

CAE 實機驗證技術於射出成型虛實整合之應用

The Application of CAE Simulation and Real Molding Verification Technology in the Cyber-Physical Integration of Injection molding

粘世智^{1*}、王伯維²、黃明賢²、柯坤呈³、許嘉翔⁴

¹ 國立台東專科學校 動力機械科

² 國立高雄科技大學 機電工程系

³ 私立元智大學 機械工程學系

⁴ 科盛科技股份有限公司

*E-mail: lawrence@ntc.edu.tw

摘要

隨著工業 4.0 的興起，國際各射出大廠莫不積極發展能化技術，而 CAE 模擬與實機射出之虛實落差對射出成型智能化的發展尤其重要。本研究將基於實驗室發展之感測數據試模技術發展 CAE 模擬與實機驗證技術以降低虛實誤差。傳統 CAE 模擬主要依靠模擬人員經驗依分析結果以試誤法進行模擬參數的調整，欠缺一套能與實際射出時感測數據相互應證的系統化模擬方法。感測數據試模方法對感測數據進行成型曲線樣態分析與特徵擷取，以曲線分析調控技術進行試模，達到以科學化成型取代傳統機械參數控制之目的。本研究進一步以感測數據試模流程為基礎發展 CAE 模擬試模方法，建立模擬節點並以節點數據曲線樣態及模擬結果為基準進行模擬參數之調整以獲得 CAE 試模曲線，可有效降低對模擬人員之經驗依賴並有效減少模擬之次數，並將 CAE 模擬產出的標的將由成型參數進化為成型曲線，作為後續試模之比對基準。本研究同時發展 CAE 試模曲線之實機追蹤調整技術，將模具動態溫度虛實誤差控制於 1 °C 以內，並經由射出參數調整將實機試模曲線調校至與 CAE 成型曲線相近，降低虛實射出差異。本研究成功的將模擬與實機射出間的數據建立了具體可行之虛實整合方法並獲致良好的結果，為射出成型之虛實整合邁出成功的一步。

關鍵詞：射出成型、CAE 模擬、感測數據試模、虛實整合

Abstract

With the development of Industry 4.0, the international injection machine manufacturers are vigorously developing their intelligent systems, and reducing the differences between CAE simulation and actual molding, which is significantly important for the development of intelligent injection molding. This research aims to develop the real molding verification technology of CAE simulation based on the concept of Industry 4.0 and sense data mold testing technology to reduce the difference between CAE simulation and real molding. It is observed that traditional CAE simulation mainly relies on experienced engineers and analysis results to change simulation parameters, which are often criticized for incomplete representation of the injection molding process. The sense data mold testing develops today by monitoring melt state of the injection process using in-mold sensors, and analysis forming curve pattern and feature extraction on the mechanical and in-mold sensing data. The curve analysis technology can control the molding process and quality, but the simulation results lack compensation for the real molding conditions. This study further develops the CAE simulation mold testing method based on the sense data mold testing, and uses the node data curve pattern adjustment to obtain the CAE mold testing curve that meets the quality requirements. The target

produced by CAE simulation will be synchronously evolved from the parameters setting to the molding curve to facilitate the comparison of the mold flow state on the real mold testing. In this study, the dynamic error detection of the simulated mold temperature in real molding was controlled within 1 °C, and we adjust the test curve through the CAE simulation test process that can reduce the dependence of simulator experience. This will efficiently reduce the number of simulations. Then the real machine adjustment technology through the CAE molding curve tracking method can unite the melt pressure curve of actual molding and CAE simulation. As a consequence, the error of the of injection conditions between simulation and molding was greatly reduced.

Keywords : Injection molding, CAE simulation, Sense data mold testing, Cyber-Physical Integration

1. 前言

在實際的射出成型製程上，塑膠的成型不良有很大的部分是源自於產品幾何形狀及模具設計不良所引起，很難於射出階段透過調整成型參數來克服，而 CAE 模流分析技術可以協助塑膠加工業者於開模前解析塑件成型過程之模流狀況以及成型品質(包封、收縮等)，協助業者於開模前之成品與模具設計階段即解析塑件成型的模流情形以及預測成型品質(收縮、翹曲)，避免潛在的成型缺陷。現今 CAE 模擬的發展不僅能用於診斷與解決塑件成型的生產問題，更希望能以更全面、更真實的模擬技術，減少模擬端與製造端之落差，達到虛實整合，走向智慧化生產之目的[1-5]。

科學成型應用模內感測技術獲取模內熔膠真實狀態以期能理解模內成型之過程，而早於 1960 年科學成型(Scientific molding)的概念[6]即被創造和極力推廣，強調利用感測器解析射出成型過程熔膠狀態的變化，使得射出過程更為科學化及數據化，將傳統的「機器觀點」(machine-focused) 轉化為「熔膠觀點」(plastic's point of view)。本研究團隊近年來也亟力投入感測技術之開發，於 2016 年於科學成型的基礎上成功開發感測數據試模技術，更進一步的建立各試模階段之試模法則，對射出成型過程之模內熔膠感測數據進行成型曲線樣態分析與特徵擷取，將傳統的機械參數控制進化為成型曲線之樣態調整，將只適合單一射出機之傳統機械參數試模表單進化為可以在任一射出機重現之試模曲線(函數)，試模曲線也將作為後續移機量產及成型監控之基礎[7]。

本研究將以感測數據試模技術為基礎，進一步發展出整合 CAE 模擬分析與實機感測數據試模之虛實驗證技術，將模擬分析與實機感測數據試模之流程做一良好之結合，整合 CAE 模擬及實機感測數據以達到降低虛實誤差之目的，為智慧化射出成形之虛實整合技術建立基礎。

2. 研究方法與實驗配置

本研究使用日本 Fanuc 株式會社 S-2000i100B 全電式射出成型機，對長寬為 200 mm × 60 mm 之不等厚度高流長/厚度比之塑膠凹字平板進行模擬與實機試模之虛實實驗驗證，圖 1 為研究流程示意圖。由於 CAE 模擬在產品及模具開發初期進行，確認模擬完整後再進行模具之製造開發，CAE 模擬在前而實機試模在後，故本研究在建立 CAE 模擬曲線後，實機試模時先進行實際模具溫度之調整追蹤，以降低實機試模時之環境及管路溫損造成之需實差異，再進行 CAE 成型曲線之實機追蹤調整，降低實機試模時之機械、材料、熔料等不穩定造成之需實差異，達到切確將 CAE 模擬試模結果轉嫁至實機試模生產之目的。圖 2 為成品幾何尺寸與模內熔膠壓力感測器裝設(CAE 模擬節點設定)位置，成品五個寬度品質量測位置，分別為 W1、W2、W3、W4 及 W5 共 5 個寬度品質，實驗所用之材料為 ABS (PA756, Chi-Mei, Taiwan)，基本加工條件根據其物性表作設定。壓力感測器使用 Futaba 鈕扣型壓力感測器，模穴壓力代號定義為 P；模具溫度感測器使用冠輝技控之熱電偶，模具表面溫度代號定義為 T，感測器埋設

位置如圖 2 所示。本研究使用 Moldex3D 2020 Studio R10R 版本之全模座模型進行模擬分析，此版本具真實三維料管壓縮模擬功能，能模擬熔膠在料管和噴嘴階段所經歷的動態壓縮行為，能夠準確預測試射出壓力值。實驗機台於實驗前經過科盛科技進行機台鑑定，模擬分析將會在真實機台響應模式下進行，可優化射出機台響應參數之耦合，更準確地呈現成型過程中螺桿在料管內之真實作動及熔膠擠壓狀態。

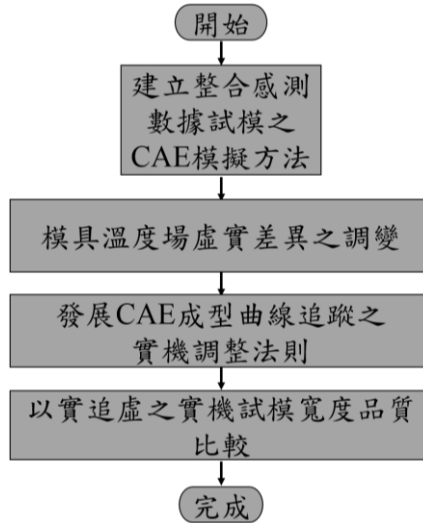


圖 1 CAE 實機驗證流程圖

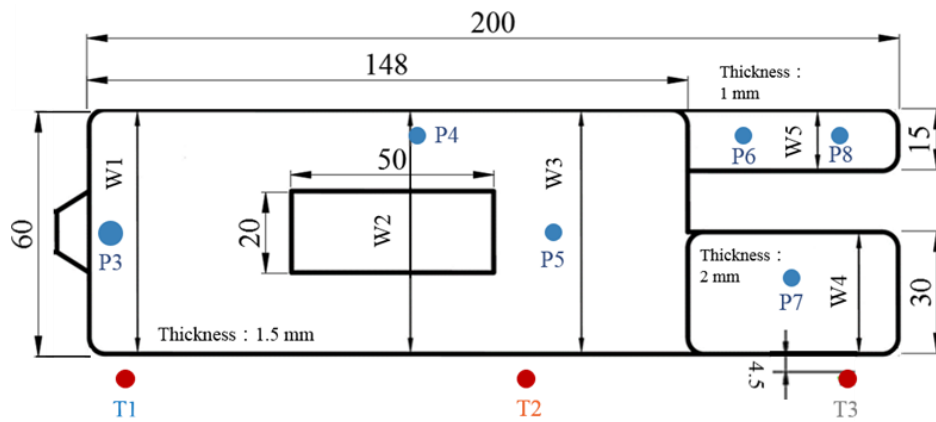


圖 2 成品幾何與寬度量測位置及感測器之埋設

本研究以感測數據試模流程為基礎(圖 3)，發展(1) CAE 節點數據模擬試模程序，以獲得合乎品質要求之 CAE 模擬試模曲線，接著進行以實追虛之虛實實驗驗證，根據 CAE 成型曲線，將實機成型曲線調整到與 CAE 成型曲線一致，以降低虛實間之落差。

- (1) CAE 節點數據試模：於塑件重要區域建立模擬節點，並以節點數據曲線樣態及模擬結果為基準進行模擬參數之調整，並最終獲得合乎品質要求之 CAE 試模曲線，執行包括：(1) 射速分段與最佳流速設定；(2)V/P 切換點設定；(3)澆口凝固時間設定；(4)分段保壓條件設定等模擬程序。
- (2) CAE 成型曲線追蹤之實機調整：實驗流程如圖 4 所示，依序為(1)模擬試模曲線之參數回饋實機試模；(2)CAE 成型曲線追蹤之實機系統壓力曲線調整；(3)CAE 成型曲線追蹤之實機近澆口壓力曲線調整；(4)CAE 成型曲線追蹤之實機多模穴壓力曲線調整等四個步驟。

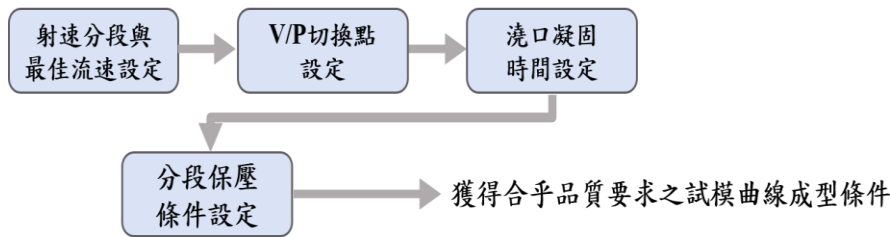


圖 3 感測數據試模流程示意圖

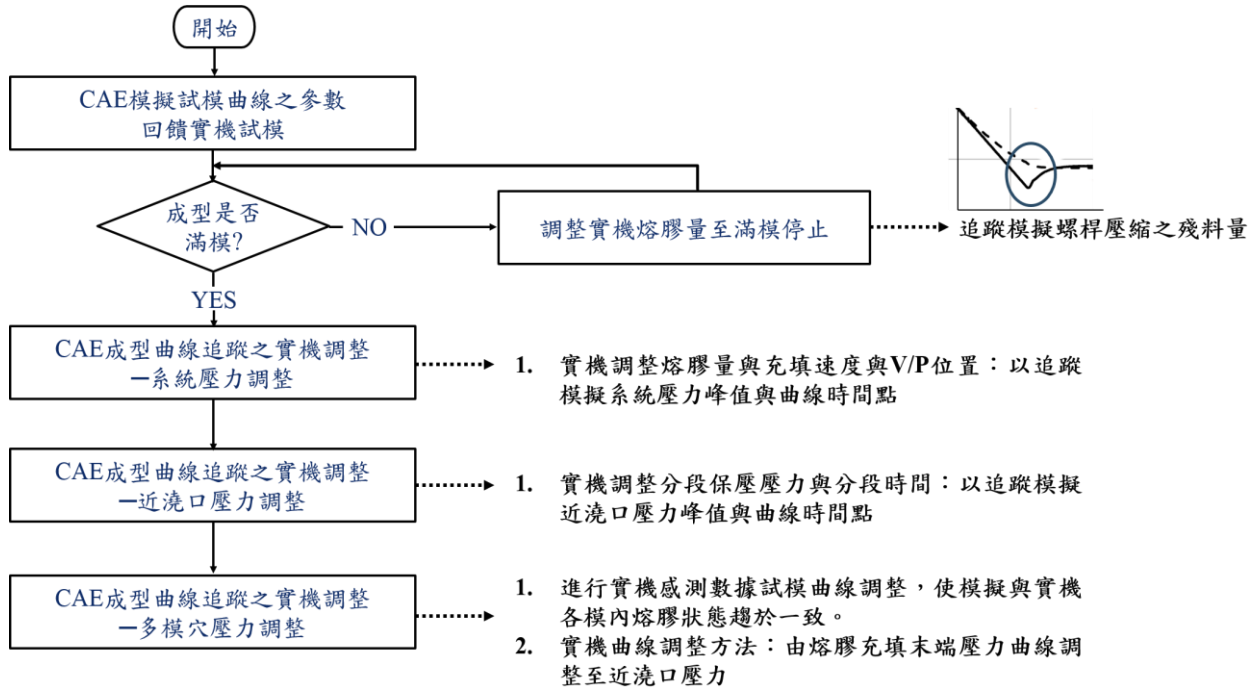


圖 4 以實追虛之 CAE 成型曲線實機追蹤流程

3. 結果與討論

3.1 建立整合感測數據試模之CAE模擬方法

本實驗進行充填階段的射速設定模擬，透過調變射出速度分析出不同射速下的壓力降(P5-P3)變化，將具有最小壓力降之速度套用至射速分段，將傳統的系統壓力 U 型曲線進化為模內壓力差，更貼近於模穴實際之充填狀態。圖 5 結果顯示當射出速度為 65 mm/s 時具有最小之塑件充填壓力差(P5-P3)，表示熔膠在該流速時剪切熱與模具熱傳之間會達到平衡，整體的熔膠流動阻力會最小，而此時之系統壓力也呈現最小之結果。圖 6 為 V/P 位置之模擬結果，由壓力曲線變化可看出當模穴壓力於滿模時會有一陡升現象，尤其以充填末端之 P8 節點之曲線最為明顯，相對於此曲線之陡升之螺桿位置即可獲得滿模時之螺桿位置(約為 19.6 mm 處)，並依此設定塑件充填百分比之 V/P 位置。圖 7 為澆口凝固時間之模擬結果，由於保壓 3 秒後近澆口之 P3 壓力曲線已無變動，可獲得保守之澆口凝固時間為 3 秒。

CAE 模擬根據塑膠 pVT 理論進行分段保壓條件設定，為降低單段保壓之開模前各節點壓力差異(圖 8)，進行分段保壓壓力調整模擬，將開模前各節點間之壓力收攏至 10 MPa 以下(圖 9)，有效降低塑件各部位之收縮差異，獲得較精準之尺寸與降低翹曲變形。模擬結果證實壓力收攏後成品平均體積收縮率由-0.629 %降至-0.044 %(圖 10)，且平均總位移由 0.133 mm 降至 0.020 mm(圖 11)，改善幅度高達 85 %，圖 12 與圖 13 為分段保壓調整前(a)後(b)之體積收縮率與總位移分佈統計。此分段保壓調整後之曲線即為 CAE 模擬試模曲線。

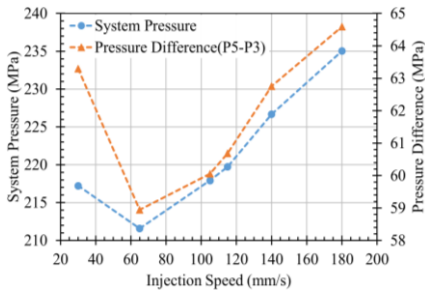


圖5 最佳流速之模擬結果

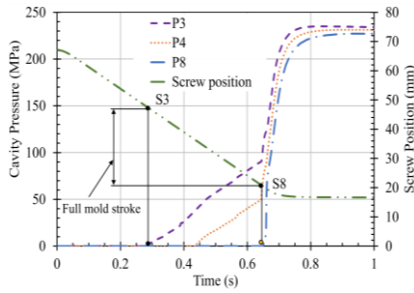


圖6 滿模行程之模擬結果

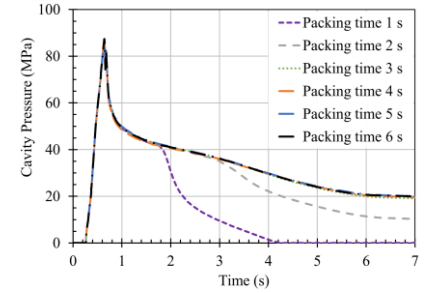


圖7 澆口凝固之模擬結果

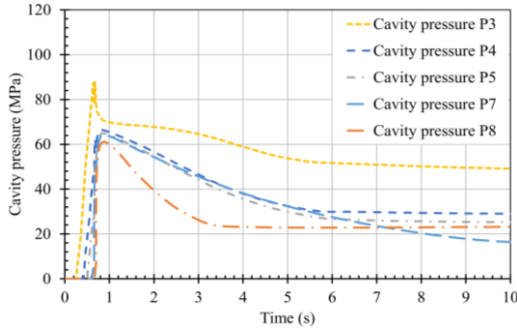


圖8 單段保壓80 MPa之模擬結果

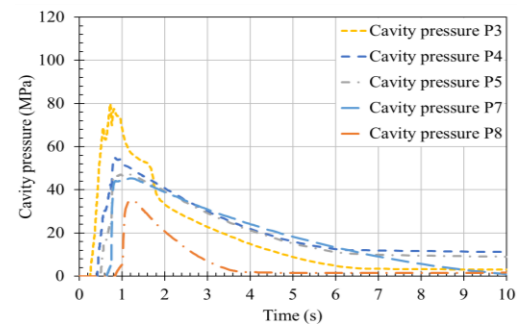


圖9 分段保壓之模擬結果

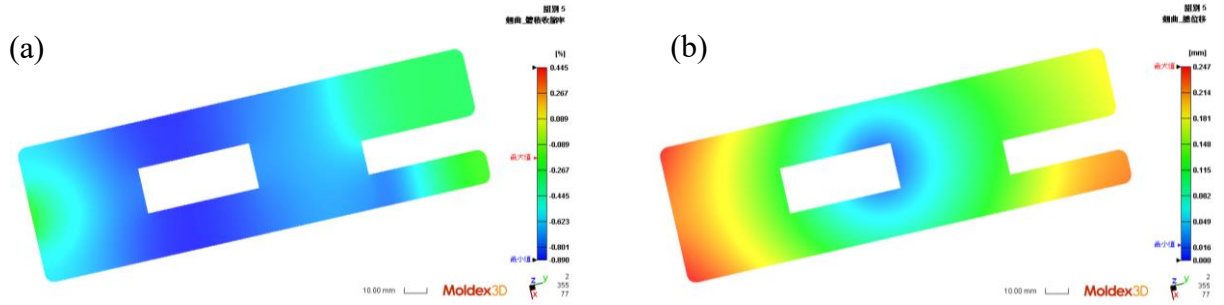


圖10 分段保壓調整前之體積收縮率(a)與翹曲(b)

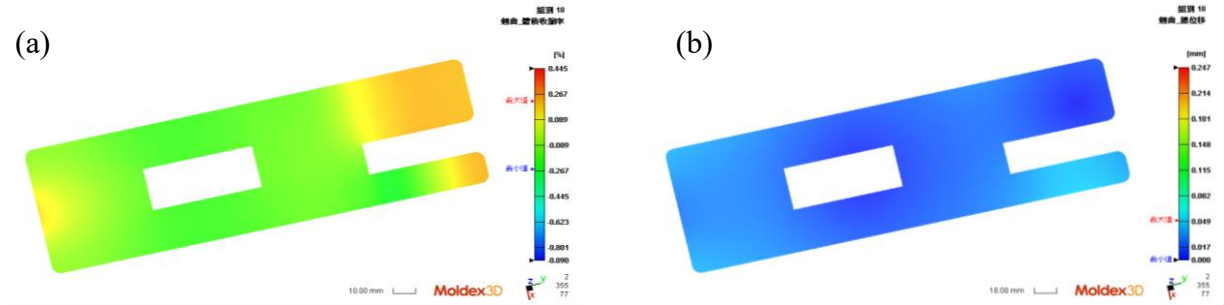


圖11 分段保壓調整後之體積收縮率(a)與翹曲(b)

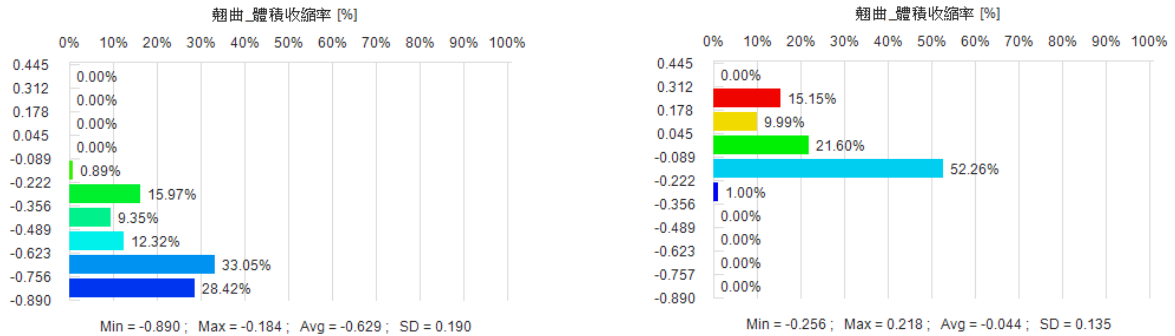


圖12 分段保壓調整前(a)與調整後(b)之體積收縮率分佈統計

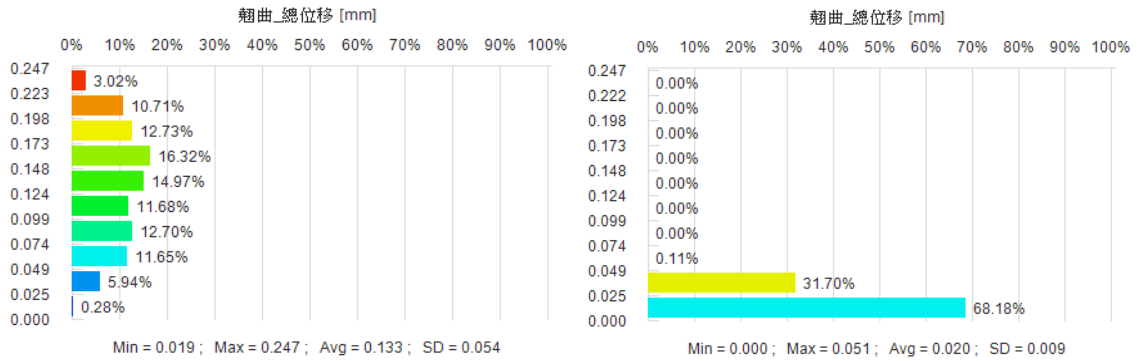


圖13 分段保壓調整前(a)與調整後(b)之翹曲總位移分佈統計

3.2 模具溫度場虛實差異之調變

實際成型上之模具溫度容易受到環境溫度及模溫機至模具間之管路熱損失而產生模溫的不穩定，造成實機與模擬模溫的巨大落差，所以需要在實機射出前將模具溫度拉至與模擬模溫接近(以實追虛)，以降低模擬與實際射出之模具溫度落差。實驗於模具重要位置設立模擬節點及熱電偶進行溫度比對，經由調整模溫機之溫度使實際模具溫度貼近模擬的模具溫度分佈。圖 14 顯示模擬之熱煤油入口溫度為 60 °C 時，透過調整模溫機溫度與流量，可使動態模具溫度之虛實誤差不超過 1 °C，而此時模溫機之設定溫度已高達 72 °C，與模擬之熱煤油入口溫度已有 12 °C 的落差。

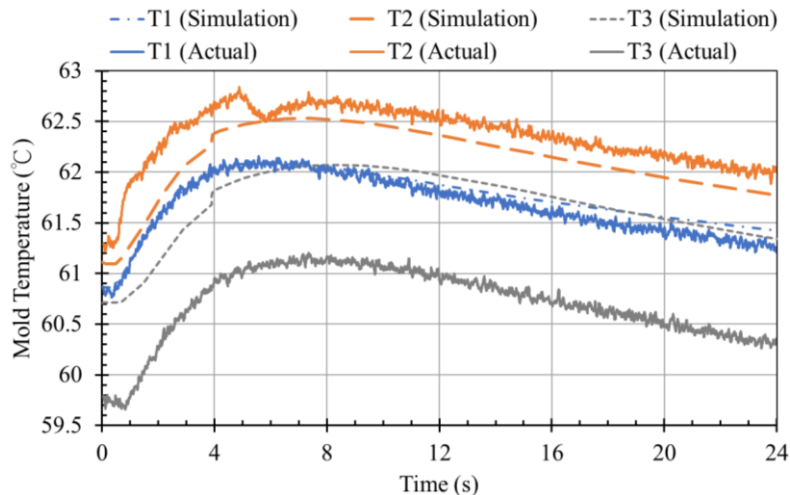


圖14 模擬與實際模具溫度動態變化曲線

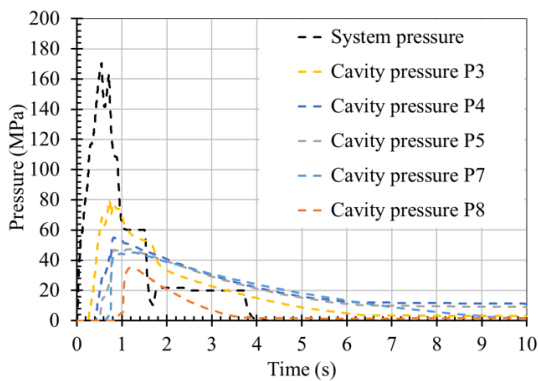
3.3 發展CAE成型曲線追蹤之實機調整法則

本階段實驗首先將 CAE 試模曲線之模擬參數反饋至機台進行實機試模，圖 15(a)、(b)為各感測點之壓力比較，結果顯示實機射出之各感測點壓力皆低於模擬壓力，而且成品出現短射無法填滿之現象。圖 15(c)顯示出實機系統壓力曲線時間點落後且壓力峰值遠低於模擬，而圖 15(d)顯示出模擬與實際之螺桿前進與回彈量、及螺桿壓縮最前位置皆有所落差，由於塑件短射，因直接將 CAE 試模參數移植至實機射出尚有落差，需要進行實機調整，將參數移植改為成型壓力追蹤。

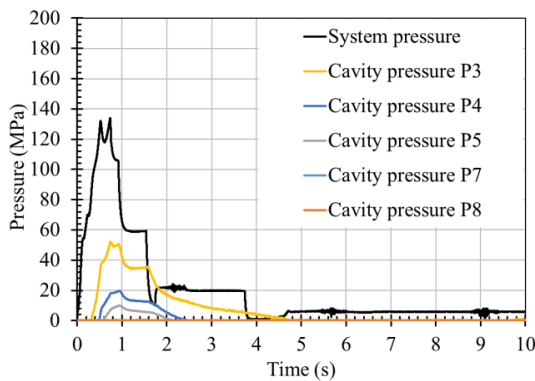
實驗第二階段將調整實機射出之系統壓力以追蹤上模擬之系統壓力，首先將計量位置由 46.03 後退至 51.65 以獲致與模擬一致之殘膠量(圖 16(a))，圖 16(b)為相對應之實機系統壓力與模擬系統壓力之比較，此時實機系統壓力峰值已接近模擬系統壓力，但實機之峰值時間點較為落後。經由調整實機熔料量(51.65 / 54.03)、射出速度(78 / 116)及 V/P 位置(6.2 / 5.2)的調

整，使得最終實機系統壓力接近模擬之系統壓力(圖 16(c))。而圖 16(d)顯示在相同系統壓力下之模擬與實際螺桿壓縮最前位置有明顯落差且實際回彈量甚多。更進一步對相同系統壓力之近澆口壓力 P3 進行虛實比對，發現曲線之時間契合但實機射出之開模前殘壓略高於模擬(圖 17(a))。實驗接續進行分段保壓調整，經由保壓時間與壓力之調整後，模擬與實際之近澆口壓力曲線有良好的一致性(圖 17(b))，然而(圖 18(a))其它感測點之壓力曲線有些落差，尤其 P5 與 P8 於開模前之殘壓過高，且螺桿壓縮最前位置及回彈量之差距明顯被放大(圖 18(b))。

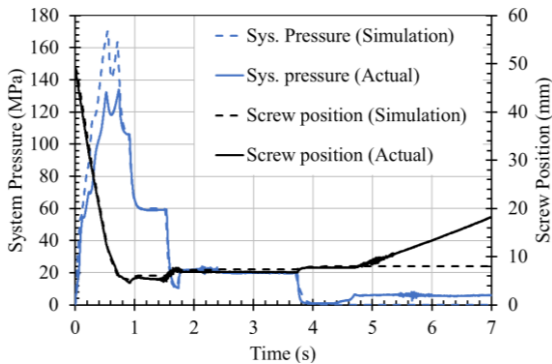
實驗最後將近澆口 P3 壓力追蹤擴展至多感測點壓力追蹤(圖 19)，圖 19(a)至(e)為實機調整熔膠量(54.03 / 53.03)、V/P 位置(5.2 / 5)及第一段分段保壓壓力(105 / 83) 後之各感測點壓力曲線比較，結果顯示模擬與實際之模內感測點皆有不錯的一致性。圖 19(f) 為多感測點壓力追蹤之各壓力歷程，結果顯示開模前之殘壓收攏已較近澆口 P3 壓力追蹤(圖 18(a))改善，將具有較佳之收縮均勻性及較小之翹曲。



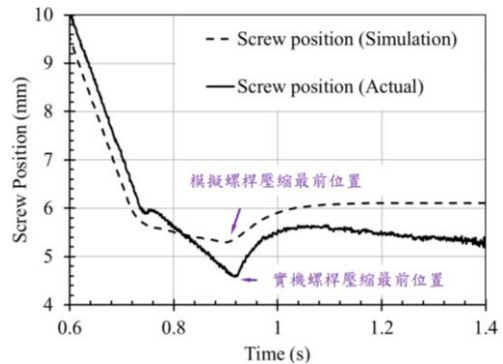
(a) 模擬試模曲線



(b) 模擬試模參數反饋實機射出

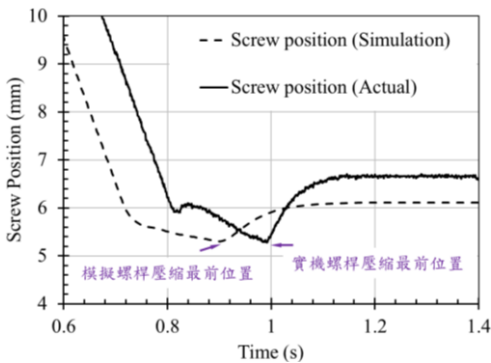


(c) 模擬與實機之系統壓力比較

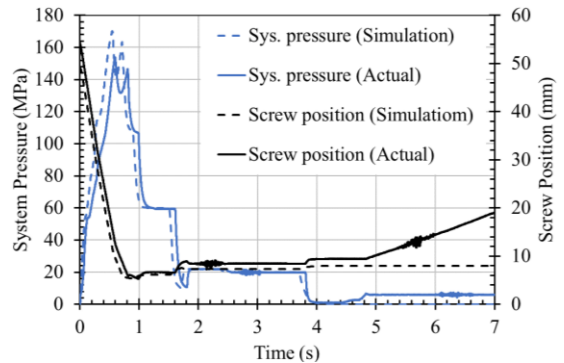


(d) 模擬與實機之螺桿位移比較

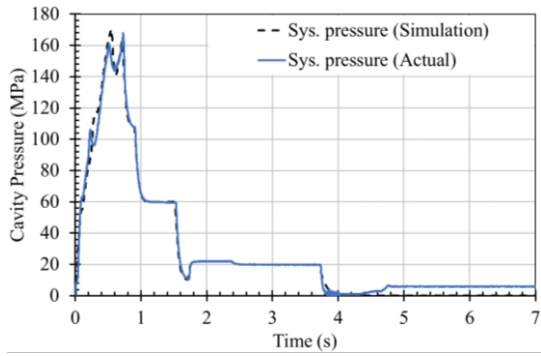
圖 15 模擬試模參數反饋實機射出



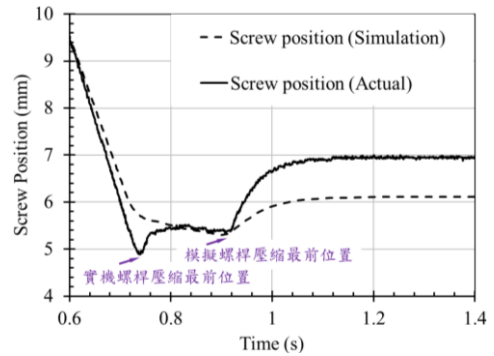
(a) 實機調整熔料量之螺桿位移比較



(b) 實機調整熔料位置由46.03至51.65 mm

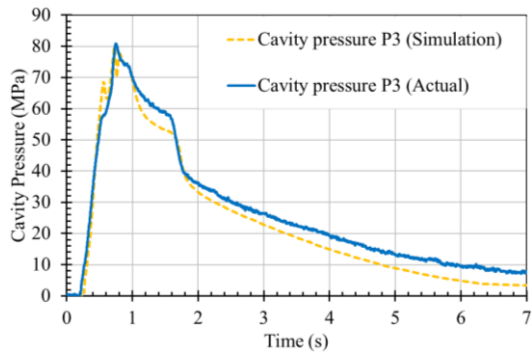


(c) 實機調整熔膠量與射出速度與V/P位置

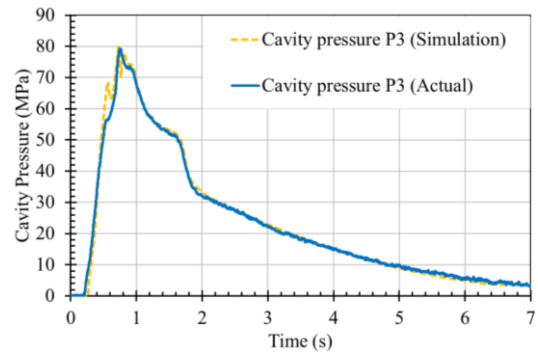


(d) 相同系統壓力之螺桿位移比較

圖16 實機系統壓力曲線調整之感測結果比較

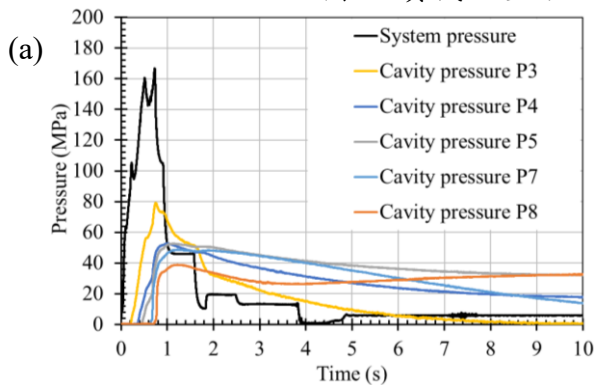


(a) 相同系統壓力之P3壓力曲線

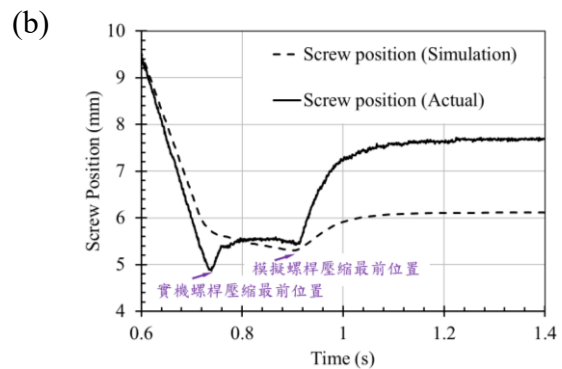


(b) 實機調整分段保壓壓力與分段保壓時間

圖17 實機P3壓力曲線調整之感測結果比較

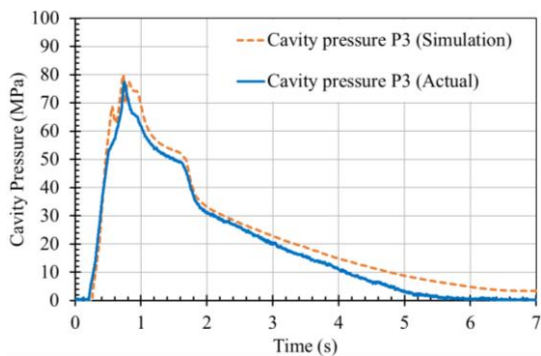


(a)

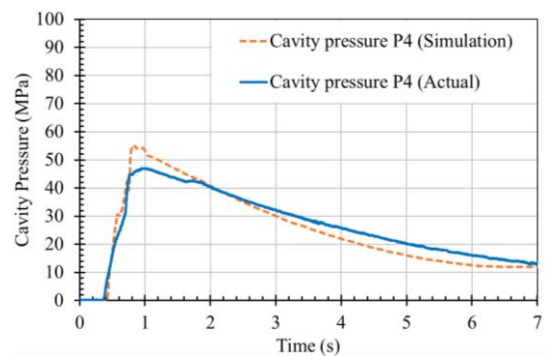


(b)

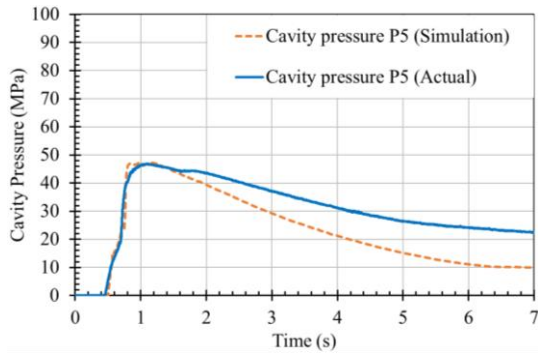
圖18 相同P3壓力曲線之實機各感測點壓力曲線(a)及螺桿位移(b)比較



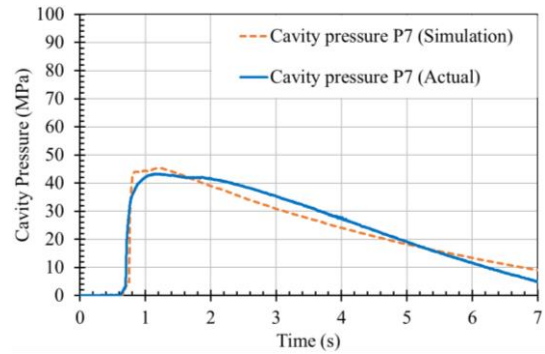
(a) 多感測點壓力追蹤之P3壓力曲線



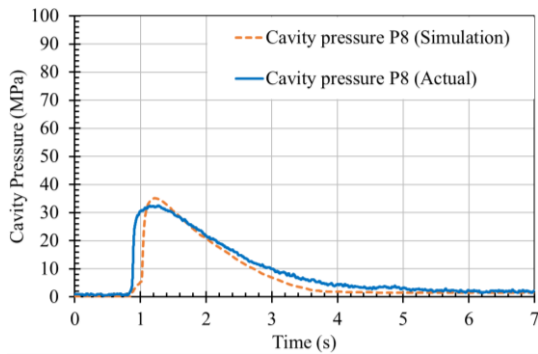
(b) 多感測點壓力追蹤之P4壓力曲線



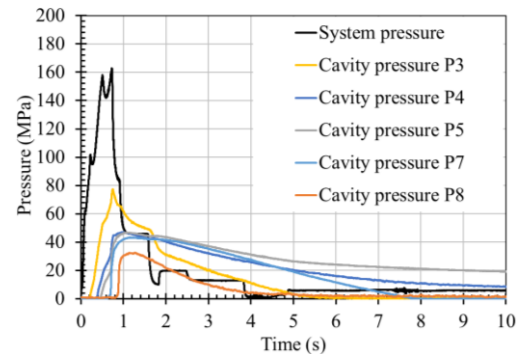
(c) 多感測點壓力追蹤之P5壓力曲線



(d) 多感測點壓力追蹤之P7壓力曲線



(e) 多感測點壓力追蹤之P8壓力曲線



(f) 多感測點壓力追蹤之壓力歷程

圖19 實機多模穴壓力曲線調整之感測結果比較

3.4 以實追虛之實機試模寬度品質比較

表 1 為最終以實追虛之實機試模寬度品質比較，調整前實機 85 MPa 單段保壓之各尺寸量測位置之收縮率差異極大，尤其是厚度 1 mm 流動末端 W5 之收縮極大，各寬度品質之收縮率全距高達 1.18 %。而實機調整成與 CAE 模擬相同系統壓力下，各寬度品質之收縮率全距縮小至 0.44 %。當實機近澆口壓力 P3 調整至與 CAE 模擬相同時，因各感測點之開模前殘壓差異稍微擴大，導致各寬度品質之收縮率全距稍微放大至 0.47 %。最後經由以實追虛之多感測點壓力追蹤結果顯示，當把各感測點壓力一起考量，將各感測點壓力曲線調整至與 CAE 模擬試模曲線相近時，可以有效的將塑件各位置之尺寸收縮率差異降低至 0.32 %。實驗結果證實經由 CAE 模擬試模曲線之追蹤進行實機試模是確實可行的。

表 1 以實追虛之實機試模寬度品質比較

量測位置		W1	W2	W3	W4	W5	收縮率全距
實機 85 MPa 單段保壓結果	尺寸 (mm)	59.898	59.8	59.747	29.817	14.798	
	尺寸差(mm)	-0.102	-0.2	-0.253	-0.183	-0.202	
	收縮率(%)	0.16 %	0.33 %	0.42 %	0.6 %	1.34 %	1.18 %
相同系統 壓力-實機	尺寸 (mm)	59.669	59.819	59.842	29.900	14.984	
	尺寸差(mm)	0.331	0.181	0.158	0.100	0.016	
	收縮率(%)	0.55 %	0.30 %	0.26 %	0.33 %	0.11 %	0.44 %
以實追虛之近 澆口 P3 壓力 曲線追蹤	尺寸 (mm)	59.645	59.798	59.829	29.880	14.983	
	尺寸差(mm)	0.355	0.202	0.171	0.120	0.017	
	收縮率(%)	0.59 %	0.34 %	0.29 %	0.40 %	0.12 %	0.47 %
以實追虛之多 感測點壓力曲 線追蹤	尺寸 (mm)	59.635	59.758	59.759	29.857	14.956	
	尺寸差(mm)	0.365	0.242	0.241	0.143	0.044	
	收縮率(%)	0.61 %	0.40 %	0.40 %	0.48 %	0.29 %	0.32 %

4. 結論

本研究成功發展出 CAE 模擬與實機感測數據試模之虛實驗證技術，為射出成型的模擬及實機射出建立一個良好的虛實整合方法。實驗結果顯示透過在 CAE 模擬模型設置感測節點進行模擬成型曲線樣態之分析與調整的方式，可以獲致良好的分析結果，相較於傳統模擬倚靠經驗進行模擬參數調整之方式更能以科學性及直觀的解析成型過程，更能明確的對應出模擬調整的方向。在實機試模方面，透過 CAE 試模曲線追蹤技術成功的將模內熔膠壓力曲線追上 CAE 試模曲線，大幅降低了模擬與實際射出之虛實差異，為射出成型產業邁向智能化的關鍵-虛實整合技術做出貢獻。

5. 致謝

本論文為科技部計畫編號MOST-108-2622-E-602-001-CC2之產學計畫，由於科盛科技與科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. 楊文禮，謝再新，“全球模流分析技術的應用現況與發展”，CTIMES (2017)。
2. P. Guerrier, G. Tosello, J. H. Hattel, “Flow visualization and simulation of the filling process during injection molding,” CIRC Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 16, pp. 220-222 (2017).
3. C. T. Huang, Y. H. Hsu, B. S. Chen, “Investigation on the internal mechanism of the deviation between numerical simulation and experiments in injection molding product development,” Polymer Testing, Vol. 75, pp. 327-336 (2018).
4. F. Regi, P. Guerrier, Y. Zhang, G. Tosello “Experimental Characterization and Simulation of Thermoplastic Polymer Flow Hesitation in Thin-Wall Injection Molding Using Direct In-Mold Visualization Technique,” Micromachines, Vol. 11(4) : 428 (2020).
5. C. T. Huang, R. T. Xu, P. H. Chen, W. R. Jong, S. C. Chen “Investigation on the machine calibration effect on the optimization through design of experiments (DOE) in injection molding parts,” Polymer Testing, Vol. 90 : 106703 (2020).
6. S. Kulkarni, “Robust process development and scientific molding: theory and practice,” Carl Hanser Verlag, Munchen, Germany (2014).
7. S. C. Nian, Y. C. Fang, M. S. Huang, “In-mold and machine sensing and feature extraction for optimized IC-tray manufacturing,” Polymers, Vol. 11(8): 1348 (2019).