

第五章 CAE 模流分析技術的應用

5.1 引言

本章擬以理論及數值模擬分析，探討射出成型的熔膠在模具充填過程中，成型製程操作條件與模具流道設計參數的影響，期能利用 CAE 模流分析技術選定模具、塑膠材料、與射出機台後就可自動設定加工條件參數，達成 CAE 模擬分析與現場實務設計同步化。

電腦輔助工程 CAE (Computer-Aided Engineer) 模流分析技術日益精進，以提昇產業的競爭力及減少現場實際試誤的成本與時程浪費，使業者邁向更快速及更周密生產流程。使用者應在最短時候內學會操作 CAE 模流分析軟體，熟悉指令操作，依照 CAE 模流分析進行產品設計，做為開模前模擬與測試，以達到效果事半功倍。

本章以無線通訊產品(Access Point)外殼為例，應用 CAE 模流分析技術，來探討產品設計與製造的問題；在模具未正式開模前，先行檢討產品設計的缺失，再針對缺失項目做設計改善，確保產品於塑膠射出成型符合品質標準要求，以提高研發、製造、生產、檢驗的效率及降低其成本。



5.2 CAE 模流分析的操作步驟

模流 CAE 的操作可分成：模型建立(Modeling)、物性數據(Data Bank)、成型條件(分析模組) 三方面[1]。CAE 模流分析的步驟有產生網格、匯入網格模型、選擇材料和射出機的加工條件和模擬射出成型等[3]。首先在 CAD 軟體建構 FEM 的產品模型，如 Rhino、AutoCAD、Cimatron、Pro/Engineer、Ideas、Euclid 等；第二是將有限元素網格匯入 Moldex3D；第三是選擇塑膠材料和設定加工條件，因為 Moldex3D 是基於塑膠材料和高分子加工物理基礎，加上塑膠特性和加工狀況，以產生仿真的模流分析結果，並得到準確的分析結果。

模型就是產品幾何形狀與尺度，模流分析 CAE 的軟體為模型建立，市面上可建立模型之 CAD 軟體等，透過轉換介面工具成為有限分析(Finite Element Analysis) 網格(Mesh)資料。匯入圖檔為操作的第一的步驟，它讀取其他軟體所建立的模型資料，如 *.iges 檔，挑選曲面並連結所有曲面以產生網格(Mesh)，如曲面資料不齊全即修補曲面。網格產生後，對於有破洞區域進行修補，有限元素網格的特性，是相鄰網格間的節點要正確的連接；如此才能將節點上的物理訊息正確的傳遞下去。要做射出成型的模流分析，可先利用 Rhino 繪製工具繪製流道、進澆點、水路與模座，將所有 Mesh 設定厚

度、定義流道、澆口尺度與進澆點，完成模型之前處理，然後將 Mesh 模型資料存成 Moldex3D 檔案資料[2]。

塑料性質介紹，所有的物理解析均根據於材料的物性出發做計算，不同物料則有不同的成型狀況，提供一個塑料資料庫可供呼叫使用，也可以自行建立物料特性；成型條件，除了產品幾何構造、進澆口位置設定外、射出機更是不可忽視的重要加工程序，對於進料螺桿射出壓力、料溫設定、保壓時間等都是重要的因素。

5.3 CAE 模流分析的電腦軟體與硬體之介紹

Moldex3D 針對不同的分析需求，提供 2.5D (Shell) 與 3D (Solid) 的分析工具模組兩個部份。Shell 系統包括 Project、Flow / Pack、Cool、Warp、GasIn、RIM、Mesh 等 7 個主要的模組；Solid 系統包括 Project、Flow、Pack、Cool、Warp、Fiber、GasIn、RIM、Mesh 等 9 個主要的模組[4]；本文以 2.5D (Shell) 系統為研究分析使用工具模組。

目前使用 CAE 模流分析，2.5D (Shell) 的版本作業須在 Window NT Service Pack 6 或 Window 2000 作業系統，硬體上需要處理器 Intel Pentium 3, 1.0G 或更高，最小記憶體 1.0 GB 或更高，硬碟 4 GB 或更高，顯示卡支援 OpenGL 規格，光碟機 2 倍數或更高；Solid 則是在 Window NT Service pack 6 或 Window 2000 作業系統操作，它的硬體需求是處理器 Intel Pentium 3, 1.7G 或更高，最小記憶體 1.5 GB 或更高，硬碟 60 GB 或更高，顯示卡支援 OpenGL 規格，光碟機 2 倍數或更高[5]。

Moldex3D 軟體架構介紹，可分為 9 大部份[6]：

- (1) Project：透過易學易用的人機介面，使用者可以輕易的選擇塑膠材料及加工條件，快速的選擇塑膠材料及設定加工條件，快速檢視分析結果，管理設計變更並產生圖文並茂的 CAE HTML 報告。
- (2) Flow：流動分析模組可預測縫合線、包封位置、射出壓力、鎖模力、機器噸數、流道系統等重要的資訊；並提供動畫結果來檢視塑膠流動的情形。
- (1) Pack：飽壓分析模組可預測體積收縮、溫度分佈等資訊，協助避免過度飽壓與不均勻體積收縮等成型題。
- (4) Cool：冷卻分析模組可預測冷卻時間，模面溫差，熱通量分佈等資訊；具有最快速的分析速度，可以快速準確的分析模具水路的安裝及建議修改。
- (5) Warp：翹曲分析模組助預測產品在脫模完成後，可能產生的翹曲變形外觀，並幫助使用者找尋發生翹曲的主要原因，以防止翹曲的發生。
- (6) Fiber：纖維配向模組可以預測纖維充填，保壓過程中纖維的排向與分佈，並且提供翹曲模組進行含纖維，非等向性塑膠材料翹曲變形分析。

- (7) GasIn : 氣體射出模組模擬氣輔射出的氣體&塑膠的動態情形;並提供氣體穿透度、皮層厚度、塑膠流動波前等重要的資訊,並可預測冷卻與翹曲變形。
- (8) RIM : 反應射出成型模組可以計算熱固性塑膠之硬化速率,並計算封膠充填和模內硬化分析,提供縫合線與包封位置、轉化率分佈、速度向量分佈、轉移壓力等重要資訊。
- (9) Mesh : 網格模組是一套架裝在 Rhino 上的網格產生軟體,它強大網格功能將建構複雜實體網格,變成一件簡單的工作,且不論是在計算流力分析,熱分析及應力分析軟體上都有很良好的應用。

5.4 CAE 模流分析的應用實例

本章的CAE模流分析作業模擬對象,為如圖(5.1)所示的無線通訊產品橋接器(Access Point)外殼為主體,這項產品主要厚度為2 mm,最薄區域:0.8 mm,長度128 mm,寬度103 mm,高度16 mm,體積33.5 C.C.,採用奇美塑膠材料(CHI-MEI) ABS塑膠材料PA757;屬於中小形產品設計,非常適合一般射出成型機製造加工作業,產品厚度分佈設計,如圖(5.2)所示。

經過塑料選擇、成型條件及壓力曲線,確定所要模擬參數,其數據為初始成型條件為充填時間 0.5 Sec、塑料溫度 235 °C、模具溫度 55 °C。以下各節為模流分析的初步結果,以及模流變異因子的設定,包括了下列共 8 組變異因子,以不同材料設定為奇美(CHI-MEI)/ABS - PA746 與 ABS - PA757;充填時間設為 0.3 sec 與 0.7 sec;塑料溫度設定為 230 °C 為 240 °C;模具溫度設定為 50 °C 與 60 °C;流道設計設定為流道 A 與流道 B。

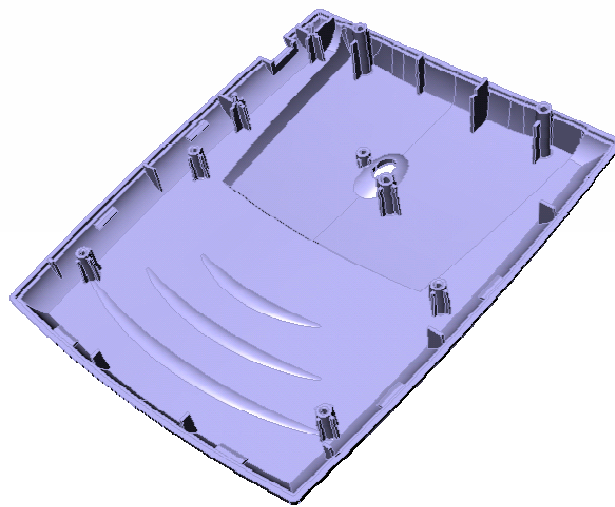


圖 5.1 無線通訊產品橋接器(Access Point)外殼

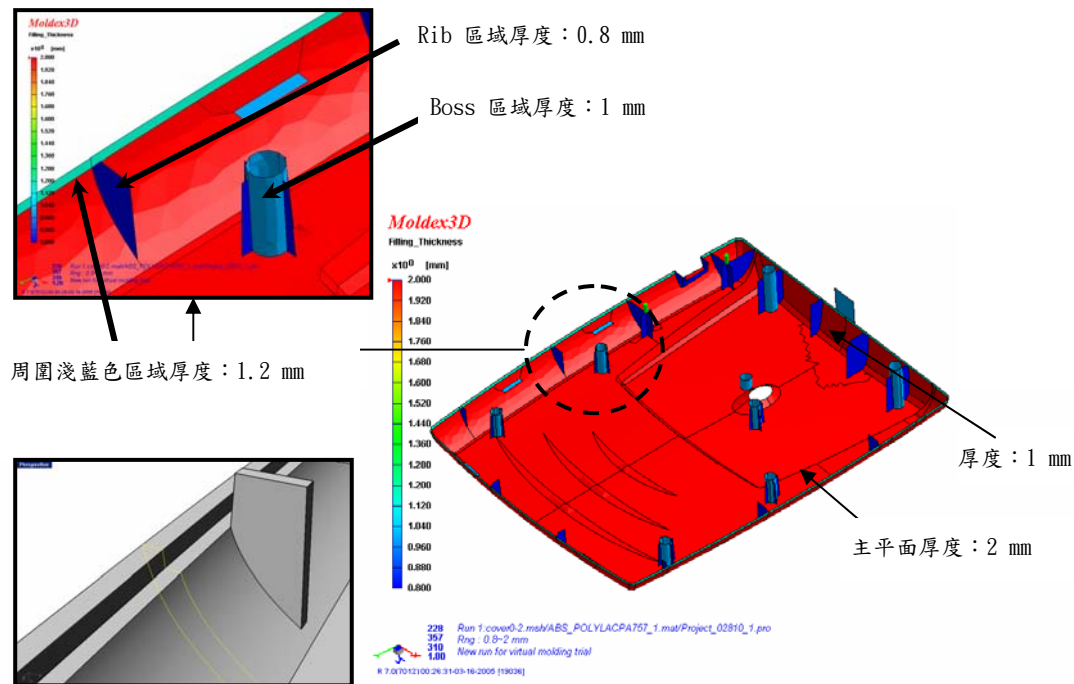


圖 5.2 橋接器產品厚度分佈設計圖

A. 網格模型

為建立成品大小與肉厚最基本組成單位，先將成品型狀、尺寸、厚度建立完成後，做最終網格檢查，確定所有網格都是相連接，以利成品長肉厚及做其他的工程運算。就網格模型所有規格與測試數據如下：網格總數 = 12177；節點總數 = 6502；使用電腦規格：Intel P4 2.0 GHz，記憶體需求：RAM 512 MB *3；所有電腦計算所需時間：充填保壓分析 (MB) = 24.8；冷卻分析 (MB) = 25.8；翹曲分析 (MB) = 27.8；流動分析 = 2.2 小時；冷卻分析 = 2.1 小時；翹曲分析 = 192 秒，如圖 (5.3) 所示。

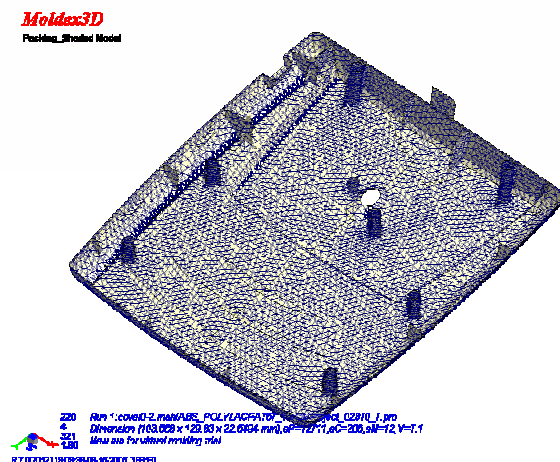


圖 5.3 橋接器網格模型圖

B. 材料特性

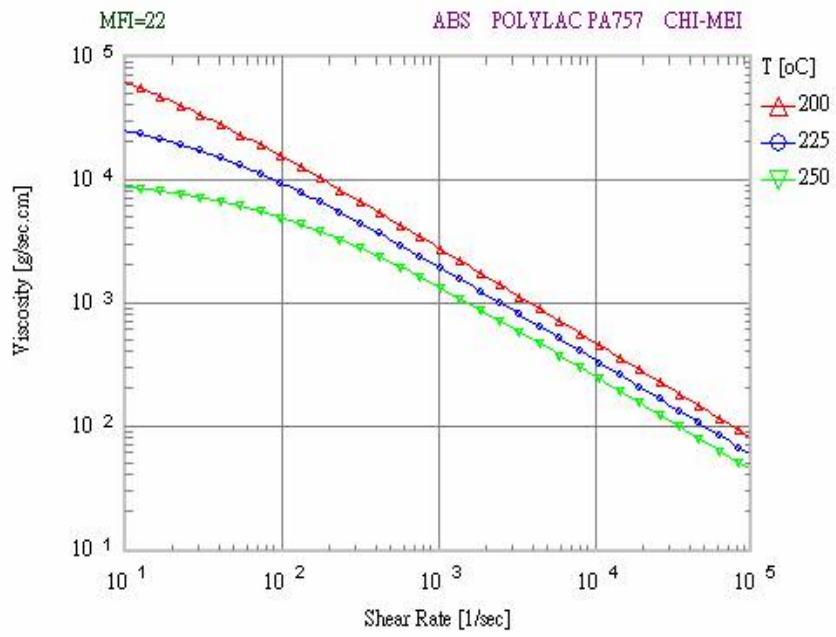
以成品的塑膠材料(包括了奇美/ABS/PA757 與奇美/ABS/PA746)等兩種的特性,為初步的分析,包含材料黏度(Viscosity)、PVT 關係(P-V-T Relationship)、比熱(Heat Capacity)、熱傳導係數(Thermal Conduction)等四大部分,然後依分析結果討論,如圖(5.4)所示[7]。詳細說明如下:

(1)黏度(Viscosity):流體流動阻力的度量。黏度越高,流動阻力越大,流動越困難,對一般熱塑性塑料,黏度是塑料成分、溫度、壓力及剪切率的函數。就溫度效應而言,熱塑性塑料的黏度,一般隨溫度升高而有降低的情形。就剪切率(Shear rate)的效應而言;剪切率越高,代表加工變形速率越大,由於高分子鏈被排向的結果,使大部份的塑料具有黏度隨剪切率升高而下降的切變致稀性(shear-thinning),如圖(5.4a1)與圖(5.4a2)所示。

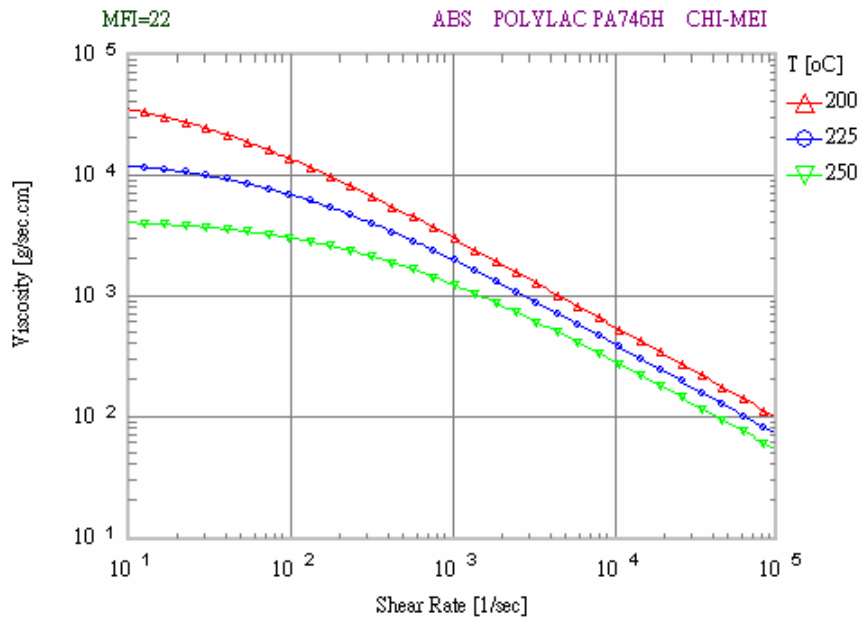
(2)PVT 關係(P-V-T Relationship):塑料的比容或密度是相狀態、溫度、壓力等的函數,一般而言可利用狀態方程式(State equation)或P-V-T 方程式加以定量化;一但模式參數由實驗取得,代入此方程式中即可求得塑料,在某一溫度壓力下的比容或密度值,如圖(5.4b1)與圖(5.4b2)所示。

(3)比熱(Heat Capacity):欲將單位塑料溫度,提高一度所需的熱量,是塑料溫度容易改變與否的度量;比熱越高,塑料溫度越不容易變化,反之亦然,如圖(5.4c1)與圖(5.4c2)所示。

(4)熱傳導係數(Thermal Conduction):塑料熱傳導(thermal conduction)特性的度量,熱傳導係數越高,熱傳導效果越佳。塑料於加工過程中溫度傾向均勻,較不會因熱量局部堆積而有熱點(hot spot)產生;熱傳導係數及比熱攸關塑料之熱傳、冷卻性質,亦影響到冷卻時間長短,如圖(5.4d1)與圖(5.4d2)所示。

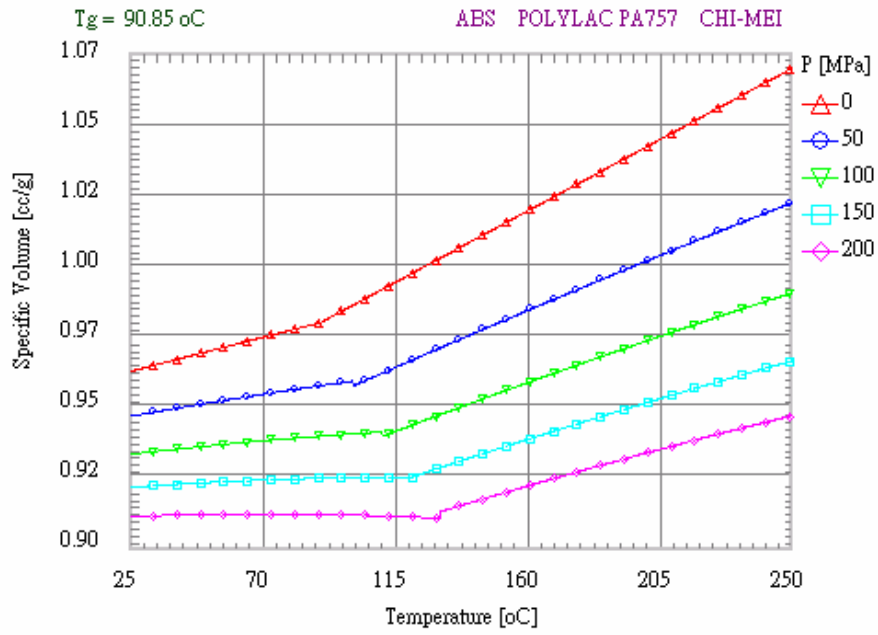


(a1) 奇美/ABS/PA757 黏度(Viscosity)[7]

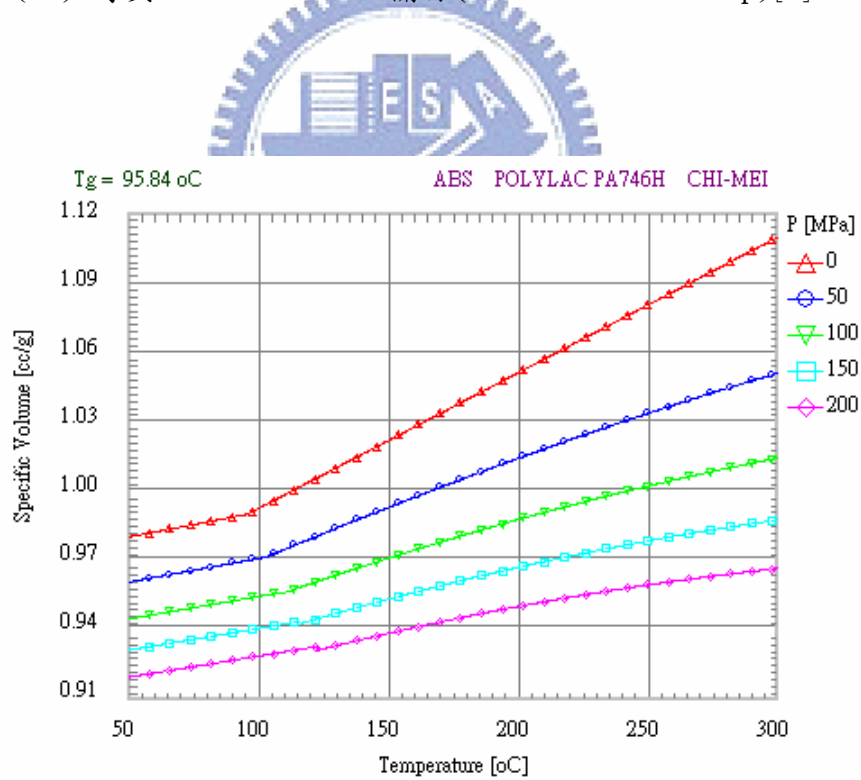


(a2) 奇美/ABS/PA746 黏度(Viscosity)[7]

圖 5.4 ABS 材料的黏度、PVT 關係、比熱、熱傳導係數特性

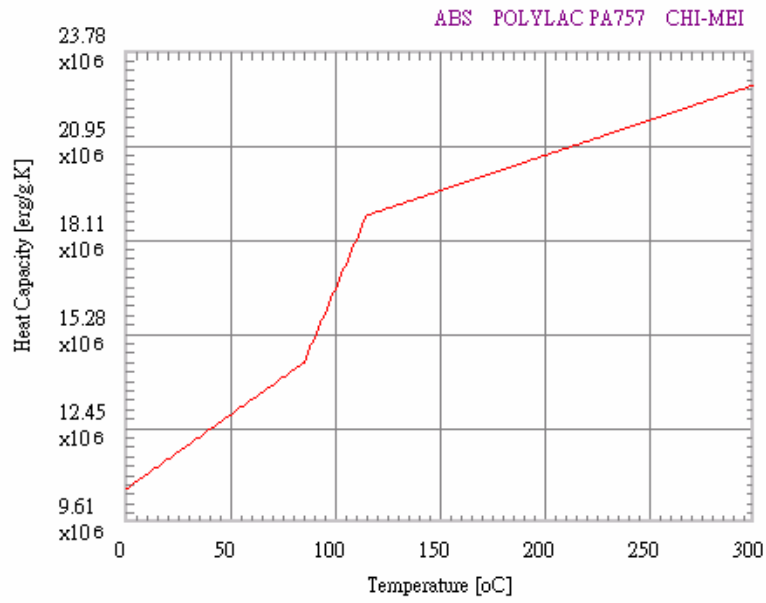


(b1) 奇美/ABS/PA757 PVT 關係(P-V-T Relationship)[7]

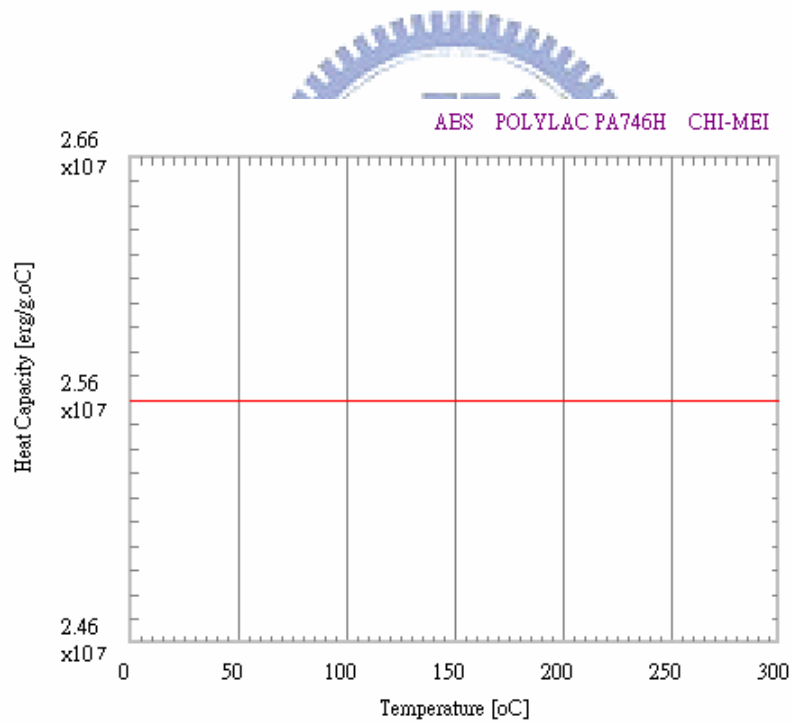


(b2) 奇美/ABS/PA746 PVT 關係(P-V-T Relationship)[7]

圖 5.4 ABS 材料的黏度、PVT 關係、比熱、熱傳導係數特性

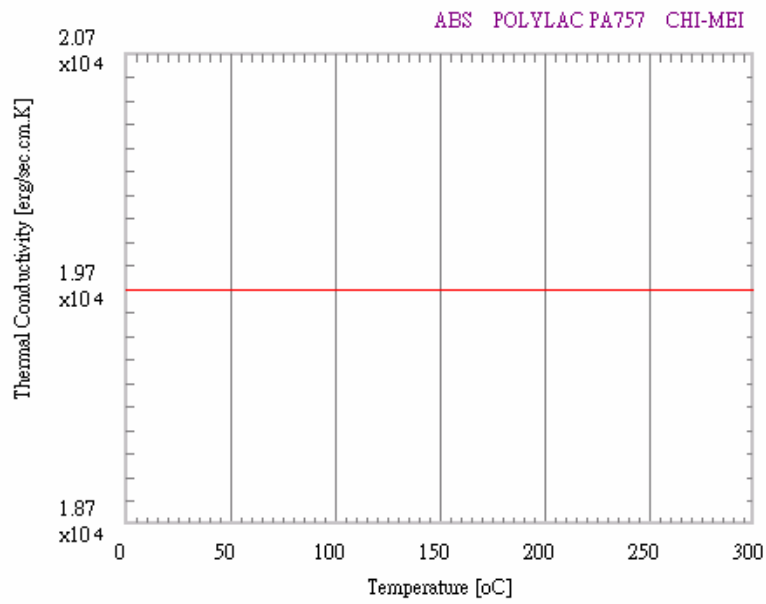


(c1) 奇美/ABS/PA757 比熱(Heat Capacity)[7]

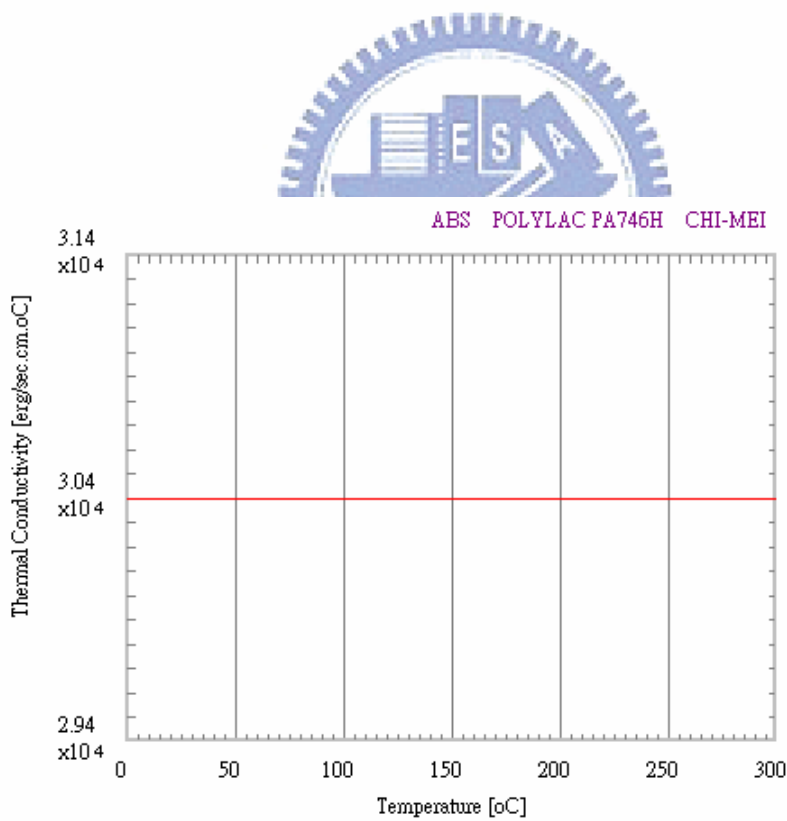


(c2) 奇美/ABS/PA746 比熱(Heat Capacity)[7]

圖 5.4 ABS 材料的黏度、PVT 關係、比熱、熱傳導係數特性



(d1) 奇美/ABS/PA757 熱傳導係數(Thermal Conduction)[7]



(d2) 奇美/ABS/PA746 熱傳導係數(Thermal Conduction)[7]

圖 5.4 ABS 材料的黏度、PVT 關係、比熱、熱傳導係數特性

C. 加工條件設定

射出成型品質的好壞，最重要的關鍵及技巧，在於製程條件的安排及設定，同時應一起考慮塑膠材料、射出成型機、模具，冷卻系統、環境溫度等因素，任何成品皆需經過此道關卡，才能將成品順利完成，達到品質標準要求，如圖（5.5）所示。

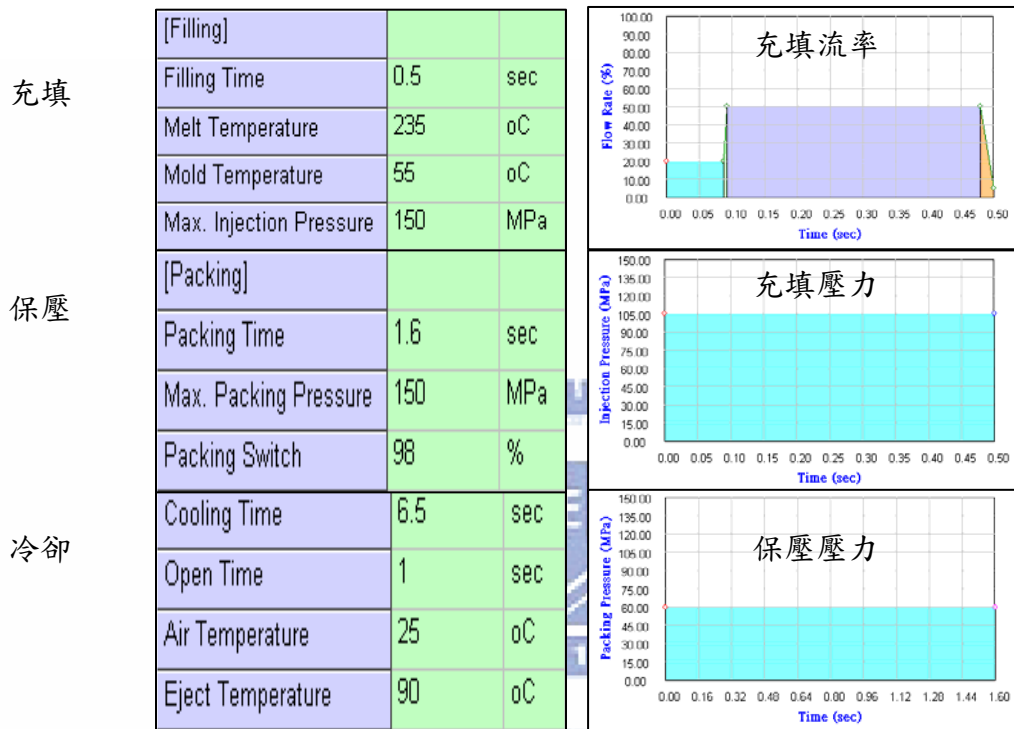


圖 5.5 用以設定射出成型加工條件的圖表

D. 流道佈置

安排射出成型，塑料流動的方式及路徑，是攸關塑料充填最重要的因素。流道佈置安排應以平均充填為主，儘量以最短行逕為最佳首選，同時應考慮冷料井設計，並以減少流道廢料的設計為最優先，如圖（5.6）所示。其說明如下：(1)冷流道直徑3→8mm；(2)冷流道直徑6mm；(3)冷流道直徑6→0.8mm；(4)進澆厚度1mm；流道總體積為：2.75 C.C.。

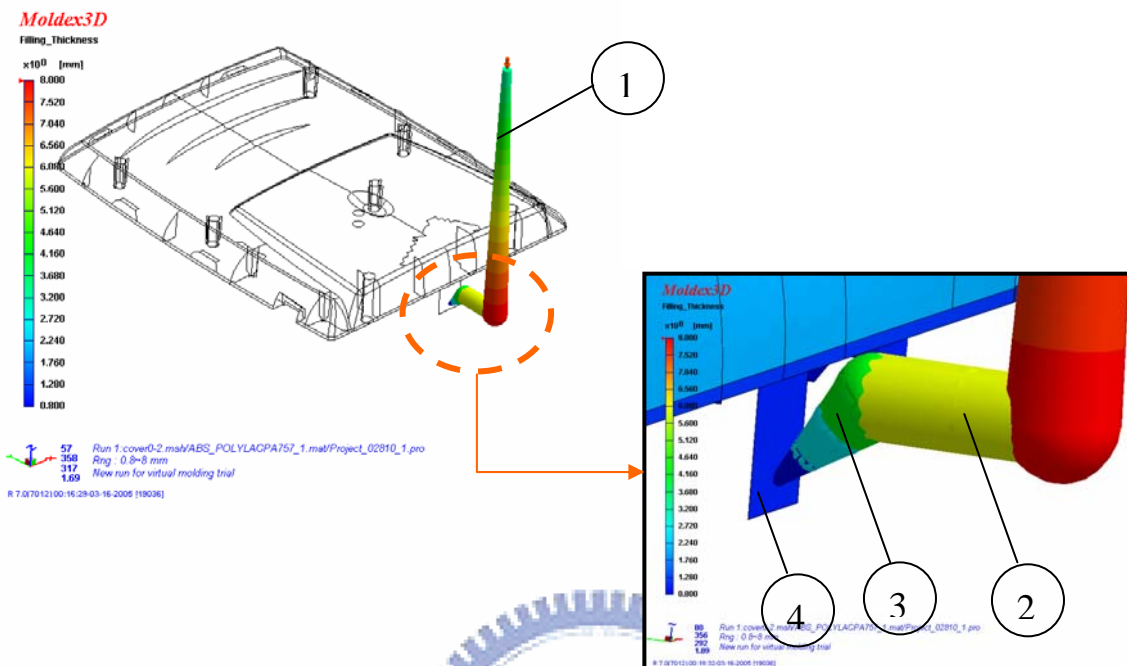


圖 5.6 成型模具流道設計說明

E. 初步充填分析與流動波前圖

藉由不同範圍的模穴充填模擬啟動前圖，或是流動波前動畫，可看塑料在模穴中流動波前各階段的充填情形，並可預測縫合線及包封等位置，且可判斷是否會有短射現象發生，提供排氣孔位置安排等參考。

包括射出成型模穴充填模擬啟動前，如圖（5.7）所示；充填 25~30%，如圖（5.8）所示，（說明(a)：一般而言，塑料的充填會趨向阻力最小的區域流動，因此區域厚度 0.8 mm 較薄，阻力較大，流動有些微遲滯的情況）；充填 40~60%，如圖（5.9）所示、充填 75~80%，如圖（5.10）所示；充填 90~95%，如圖（5.11）所示；模穴充填模擬即將充填完成時(充填 98~100%)，如圖（5.12）所示等階段。

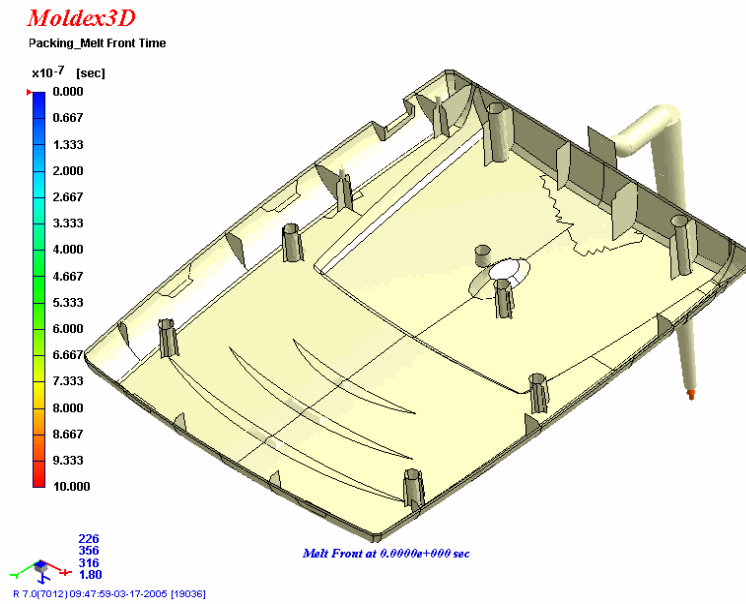


圖 5.7 橋接器射出成型模穴充填模擬啟動前

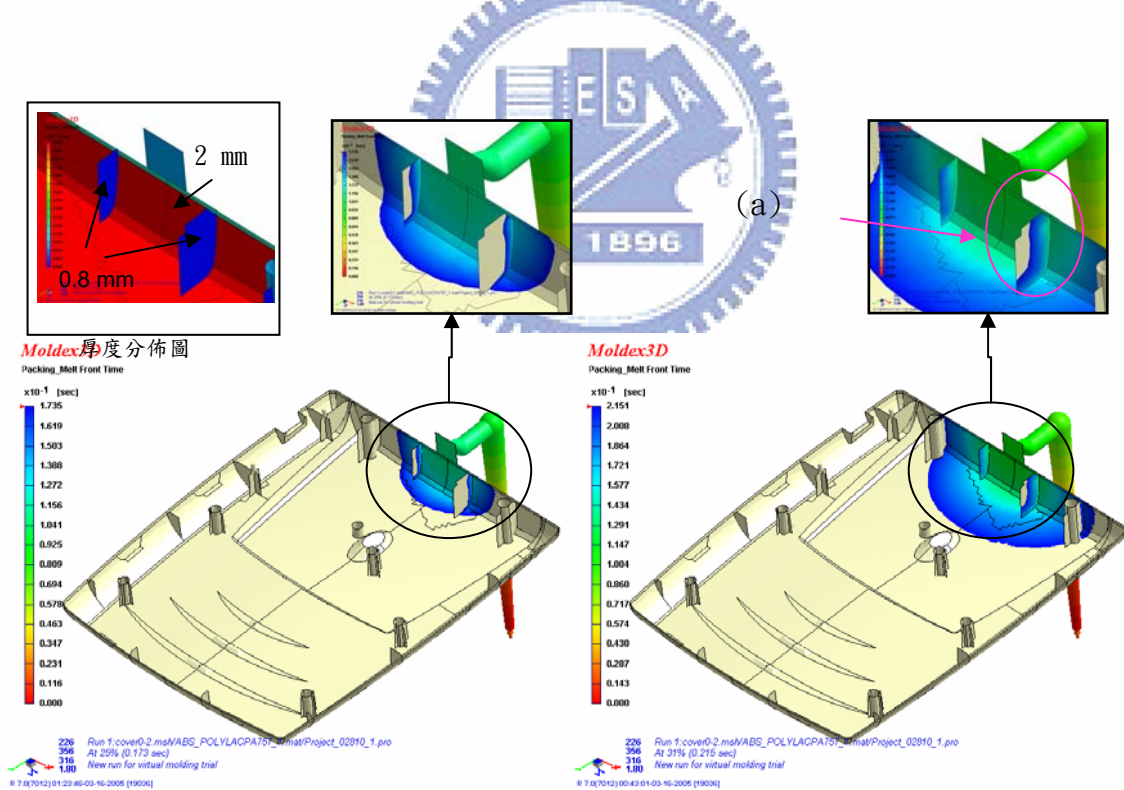


圖 5.8 橋接器模穴充填模擬至 25~30% 時

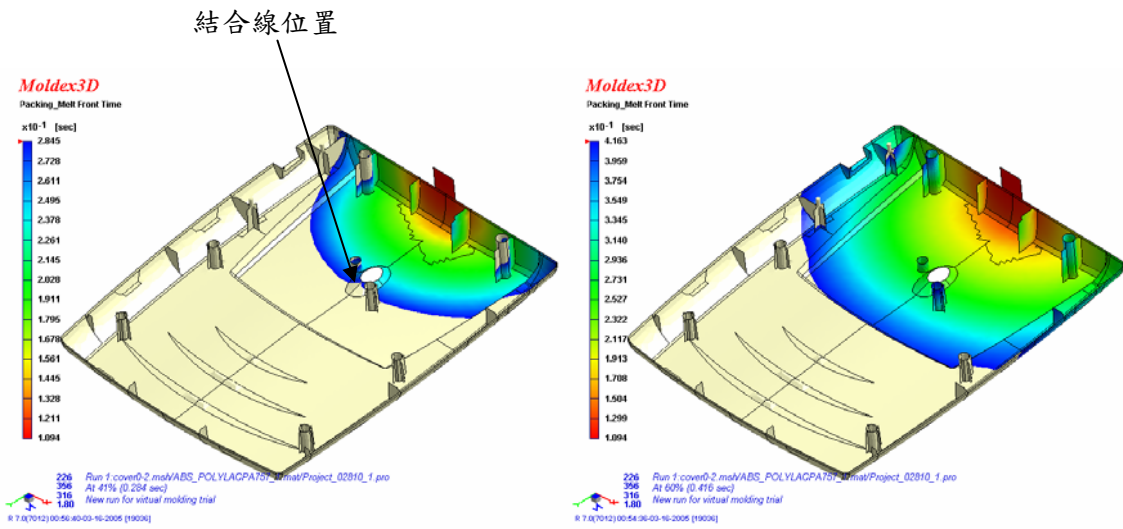


圖 5.9 橋接器模穴充填模擬至 40~60% 時

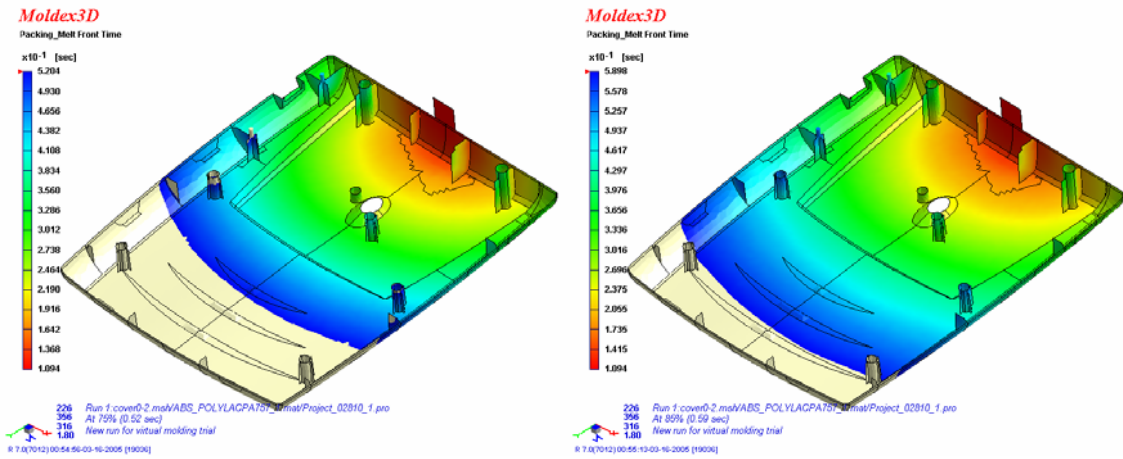


圖 5.10 橋接器模穴充填模擬至 75~80%時

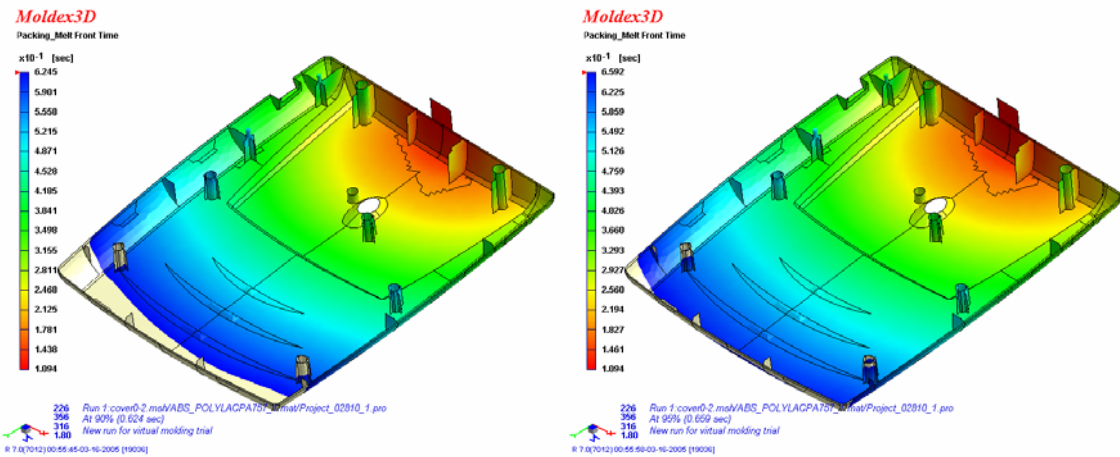


圖 5.11 橋接器模穴充填模擬至 90~95%時

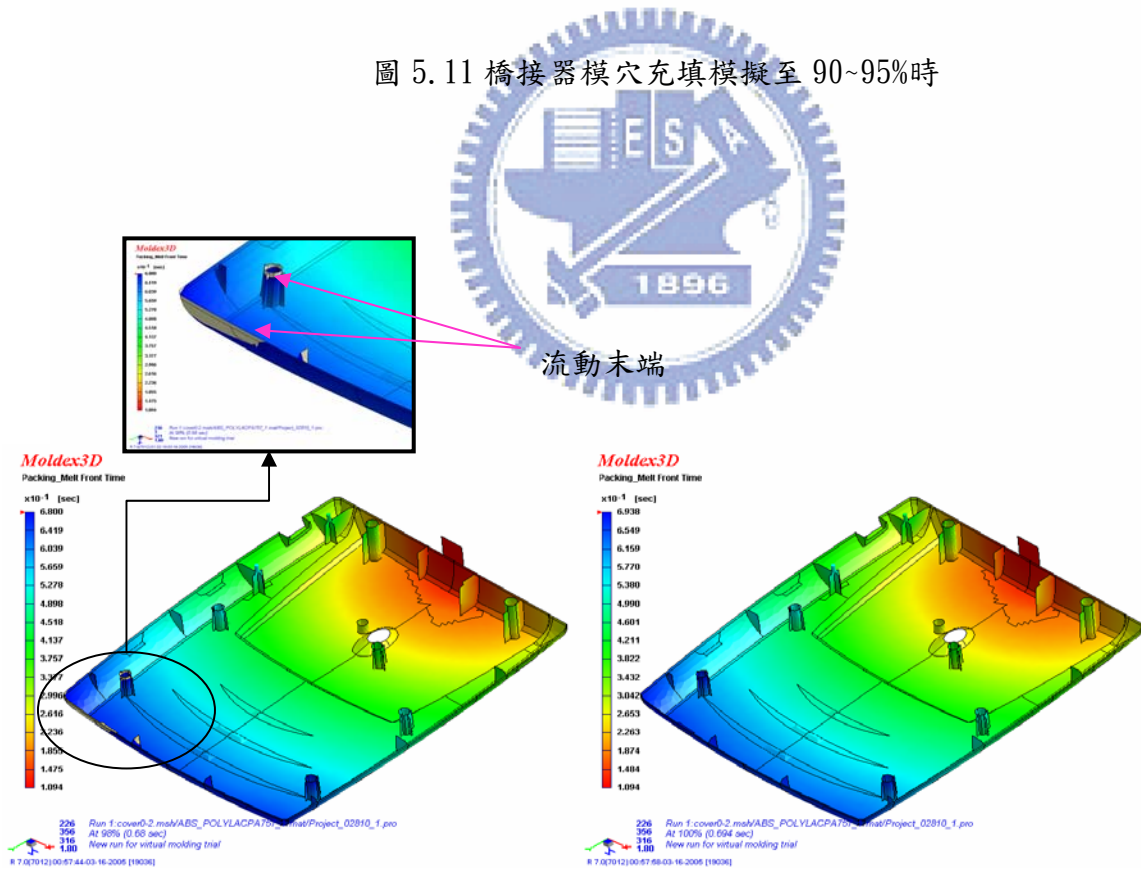


圖 5.12 橋接器模穴充填模擬即將充填完成時

F. 熔接線形成

可分為熱熔接線，發生於充填過程中，熔接溫度較高；當熱熔接線的熔接角大於120~150度時，熱熔接線的痕跡較不明顯；而冷熔接線，發生於充填即將結束時，熔合溫度較低，熔接線痕跡明顯，熔接角接近0度，如圖(5.13)所示。

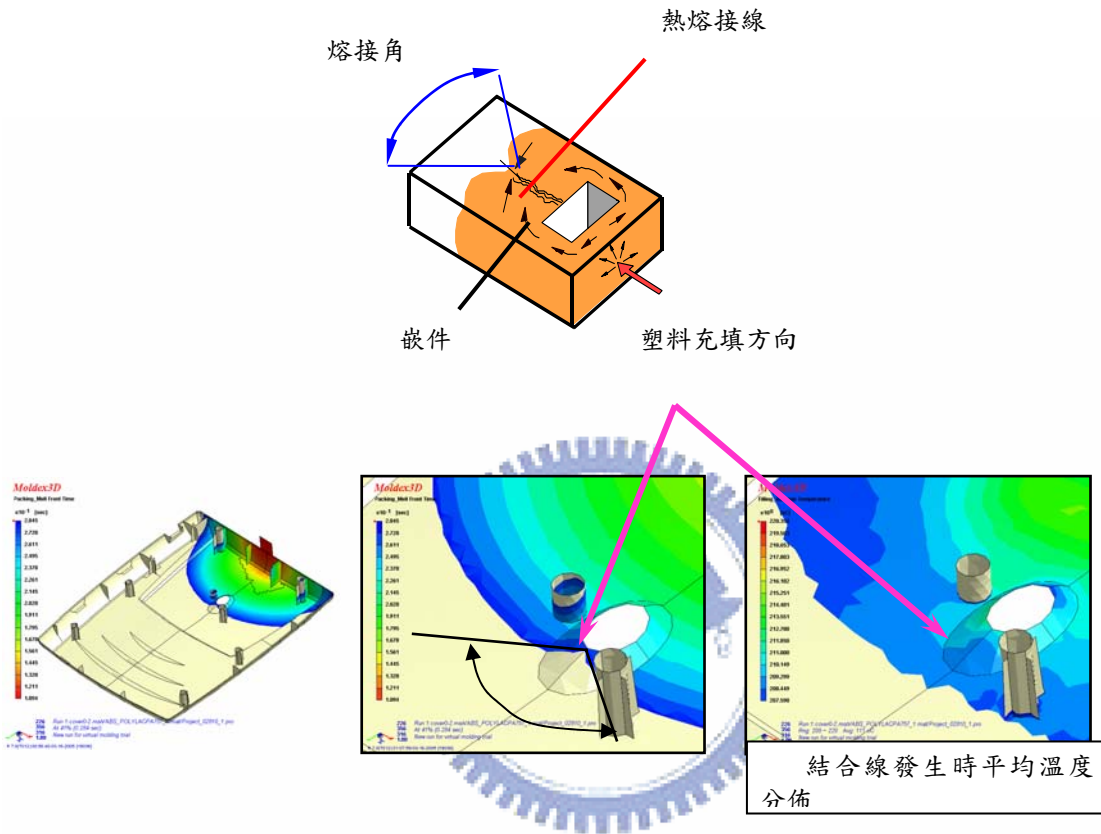


圖 5.13 成型中熔接線的形成

5.5 初步模擬分析

此分析主要進行模式，先進行初步的分析，包含的模流分析的四大部份；如 Flow (充填)、Pack (保壓)、Cool (冷卻)、Warp (翹曲)等，然後依分析結果討論，詳細說明如下：

A. 充填分析結果說明

分析結果：包括中心溫度分佈圖，如圖(5.14a)所示，說明：(aa)此Rib 因厚度0.8 mm較薄，且先充填完畢先冷卻，至充填結束時中心溫度已冷卻至134~141°C)；成型充填結束瞬間，塑件肉厚方向中心層的温度分佈情形。平均溫度分佈圖，如圖(5.14b)所示；顯示充填結束瞬間塑件，在厚度方向的平均溫度。容積溫度分佈圖，如圖(5.14c)

所示；(說明：(cc)此區域溫度較高有黏滯生熱的現象)，容積溫度指厚度方向的體積加權平均料溫，此數據忽略來自不流動固化層的溫度加權，因此可以顯示熱對流，及黏滯加熱對溫度的效應；此數據可視為融膠熱對流對溫度分佈的效應。

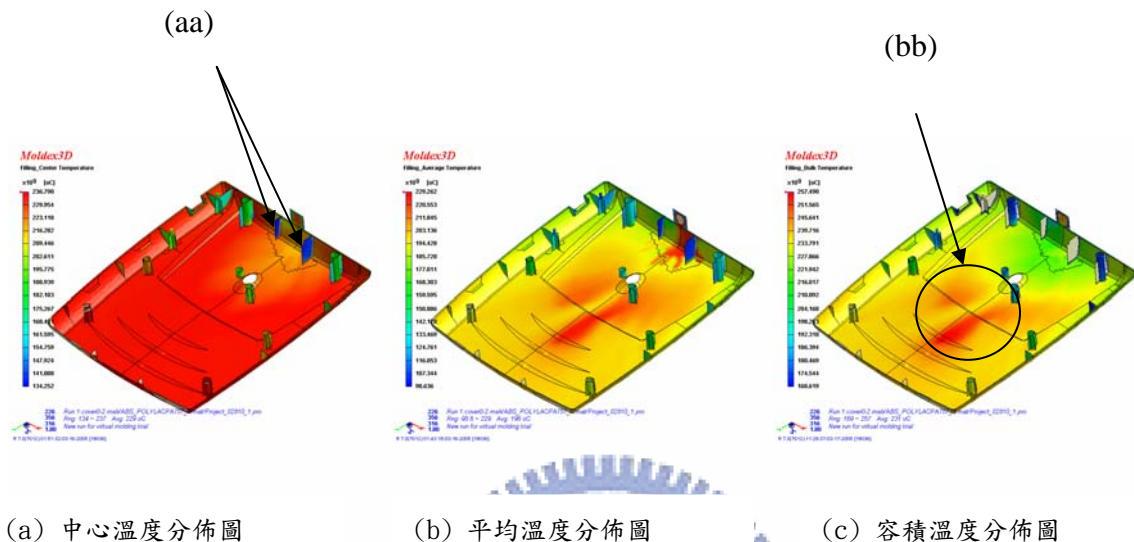


圖 5.14 成型充填的溫度分佈：(a)中心溫度，(b)平均溫度，(c)容積溫度

(1) **剪切率分佈**：顯示充填結束瞬間剪切率分布情形，剪切率指塑料成型加工，過程中的特徵形變速率，剪切率越高，代表形變速率越高，塑料高分子鏈，被高速剪切變形而順向排列。因此剪切率分佈，與速度梯度(變化量)，黏滯加熱以及分子鏈配向性有關，剪切率過高會破壞高分子鏈，造成成型塑件局部劣化，同時高剪切率也有可能，導致過量黏滯加熱造成塑件燒焦，如圖(5.15)所示；(說明：(a)一般而言，在均一肉厚的情況下，塑料的充填會以最短距離進行，而此區域充填速度也較其它區域快；(b)此區域因充填速度較快，剪切率高，造成黏滯生熱，溫度上升)。

(2) **壓力分佈**：顯示充填結束瞬間各處的壓力值，由流道至充填末端漸減，最大壓力值可提供射出機之鎖模力值，壓力分布是否均勻顯示壓力傳遞效果。評估模具中肉厚及溫度，對於壓力分布及損耗的影響，如圖(5.16)所示。(說明：(a)成品壓力分佈在0~47MPa，此區域顏色變化較為劇烈，壓力損失也較高；(b)此成型所需壓力約78.4 MPa，流道壓力降約31 MPa)。

(3) **剪切應力分佈**：顯示充填結束，瞬間模穴各處剪切應力分布情形。剪切應力代表塑料在加工過程中，由於剪切流動，造成的應力大小，可由圖判別塑料流動應力是否過高，以作為是否使塑料產生裂解，及過度殘餘應力(residual stress)的參考。其值過大

($>1\text{MPa}$)，造成產品日後可能產生斷裂等問題，如圖 (5.17) 所示。(說明：(a)顏色顯示區域為剪切應力在 1MPa 以上的分佈情況)。

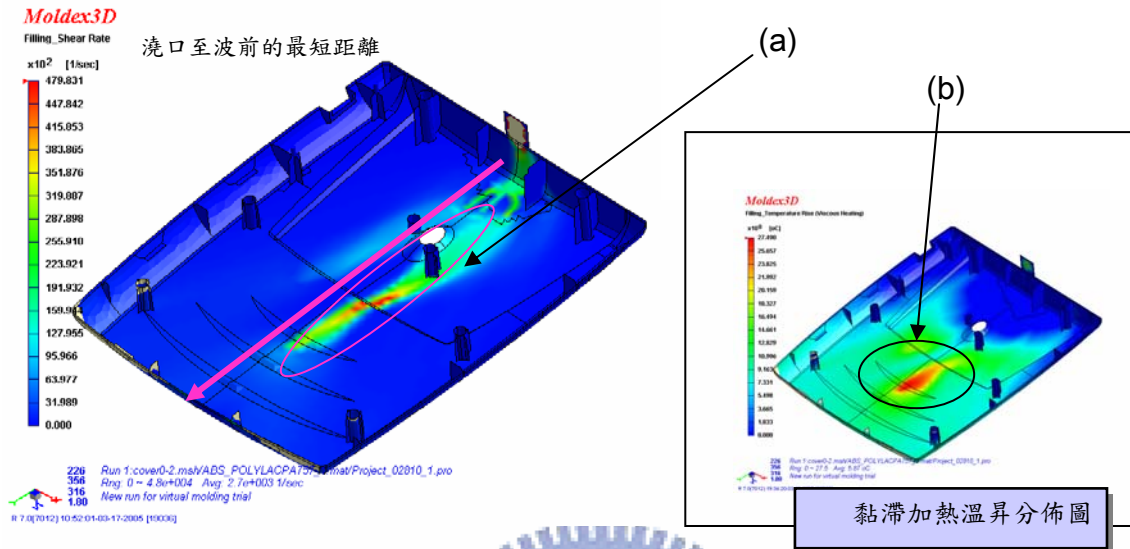


圖 5.15 成型充填剪切率分佈

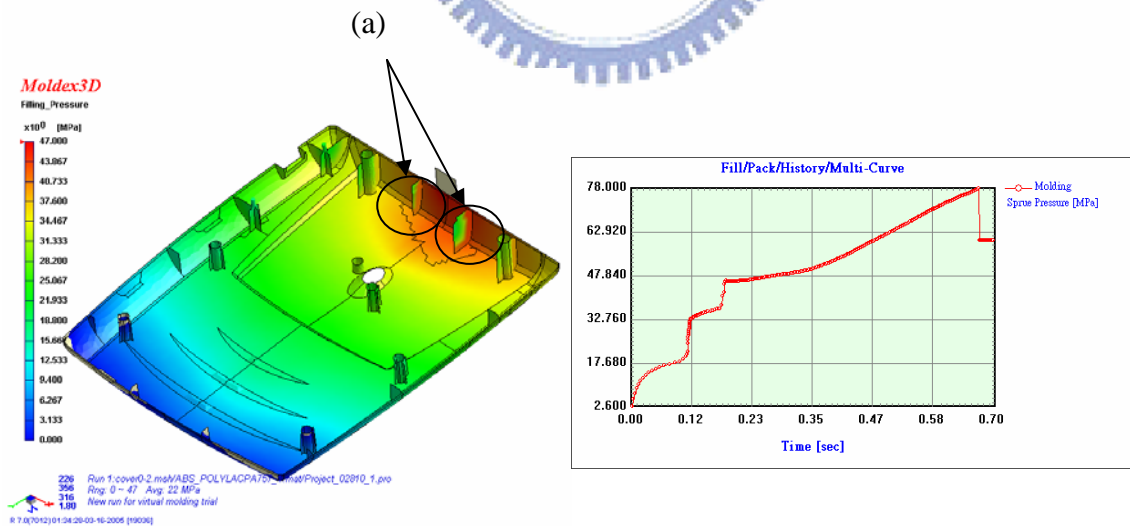


圖 5.16 成型充填壓力分佈

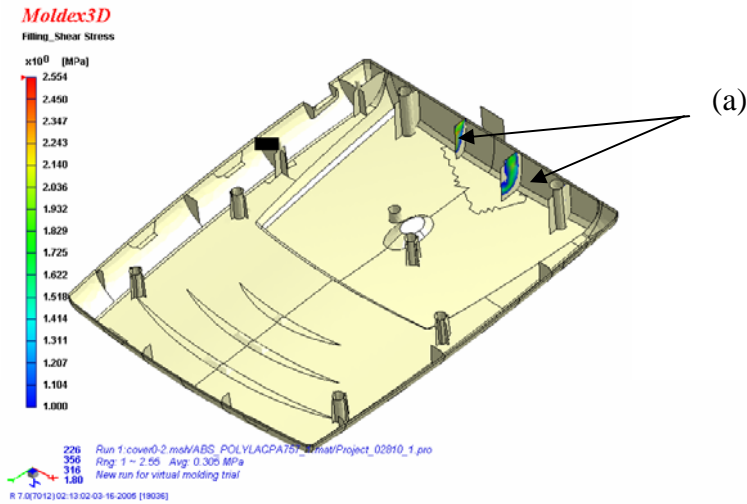
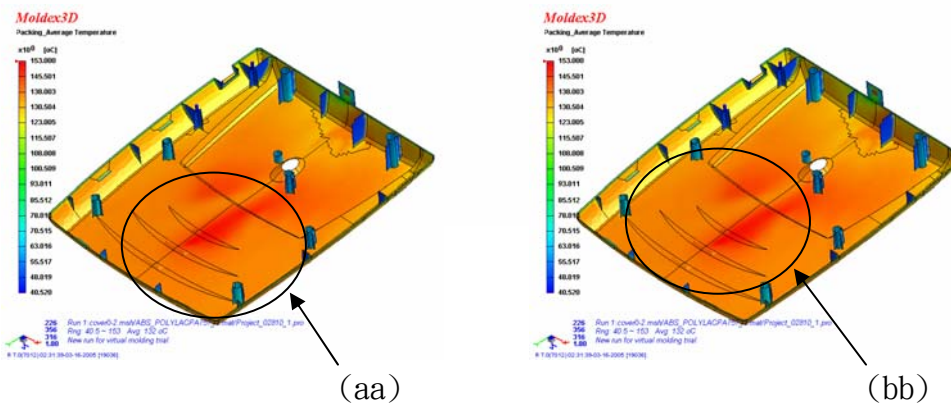


圖 5.17 成型充填剪切應力分佈

B. 保壓分析結果說明

成型製造加工，除應防止成品翹曲、變形、冷卻不良問題外，首重保壓加工。因保壓是關係未來成品尺寸最重要的因素，攸關成品未來是否凹陷與變形等問題，為製程加工重要因素。

(1)溫度分佈：中心溫度分佈圖，如圖(5.18a)所示；顯示保壓結束瞬間，塑件肉厚方向中心層的溫度分布情形，(說明：(aa)保壓結束時，中心溫度分佈在45~212°C之間)。平均溫度分佈圖，如圖(5.18b)所示；顯示保壓結束瞬間塑件在厚度方向的平均溫度。(說明：(bb)保壓結束時，平均溫度分佈在41~153°C之間，此區域因充填有黏滯加熱的現象，造成溫度較其它區域高)。



(a) 中心溫度分佈圖

(b) 平均溫度分佈圖

圖 5.18 保壓溫度分佈：(a)中心溫度，(b)平均溫度

(2)壓力分佈：如圖 (5.19) 所示，顯示保壓結束瞬間各處的壓力值，由流道至充填末端漸減，最大壓力值可提供射出機之鎖模力值。壓力分布是否均勻，顯示壓力傳遞效果，評估模具中肉厚及溫度，對於壓力分布及損耗的影響。說明：保壓壓力分佈在0~30MPa，保壓結束，澆口區域平均溫度均已降至120°C左右，壓力已較難傳遞。

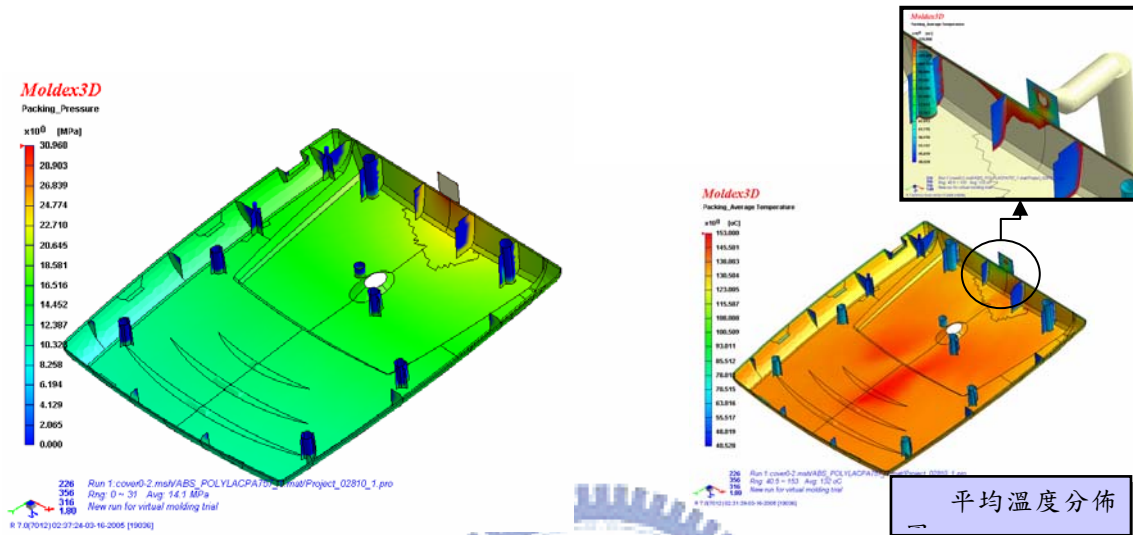


圖 5.19 成型充填壓力分佈

(3)體積收縮率分佈：如圖 (5.20) 所示，顯示塑件自充填與保壓結束後，冷卻至室溫常壓時的體積收縮率值，提供成形條件其保壓效果，及翹曲變形等之參考。正值代表『收縮』，負值代表塑件『膨脹』，但往往發生在壓力設定過高，或塑件太薄的情形。故此值愈小，代表產品收縮量愈小；若分佈不均，產品易造成翹曲變形。(說明：(a)體積收縮率分佈在0~4.4%，此區域溫度較高，收縮也較大)。

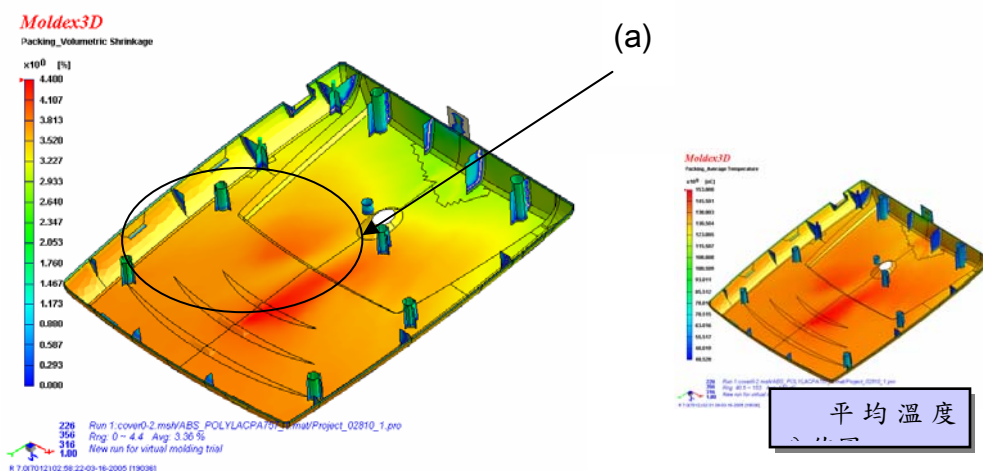


圖 5.20 成型充填體積收縮率分佈

C. 冷卻分析結果說明

冷卻分析的目的在於控制模具冷卻系統效率，於成品於射出成型加工時可觀察成品的品質殘留溫度的狀況，做為目前初步冷卻分析的參考。而冷卻時間，越短越好；此值越小，代表成品尺寸收縮率也越小，品質可越趨穩定；若冷卻分佈不均，成品易造成翹曲、變形，形成無法挽救的問題。

(1) **冷卻水路配置**：如圖 (5.21) 所示，成型品厚度愈厚，冷卻時間愈長。一般而言，冷卻時間與塑件厚度的平方成正比。也就是厚度加倍，冷卻時間增加四倍，(冷卻時間 $t_c = h^2$)。水路配置，越靠近模穴，管徑越大，數目越多，冷卻效果越佳，冷卻時間越短。(說明：冷卻水路配置，其水路直徑為8 mm，水路溫度 30°C)。

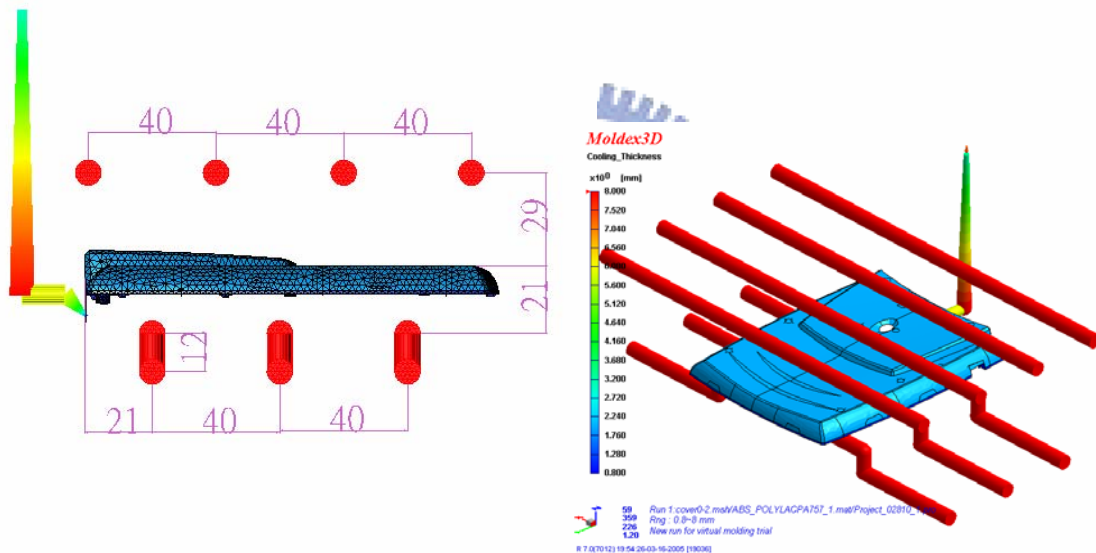


圖 5.21 成型充填冷卻水路的配置

(2) **模溫分佈**：如圖 (5.22) 所示，在射出成型加工過程中的週期平均(cycle-averaged)溫度分佈，由於在成型過程中模溫，與料溫會隨時間而變，週期平均代表取整個成型週期過程中的平均值。(說明：(a)此Boss因較高，積熱較為嚴重；在公模面顏色大部份分佈在淺藍色及黃綠色區域，溫度約在53~71°C。而母模面顏色分佈在藍色及淺綠色區域，溫度約在46~60°C；因此公模面部位受熱溫度較高，而母模面部位溫度較低)。

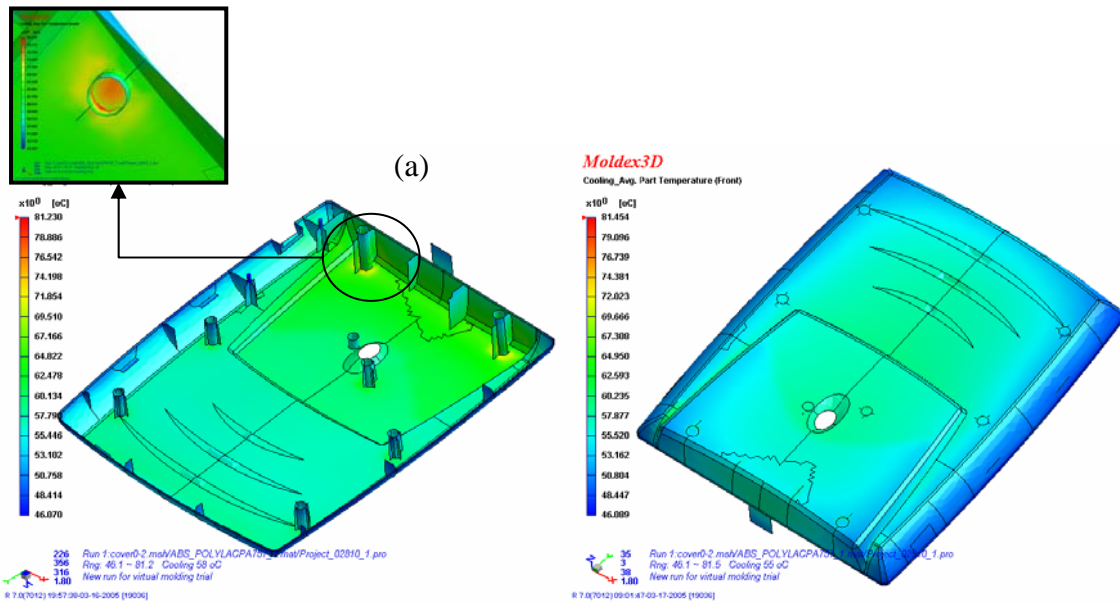


圖 5.22 成型充填模溫分佈

(2) 模溫差分佈：如圖 (5.23) 所示，指塑件上下模面之平均模溫差分佈，一般而言即是公模及母模 (模仁和模穴側) 的模面溫度差。此溫度差值愈低愈好，表示上下模面溫度相近，可達到均勻冷卻的效果，避免塑件厚度兩側冷卻不均，所造成的翹曲變形。就精密成型而言，上下模溫差應需控制在 5°C 以內。(說明：(a)此區域因在公模面的結構為Boss，且較高，積熱嚴重，模溫差也相對較高)。

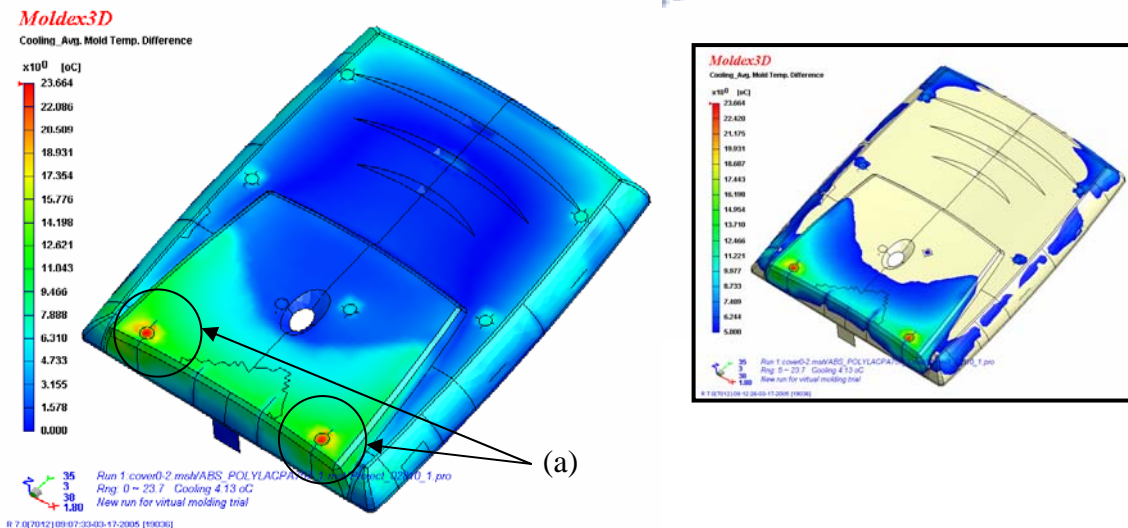


圖 5.23 成型充填模溫差分佈

D. 翹曲分析結果說明

成品設計影響未來，射出成型製程加工品質優劣，尤其是翹曲、變形等因素；故應考慮模具的冷卻效率，並可用來判別冷卻是否均勻，冷卻系統設計是否良好的指標。X方向位移量分佈，X方向位移量分佈，值在-0.62~0.64 mm，如圖（5.24）所示；Y方向位移量分佈，Y方向位移量分佈，值在-0.82~0.64 mm、如圖（5.25）所示；Z方向位移量分佈，Z方向位移量分佈，值在-0.19~0.51 mm，如圖（5.26）所示；顯示塑件脫模後，冷卻至室溫常壓下，在三個座標方向的總尺寸變化(位移)，此分布值與座標系統選擇有關。例如正值代表在 +x、+y、+z方向的位移，負值代表在 -x、-y、-z方向的位移；此位移為總位移，考慮了P-V-T與模溫的綜合效應。此值為線性收縮率(Linear shrinkage)的度量，也是模具設計時尺寸補償的參考。Z方向熱位移量分佈，其值在-0.05~0.03 mm，影響的效應相當的小，如圖（5.27）所示。

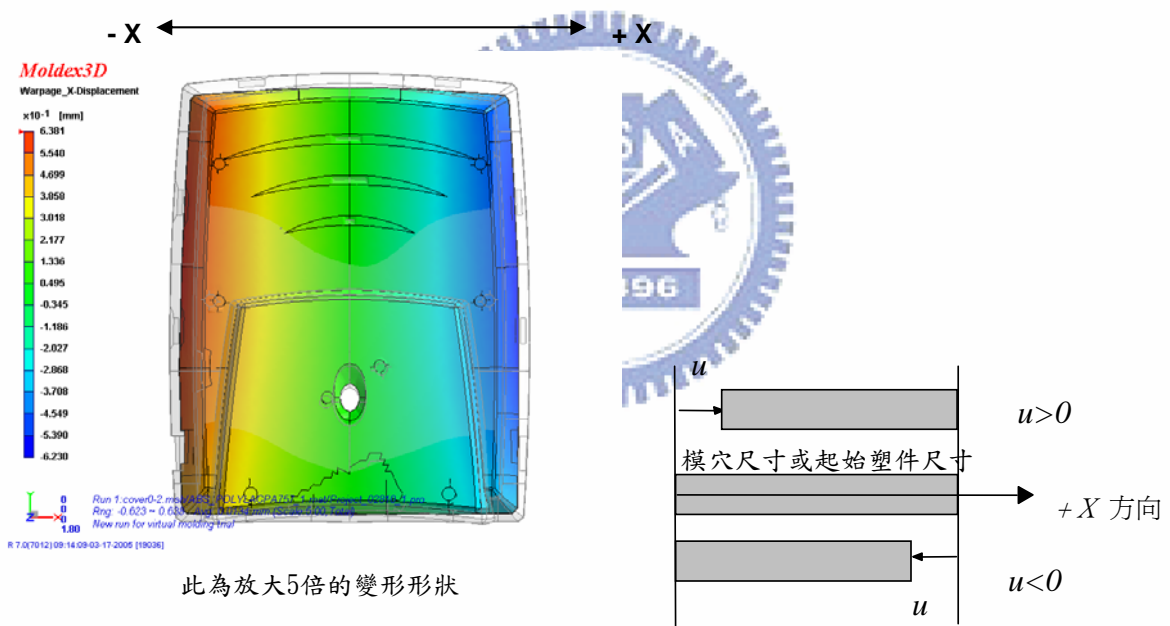


圖 5.24 成型充填 X 方向位移量分佈

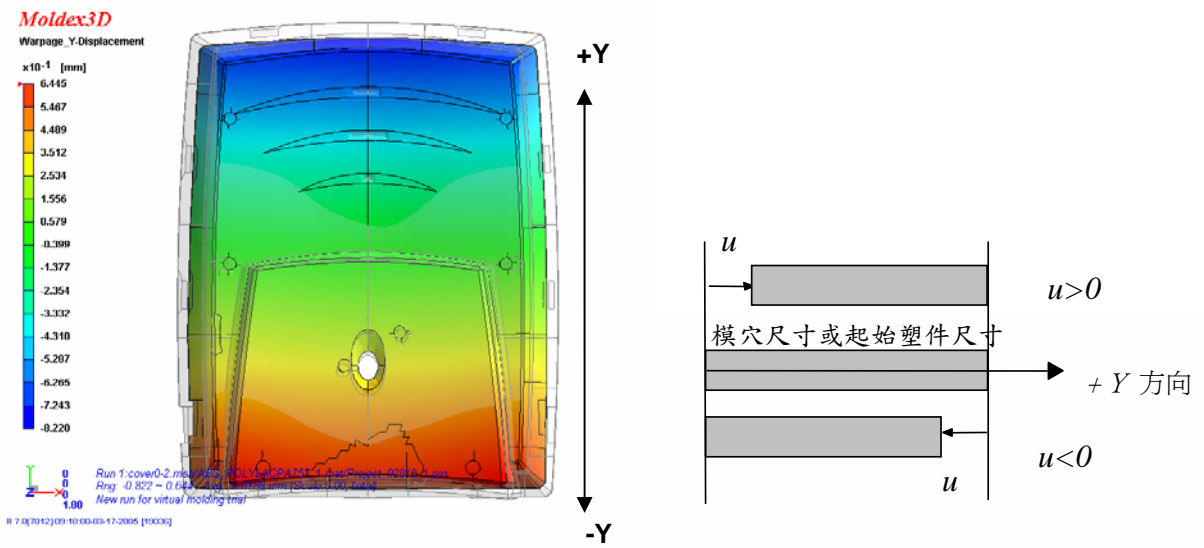


圖 5.25 成型充填 Y 方向位移量分佈

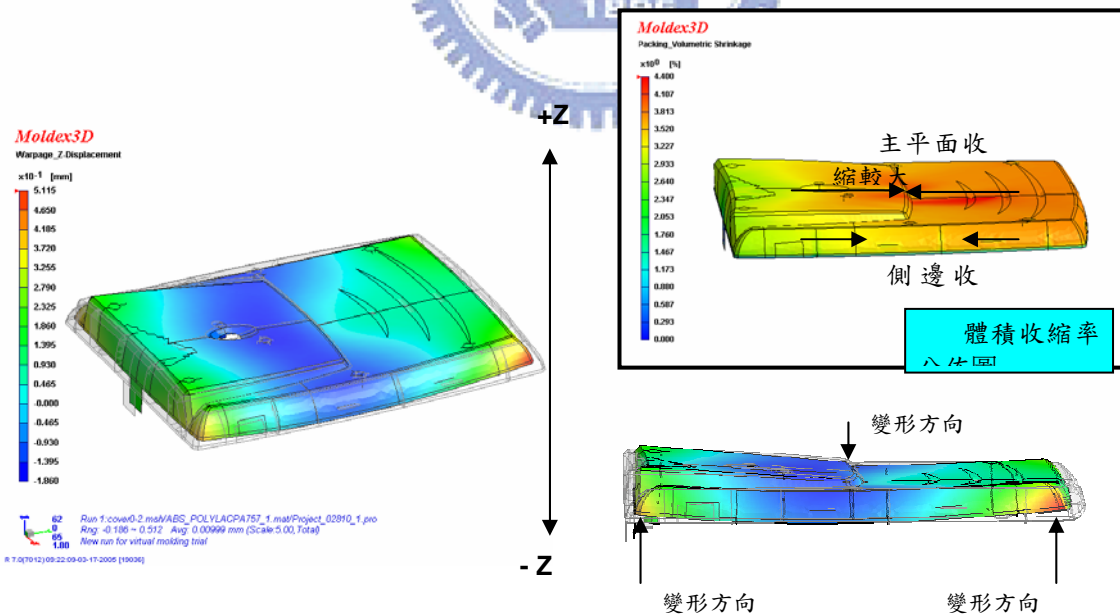


圖 5.26 成型充填 Z 方向位移量分佈

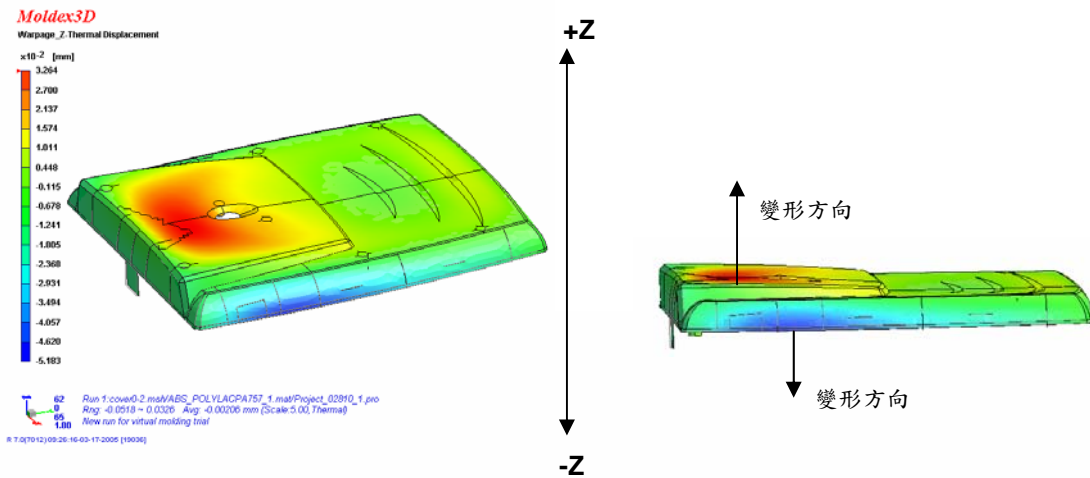


圖 5.27 成型充填 Z 方向熱位移量分佈

5.6 結語

本章以無線通訊產品橋接器 (Access Point) 外殼為 CAE 模流分析作業模擬主體對象，所做的分析充分顯示 CAE 模流分析的功能及效用。

然而 CAE 模流分析只是一種電腦工具，使用效益大小取決於操作者要如何發揮其功能，但錯誤的輸入可能得到反效果，遭受更大的損失；若要能發揮 CAE 的功能，關於準確性的一些基本的觀念，需要事先瞭解理論未完全發展完成前，仍有簡化與假設可能導致誤差；利用電腦運算與數值方法求解時，為求達到收斂得解，會有部份計算誤差的發生，其物性數據的真實性，含測試誤差與製程穩定性，都可能是人為操作上的誤差。

一般說來，模型的建立尺寸精確度等，用 CAE 模流分析得解的誤差值，不見得都能小於模具容許公差，但不要認為 CAE 模流分析，不夠準確或失去實用性。但現實上，理論與實務雖仍有差距，但相對的 CAE 模流分析，提供了詳盡的數據輔助判斷，相較傳統經驗試誤法仍是大幅提升了設計上的效益。