

射出成型中長纖維微結構變化與其對翹曲和機械性質影響之研究  
Investigation on the Microstructures of Long Fiber and Their Influences on  
Warpage and Mechanical Property in Injection Reinforced Thermoplastics  
(FRT) Parts

朱家豪<sup>1</sup>、傅韋文<sup>1</sup>、黃招財<sup>1\*</sup>、黃聖杰<sup>2</sup>、彭信舒<sup>3</sup>、杜俊毅<sup>4</sup>、許暉勳<sup>4</sup>  
Jia-Hao Chu<sup>1</sup>, Wei-Wen Fu<sup>1</sup>, Chao-Tsai Huang<sup>1\*</sup>, Sheng-Jye Hwang<sup>2</sup>, Hsin-Shu Peng<sup>3</sup>,  
Chun-I Tu<sup>4</sup>, Wei-Hsun Hsu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 淡江大學化學工程與材料工程學系

<sup>1</sup> Chemical and Materials Engineering Department, Tamkang University

<sup>2</sup> 國立成功大學 機械工程學系

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, National Cheng Kung University

<sup>3</sup> 逢甲大學機械與電腦輔助工程學系

<sup>3</sup> Dept. of Mech. and Computer-Aided Eng., Feng Chia University

<sup>4</sup> 全立發機械廠股份有限公司

<sup>4</sup> Chuan Lih Fa Machinery Works Co. Ltd

\* E-mail: cthuang@moldex3d.com; cthuang@mail.tku.edu.tw

## 摘要

由於纖維強化熱塑性塑膠(fiber reinforced thermoplastics, FRT) 具有非常優異之特性，近年來已成為產業中主要的輕量化技術之一，尤其是在汽車及航太產業中。然而，因為纖維在塑膠內部的微結構非常複雜且很難掌握，更無法了解其對成品翹曲收縮的影響。為此，本研究主要透過產學研合作，初步完成新式之長纖射出機台，同時應用 CAE 模擬分析與實驗研究兩種方式，針對我們設計之具有三種不同澆口型態(Model I 為側邊入料、Model II 為直接入料、Model III 為雙邊入料)標準拉伸試片(ASTM D638)的複合幾何模型，藉此複合幾何改變纖維微結構之變化，進而探索對產品品質之影響。結果顯示，應用短纖維複合 PP 材料在原始操作條件下，因為流道與澆口幾何效應的影響，三個試片模型呈現非常不同之翹曲變形之行為，其中一個試片下翹並內彎，一個試片上翹，另一個些微上翹。此等模擬預測之翹曲行為經過實驗驗證十分吻合。接著，我們針對整體射出成品翹曲的變化進行探討，結果顯示，纖維長度的增加可以有效降低整體之翹曲量值。再則，我們也利用萬能拉力機(弘達儀器 HT-9102M)進行三種不同試片之拉伸強度實驗：當使用短纖維之強化塑料時，Model I 之標準試片拉伸強度大於 Model II，其原因我們推估是由熔膠經流道及澆口之入口效應導致；接著，當我們考慮不同纖維配方之強化塑料時，不同試片之拉伸強度都與纖維長度成正比，而且 Model I 之標準試片拉伸強度都大於 Model II，此部份可能與纖維排向變化差異有關。再則，纖維微結構之有效表徵是目前產業最困難的部份，為此，我們初步利用 CT Scanner 對試片進行電腦斷層掃描，再利用 Avizo 軟體進行纖維排向變化之重建，初步結果與我們模擬預測吻合，此等結果初步證明我們產學合作建立之新穎特殊長纖系統可有效保留適量之纖維長度，並提供較優異

之產品特性，後續將可做為商業化之基礎。

**關鍵詞：**射出成型、纖維強化塑膠、纖維微結構、流道與澆口幾何效應、電腦斷層掃描

## Abstract

In recent years, due to its excellent properties, the fiber-reinforced thermoplastics (FRT) material has been applied into industry as one of the major lightweight technologies, especially for automotive or aerospace products. However, due to the microstructures of fiber inside plastic matrix are very complex, they are not easy to be visualized. The connection from microstructures to the final shrinkage/warpage is far from our understanding. In this study, we have proposed a benchmark with three standard specimens based on ASTM D638 where those specimens have different gate designs. Due to the geometrical effect, the local warpage behaviors are quite different for those three specimens. Specifically, it causes one specimen warped downward and bended inward, another warped upward, and the other slightly upward at the same time. The local warpage behaviors are validated by experimental study with excellent agreement. Moreover, the fiber length effect on the full warpage behavior was also conducted. When the longer fiber length is introduced, the full model warpage behavior can be reduced. The detailed of the full model warpage behavior has been analyzed side-by-side using both of numerical simulation and experiment. The trend is in a reasonable agreement for both simulation and experiment. Furthermore, the mechanical property variation of the finished parts due to the different fiber length was also investigated. Results showed that when the fiber is reinforced the tensile strength is increased linearly for all Models. However, the tensile strength of the Model I is always better than that of Model II, while Model III is much worse than others due to its double gate effect. The reason why the tensile strength of the Model I is always better than that of Model II could be due to the side-gate structure to provide strong fiber orientation and also more uniform fiber distribution at NGR. Moreover, we utilized CT scanner as well as Avizo to visualize the fiber orientation. The observation of fiber orientation experimentally is quite consistent with that of CAE simulation. The results also indicate that the long-fiber injection molding system we proposed can retain fiber length efficiently to keep the excellent mechanical properties.

**Key words:** Injection molding, fiber reinforced thermoplastics (FRT), fiber microstructure, runner and gate effect, CT Scan

## 1. 前言

由於纖維強化熱塑性塑膠(fiber reinforced thermoplastics, 後續簡稱 FRT) 具有非常優異之特性，近年來已成為產業中主要的輕量化技術之一，尤其是在汽車及航太產業中。然而，因為纖維在塑膠內部的微結構(纖維排向、纖維長度等)非常複雜且很難掌握，更無法了解其對成品翹曲收縮的影響[1,5-10]。為此，我們設計之具有三種不同澆口型態(Model I為側邊入料、Model II為直接入料、Model III為雙邊入料)標準拉伸試片(ASTM D638)的複合幾何模型，同時應用CAE模擬分析與實驗研究兩種方式，探索不同之澆口型態造成之流場改變對纖維微結構之變化，以及此等纖維微結構變化對產品品質之影響。

## 2. 數值理論與背景

纖維強化熱塑性塑膠(FRT)材料是以一般熱塑性塑膠當基質再適當地加以纖維所組成的複合材料，在本研究中，我們將FRT材料假設為不可壓縮之牛頓流體。為了對整體系能有更好的瞭解，我們將對此等塑料在射出成型製程中所產生之三維流動系統，以下列之主控方程式(Governing Equation)及纖維微結構之數學模型進行表示。

## 2.1 質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

## 2.2 動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u} + \tau) = -\nabla p + \rho g \quad (2)$$

## 2.3 能量守恆方程式

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

其中， $u$ 是速度向量， $T$ 是溫度， $t$ 為時間， $p$ 是壓力， $\rho$ 是密度， $\eta$ 為黏度， $\dot{\gamma}$ 為剪切速率， $k$ 為熱傳導係數， $C_p$ 為比熱。

## 2.4 纖維排向模型

在此，每一根纖維可被視為具有剛性的軸對稱硬棒，而其單位向量為 $p$ ，沿軸向可描述纖維排向，詳細敘述可以參考文獻[2-3]

$$A = \oint \psi(p) p p d p \quad (4)$$

其中， $\psi(p)$ 為定向空間上的概率密度分布函數。 $A_4$ 為四階方向向量，其定義為：

$$A_4 = \oint \psi(p) p p p p d p \quad (5)$$

此張量恰巧為一對稱張量，為了處理這個複雜的張量系統，Tseng等人[2-3]提出了一種新的纖維排向模型，結合Jeffery的流體力學(HD)模型，即為iARD-RPR模型：

$$\dot{A} = \dot{A}_{HD} + \dot{A}_{iARD}(C_I, C_M) + \dot{A}_{RPR}(\alpha) \quad (6)$$

詳細RPR模型及iARD模型可見於[4]

$$\dot{A}_{HD} = (W \cdot A - A \cdot W) + \xi (D \cdot A + A \cdot D - 2A_4 : D) \quad (7)$$

其中， $W$ 是渦度張量， $D$ 為變形數率張量， $\xi$ 是單一纖維的形狀因子。

## 2.5 纖維斷裂模型

纖維在加工過程中會因為製程引發作用力過大而斷裂，其斷裂後長度可以依據數量平均(式8)以及重量平均(式9)之統計方式評估，計算方式如下：

$$L_N = \frac{\sum_{i=1}^N N_i l_i}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (8)$$

$$L_W = \frac{\sum_{i=1}^N N_i l_i^2}{\sum_{i=1}^N N_i l_i} \quad (9)$$

其中 $N_i$ 是指在取樣區域內長度為 $l_i$ 之纖維數目， $L$ 是指纖維之原始長度， $N$ 為斷裂數目。

### 3. 研究之模型與資訊

本研究之產品複合之幾何模型，如圖1所示，其中產品外觀尺寸為400 mm×165 mm×3 mm。為了研究纖維微結構的變化，在此複合模型中包含了三個不同進澆方式的ASTM D638標準拉伸試片，包括Model I 為側邊入料、Model II 為直接入料、以及Model III 為雙邊入料，此等Model I 至Model III 試片之尺寸為172 mm×20 mm×3 mm。另外，為了探索不同纖維長度之效應，我們使用四種不同玻璃纖維長度之聚丙烯材料，詳細資訊如表1所示。

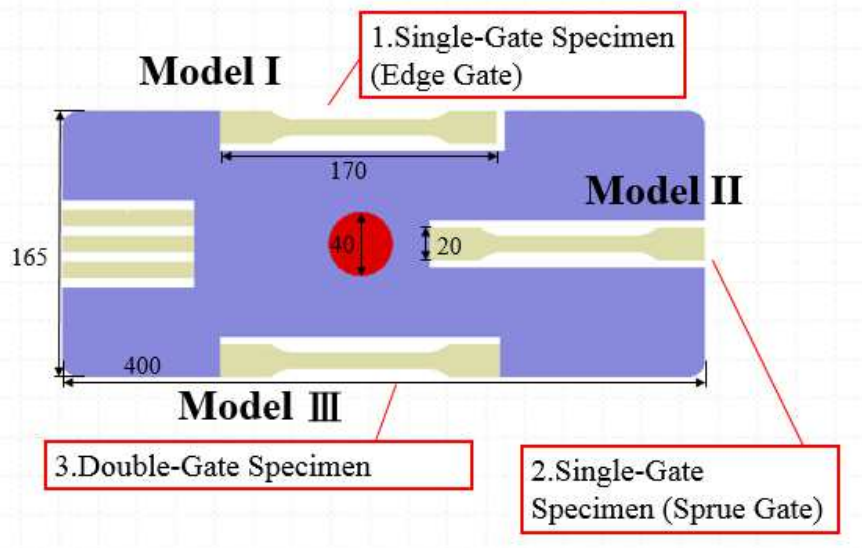


圖1. 幾何模型尺寸與不同澆口設計之試片

表1 材料資訊				
項目	塑膠基材	玻璃纖維	材料型號	製造商
A	PP	X	Globalene ST868M	LCY chemical
B	PP	30%, 3 mm	Globalene SF7351	LCY chemical
C	PP	50%, 12 mm	PP+12mm Glassfiber	GRECO
D	PP	50%, 25mm	PP+25mm Glassfiber	GRECO

### 3.1 CAE模擬分析設定之量測位置

我們使用Moldex3D執行相關之射出成型製程，為了進一步深入了解整體成品之翹曲變形行為，以及每一邊之標準試片局部翹曲變形之趨勢，我們特別在模型的四個邊上，分別設置7個量測節點，如圖2所示；四個邊分別為Model I和Model III長邊，以及Model II和Impact Side短邊。此外，針對個別拉伸試片局部翹曲變形情形及其纖維微結構特性變化(主要探討纖維排向、長度、密度分佈效應)，我們特別將每一個標準拉伸試片再分成三個區域，分別是為靠近澆口區域(NGR)，中間區域(CR)以及流動末端區域(EFR)，另外在每個區域再分別設置三個量測節點，以確定能詳細搜集各項可能影響產品翹曲變形之因子，如圖3所示。

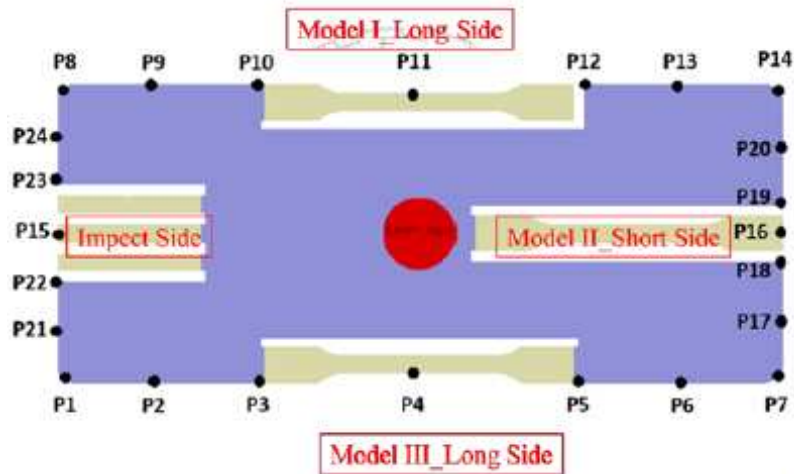


圖2. 整體量測節點

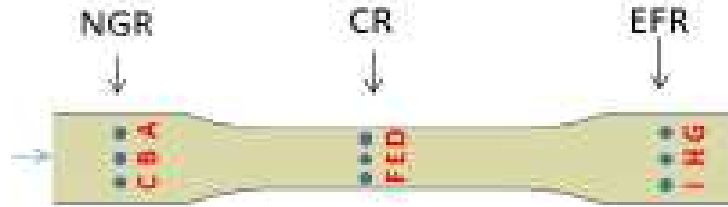


圖3. 拉伸試片量測節點

### 3.2 實驗研究之相關資訊

為了瞭解整體成品之翹曲變形行為，以及每一邊之標準試片局部翹曲變形之趨勢，我們除了前述之CAE模擬分析資訊外，我們也進行實際射出成型之研究，當完成一系列之射出成型實驗後，我們也對射出成品進行相關之量測。實驗所使用的射出機台為全立發機械廠股份有限公司所研究開發之特殊長纖機台，型號為CLF-180TXL。另外，其模座與水路配置與CAE模擬分析相同，如圖4所示。再則，射出成型主要之操作條件，如表2所示(模擬和實驗相同)。此外，射出成品的機械性質量測，主要是使用萬能拉力機(弘達儀器HT-9102M)來測試。

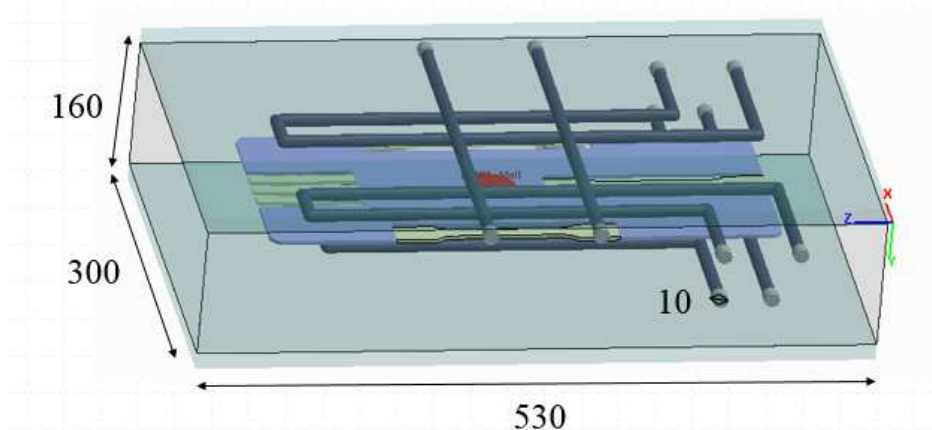


圖4 模座尺寸及冷卻水路配置

表2 操作參數	
參數	條件
射出壓力 (%)	70
保壓壓力 (%)	30
保壓時間 (s)	5
冷卻時間 (s)	15
空氣溫度 (°C)	20
背壓壓力 (%)	5
螺桿速度 (%)	30
螺桿位置 (mm)	117
鎖模力 (ton)	100
機台上限壓力: 230.3 MPa	

## 4. 結果與討論

### 4.1 局部翹曲變形之探討

首先，我們利用CAE模擬分析進行局部拉伸試片之局部翹曲變形之行為之預測，可以發現三個拉伸試片的局部翹曲變形狀況不太相同，其中Model I 試片(側邊入料)有向下翹並向內彎的情形；Model II 試片(直接入料)有向上翹的情形；而Model III 試片(雙邊入料)則有些微的向下翹情形。之後，我們採用實際射出成型實驗進行細部觀察，實際量測之情況，如圖5所示。接著我們將CAE模擬分析與實際成品之量測值彙集，如表3所述；從表中可以明顯地發現CAE模擬分析與實際射出成品在局部翹曲變形狀況，不僅在趨勢甚至量值都非常吻合。

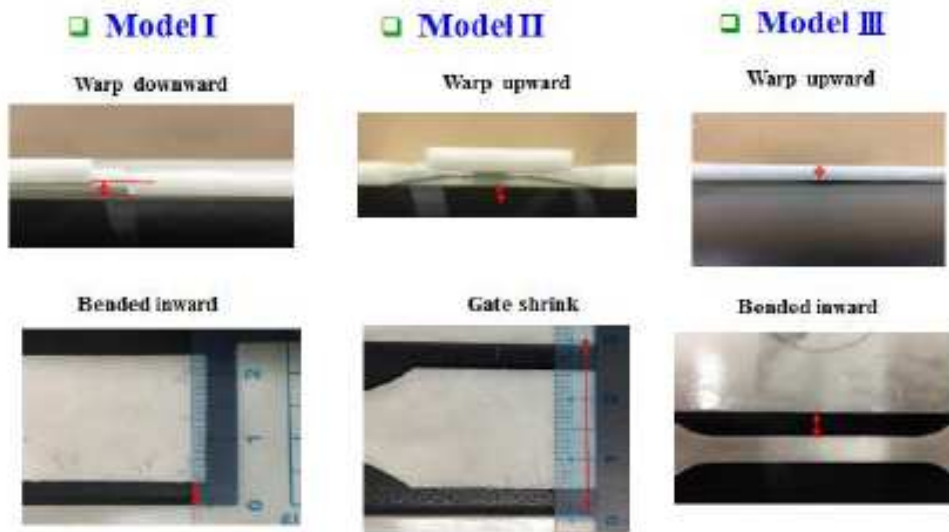


圖5. 不同試片局部翹曲變形細部觀察

表3 模擬與實驗之不同試片翹曲情形比較

試片	翹曲情形	趨勢	數值分析(mm)	實際量測(mm)	誤差值(%)
I	下翹	V	2.25	2.44	7.7
	內彎	V	2.05	2.19	6
II	上翹	V	1.76	1.93	9
	收縮	V	28.25	28.58	3
III	上翹	V	0.85	1.01	16
	內彎	V	8.6	9.51	1

#### 4.2 產品整體外觀翹曲變形之探討

再者，為了瞭解整體翹曲變形之行為，我們依據3.1章節所設置之量測節點，仔細地針對整體模型四個邊量測成品之相對位置，再彙整成成的每一邊之巨觀翹曲變形情況，如圖6-7所示。當我們仔細觀察，可以發現當使用PP(無纖維)材料情形下，以Model I 長邊為例(圖6)，其翹曲呈現”哭臉: 兩旁低/中間高”的趨勢，其中CAE模擬分析和實驗趨勢相符。另外從Model II 短邊(圖7)觀察，CAE模擬分析和實驗都呈現”笑臉: 兩旁高/中間低”的趨勢，其中CAE模擬分析和實驗趨勢相符。

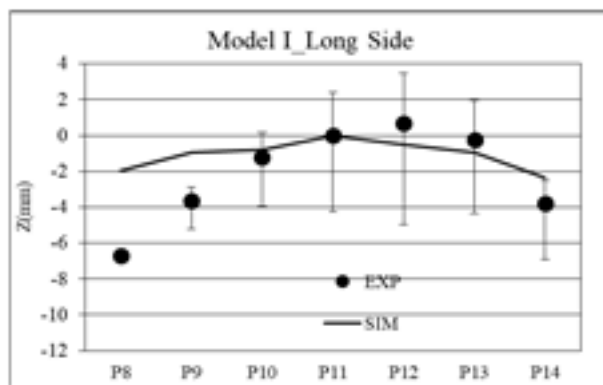


圖6. PP之Model I長邊翹曲

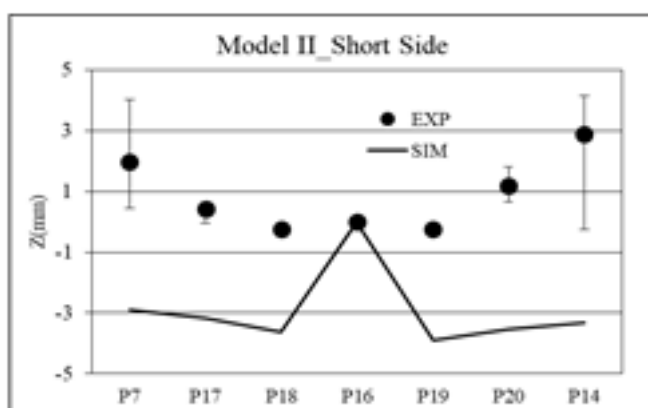


圖7 PP之Model II短邊翹曲

#### 4.3 不同纖維長度複合材料對整體外觀翹曲變形之探討

接著，為了瞭解不同纖維長度複合材料對整體翹曲變形之行為，我們調配了三種不同纖維長度複合材料，其射出成品整體翹曲變形之結果，如圖8-9所示。我們仔細觀察此等結果可以發現，當纖維長度增加時，可以有效抵抗並降低變形；如圖8為例，當材料從純PP改成25 mm長纖維複合材料時，在Model I長邊上使用PP的最大翹曲量約為7 mm，改用長纖維材料其最大翹曲量則下降到 2 mm，改善率非常明顯。同樣地，如圖9為例，在Model II短邊上使用PP的最大翹曲量約為3 mm，改用長纖維材料其最大翹曲量則下降到 2 mm。

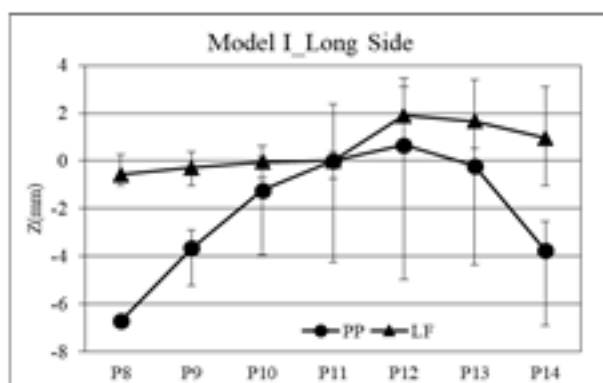


圖8. 不同纖維長度複合材料對 Model I 長邊翹曲變形行為

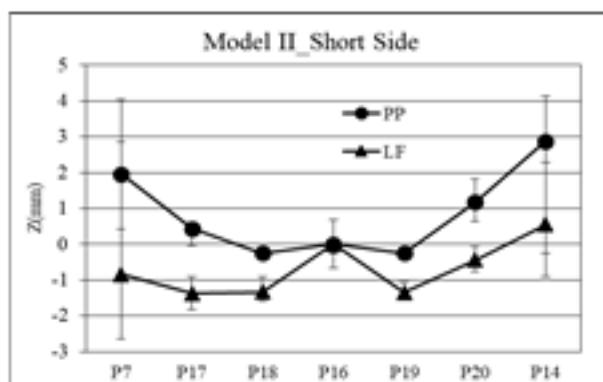


圖9. 不同纖維長度複合材料對 Model II短邊翹曲變形行為



#### 4.4 不同纖維長度複合材料之射出成品之機械強度探討

再則，為了解不同纖維長度對射出成品之機械性質的影響，我們對三種試片透萬能拉力機進行拉伸強度之探索，其結果彙整如圖10所示。當我們仔細探索，對於同一種試片的拉伸強度特性將隨著纖維長度增加而增強，例如：以Model I為例，純PP之射出成品，其強度約為20 N/mm<sup>2</sup>；當改用長纖維材料後，其強度提升到約140 N/mm<sup>2</sup>，可見纖維長度之增加，可有效提昇射出成品之拉伸強度。同樣地，針對Model II也可發現類似趨勢，其強度由20 N/mm<sup>2</sup>(純PP材料)提升到120 N/mm<sup>2</sup>(長纖維材料)；另外，Model III則因為利用雙邊入料會產生縫合線，所以強度提升較為不明顯，僅從20 N/mm<sup>2</sup>提升到約40 N/mm<sup>2</sup>。

另外，如果進一步比較Model I及 Model II之間的強度差異，針對使用含纖維複合材料時，Model I的強度始終大於Model II，明確來說：中纖維材料下，Model I比 Model II，其強度比為118 N/mm<sup>2</sup>比上105 N/mm<sup>2</sup>；同樣地，改為長纖維複合材料時，Model I比 Model II，其強度比為140 N/mm<sup>2</sup>比上120 N/mm<sup>2</sup>。我們推測此現象發生的原因，可能是側邊入料所造成的入口效應，提供了比較強之纖維排向效應。

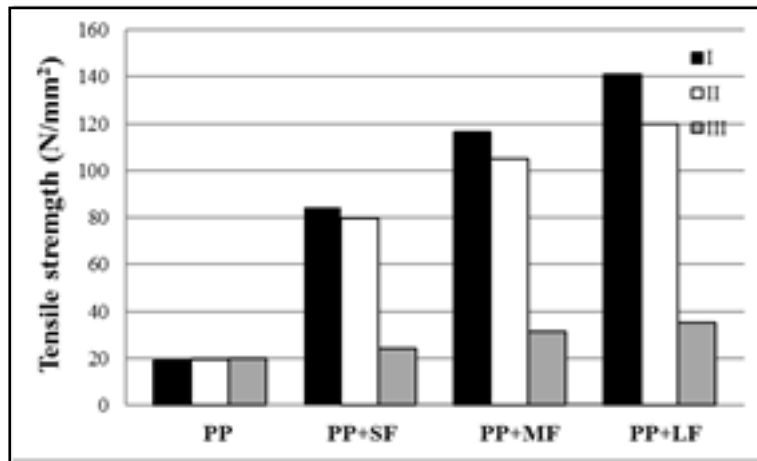


圖10. 三種試片不同材料之拉伸強度

#### 4.5 入口效應纖維排向之影響探討

我們為了探討不同澆口型態對纖維排向的影響，我們針對三種試片，分別對於靠近澆口區域(NGR)、中間區域(CR)以及流動末端區域(EFR)的纖維排向進行分析。圖11及圖12分別展示Model I 及Model II 在靠近澆口區域(NGR)之纖維排向。仔細審示可以發現，Model I 之A<sub>11</sub>纖維排向介於0.6到0.8；反觀，Model II 之A<sub>11</sub>纖維排向介於0.4到0.8，特別是針對熔膠之核心區域產生之A<sub>11</sub>纖維排向差異，Model I 明顯高出Model II 許多，由此等CAE模擬分析結果可以初步支持我們針對入口效應的推估。

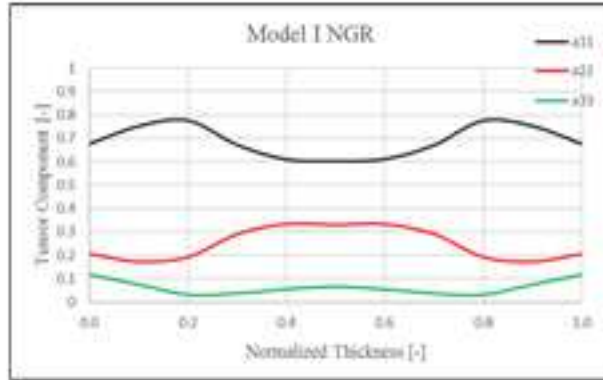


圖11. CAE模擬: Model I 靠近澆口處(NGR)纖維排向

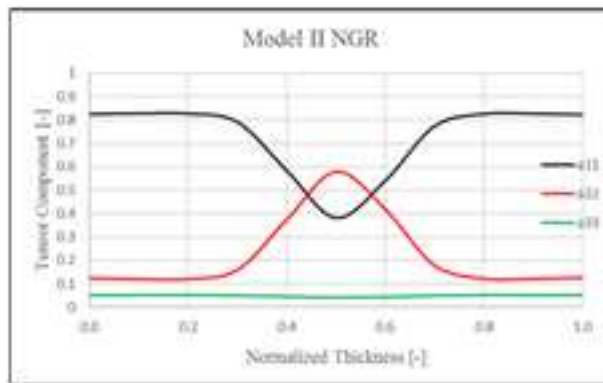


圖12. CAE模擬: Model II靠近澆口處(NGR)纖維排向

最後，為了驗證我們利用CAE模擬分析結果對入口效應的推估，我們將試片進行電腦斷層掃描，再利用Avizo軟體進行纖維排向變化之影像重建，其纖維排向重建結果，如圖13-14所示。很明顯地，Model I 之 $A_{11}$ 纖維排向介於0.6到0.9；反觀，Model II 之 $A_{11}$ 纖維排向介於0.35到0.8，特別是針對熔膠之核心區域產生之 $A_{11}$ 纖維排向差異，Model I 明顯高出Model II 許多，由此等電腦斷層掃描及影像重建後之結果強烈地支持我們針對入口效應的推測是正確的。

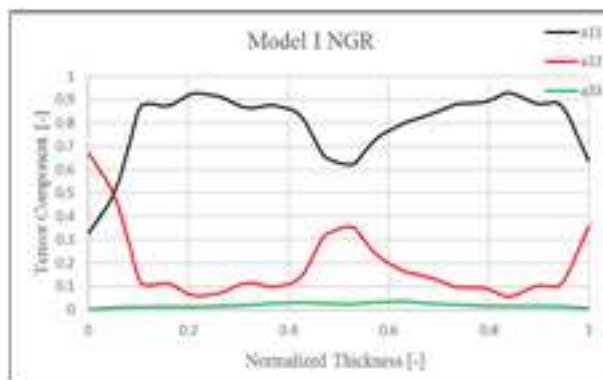


圖13. 經電腦斷層掃描及影像重建後之Model I靠近澆口處(NGR)纖維排向

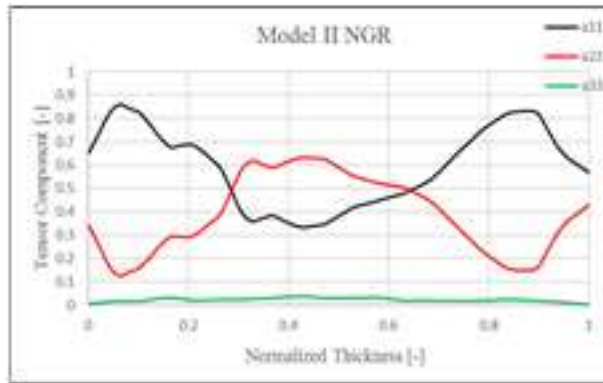


圖 14. 經電腦斷層掃描及影像重建後之 Model II 靠近澆口處 (NGR) 纖維排向

## 5. 結論

在本研究之中，我們設計了一個包含三種不同澆口設計的標準拉伸試片之複合幾何模型，特別是透過不同進澆口之方式改變纖維微結構之變化，進而探索對產品品質之影響。結果顯示，應用短纖維複合 PP 材料在原始操作條件下，因為流道與澆口幾何效應的影響，三個試片模型呈現非常不同之翹曲變形之行為，其中一個試片下翹並內彎，一個試片上翹，另一個些微上翹。此等模擬預測之翹曲行為經過實驗驗證十分吻合。另外，針對纖維長度效應對整體模型翹曲的影響，我們分別對定義的四個邊進行模擬分析及實驗量測得到以下結果，模擬與實驗之趨勢相當吻合，而且纖維長度增加可以有效降低整體之翹曲量值。再則，我們也利用萬能拉力機(弘達儀器 HT-9102M)進行三種不同試片之拉伸強度實驗：當使用短纖維之強化塑料時，Model I 之標準試片拉伸強度大於 Model II，其原因我們推估是由熔膠經流道及澆口之入口效應導致；接著，當我們考慮不同纖維配方之強化塑料時，不同試片之拉伸強度都與纖維長度成正比，而且 Model I 之標準試片拉伸強度都大於 Model II，此部份可能與纖維排向變化差異有關。再則，纖維微結構之有效表徵是目前產業最困難的部份，為此，我們初步利用 CT Scanner 對試片進行電腦斷層掃描，再利用 Avizo 軟體進行纖維排向變化之重建，特別是 Model I 之  $A_{11}$  纖維排向介於 0.6 到 0.9；反觀，Model II 之  $A_{11}$  纖維排向介於 0.35 到 0.8，特別是針對熔膠之核心區域產生之  $A_{11}$  纖維排向差異，Model I 明顯高出 Model II 許多，透過 CAE 模擬分析與電腦斷層掃描及影像重建後之結果強烈地支持我們針對入口效應的推測是正確的。此等結果初步證明我們產學合作建立之新穎特殊長纖維系統可有效保留適量之纖維長度，並提供較優異之產品特性，後續將可做為商業化之基礎。

## 6. 誌謝

本文作者非常感謝科技部部份之經費支持(計畫編號：MOST 107-2622-E-006-024-CC1)。

## 7. 參考文獻

1. Thomason, J.L. ; Vlug, M.A. et al: Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber-reinforced polypropylene: Part 1-Tensile and flexural modulus, Composites; 27A; p 477-484 (1996)

2. Advani, S.G., 1994. *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing* (Elsevier, New York)
3. Tseng, H.-C., R.-Y. Chang, and C.-H. Hsu, "Phenomenological improvements to predictive models of fiber orientation in concentrated suspensions." *J. Rheol.* 57 1597 (2013).
4. Tseng, H.-C., R.-Y. Chang, and C.-H. Hsu, "Method and computer readable media for determining orientation of fibers in a fluid," *U.S. Patent* No. 8571828 (2013).
5. Peter H. Foss, Huan-Chang Tseng, John Snawerdt, Yuan-Jung Chang, Wen-Hsien Yang, Chia-Hsiang Hsu, "Prediction of Fiber Orientation Distribution in Injection Molded Parts Using Moldex3D Simulation", *Polym. Compos.*, 35, 4, pp. 671-680 (2014).
6. Chao-Tsai (CT) Huang; Huan-Chang Tseng; Rong-Yeu Chang; Sheng-Jye Hwang, *SPE Technical Papers, ANTEC2016*, pp.1120-1125 (2016).
7. Chao-Tsai Huang, Huan-Chang Tseng, "Simulation Prediction of the Fiber Breakage History in Regular and Barrier Structure Screws in Injection Molding", *Polymer and Engineering Science*, 58(4), pp.452-459 (2018)
8. Sebastian Goris, Umesh Gandhi, Yu Yang Song, and Tim A. Osswald, *SPE Technical Papers, ANTEC2016*, pp.348-356 (2016).
9. Christoph Kuhn, IanWalter, Olaf Taeger and Tim A. Osswald, *J. Compos. Sci.* **2017**, 1, 2; doi:10.3390/jcs1010002.
10. Chao-Tsai (CT) Huang, Xiang-Lan Peng, Sheng-Jye Hwang, Huan-Chang Tseng, and Rong-Yeu Chang, *SPE Technical Papers, ANTEC2017*, Paper No. 153 (2017).