元件數目以及元件軸向間距。本研究對不同之設計參數進行其混合性能探討。

3.4.1.1 改變元件角度之分析比較

首先，於螺桿計量區末端 4 牙之混合區中，自入口截面起之軸向距離 1.5 牙開始至 2.5 牙結束，增設楔型 Dulmage 混合元件，探討改變元件之角度對混合性能之影響。並固定其他幾何條件如下：單圈元件數目安裝 12 支混合元件、軸向排列為 3 排、元件軸向間距為 $1/4D$ (D 為螺桿直徑)。

本研究之 Dulmage 混合元件其元件角度 30° 、 45° 及 60° 幾何形狀之尺寸設計圖，如圖 36 所示。

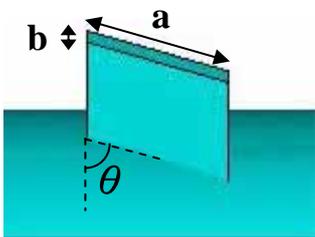
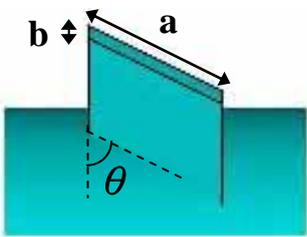
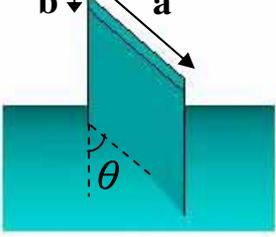
Dulmage type		
		
$a : \sqrt{2} \text{ cm}$ $b : 0.2 \text{ cm}$ $\theta : 30^\circ$ Height : 0.45 cm	$a : \sqrt{2} \text{ cm}$ $b : 0.2 \text{ cm}$ $\theta : 45^\circ$ Height : 0.45 cm	$a : \sqrt{2} \text{ cm}$ $b : 0.2 \text{ cm}$ $\theta : 60^\circ$ Height : 0.45 cm

圖 36. Dulmage 混合元件其元件角度為 30° 、 45° 及 60° 幾何形狀之尺寸設計圖

在各混合區其流道入口截面之中心位置取一質點，觀察質點在流道內之流線分析示意圖，分別如圖 37、圖 38 及圖 39 所示。由圖 37 至圖 39 可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有迴流現象產生。

圖 37 中，可明顯觀察出流線在靠近元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。

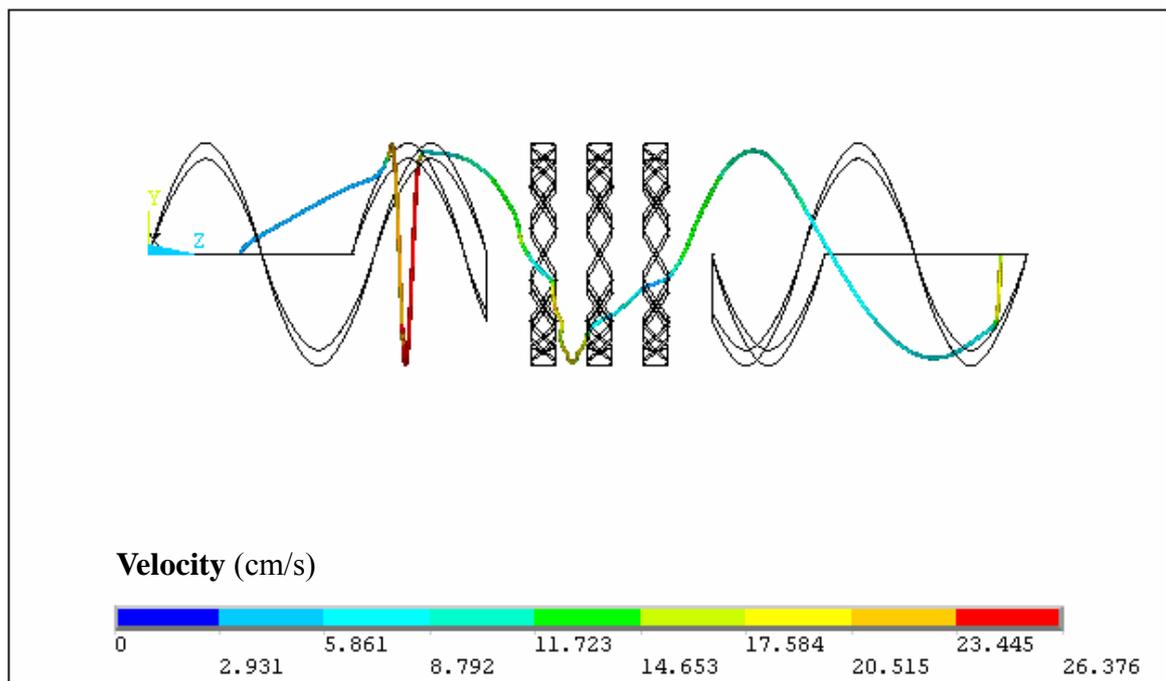


圖 37. 元件角度 30° 之 Dulmage 混合區其流道與流線示意圖

圖 38 中，可明顯觀察出流線在靠近元件角度 45° 之 Dulmage 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。在通過混合區之後，質點被帶往靠近套筒之位置流動，故其流線速度突然上升至接近套筒的速度。

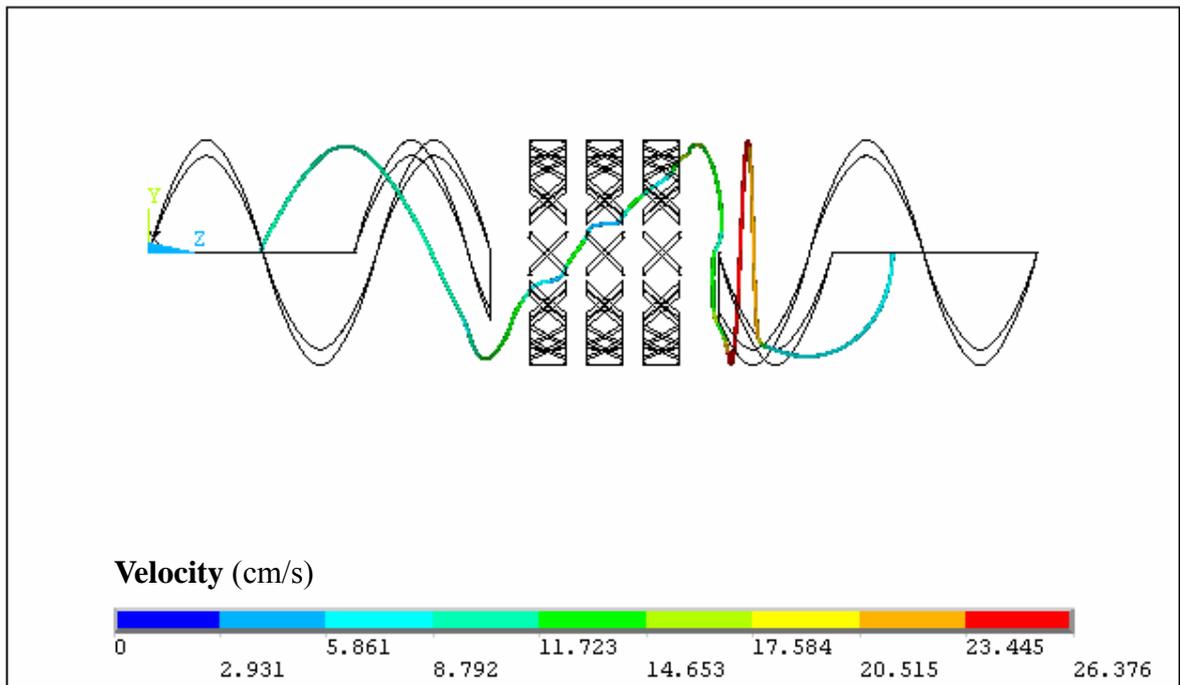


圖 38. 元件角度 45° 之 Dulmage 混合區其流道與流線示意圖

圖 39 中，可明顯觀察出流線在靠近元件角度 60° 之 Dulmage 混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，此處可清楚的看出，流線經過混合元件時所造成的擾動現象，流線不停的改變其行進方向，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。

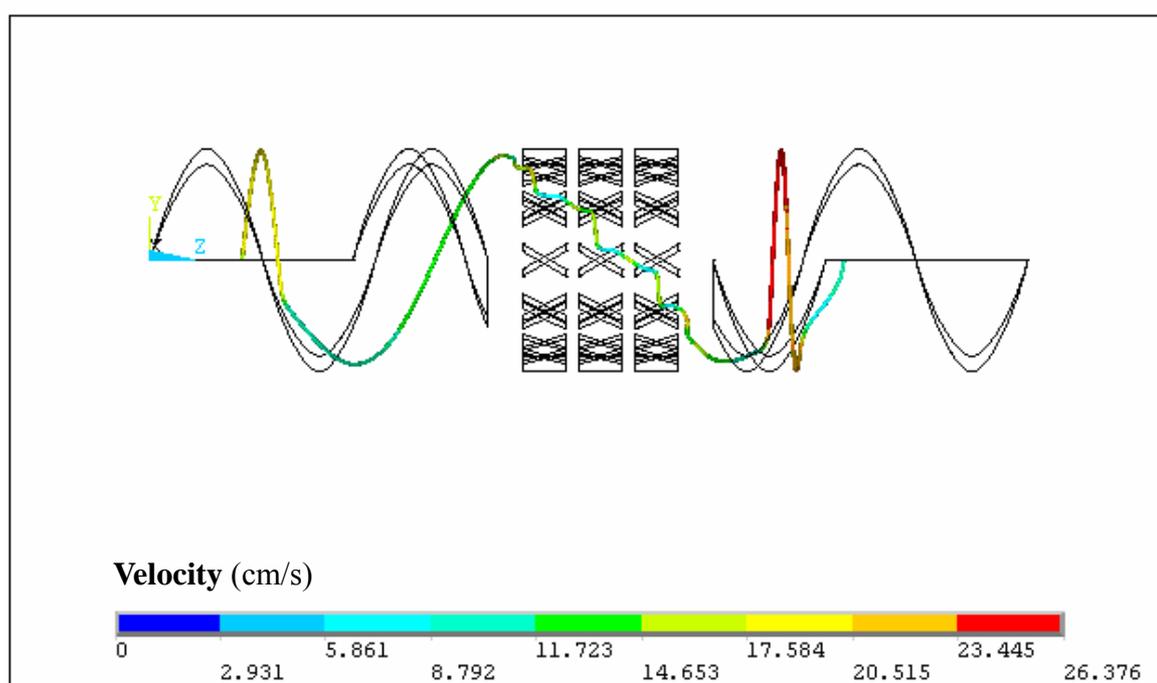


圖 39. 元件角度 60° 之 Dulmage 混合區其流道與流線示意圖

不同的混合元件形狀，在流場中會產生不同大小的死角或停滯區，由於停滯區通常在速度慢的區域出現，因此以速度最慢的區域大小來做判別。各混合區之軸向中心位置之流道橫切面示意圖，則分別如圖 40、圖 41 及圖 42 所示。由以上圖示可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有滯流現象產生。

由上述圖 40 至圖 42 中可比較，元件角度為 60° 之 Dulmage 混合區速度最慢的區域最少，元件角度為 30° 及 45° 之 Dulmage 混合區速度最慢的區域差不多，可知元件角度為 60° 之 Dulmage 混合區較不易造成滯留之現象，以及死角之產生，有助於混合效益。

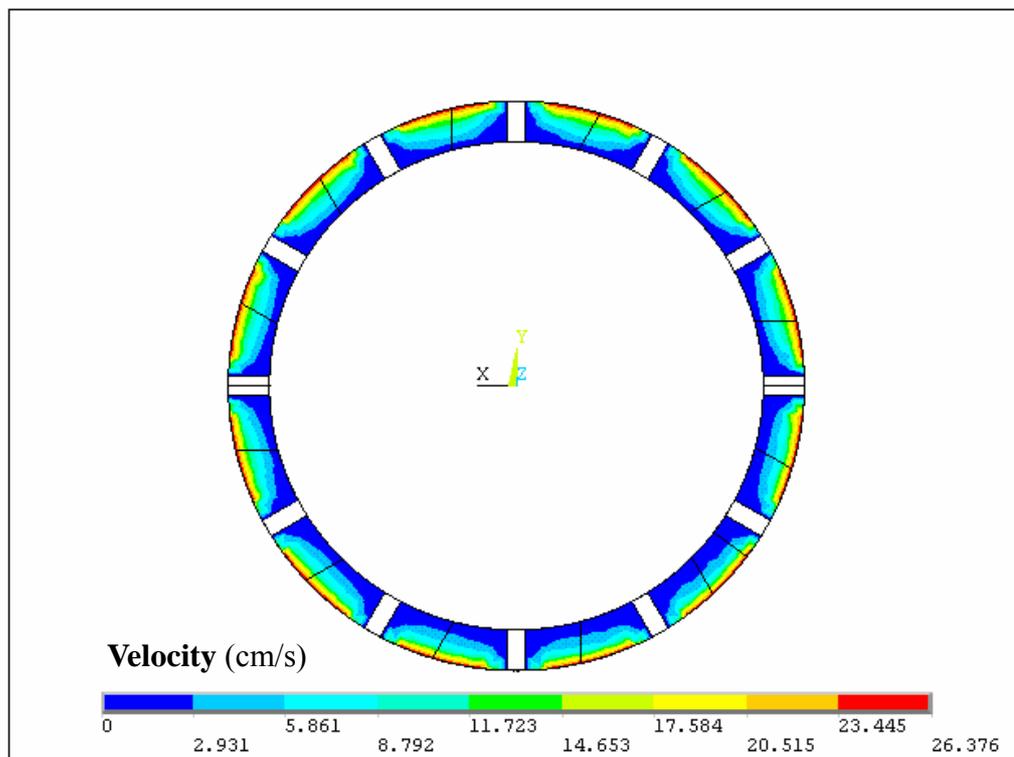


圖 40. 元件角度 30° 之 Dulmage 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

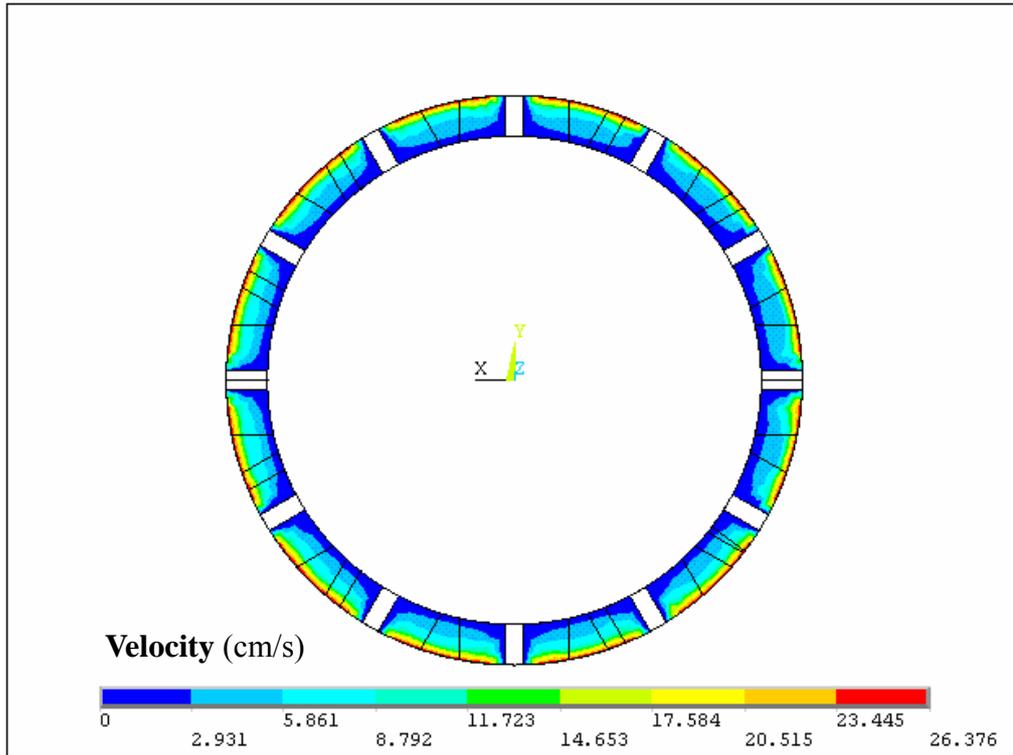


圖 41. 元件角度 45° 之 Dulmage 混合區其軸向中心位置之流道橫切
橫切面示意圖

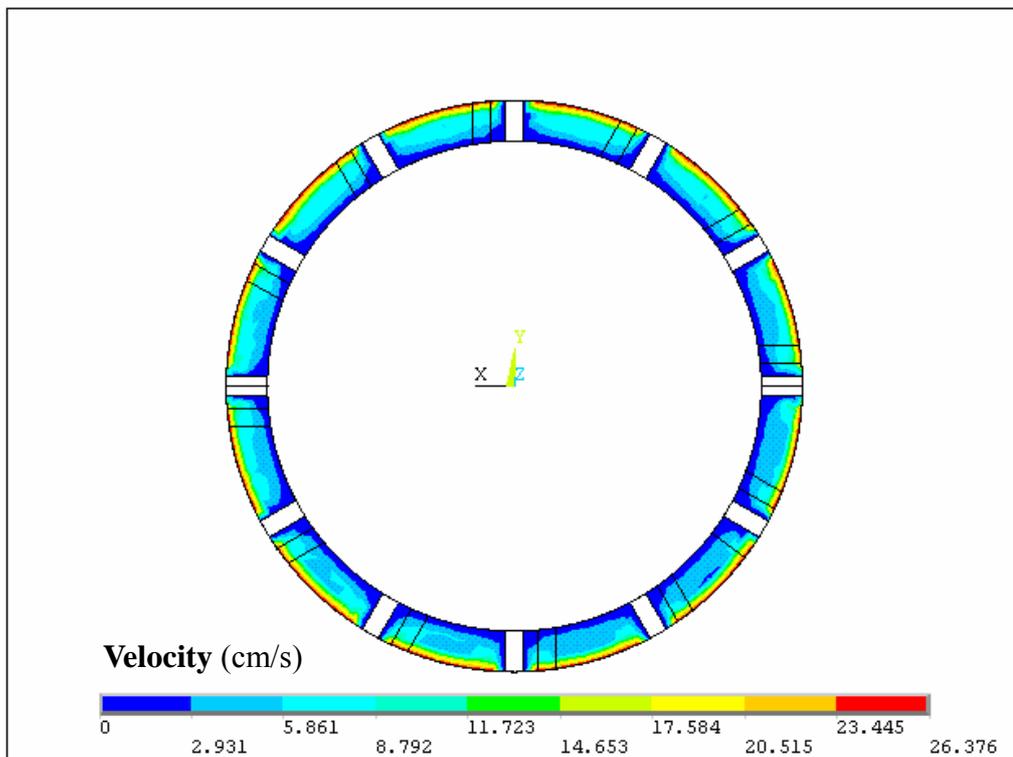


圖 42. 元件角度 60° 之 Dulmage 混合區其軸向中心位置之流道橫切
橫切面示意圖

在元件角度 30° 、元件角度 45° 及元件角度 60° 等三種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 43、圖 44、圖 45 所示。

由圖 43 至圖 45 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。

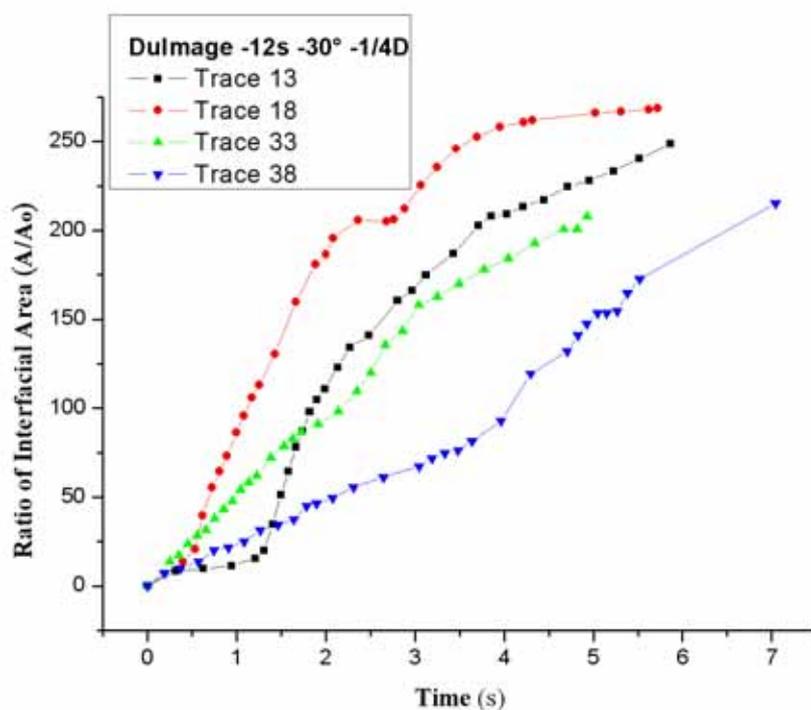


圖 43. 元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

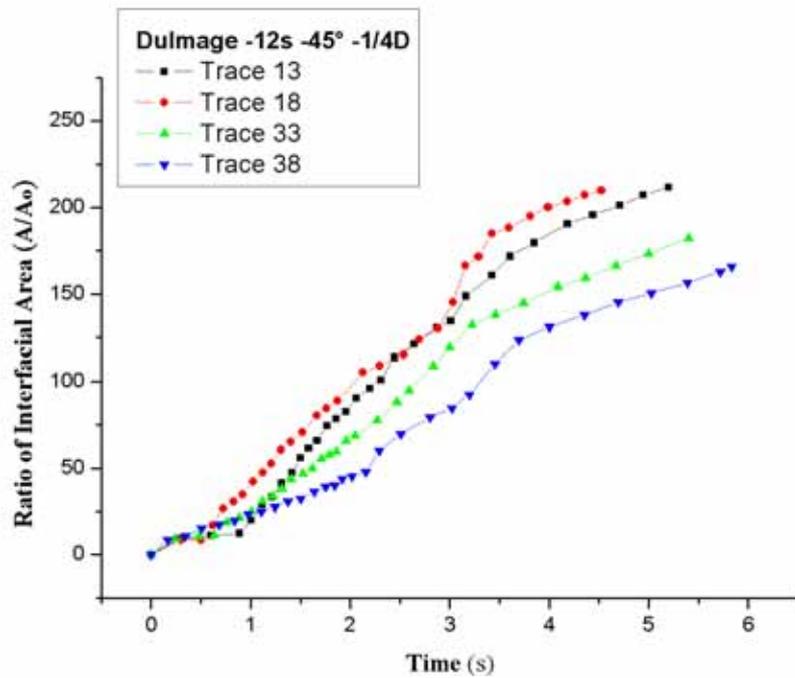


圖 44. 元件角度 45° 之 Dulmage 混合元件其混合區四質點流線
其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

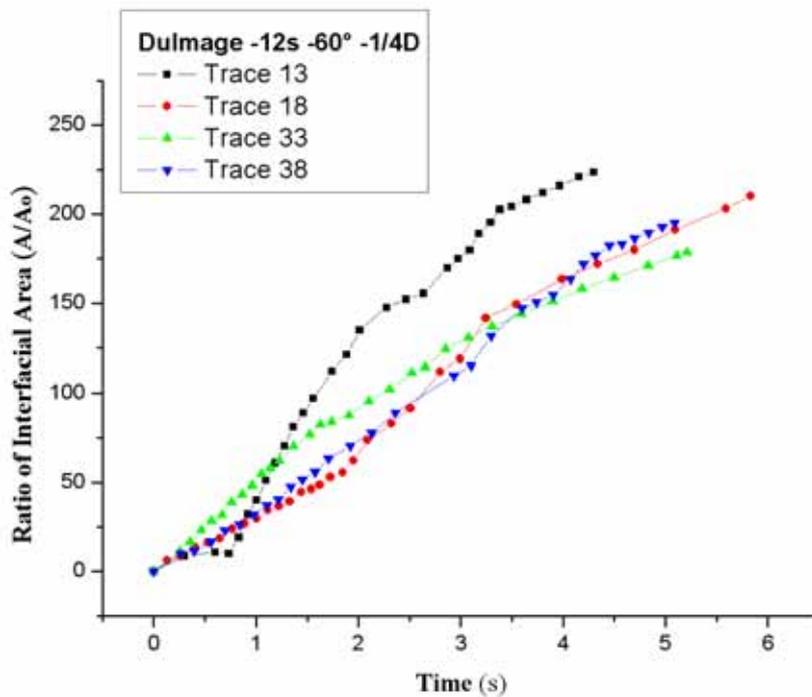


圖 45. 元件角度 60° 之 Dulmage 混合元件其混合區四質點流線
其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 230.82；元件角度 45° 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 204.00；元件角度 60° 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 215.47。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 10 所示)。表 10 中，可觀察出元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件消耗壓降最大，元件角度 60° 之 Dulmage 混合元件消耗壓降次之，元件角度 45° 之 Dulmage 混合元件消耗壓降最小。



表 10. 元件角度 30°、45° 及 60° Pineapple 各混合區其混合元件前後之壓降比較

Dulmage Mixing Section Angle of Elements	ΔP (MPa)
30°	0.24
45°	0.10
60°	0.13

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 11 所示。

表 11. 元件角度 30°、45° 及 60° 之 Dulmage 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Dulmage Mixing Section Angle of Elements	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
30°	0.77	0.85	0.92	0.93
45°	0.75	0.84	0.88	0.87
60°	0.82	0.86	0.89	0.90

表 11 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故空間上的質點顏色還未達到較好的分配，故其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件，在其混合區色彩均勻度值上升的幅度較其他兩者為大，造成較好的分配效果。

總合上述 3.4.1.1 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

元件角度 30° 、 45° 、 60° 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率之比較，如圖 46 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，元件角度 30° 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值最佳。

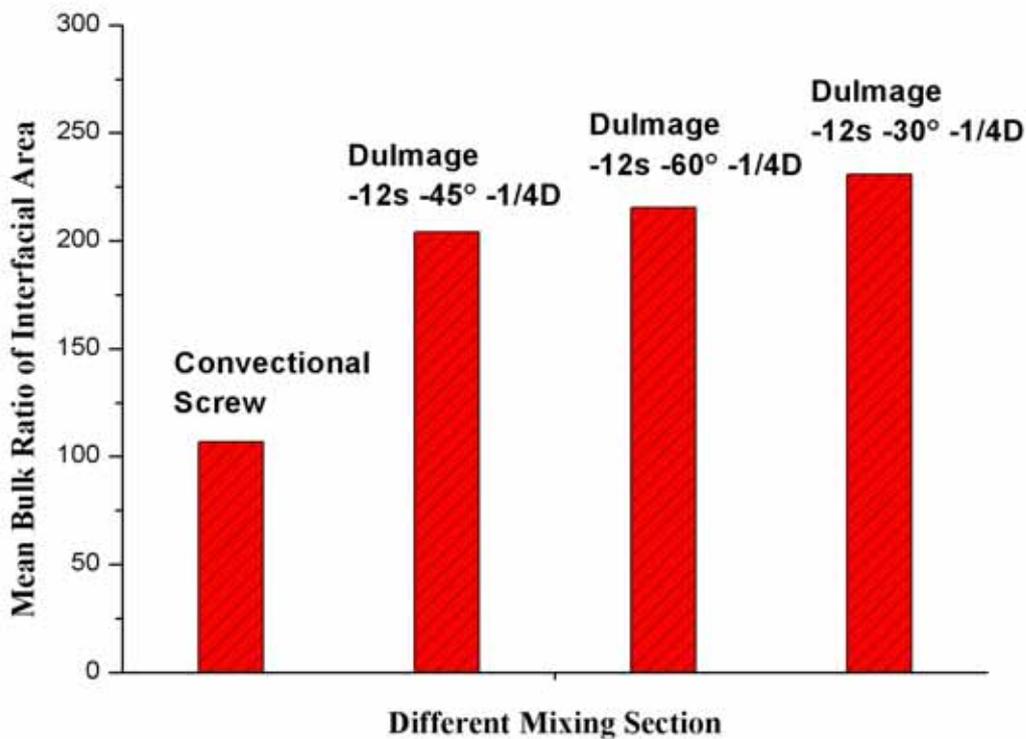


圖 46. 元件角度 30° 、 45° 、 60° 之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

元件角度 30° 、 45° 、 60° 之 Dulmage 混合元件其色彩均勻度比較，如

圖 47 所示。圖 47 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，元件角度 30° 之 Pineapple 混合元件其色彩均勻度值最佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

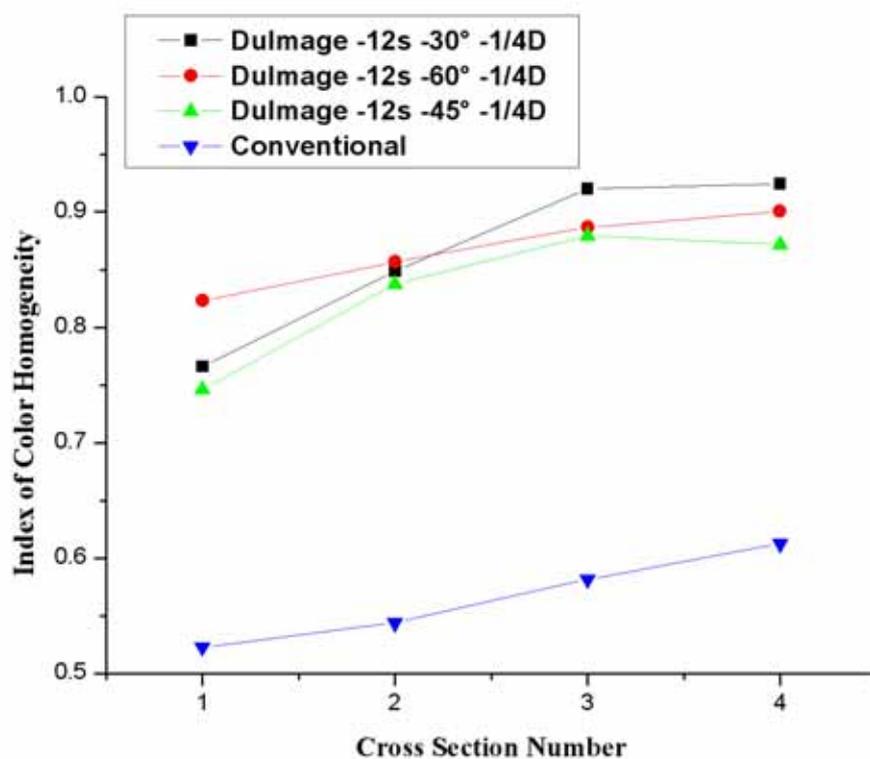


圖 47. 元件角度 30° 、 45° 、 60° 之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之元件角度 30° 之 Dulmage type 混合元件作為最佳設計條件。

3.4.1.2 改變元件單圈數目之分析比較

以 3.4.1.1 節所選擇之元件角度 30° Dulmage type 混合元件為最佳設計條件基準，其元件單圈數目為 12 支，本小節則再改變元件單圈數目（包括 9 支與 15 支），以進行分析比較。

在元件單圈數目 9 支與元件單圈數目 15 支等兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 48 及圖 49 所示。

由圖 48 至圖 49 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。圖 48 中，由於在橫截面混合元件的數量較少，流動的阻礙降低，流線很快就通過了混合元件，流線路徑明顯短了許多，也因此降低了混合效益。圖 49 中，增加橫截面安裝數量可提高流體被切割的機會，由於流體流動的空間減少，流體會以被擠壓的方式通過混合元件的空隙，進入到較寬廣的區域進行拉伸，可增加分配混合效果。

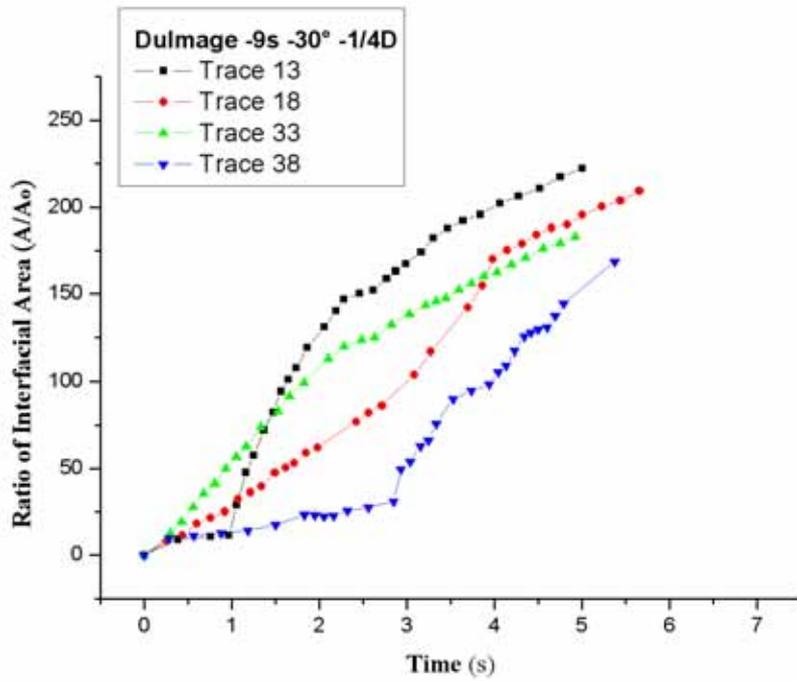


圖 48. 元件單圈數目安裝 9 支之 Dulmage 混合元件其混合區四質點其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

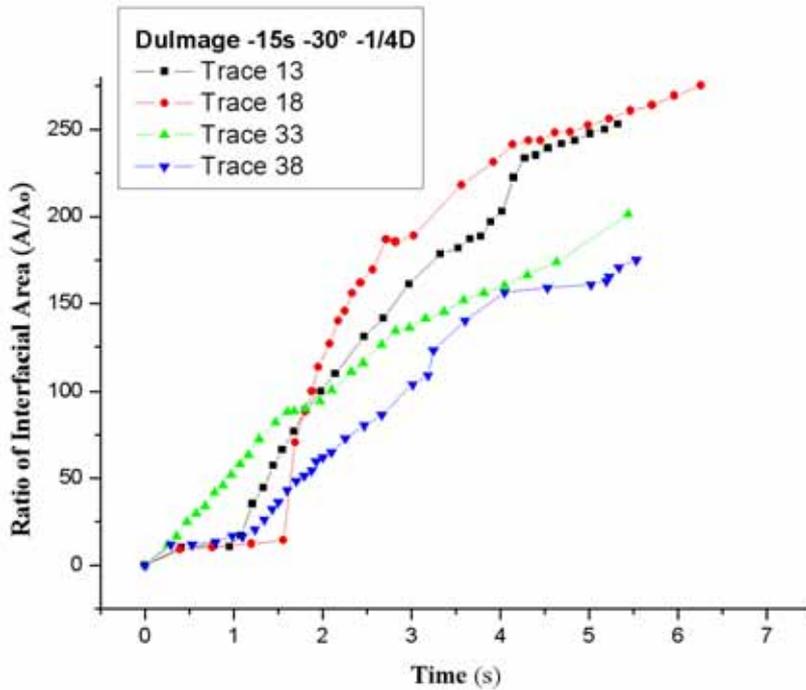


圖 49. 元件單圈數目安裝 15 支之 Dulmage 混合元件其混合區四質點其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，元件單圈數目安裝 9 支之 Dulmage 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 206.60；元件單圈數目安裝 12 支之 Dulmage 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 230.82；元件單圈數目安裝 15 支之 Dulmage 混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 233.01。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 12 所示)。表 12 中，可觀察出元件單圈數目安裝 15 支之 Dulmage 混合元件消耗壓降最大，元件單圈數目安裝 12 支之 Dulmage 混合元件消耗壓降次之，元件單圈數目安裝 9 支之 Dulmage 混合元件消耗壓降最小，可知元件單圈數目越多，其所消耗壓降越大。

表 12. 元件單圈數目安裝 9 支、12 支及 15 支之 Dulmage 各混合區其混合元件前後之壓降比較

Dulmage Mixing Section 元件單圈數目	ΔP (MPa)
9 Elements	0.17
12 Elements	0.24
15 Elements	0.50

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 13 所示。

表 13. 元件單圈數目安裝 9 支、12 支及 15 支之 Dulmage 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Dulmage Mixing Section 元件單圈數目	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
9 Elements	0.67	0.81	0.87	0.88
12 Elements	0.77	0.85	0.92	0.93
15 Elements	0.80	0.87	0.92	0.93

表 13 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故空間上的質點顏色還未達到較好的分配，故其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。元件單圈數目安裝 12 支及 15 支之 Dulmage 混合元件混合區色彩均勻度值差異不大，皆比元件單圈數目安裝 9 支高，故元件單圈數目安裝 12 支及 15 支之 Dulmage 混合元件可造成較好的分配效果。

總合上述 3.4.1.2 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

- ① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

元件單圈數目安裝 9 支、12 支、15 支之 Dulmage 混合元件之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 50 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，元件單圈數目安裝 15 支之 Pineapple 混合元件其總體界面面積增加率值較佳，安裝 12 支之 Dulmage 混合元件次之，安裝 9 支之 Dulmage type 混合元件為最差。

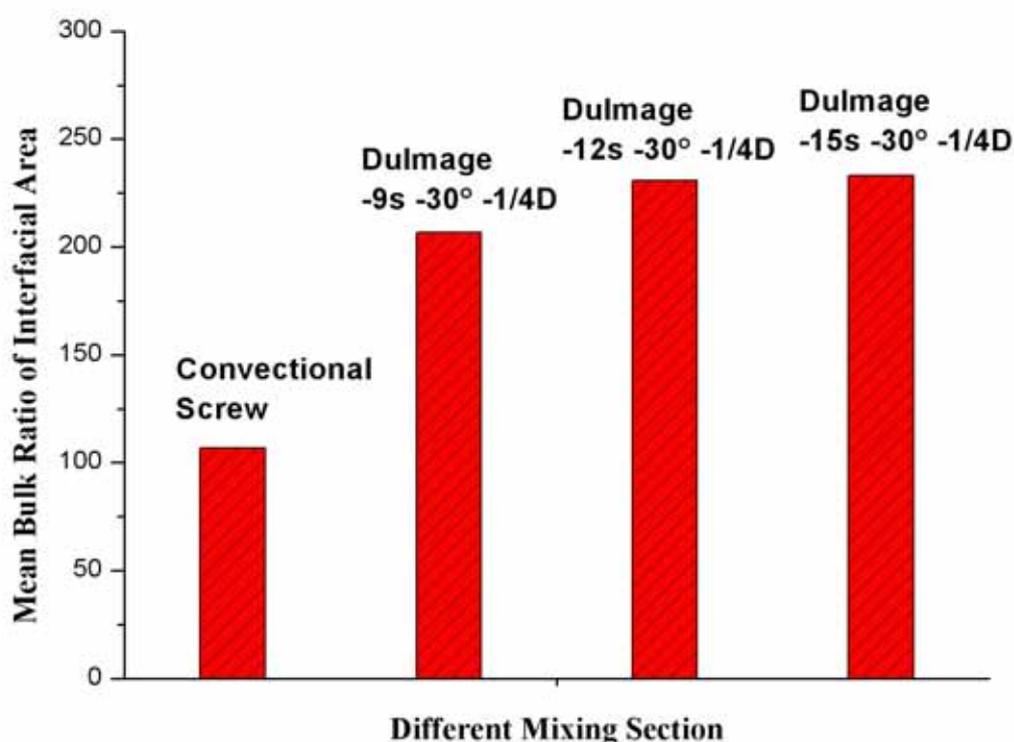


圖 50. 元件單圈數目安裝 9 支、12 支、15 支之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿其總體界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

元件單圈數目安裝 9 支、12 支、15 支之 Dulmage 混合元件其色彩均勻度比較，如圖 51 所示。圖 51 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標

之結果，發現元件單圈數目安裝 15 支與安裝 12 支之 Dulmage 混合元件其色彩均勻度值皆較安裝 9 支佳，但彼此間之值差異不大。

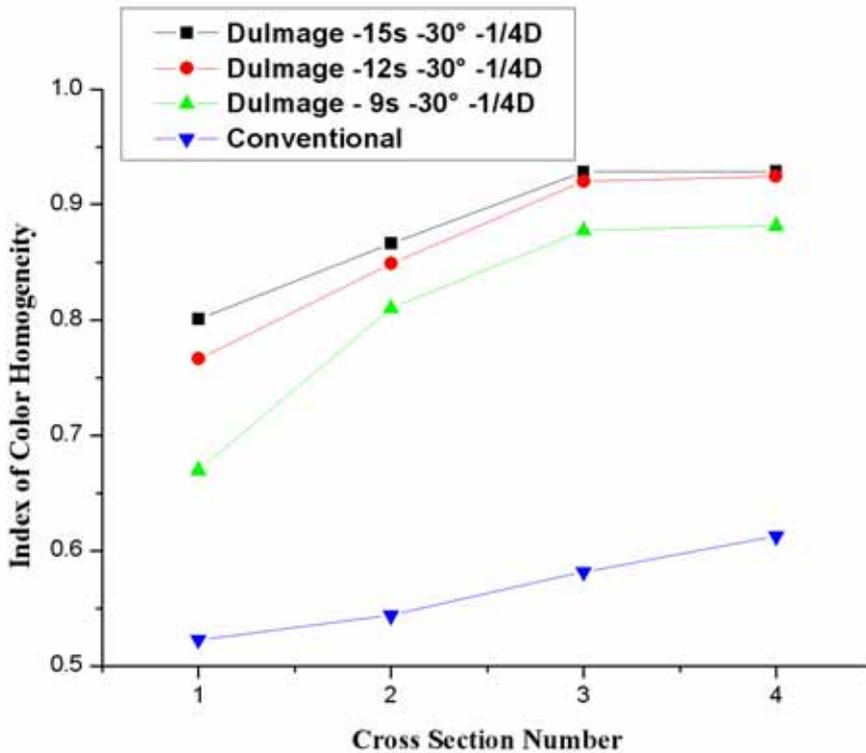


圖 51. 元件單圈數目安裝 9 支、12 支、15 支之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿各橫其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，發現元件單圈數目安裝 15 支與安裝 12 支之 Dulmage type 混合元件其總體平均界面面積增加率值與色彩均勻度值差異皆不大，但安裝 15 支所消耗壓降最大，且較易造成滯留區之增加，故為了節省成本，以經濟效益的考量，故選元件單圈數目安裝 12 支之 Dulmage type 混合元件作為最佳設計條件。

3.4.1.3 改變元件軸向間距之分析比較

以 3.4.1.2 節所選擇之元件單圈數目安裝 12 支之 Dulmage type 混合元件為最佳設計條件基準，其元件軸向間距為 $1/4D$ ，本小節則再改變元件軸向間距（包括 $1/3D$ 與 $1/5D$ 支），以進行分析比較。

在元件軸向間距 $1/3D$ 及元件軸向間距 $1/5D$ 兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 52 及圖 53 所示。

由圖 52 及圖 53 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率突然增加之現象，可知此時即為流線要開始進入混合元件區段，所造成界面面積增加率的快速上升，而在後半段的斜率趨勢減緩許多，可知流線此時已通過混合元件區域。圖 52 中，由於混合元件之軸向間距較小，導致流線流經元件時不易通過，容易一次越過兩支至三支元件間隙，使流線受到擾動的情形減少許多，降低了混合效果。圖 53 中，由於增加了混合元件之軸向間距，則會增加橫向流動的機會，提高流體受到切割與重新排列的機會，提升了混合效果。

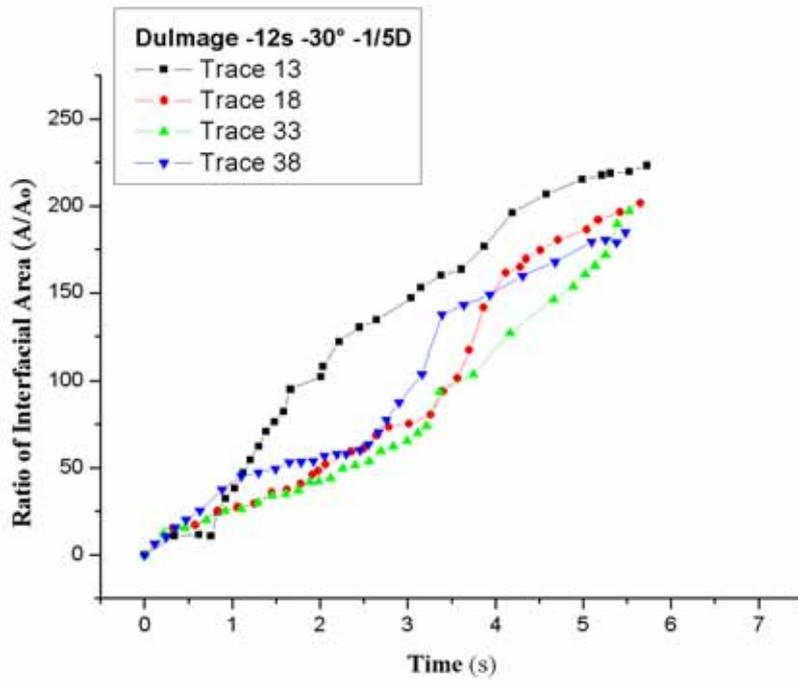


圖 52. 元件軸向間距 1/5D 之 Dulmage 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

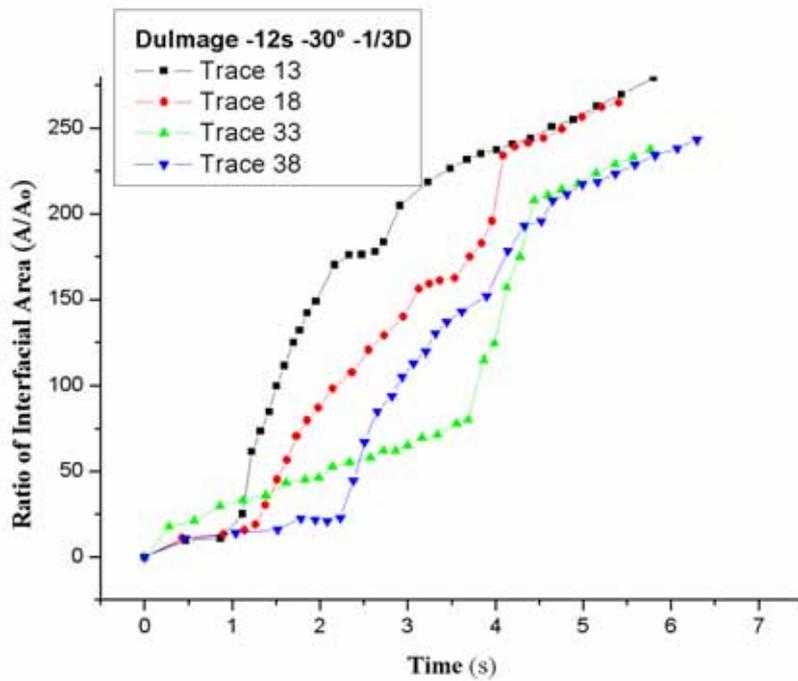


圖 53. 元件軸向間距 1/3D 之 Dulmage 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，元件軸向間距 1/5D 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 205.42；元件軸向間距 1/4D 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 230.82；元件軸向間距 1/3D 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面面積增加率值可達 255.05。

另外，為了比較各混合區產生之壓降，由分析出之混合區壓力分佈，計算混合元件區前後之壓力差，以判斷在混合元件區消耗了多少壓降(如表 14 所示)。表 14 中，可觀察出元件軸向間距 1/5D 之 Dulmage 混合元件消耗壓降最大，元件軸向間距 1/4D 之 Dulmage 混合元件消耗壓降次之，元件軸向間距 1/3D 之 Dulmage 混合元件消耗壓降最小，可知元件軸向間距越小，其所消耗壓降越大。

表 14. 元件軸向間距 1/5D、1/4D 及 1/3D 之 Dulmage 各混合區其混合元件前後之壓降比較

Dulmage Mixing Section Axial Distance	ΔP (MPa)
1/5D	0.26
1/4D	0.24
1/3D	0.21

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 15 所示。

表 15. 元件軸向間距 1/5D、1/4D 及 1/3D 之 Dulmage 混合元件其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Dulmage Mixing Section Axial Distance	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
1/5D	0.68	0.81	0.79	0.88
1/4D	0.77	0.85	0.92	0.93
1/3D	0.77	0.83	0.93	0.94

由表 15 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故空間上的質點顏色還未達到較好的分配，其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面沿 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。元件軸向間距 1/3D 之 Dulmage 混合元件，其混合區色彩均勻度值上升的幅度較其他兩者為大，造成較好的分配效果。

總合上述 3.4.1.3 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

元件軸向間距 1/3D、1/4D、1/5D 之 Dulmage 混合元件其總體平均界面

面積增加率之比較，如圖 54 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，元件軸向間距 $1/3D$ 之 Dulmage 混合元件其總體界面面積增加率值最佳。軸向間距太小會造成流體不經過元件產生分流切割，而直接由元件間隙通過，導致混合效果不佳及裂解現象，至於增加軸向間距，則能增加流體橫向流動以取得切割及再取向之機會，增加混合效益。

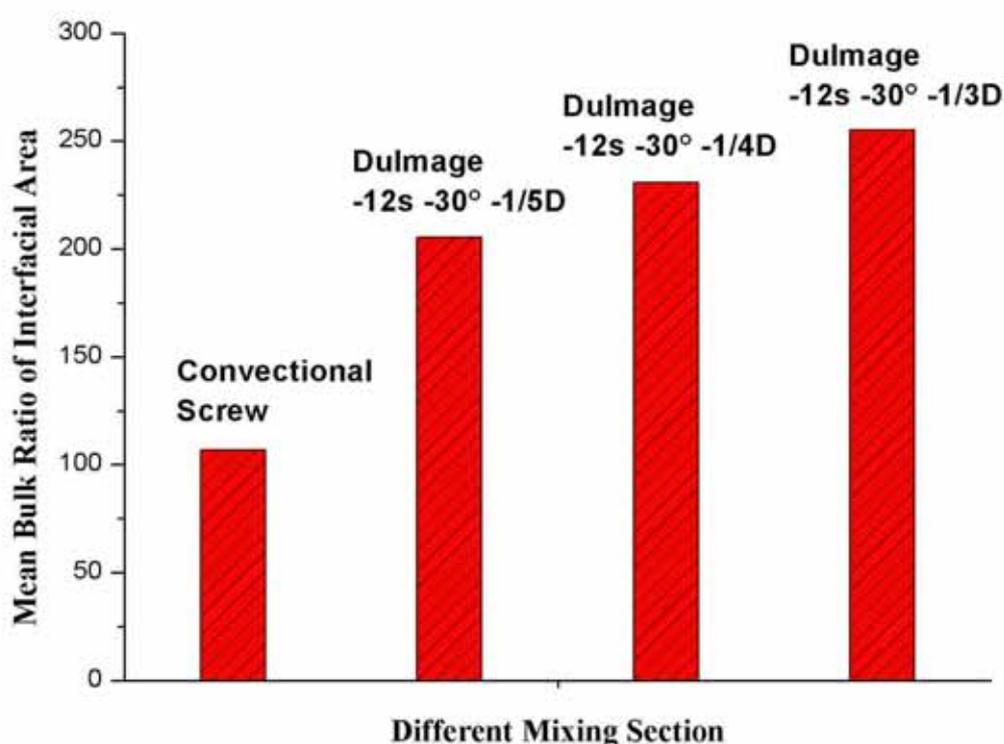


圖 54. 元件軸向間距 $1/3D$ 、 $1/4D$ 、 $1/5D$ 之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

元件軸向間距 $1/3D$ 、 $1/4D$ 、 $1/5D$ 之 Dulmage 混合元件其色彩均勻度比較，如圖 55 所示。圖 55 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結

果，元件軸向間距 $1/3D$ 之 Dulmage 混合元件其色彩均勻度值最佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

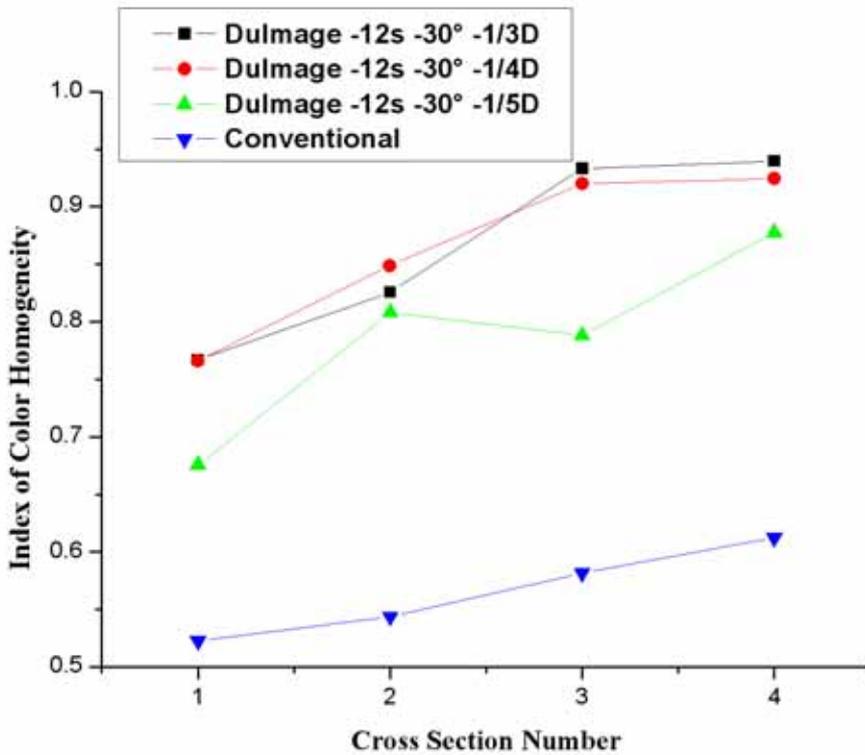


圖 55. 元件軸向間距 $1/3D$ 、 $1/4D$ 、 $1/5D$ 之 Dulmage 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之元件軸向間距 $1/3D$ 之 Dulmage type 混合元件作為其最佳化條件設計。

3.4.2 Slotted type 混合區之混合分析

Slotted type 混合元件所組成之混合區，其最重要的幾何設計參數為孔隙形狀、一牙孔隙數目，因此本研究將對這些不同設計參數進行其混合性能探討。

3.4.2.1 改變孔隙形狀之分析比較

首先，於螺桿計量區末端 4 牙之混合區中，增設楔型 Slotted type 混合元件，探討改變元件之孔隙形狀對混合性能之影響。並固定其他幾何條件如下：一牙孔隙數目為 6 孔之 Slotted type 混合元件。

本研究之平行口式以及梯形口式孔隙幾何形狀之尺寸設計，如圖 56 所示。

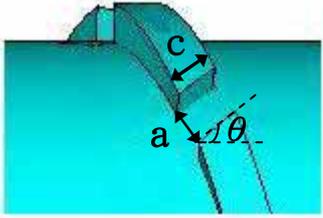
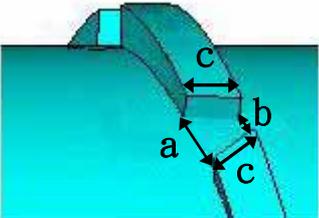
(a) Parallelism type	(b) Trapezoid type
	
<p>a : 0.7 cm</p> <p>c : 0.7 cm</p> <p>θ : 45°</p> <p>Height : 0.45 cm</p>	<p>a : 1.0 cm</p> <p>b : 0.4 cm</p> <p>c : 0.7 cm</p> <p>Height : 0.45 cm</p>

圖 56. Slotted 平行口式及梯形口式孔隙幾何形狀之尺寸設計圖

在平行口式以及梯形口式兩種混合區其流道入口截面之中心位置取一質點，觀察質點在流道內之流線分析示意圖，分別如圖 57 及圖 58 所示。由圖 57 及圖 58 可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有迴流現象產生。

圖 57 中，可明顯觀察出流線在靠近平行口式孔隙幾何形狀之混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，此圖可明顯看到流線在經過混合區時有四處轉折點，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。

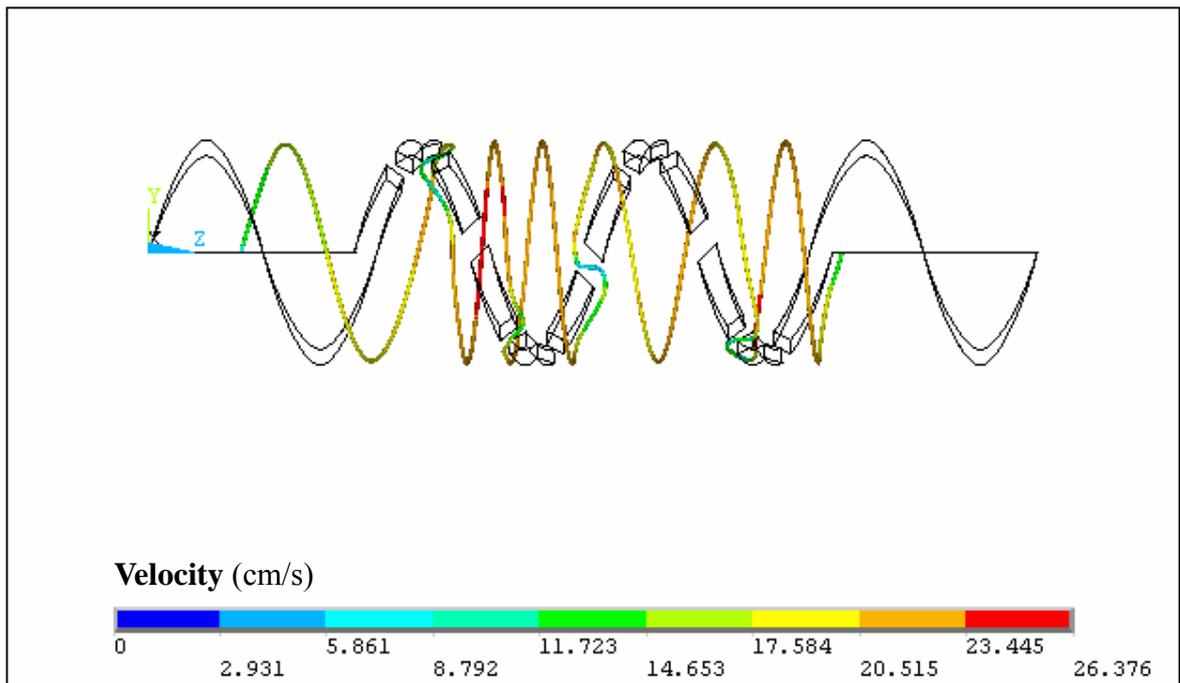


圖 57. Slotted 平行口式混合區之流道與流線示意圖

圖 58 中，可明顯觀察出流線在靠近梯形口式孔隙幾何形狀之混合元件週遭時，流動受到元件之阻礙而產生擾動因而繞過混合元件，此圖可明顯看到流線在經過混合區時有三處轉折點，造成流線不平滑的現象，此時速度梯度亦產生較大的變化。

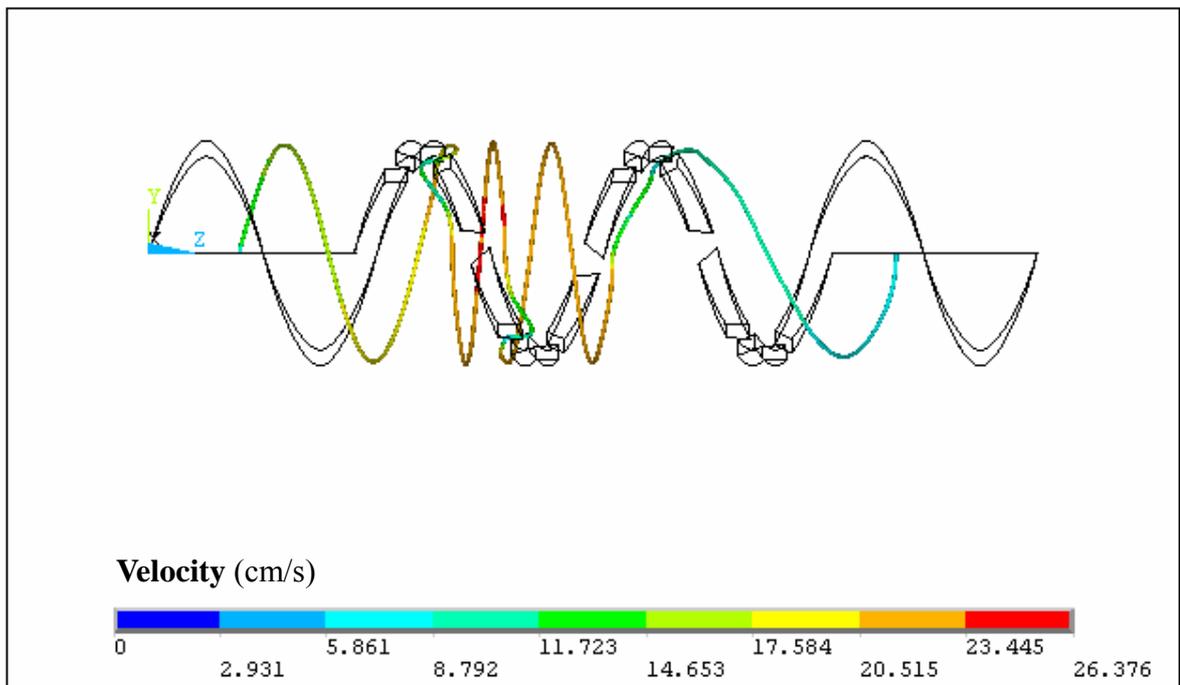


圖 58. Slotted 梯形口式混合區之流道與流線示意圖

不同的混合元件形狀，在流場中會產生不同大小的死角或停滯區，由於停滯區通常在速度慢的區域出現，因此以速度最慢的區域大小來做判別。各混合區之軸向中心位置之流道橫切面示意圖，則分別如圖 59 及圖 60 所示。由以上圖示可進一步去判斷各混合區中元件周圍是否有滯流現象產生。

由上述圖 59 至圖 60 中可比較，平行口式孔隙幾何形狀之 Slotted 混合區速度最慢的區域較大，梯形口式孔隙幾何形狀之 Slotted 混合區速度最慢的區域較小，可知平行口式孔隙幾何形狀之 Slotted 混合區較易造成滯留之現象，以及死角之產生，降低混合的程度。

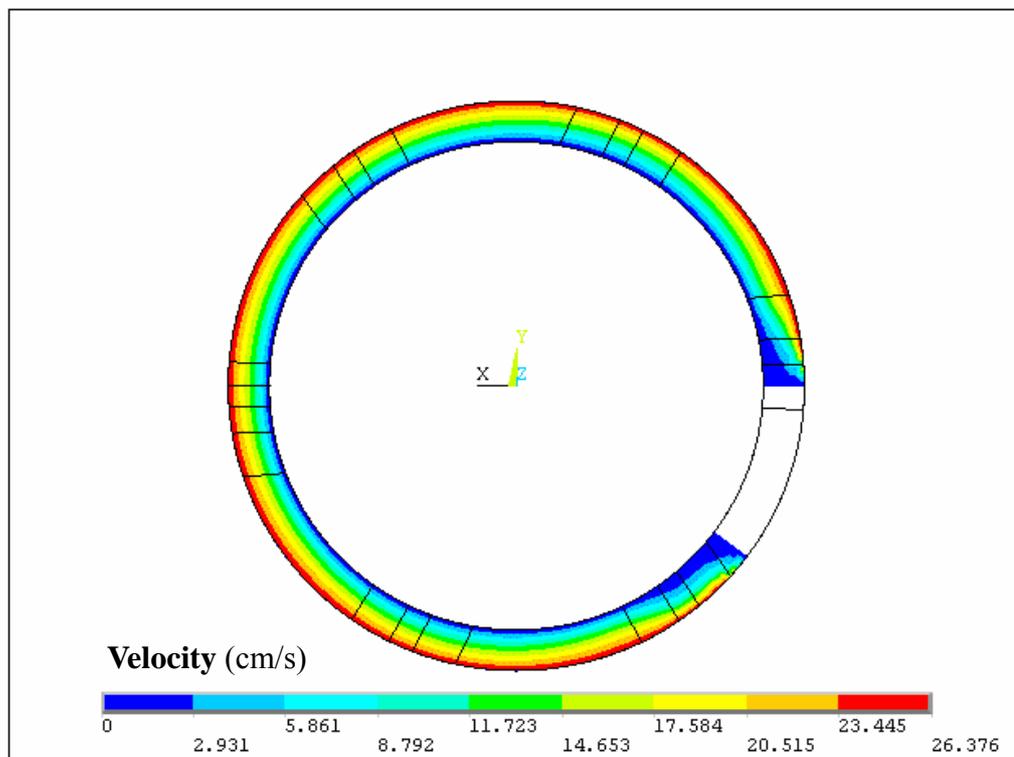


圖 59. 平行口式孔隙形狀之 Slotted 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

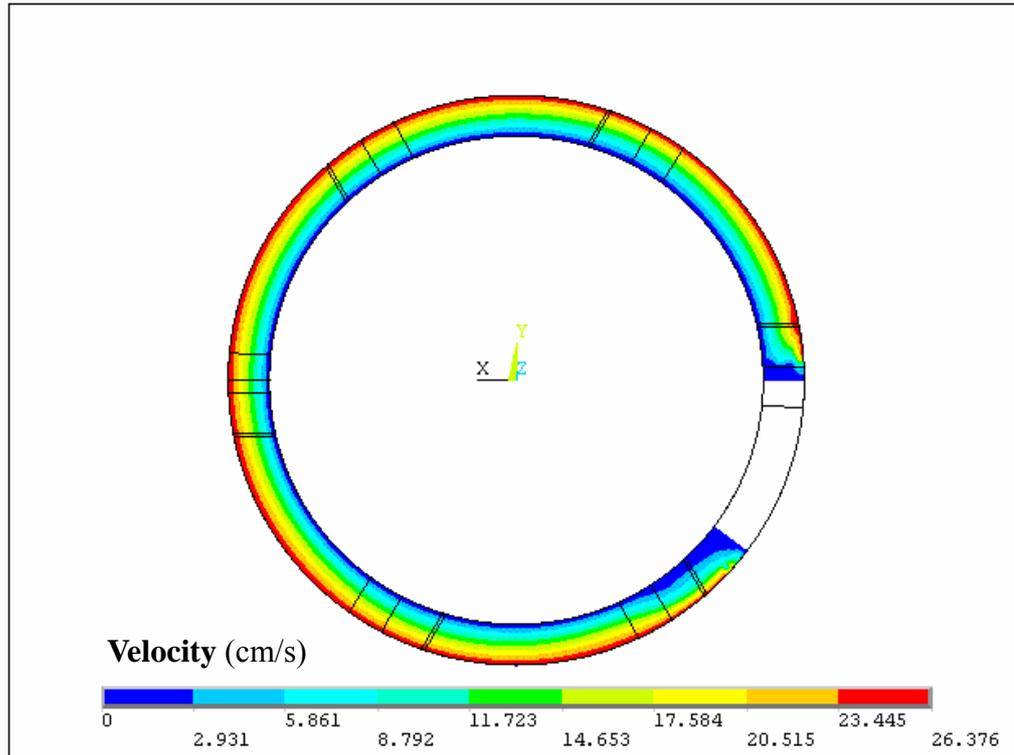


圖 60. 梯形口式孔隙形狀之 Slotted 混合區其軸向中心位置之流道橫切面示意圖

在平行口式以及梯形口式兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 61 及圖 62 所示。

由圖 61 至圖 62 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率為平緩上升之趨勢，較無突然增加之現象。

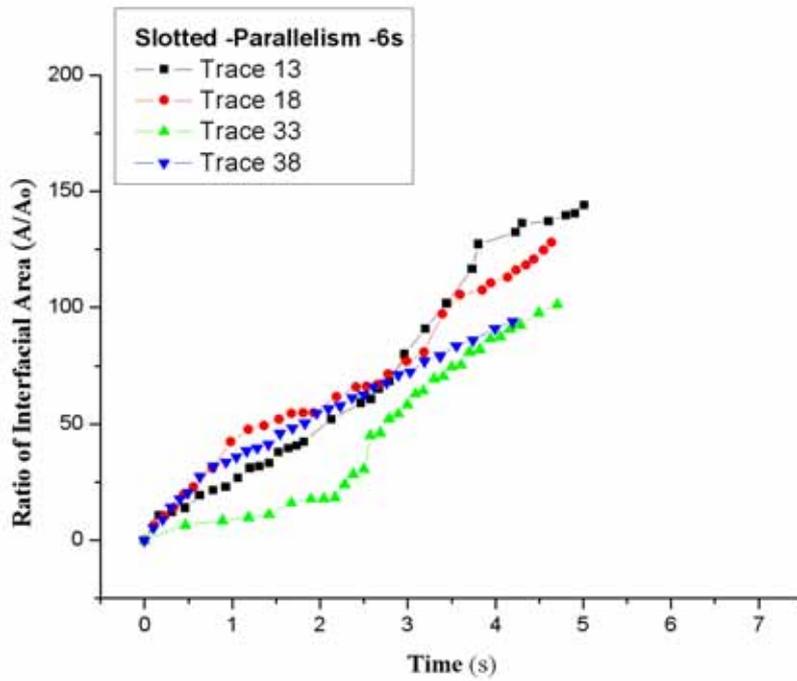


圖 61. 平行口式之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

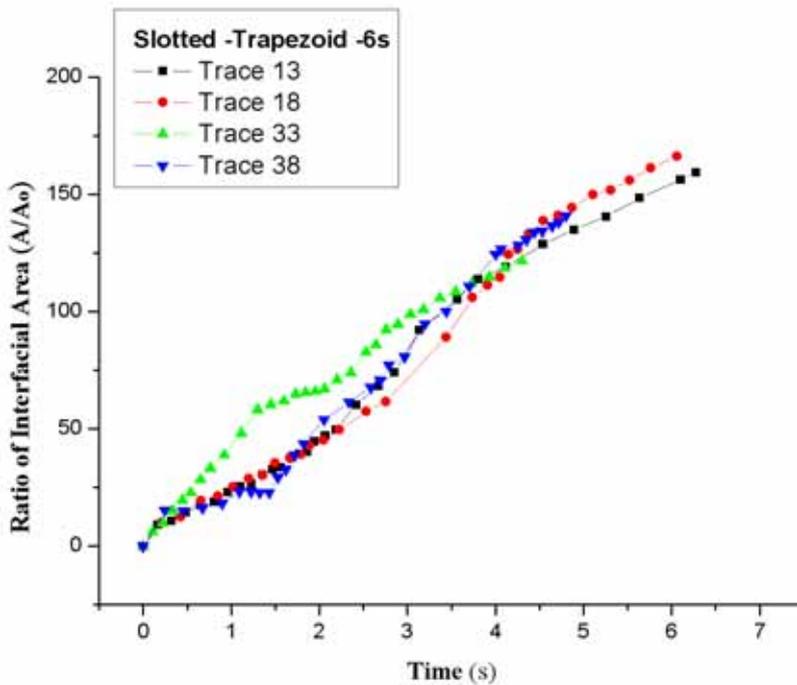


圖 62. 梯形口式之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，Slotted 平行口式混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 127.46；Slotted 梯形口式混合元件之總體平均界面面積增加率值可達 141.23。

另外，為了比較各混合區在流場中之壓力變化，分別計算各混合區入口至出口截面之壓力增加值(如表 16 所示)。表 16 中，可觀察出梯形口式孔隙形狀之 Slotted 混合區壓力增加值較大，平行口式孔隙形狀之 Slotted 混合區壓力增加值較小。

表 16. Slotted 孔隙形狀為平行口式及梯形口式各混合區入口截面至至出口截面之壓力增加值比較

Slotted Mixing Section	ΔP (MPa)
Parallelism type	0.26
Trapezoid type	0.50

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 17 所示。

表 17. Slotted 孔隙形狀為平行口式及梯形口式其混合區各橫切面之色彩均勻度值

Slotted Mixing Section	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
Parallelism type	0.57	0.60	0.65	0.69
Trapezoid type	0.59	0.68	0.71	0.72

由表 17 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故區域上的質點顏色還未達到較好的分配，其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面沿 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。梯形口式孔隙形狀有較好的色彩均勻度值，但與 3.4.1 做比較，其色彩均勻度值仍偏低，可知混合元件在此四個切面區域上藍、紅質點的配置，還未達到較好的均勻分配現象。

總合上述 3.4.2.1 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

Slotted 孔隙形狀為平行口式及梯形口式之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 63 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，以梯形口式孔隙形狀其總體平均界面面積增加率值最佳，這是由於孔隙突然縮小，造成流體以被擠壓的方式通過元件之孔隙，造成流體斷面積變小增加流速，亦造成流體的拉伸現象產生延伸流，增加分配混合之效果。

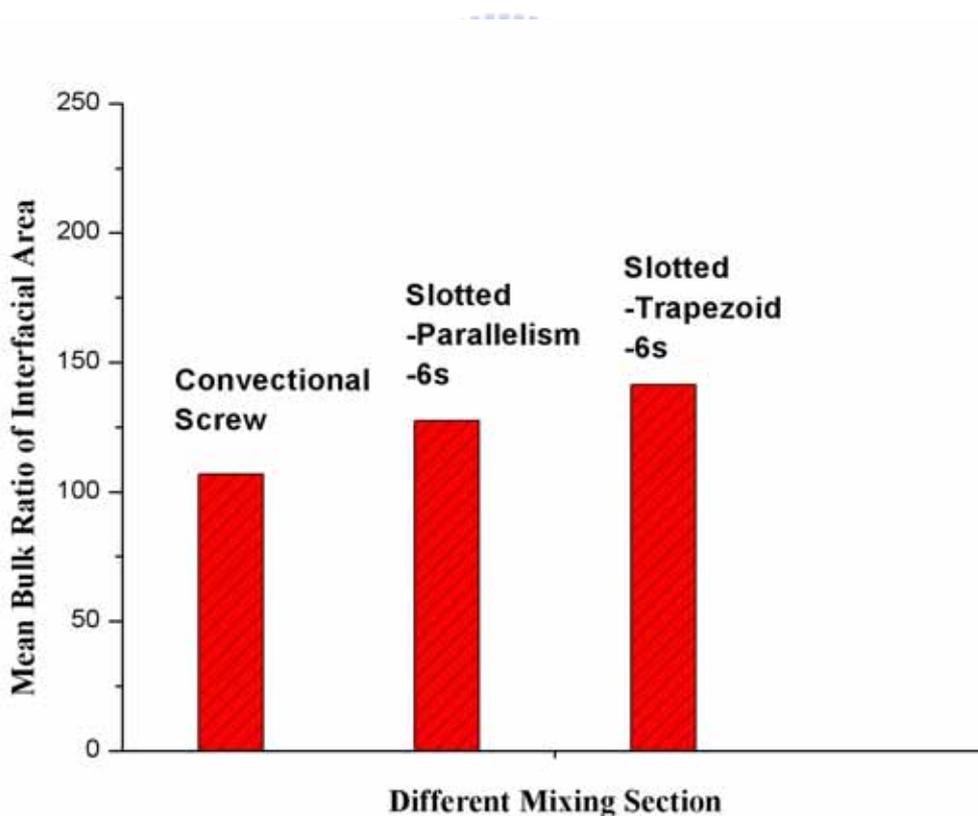


圖 63. 孔隙形狀為平行口式及梯形口式之 Slotted 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

孔隙形狀為平行口式及梯形口式之 Slotted 混合區其色彩均勻度比較，如圖 64 所示。圖 64 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，發現梯形口式孔隙形狀其色彩均勻度值較梯形口式孔隙形狀佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

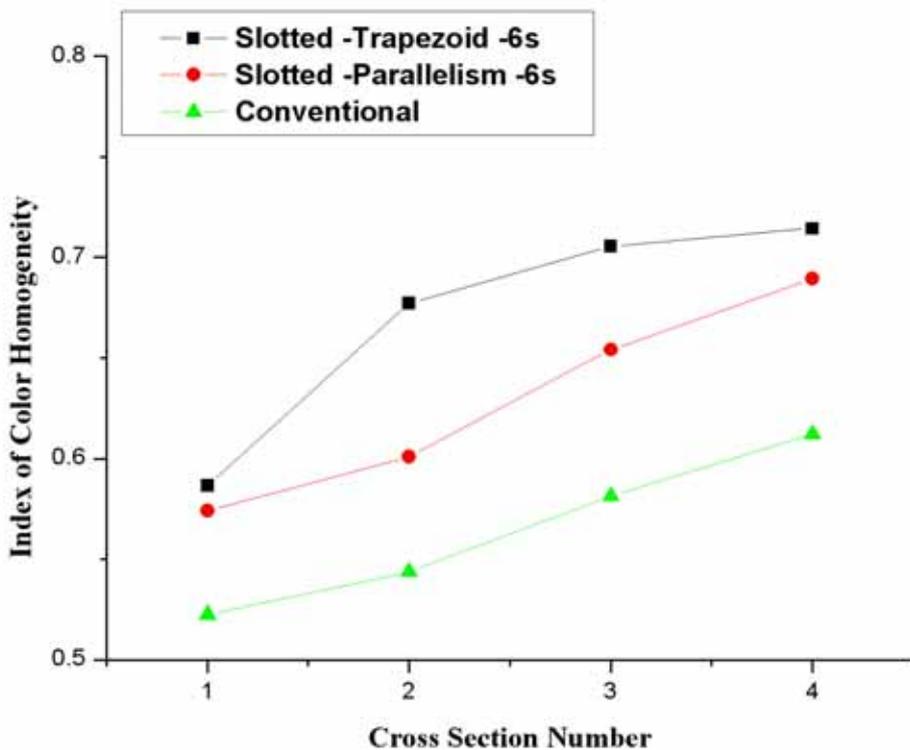


圖 64. 孔隙形狀為平行口式及梯形口式之 Slotted 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之梯形口式之 Slotted 混合元件作為其最佳化條件設計。

3.4.2.2 改變一牙距孔隙數目之分析比較

以 3.4.2.1 節所選擇之 Slotted 梯形口式混合元件為最佳孔隙幾何形狀基準，其一牙距孔隙數目為 6 孔，並固定其他幾何條件如下：孔隙導角區起始寬度為 1cm 之 Slotted type 混合元件。本小節則再改變一牙距孔隙數目(包括 4 孔與 8 孔)，以進行分析比較。

在一牙距孔隙數目 4 孔及一牙距孔隙數目 8 孔等兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 65 及圖 66 所示。

由圖 65 及圖 66 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率為平緩上升之趨勢，較無突然增加之現象。



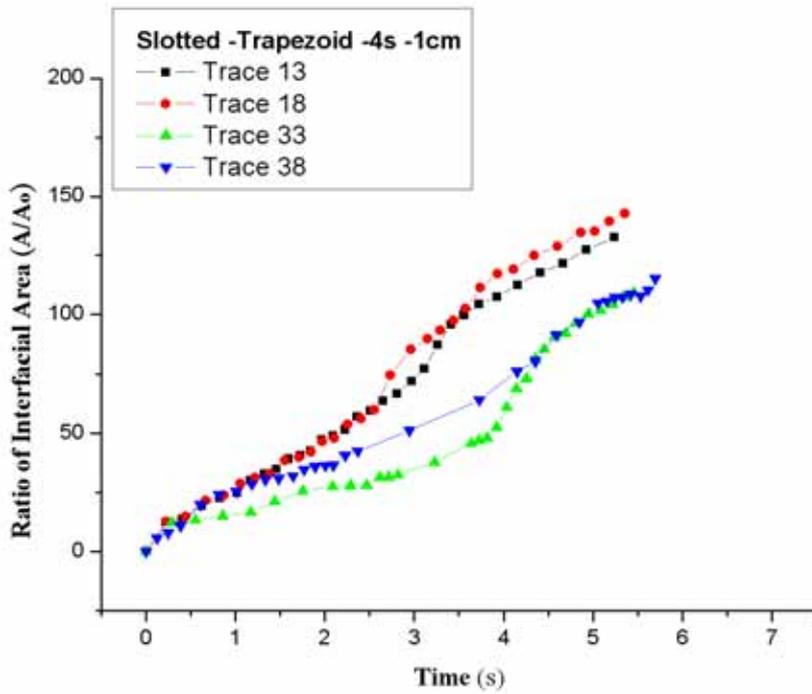


圖 65. 一牙距孔隙數目 4 孔之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

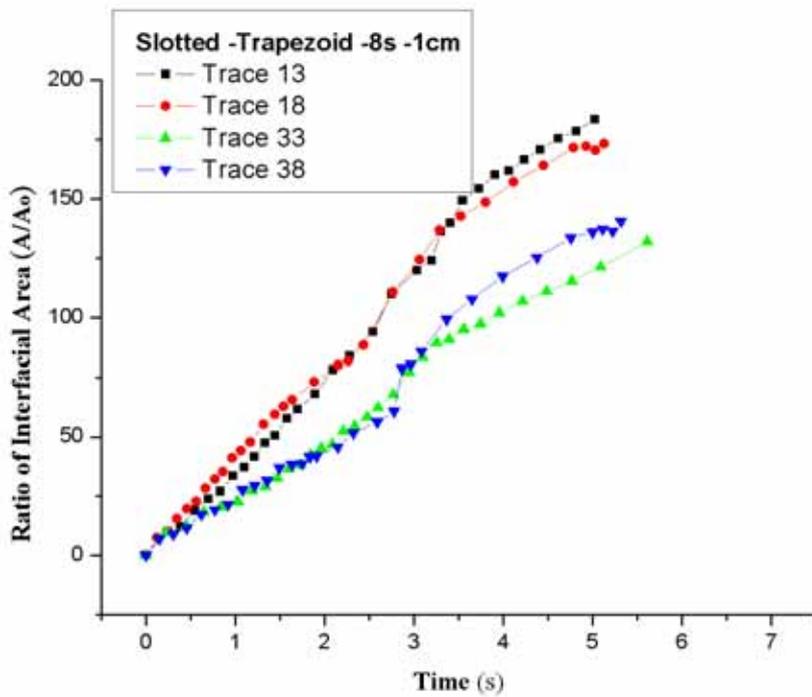


圖 66. 一牙距孔隙數目 8 孔之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，一牙距孔隙數目為 4 孔之總體平均界面面積增加率值可達 123.24；一牙距孔隙數目為 6 孔之總體平均界面面積增加率值可達 141.23；一牙距孔隙數目為 8 孔之總體平均界面面積增加率值可達 157.94。

為了比較各混合區在流場中之壓力變化，分別計算各混合區入口至出口截面之壓力增加值，如表 18 所示。可觀察出元件一牙距孔隙數目為 4 孔之 Slotted 混合區壓力增加值較大，一牙距孔隙數目為 6 孔之 Slotted 混合區壓力增加值次之，一牙距孔隙數目為 8 孔之 Slotted 混合區壓力增加值較小。有此現象可推測一牙距孔隙數目越多，越能減低主螺牙對流體推擠之阻力。

表 18. 一牙距孔隙數目為 4 孔、6 孔及 8 孔之 Slotted 各混合區入口截面各至出口截面之壓力增加值比較

Slotted Mixing Section 一牙距孔隙數目	ΔP (MPa)
4 孔	1.05
6 孔	0.50
8 孔	0.20

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 19 所示。

表 19. 一牙距孔隙數目為 4 孔、6 孔及 8 孔之 Slotted 混合區各橫切面之色彩均勻度值

Slotted Mixing Section 一牙距孔隙數目	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
4 孔	0.54	0.65	0.67	0.68
6 孔	0.59	0.68	0.71	0.72
8 孔	0.55	0.66	0.71	0.73

由表 19 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故空間上的質點顏色還未達到較好的分配，故其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。一牙距孔隙數目為 8 孔在其混合區各橫切面之色彩均勻度值為最高，可知混合元件在此四個切面區域上藍、紅質點的配置，比起其他兩者有較好的均勻分配現象。

總合上述 3.4.2.2 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

一牙距孔隙數目為 4 孔、6 孔及 8 孔之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 67 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，以一牙距孔隙數目為 8 孔其總體平均界面面積增加率值最佳，因為較多的孔隙數目可讓流體產生分流的情形增加，提高流體被切割的機會，增加分配混合效率。

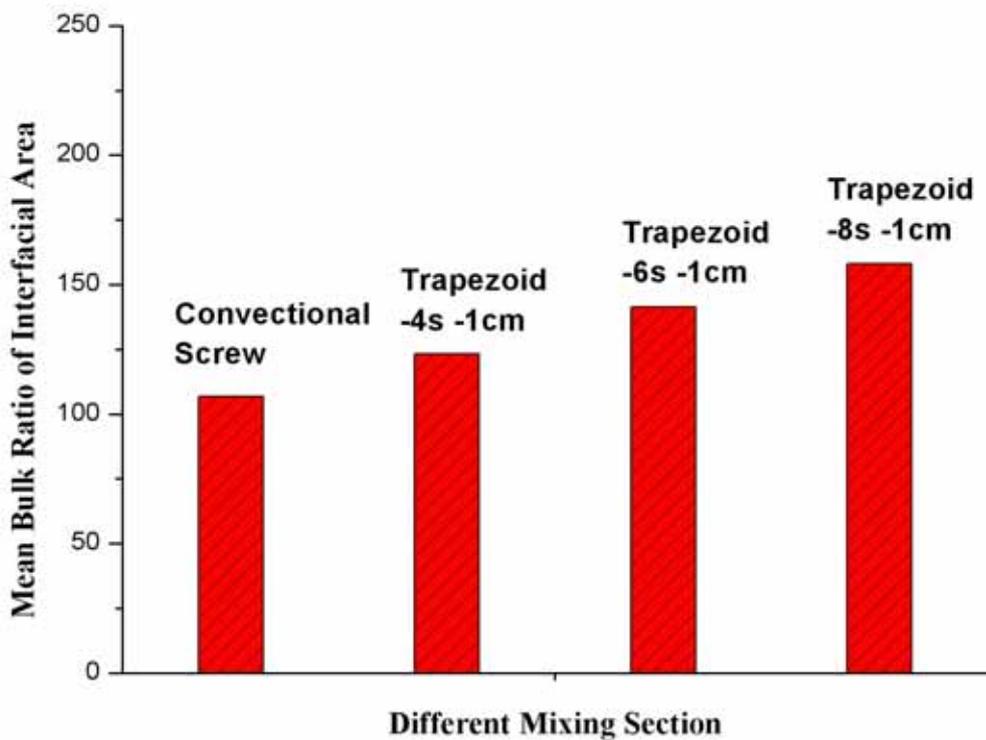


圖 67. 一牙距孔隙數目為 4 孔、6 孔、8 孔之 Slotted 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

一牙距孔隙數目為 4 孔、6 孔、8 孔之 Slotted 混合區其色彩均勻度比較，如圖 68 所示。圖 68 中，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，發現一牙距孔隙數目為 8 孔之 Slotted 混合區其色彩均勻度值較佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

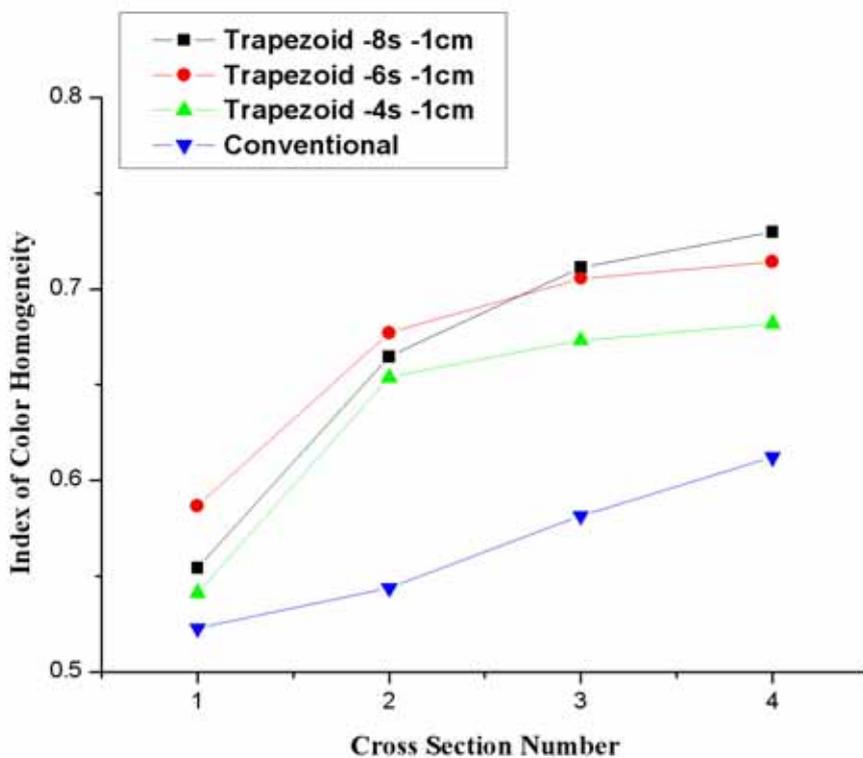


圖 68. 一牙距孔隙數目 4 孔、6 孔及 8 孔之 Slotted 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之一牙距孔隙數目為 8 孔之 Slotted 混合元件作為其最佳化條件設計。

3.4.2.3 改變孔隙導角區起始寬度之分析比較

以 3.4.2.2 節所選擇之一牙距孔隙數目為 8 孔之 Slotted 混合元件為基準，其孔隙導角區起始寬度為 1cm，本小節則再改變孔隙導角區起始寬度（包括 0.7cm 與 1.3cm），以進行分析比較。

在孔隙導角區起始寬度為 0.7cm 及孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 等兩種混合區入口截面處平均選取四個質點，觀察各質點流線之瞬時界面面積增加率對流動時間之變化，分別如圖 69 及圖 70 所示。

由圖 69 及圖 70 中可看出，在某一區段界面面積增加率對時間作圖之斜率為平緩上升之趨勢，較無突然增加之現象。



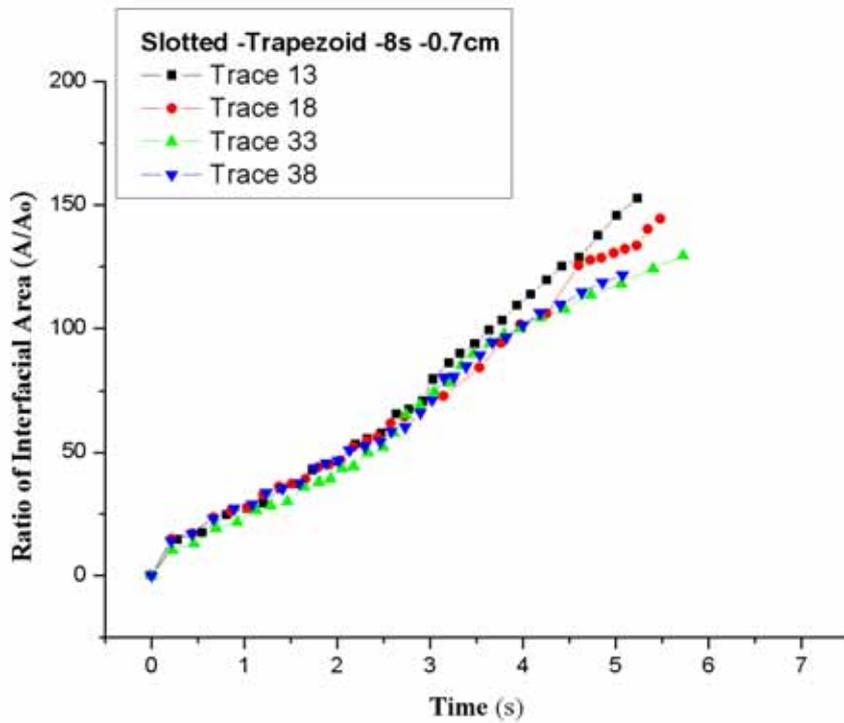


圖 69. 孔隙導角區起始寬度為 0.7cm 之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

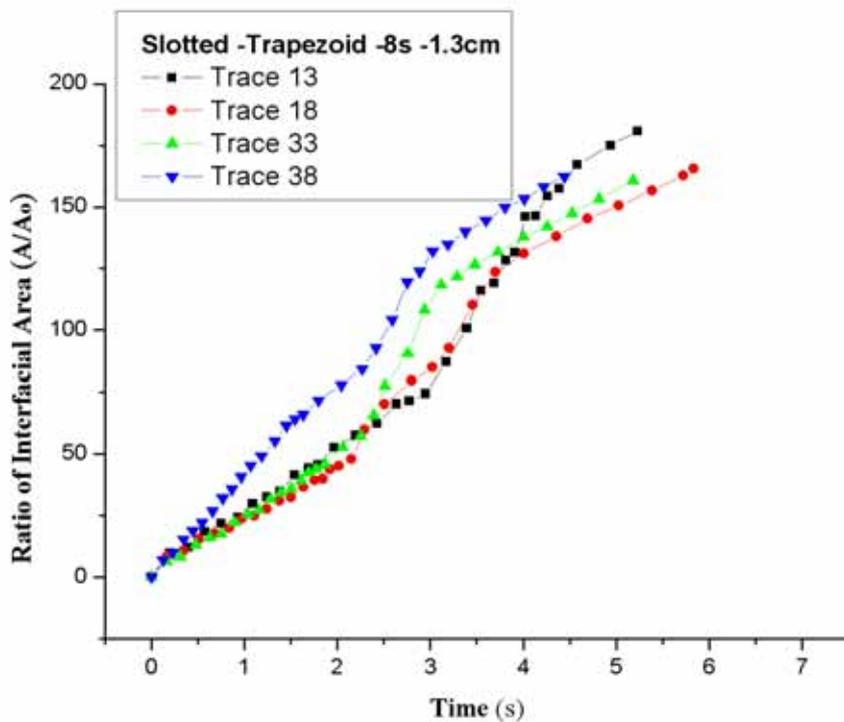


圖 70. 孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 之 Slotted 混合元件其混合區四質點流線其瞬時界面面積增加率隨流動時間之變化

最後，可根據前述 2.2.2 節所述之方法，分別計算得到各混合區其 50 條質點流線之總體平均界面面積增加率值。其中，孔隙導角區起始寬度為 0.7cm 之總體平均界面面積增加率值可達 145.83；孔隙導角區起始寬度為 1cm 之總體平均界面面積增加率值可達 157.94；孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 之總體平均界面面積增加率值可達 169.92。

為了比較各混合區在流場中之壓力變化，分別計算各混合區入口至出口截面之壓力增加值，如表 20 所示。可觀察出孔隙導角區起始寬度為 0.7cm 之 Slotted 混合區壓力增加值較大，孔隙導角區起始寬度為 1cm 之 Slotted 混合區壓力增加值次之，孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 之 Slotted 混合區壓力增加值較小。



表 20. 孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之 Slotted 各混合區入口截面各至出口截面之壓力增加值比較

Slotted Mixing Section 孔隙導角區起始寬度	ΔP (MPa)
0.7cm	0.64
1cm	0.5
1.3cm	0.37

另外，再根據前述 2.2.3 節所述之方法，可計算得到各混合區其四個橫切面之色彩均勻度變化，如表 21 所示。

表 21. 孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之 Slotted 混合區各橫切面之色彩均勻度值

Slotted Mixing Section 孔隙導角區起始寬度	Color Homogeneity			
	Cross Section 1	Cross Section 2	Cross Section 3	Cross Section 4
0.7cm	0.60	0.69	0.71	0.72
1cm	0.55	0.66	0.71	0.73
1.3cm	0.61	0.67	0.75	0.76

由表 21 中，可看出在第一個切面，由於此時流線還未通過混合元件，故空間上的質點顏色還未達到較好的分配，故其色彩均勻度的值偏低，隨著四個切面 z 方向的增加，有逐漸上升的趨勢。孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 在其混合區各橫切面之色彩均勻度值為最高，可知混合元件在此四個切面區域上藍、紅質點的配置，比起其他兩者有較好的均勻分配現象。

總合上述 3.4.2.3 節所述，可將本小節之分析結果作綜合比較如下：

① 以總體平均界面面積增加率為混合指標之混合分析：

孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之總體平均界面面積增加率之比較，如圖 71 所示。由總體平均界面面積增加率值的結果看來，以孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 其總體平均界面面積增加率值最佳，孔隙導角區起始寬度為 1cm 其總體平均界面面積增加率值次之，孔隙導角區起始寬度為 0.7cm 其總體平均界面面積增加率值最差。

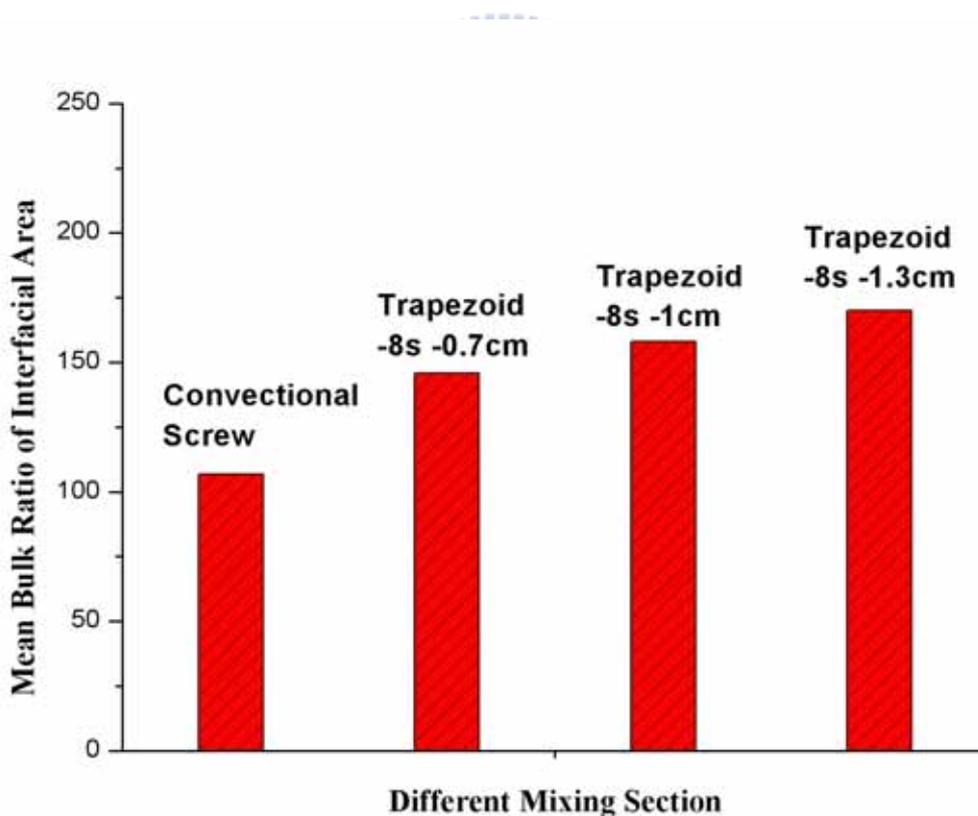


圖 71. 孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之 Slotted 混合區與傳統式螺桿其總體平均界面面積增加率比較圖

② 以色彩均勻度為混合指標之混合分析：

孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之 Slotted 混合區其色彩均勻度比較，如圖 72 所示。圖 72，可清楚的比較以色彩均勻度為混合指標之結果，發現孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 之 Slotted 混合區其色彩均勻度值較佳，與以界面面積增加率為混合指標之混合分析結果相符合。

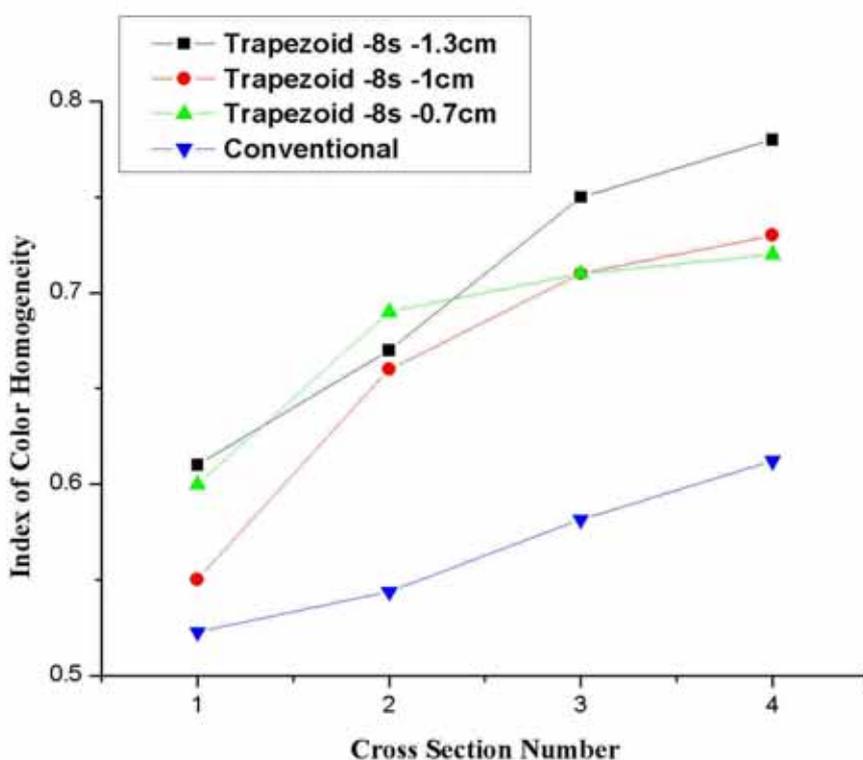


圖 72. 孔隙導角區起始寬度為 0.7cm、1cm 及 1.3cm 之 Slotted 混合區與傳統式螺桿各橫切面其色彩均勻度變化比較

由以上兩種混合指標之混合分析結果，故選擇混合效益最佳之孔隙導角區起始寬度為 1.3cm 之 Slotted 混合元件作為其最佳化條件設計。

3.4.3 楔型混合區之最佳化設計

楔型混合元件以 Dulmage 及 Slotted 兩種型式最被重視，3.4.1 至 3.4.2 探討了此二種楔型混合元件所組成之混合區不同設計參數之比較分析，發現 Dulmage 在以總體界面面積增加率及色彩均勻度為混合指標，其值皆比 Slotted 高很多，故在楔型混合元件中，選擇了元件角度為 30° 、元件單圈數目安裝 12 支及元件軸向間距為 $1/3D$ 之 Dulmage 混合元件為最佳化設計的條件。

