

活塞外型與閥門昇程對缸內直噴引擎內流場之影響

EFFECT OF PISTON GEOMETRY AND VALVE LIFT ON IN-CYLINDER FLOW IN A MOTORCYCLE GDI ENGINE

蔡欣倫¹, 陳志源²

(高苑科技大學電子工程系暨先進潔淨節能引擎開發與測試服務中心)¹

(加州大學柏克萊分校機械工程系)²

摘要: 本研究之目的乃採用專業內燃機發動機流場分析軟體: STAR-CD/ES-ICE, 建立摩托車缸內直噴引擎格點, 並利用其求解器進行整個循環之缸內流場特性分析, 探討活塞形狀改變及採用不同閥門昇程與正時策略之影響。由缸內流場定量分析結果發現, 淺凹活塞可產生較大紊流動能及較強正向滾流; 在缸內漩流比方面, 淺凹活塞較弱且與平頂活塞漩渦方向不同, 在搭配實驗閥門策略, 淺凹活塞之漩流強度略增強, 而平頂活塞條件漩渦方向會反向且強度與淺凹情況相當, 因此採用適當閥門昇程與正時策略顯得相當重要, 對於缸內流場具有主導作用, 應會增益 GDI 測試時缸內油氣混合情況。

关键词: 缸內直噴引擎、活塞形狀、閥門昇程/正時、數值模擬

Abstract: The Professional Internal Combustion Engine Flow Solver package, STAR-CD/ES-ICE was used to create the motorcycle GDI engine grids and calculate the full-cycle in-cylinder flow characteristics under two different piston geometries, and valve lifts and timings. The results revealed that the cavity piston could result in larger turbulent kinetic energy and stronger normal tumble ratio than the flat one. In the swirl ratio, the cavity piston exhibits weaker, and different direction compared to the flat piston. By adopting experimental valve lifts/timings, swirl ration in the cavity piston is enhanced, and the swirl direction in flat piston changes. It concludes that using the proper valve strategy is quite vital to manage the in-cylinder flow characteristics, and may enhance droplet vaporization and improve fuel mixture preparation in the further GDI engine testing.

Keywords: Gasoline Direct Injection, Piston Shape, Valve Lift/Timing, Numerical Simulation

1 簡介

汽油缸內直接噴射引擎具有很多的潛力與優點, 如: 燃油經濟性佳、高扭力輸出及低污染等等, 此些正面性的特性吸引著汽車與機車引擎業者致力於發展此項技術。在汽油直接噴射引擎內混合油氣的配置在整體紊流燃燒過程中扮演相當重要的角色, 在中高負載時, 汽油直接噴射引擎會在當量比下或稀薄勻相燃燒模式操作, 而在低負載時, 端看是採用何種噴油配置技術(噴霧導引或活塞導引式), 則是採用分層充氣燃燒模式。在缸內直接噴油後, 噴霧的動態特性, 包含: 注油、油柱破裂、燃油霧化及氣化等對於缸內可燃氣的形成與空間分配有著相當重大的影響。

油滴在噴霧燃燒系統中扮演著提供燃油蒸汽的角色, 油滴氣化與燃燒的相關研究是不論在其動態性及能量性角色上看來甚具相當程度的複雜度, 在正常操作下, 摩托車引擎的轉速大約為一般汽車

引擎的兩倍，在摩托車缸內的油滴氣化的時間則是原本汽車的二分之一，而此在缸內直噴的摩托車引擎設計時，選擇適當的燃油噴嘴則顯得相當重要，方能確保在摩托車缸內能夠在有限時間內提供適當的油滴大小及空間分佈以便能夠在有限時間內完全氣化與空氣混合形成適當空間分佈的混合燃氣。先前[1]曾利用一維暫態油滴氣化模擬分析法求解一維油滴氣化行為，找出最大允許油滴半徑可快速地提供相關設計資訊，分析結果發現最大容許油滴尺寸會隨著轉速的增大而變小，而其相互的關係約略與轉速成反比(1/RPM)，在 1000 RPM 時，可看出其最大容許油滴大小為 $61\ \mu\text{m}$ ，而在高轉速 9000 RPM 時，最大容許的油滴大小則為 $21\ \mu\text{m}$ ，因此為了方便使用該結果將其線性擬合找出最大容許尺寸與引擎轉速的關係式，該公式可以提供在設計引擎階段能選定比較能搭配的噴油嘴。

對缸內直噴引擎用汽油噴嘴進行相關的測試，本研究中心[4]利用實驗法量測噴嘴流量，並利用流場可視化以及雷射數位化粒子影像測速(PIV)技術來分析一商用單孔缸內直噴引擎(GDI)用噴嘴之特性。後續模擬分析研究[5]利用內燃機發動機流場分析軟體，建立實驗引擎格點，並且利用其求解器進行冷流場分析與噴霧流場分析，分析設定採用實驗組所量得相關噴油嘴數據，以設定比較合理的模擬分析設定參數，結果顯示有少數油滴從進氣閥門流到進氣道中，初期粒徑大、後期粒徑小，這問題點值得日後引擎改裝設計時加以考量。

由於 KIVA 程式[2, 3]本身要製作與實體發動機幾何近似的格點頗具困難，因此在本中心研究 PFI 改裝成 GDI 發動機的可行性研究上，採用 CD-adapco 所發展的專業發動機流場分析模擬軟體(STAR-CD/ES-ICE)[6]，因實驗改裝上，需瞭解活塞幾何與閥門昇程/正時改變時的缸內流場特性改變情形，因此本論文則採用實體引擎幾何，透過模擬分析進行缸內流場相關特性分析，以便提供發動機測試組相關改裝資訊。

2 數值分析方法

2.1 程式說明

本文採用 CD-adapco 公司產品：STAR-CD 與 ES-ICE，為專業內燃機分析軟體與專家系統[6]，根據實驗用單缸 500cc 發動機幾何資料，透過 ES-ICE 建立模擬分析時所需的引擎格點，ES-ICE 並處理在流場分析時格點動態變化，並且利用 STAR-CD 流場求解器進行冷流場分析。

2.2 3D 發動機格點製作

經過本中心集思廣益後，針對於 500cc PFI 引擎改裝成 GDI 引擎，決定噴油嘴與火星塞之配置構型[5]後，依據文獻此構型屬於 Spray-Guided 燃燒系統，因此採用原本平頂活塞頭可能在缸內漩流與翻滾流之情況未必能符合需求，在 PFI 引擎原本有限空間中，修改後活塞頭，增加了淺凹(cavity)，如圖 1 所示。

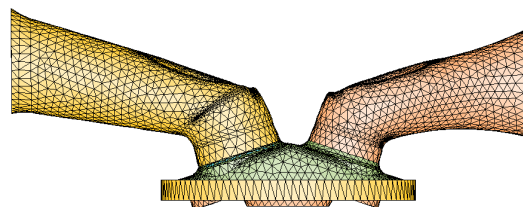


圖 1 淺凹活塞之發動機外觀

採用 ES-ICE 進行發動機格點製作，本文僅採用一半的流體區域進行格點劃分，以便能節省計算

量與所需時間；製作格點有 Mapping 及 Trimming 兩種方法，本研究所使用的格點產生方法為 Trimming 法。圖 2(左圖)為平頂活塞發動機在 $CA=180\text{ deg}$ 時的格點外觀圖，此時總格點數為 232,036。至於淺凹(cavity)活塞發動機格點在 $CA=180\text{ deg}$ 時，圖 2(右圖)為其格點外觀圖，總格點數為 235,170。可發現本構型改裝在活塞頭新增淺凹(cavity)，因此改變了發動機原本的容積量，也改變了壓縮比，因此若要作精確的構型修改，則需要固定壓縮比，方能比較有意義地比對流場差異性；底下則是姑且不考慮壓縮比變化而進行模擬分析與變化比對。

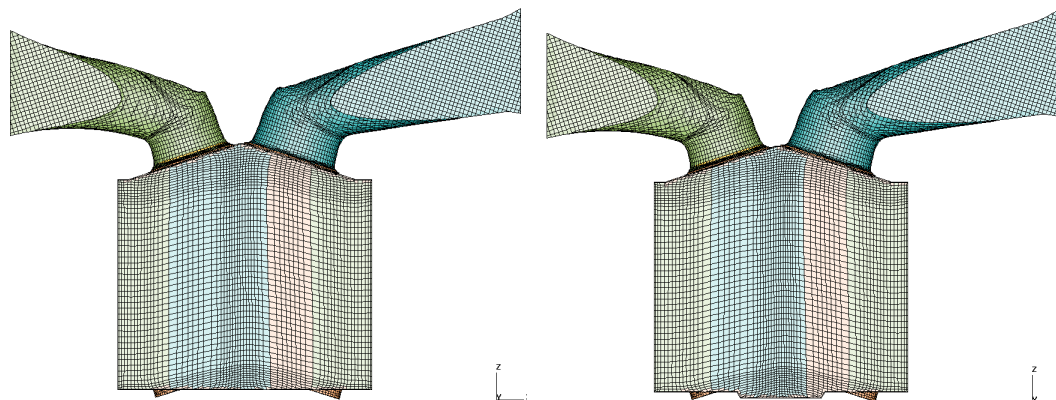


圖 2 發動機模擬分析格點

本文採用兩組不同閥門昇程(Valve Lift)與正時(Valve Timing)條件，如圖 3 所示，其中 original 表 PFI 原始設計條件，experimental 則表 GDI 實驗測試所用條件，可看出進氣最大昇程相差 18%，而排氣最大昇程相差約 27%；因閥門相關資料改變，則需要重作格點，因此圖 4 顯示兩種不同活塞幾何在排氣最大昇程時閥中心切面之格點分佈圖；從圖 3 可知，進排氣閥門重疊(NVO, Negative Valve Overlay)在原始設計上為 122 度，而在實驗測試組則採用約 60 度，因此實驗組期望能從模擬分析結果看出兩組不同活塞及兩組不同閥門昇程與正時對於缸內流場之影響，以便能輔助評估設計。

2.3 模擬分析步驟

本研究將先進行引擎發動機格點製作，利用 ES-ICE 完成建模工作後，在 prostar 中讀入模型，設定相關求解參數設定與邊界後，產生 .geom 和 .prob 文件後，完成輸出 STAR 執行所需的格點檔案與相關設定資料檔案，退出 prostar 後儲存模型(.mdl)後，最後採用 STAR 進行缸內流場模擬分析。

3 模擬分析結果與討論

在原本 PFI 發動機之有限空間下進行改裝成 GDI 發動機與性能測試，經過本中心集思廣益後，實驗組完成如前所述幾何構型改裝與閥門昇程資料，本組根據該資料進行模擬分析以便提供相關設計資訊。依據先前噴油研究分析[5]，以下分析僅檢視在 4000RPM 時的缸內流場特性，而本次模擬分析所採用的流場初始條件與進氣及排氣條件均為大氣條件。

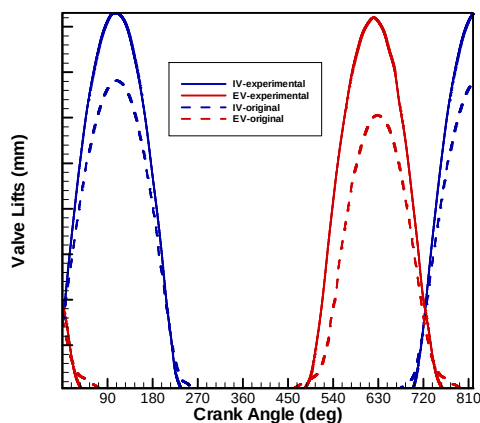


圖 3 兩種不同閥門昇程與正時圖

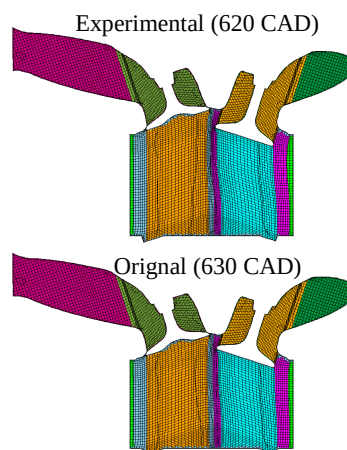


圖 4 兩種不同活塞引擎在排氣最大昇程時之閥中心切面格點分佈圖

3.1 活塞幾何改變

在完成發動機格點後，分別將所產生的分析格點設定參數，採用原始閥門昇程與正時資料，進行冷流場分析。分析結果中，兩種不同構型之缸內所吸入流體質量隨曲柄角變化，如圖 5 所示，可看出在進氣閥門開到最大後，兩者缸內空氣質量開始有所差異，而以淺凹活塞之發動機所吸空氣量比較大，主要是因為淺凹會增大了容積空間，也相對可吸入比較多的空氣量，而在 720 CA 到 820 CA 之間也有大小差異，則是因為 NV0 (671.5 至 793.5 CAD) 緣故。比較圖 6 內之兩者缸內整體紊流動能隨曲柄角變化關係圖，可看出在排氣閥門關閉前，兩者差異不大，但在進氣閥門與排氣閥門開啟重疊處，則有相當大的差異性，從速度向量場觀察也能看出。

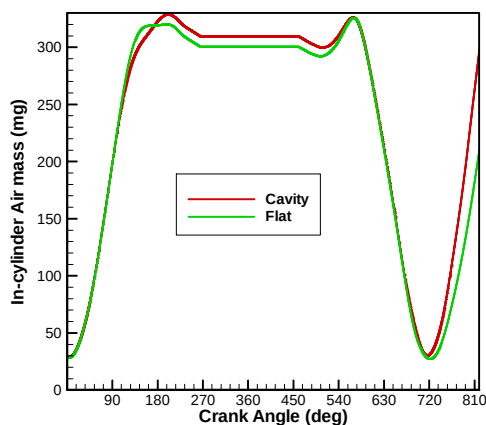


圖 5 兩種活塞構型之發動機所缸內氣體質量隨曲柄角變化比較圖

再者，觀察兩者的漩流與翻滾流特性之差異性，圖 7 為側向滾流比 (Sideway tumble ratio, S_x) 的比較圖，可看出在隨曲柄角改變整體差異變化不大，而以平頂活塞數值大一些。圖 8 則是兩者沿著 y 軸之正向滾流比 (normal tumble ratio, S_y) 比較，僅在進氣閥門最大昇程後有小差異，幾乎維持相近值，在進氣閥門與排氣閥門重疊時，則產生劇烈差異性，而以淺凹活塞構型比較能夠產生強烈的翻滾流特性。

檢視繞著 Z 軸的漩流比 (Swirl ratio, S_z) 特性，從圖 9 可看出進氣閥門與排氣閥門均關閉後 (約 265 CAD 處)，兩者差異性開始變大，並產生正負的差異性，而在兩種閥門重疊 (NV0) 時，淺凹活塞構型產生了正的漩流比值，而平頂活塞則為負的漩流比值，正負僅代表方向性，以強度值比較，則以

平頂活塞較佳。

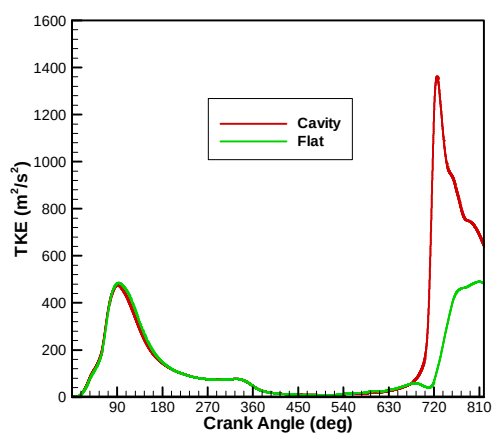


圖 6 兩種活塞構型之發動機缸內紊流動能隨曲柄角變化比較圖

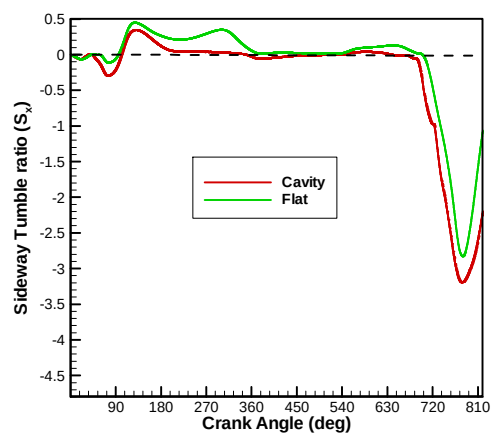


圖 7 兩種活塞構型之發動機缸內側向滾流比隨曲柄角變化比較圖

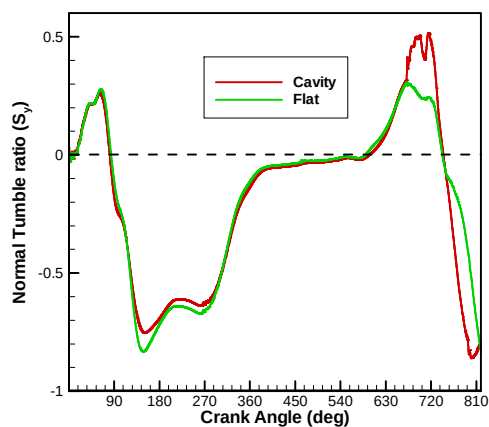


圖 8 兩種活塞構型之發動機缸內正向滾流比隨曲柄角變化比較圖

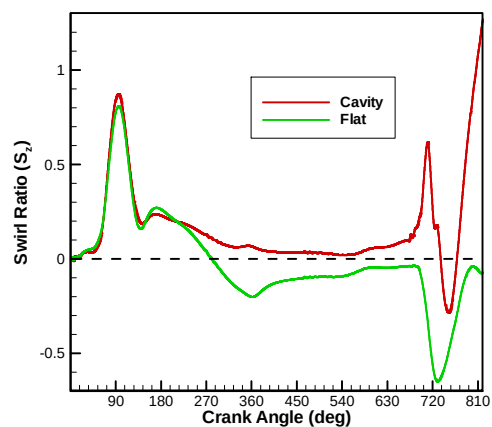


圖 9 兩種活塞構型之發動機缸內旋流比隨曲柄角變化比較圖

在探討整體紊流動能、漩流與滾流特性時，在兩種閥門相互重疊 (NVO) 時會產生蠻劇烈的變化與差異性，因此將缸內速度向量場在 680 CA 及 820 CA 時列出比較之，中心剖面速度如圖 10 所示，可發現在 680 CA 時具淺凹構型在進氣閥門氣體速度偏大，因此氣體引入量較大，因此在 820 CA 時兩者的速度向量場特性則不相同。

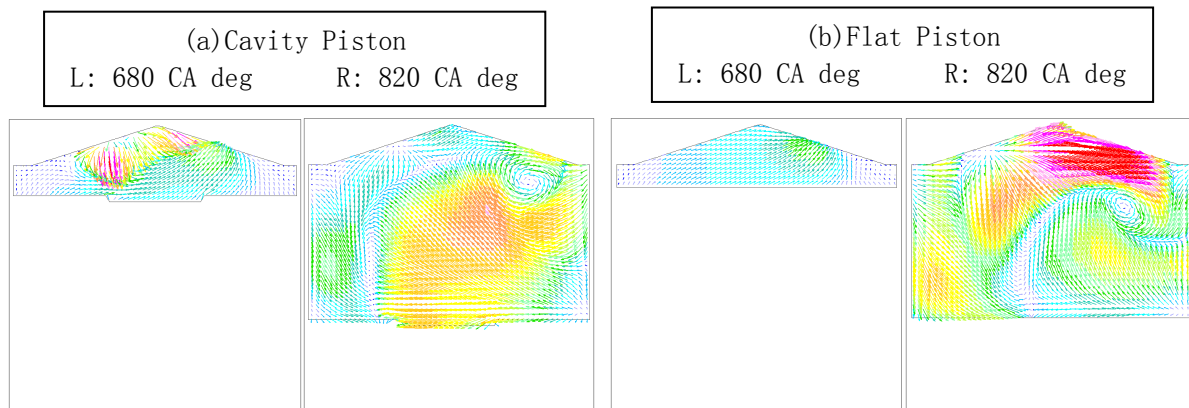


圖 10 兩種活塞構型在排氣時流場特性差異處比較圖

3.2 閥門昇程與正時改變

本文採用兩組不同閥門昇程與正時條件，如前所述進氣最大昇程相差 18%，而排氣最大昇程相差約 27%，而進排氣閥門重疊(NVO, Negative Valve Overlay)情況上，在原始設計上為 122 度，而在實驗測試上則採用約 60 度；昇程大小由前分析可知會影響到吸入氣體量，而 NVO 一般在實際引擎上則具有內部廢氣再循環(Internal EGR)之功用，因此本研究先透過冷流分析初步檢視其影響程度。

圖 11 及 12 分別顯示淺凹及平頂活塞在兩種不同閥門昇程時缸內氣體質量之變化關係，在具有淺凹構型下兩者差異不大，但在平頂活塞下從進氣閥門最大昇程(105 CAD)後產生出差異性，而以較大閥門開度所吸入氣體量較大，觀察在 NVO 時也是實驗組比較大，此與一般物理觀點吻合。

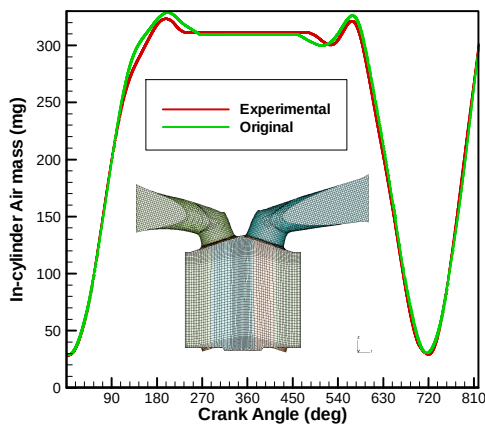


圖 11 淺凹活塞在不同閥門昇程之缸內質量變化

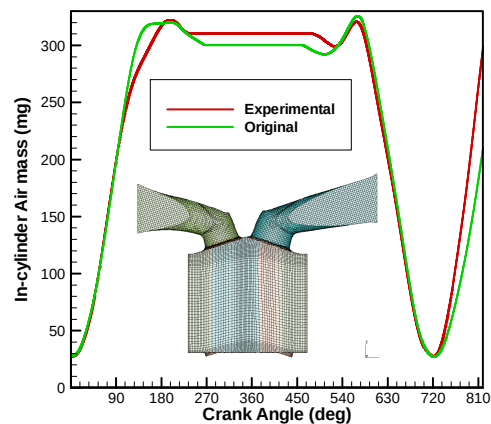


圖 12 平頂活塞在不同閥門昇程之缸內質量變化

對於紊流動能而言，檢視圖 13 及 14，在 670 CAD 之前兩者差異都不大，兩者僅在進氣閥門最大昇程前後產生些微差異，而卻以最大昇程小者為大；在 NVO 時兩者均有差異，皆是以最大昇程大者為大，而以平頂活塞幾何時差異最大，並在原始閥門條件時紊流動能最小，因此雖然淺凹深度不大，其對於紊流動能確有顯著影響，且其動能值比較大，但不受到閥門條件改變而影響。

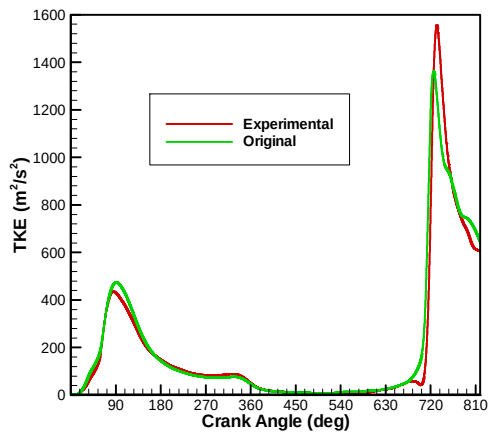


圖 13 淺凹活塞在不同閥門昇程之缸內紊流動能變化

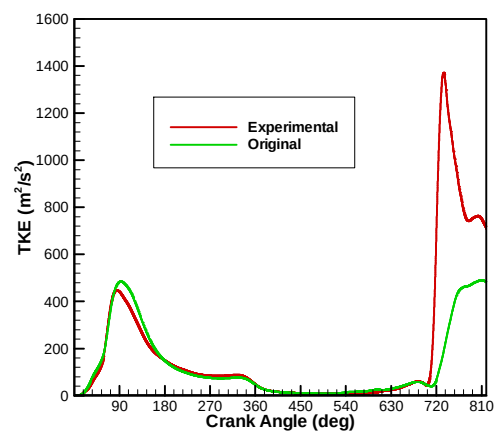


圖 14 平頂活塞在不同閥門昇程之缸內紊流動能變化

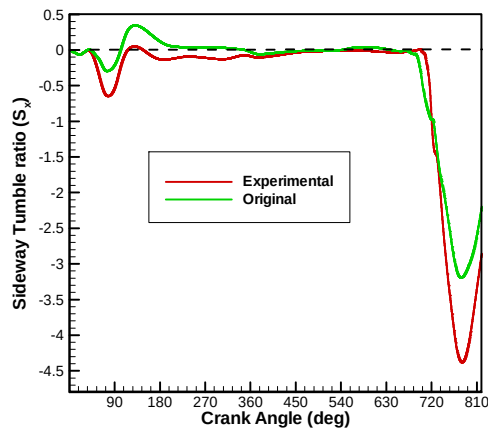


圖 15 淺凹活塞在不同閥門昇程之缸內側向滾流強度比 (S_x) 變化

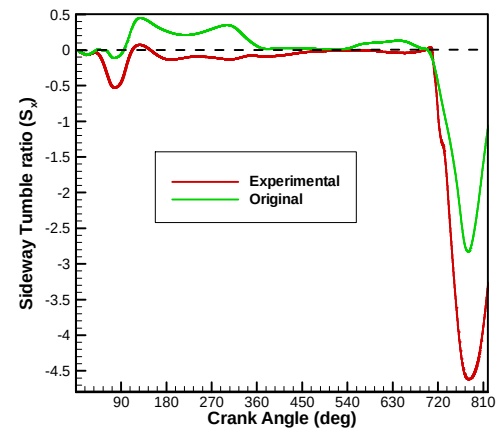


圖 16 平頂活塞在不同閥門昇程之缸內側向滾流強度比 (S_x) 變化

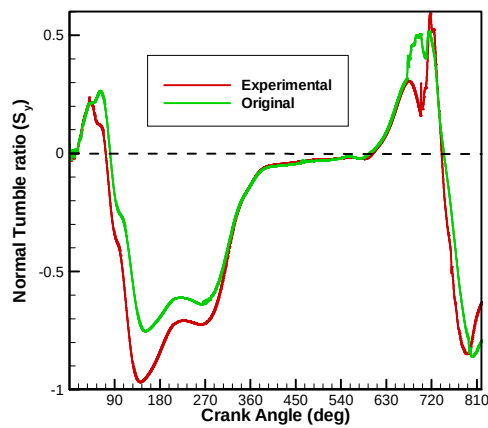


圖 17 淺凹活塞在不同閥門昇程之缸內正向滾流強度比 (S_y) 變化

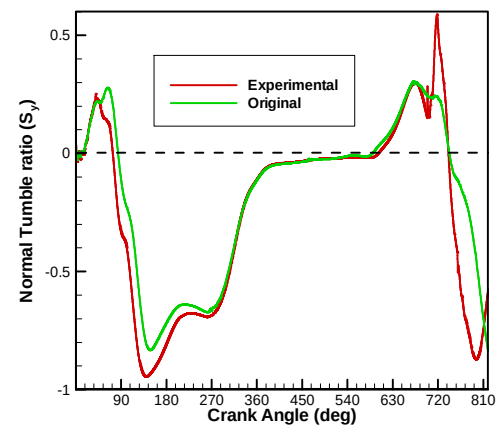


圖 18 平頂活塞在不同閥門昇程之缸內正向滾流強度比 (S_y) 變化

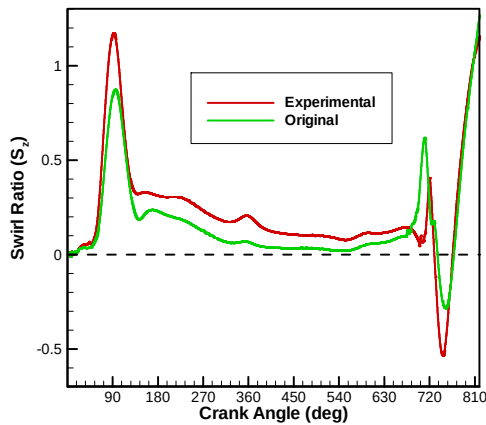


圖 19 淺凹活塞在不同閥門昇程之缸內漩流強度比 (S_z) 變化

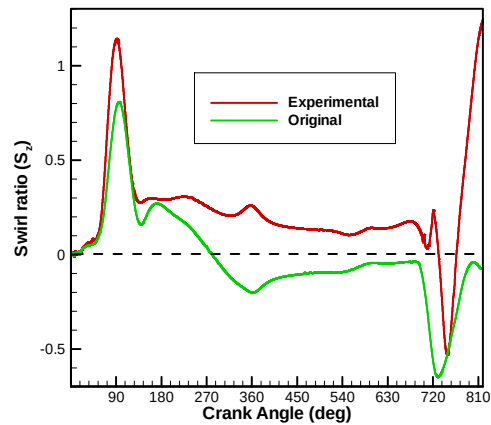


圖 20 平頂活塞在不同閥門昇程之缸內漩流強度比 (S_z) 變化

再者對於缸內流場特性進行量化比較分析，圖 15 至 20 分列淺凹與平頂活塞在兩個閥門條件下之側向滾流比 (S_x)、正向滾流比 (S_y) 及漩流比 (S_z) 之比較圖；從側向滾流比之比較圖（圖 15 及 16），可看出兩種活塞形狀之趨勢相同，但在進氣閥門最大昇程後 (110/105 CAD) 有最大差異性，且以平頂活塞之實驗用閥門條件在 NVO 階段有較大的相差比值。比較正向滾流比（圖 17 及 18），發現在進氣的過程中會造成正向滾流比由正轉負值，且在不同閥門條件趨勢相仿但數值上則稍有差異，而以實驗用條件之比值最大，在壓縮過程則兩者趨於一致，且慢慢地到排氣閥門開啟後則由負轉正，此正負乃代表滾流或漩流的方向性；在 NVO 階段，不同閥門條件下又產生差異，在淺凹構型下則會因該幾何形狀而產生了較強的正向滾流，在平頂活塞情況下採用實驗閥門條件可增強正向滾流強度，在排氣閥門關閉後，滾流比由正轉負且實驗閥門條件可產生較強的正向滾流。

圖 19 及 20 則是比較缸內漩流比，一般認為漩流比為影響引擎性能的一項指標，比較發現淺凹活塞情況下在排氣閥門關閉前 (720 CAD) 整體漩流比均為正值，且以採用實驗閥門條件所產生漩流強度較大，但在 NVO 階段則略小，在閥門關閉後則大小相同且慢慢由負值轉為正值。至於平頂活塞情況，則在進氣閥門關閉後（約 270 CAD），採用原始閥門條件時漩流比由正轉負值，直到整個循環結束均為負值，但採用實驗閥門條件則維持正值且其值與淺凹情況相當，直到 NVO 階段快結束前（約 738 CAD）漩流比為正轉負，且在排氣閥門關閉後則慢慢由負值轉為正值。

4 結論

本研究利用專業發動機燃燒室模擬分析軟體：STAR-CD/ES-ICE，進行摩托車缸內直噴引擎整個循環之缸內流場特性分析。本文針對了活塞形狀改變及採用不同閥門昇程與正時條件時，對於缸內流場的影響情況分析，相關結論如下：

1. 在同一閥門升程和正時策略下，淺凹活塞因增大了容積空間，比平頂活塞的進氣量大。除在 NVO 階段，兩種活塞的缸內整體紊流動能有較大差異外，在其他曲柄轉角下兩者相差不大。

2. 採用不同閥門策略時，在 NVO 階段時平頂活塞缸內紊流動能差異最大，淺凹活塞雖內凹深度不大，卻可產生較大紊流動能，且不受到閥門條件改變而產生明顯影響。

3. 透過缸內流場定量分析發現，淺凹活塞造成了較強的正向滾流；在缸內漩流比方面，淺凹活塞較弱與平頂活塞漩渦方向不同，在搭配實驗閥門條件，淺凹活塞之漩流強度再增強，而平頂活塞條件漩渦方向會改變且強度與淺凹情況相當，因此採用適當閥門條件顯得相當重要，對於缸內流場具有主導作用。

5 参考文献

- [1] Hsin-Luen Tsai and J.-Y. Chen, “Estimate of Maximum Allowable Droplet Size for Motorcycle Gasoline Direct Injection Engines, 7th Asia-Pacific Conference on Combustion, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 24-27 May 2009.
- [2] Amsden, A. A., “KIVA3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves, Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS, July 1997.
- [3] Amsden, A. A., KIVA3V, Release 2, Improvements to KIVA3-V, Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-99-915 1999.
- [4] 吳志勇、蔡文昌、蔡欣倫、陳正暉、謝逸霖、趙怡欽，缸內直噴噴嘴噴霧特性之實驗診斷，2009 中華民國燃燒學會第十九屆學術研討會，台北台灣。
- [5] 蔡欣倫、吳志勇、蔡文昌、陳志源，“缸內直噴引擎噴霧分析”，2010 中華民國燃燒學會第二十屆學術研討會論文集，台南台灣。
- [6] ES-ICE USER GUIDE, VERSION 2.02, CD-adapco, 2007.