

高壓縮比缸內直噴單缸引擎分析與驗證

Modeling, Analysis and Validation of High Compression Ratio Single Cylinder GDI Engine

蔡欣倫

Hsin-Luen Tsai

(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)

(Department of Electronic Engineering and Advanced Engine Research Center, Kao Yuan University, Taiwan)

摘要: 本研究採用一維引擎模擬軟體進行高壓縮比直噴式汽油引擎分析, 找出點火正時、噴油正時以供以引擎測試實驗設計, 並將實驗測試數據進行 CFD 分析規劃與驗證。如此一維性能分析、實驗測試及 CFD 模擬分析連串式之研究方式, 將能有助於加速發動機開發時程及節省成本。

关键词: 缸內直噴引擎、活塞形狀、閥門昇程/正時、數值模擬、點火時機、燃油消耗率

Abstract: The one-dimensional commercial engine simulation code was carried out to investigate the effects of compression ratio on ignition timing and engine performance in a single cylinder direct injection engine. The numerical results were applied to design the engine testing experiments. The CFD simulation was also conducted based on the experimental conditions and results. The engine design procedure including 1-D engine code, experimental testing and 3D CFD analysis would accelerate the engine research and development and save the cost.

Keywords: Gasoline Direct Injection, Piston Shape, Valve Lift/Timing, Numerical Simulation, Flame Speed, Ignition timing, Brake Specific Fuel Consumption (BSFC)

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 formed 與空間分配有著相當重大的影響。

過去在引擎控制參數的設定往往需要花費大量的時間及金錢成本, 在成本考量下, 業界採用電腦數值模擬進行發動機研發與設計逐漸增加, 模擬分析的準確度也成為產學界所關注目的之一。本研究以一具自行改裝的 500c. c. 缸內直噴汽油(GDI)引擎為實驗平台, 採用的引擎性能分析軟體[1]進行引擎控制參數的模擬分析, 並與實驗引擎進行缸壓比對, 後續針對實驗比對部分進行 CFD 分析探討, 以提供控制組引擎控制設計之相關資料。先前研究[2, 3]使用商用引擎性能分析軟體 GT-SUITE [1]針對引擎噴射正時及點火正時進行最佳化模擬, 並且透過引擎驗證性能輸出, 可以確立其計算模型建立的可行性。

本文之 500c. c. 單缸缸內直噴汽油(Gasoline Direct Injection, GDI)引擎, 在燃燒室構型上採用不同的活塞幾何進行設計與未來實驗測試, 預計能有效改善缸內渦流及噴霧之交互作用, 以便能

增強噴霧與油滴之蒸發，以改善整體引擎的燃燒性能。並以商用引擎性能分析軟體 GT-SUITE 分析引擎在怠速穩態操作下進行最佳油耗 (BSFC) 之可操作點分析。本研究先以模擬結果與實驗引擎進行缸壓比對，確認缸內燃燒參數驗證後，分別進行不同閥門升程 (Valve Lift)、不同噴射正時 (Fuel Injection Timing) 及不同點火正時 (Ignition Timing) 之最佳化計算，並針對實驗資料進行 CFD 模擬分析與探討。

2 引擎性能分析與測試

2.1 引擎性能分析

本研究採用噴霧導引式 (Spray-Guided) 之缸內直噴燃燒系統，將一具 500cc PFI 引擎改裝成 GDI 引擎，引擎相關格與參數如表 1 所列，燃燒室外型如圖 1 所示，決定噴油嘴與火星塞之配置構型[2,3]後，因此採用原本平頂活塞頭在缸內渦流與翻滾流狀態未必能符合需求，在 PFI 引擎原本有限空間中，進行設計新式活塞頭[4]。

表 1 實驗引擎相關規格與參數

Bore	92 mm
Stroke	75 mm
Compressor Ratio	12.4
Displacement Volume	498 c.c.
Throttle position	15~45 (deg.)

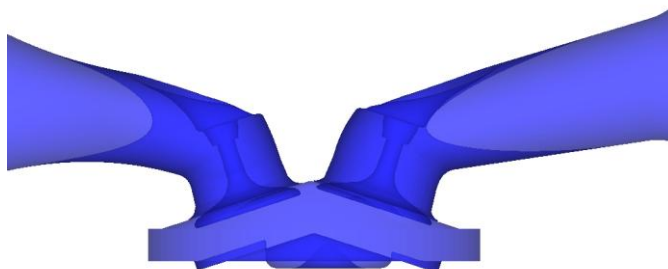


圖 1 500cc GDI 引擎燃燒室 3D 透視圖

圖 2 為 GT-SUITE 所建立之單缸引擎模型，配合實驗引擎配置所需，除去空氣濾清器及排氣尾管設置，並使用實際引擎所量測之各部件幾何形狀所建立。

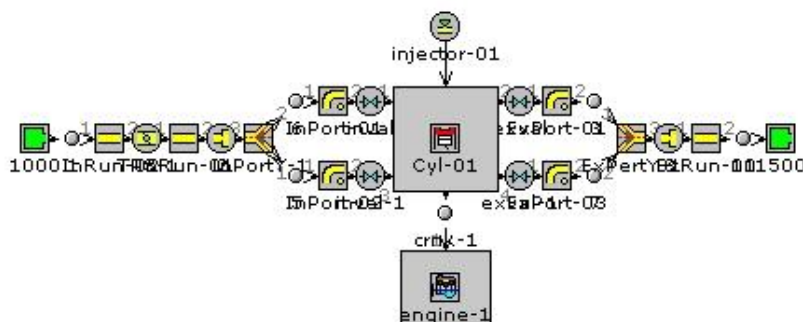


圖 2 GT-SUITE 引擎性能分析模型架構圖

缸內火焰傳播速度為火焰傳入未燃氣的速率及燃燒時燃氣膨脹傳播速度，與缸內壓力、溫度具絕對關係，為探討缸內混合燃氣火焰傳播速度之影響，模擬所使用的火焰速度方程式如下：

$$S_L = (B_m + B_\phi(\phi - \phi_m)^2) \left(\frac{T_u}{T_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^\beta (1 - 2.06(Dilution)^{DEM-0.77}) \quad (1)$$

其中 Φ 為缸內當量比、 Φ_m 為最大速度之當量比、 T_u 為未燃氣溫度、 $Dilution$ 為未燃區內殘餘燃氣之質量分率而 DEM 則為其指數參數，相關參數為 $B_m=0.350$ (m/s)， $B_\phi=0.549$ (m/s)， $\Phi_m=1.1$ ， $\alpha=2.4-0.271\Phi^{3.51}$ ， $\beta=-0.357+0.14\Phi^{2.77}$ 。

燃油蒸發是燃燒反應前很重要的過程，蒸發的過程速度也會影響到缸內壓力及溫度的變化。本文中採用 GT-SUITE 進行引擎性能分析軟體中所採用的蒸發率計算式，如下所示：

$$R_{evp} = \frac{4.16 \times RPM_{ref}}{CA50} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{TMPEXP} \left(\frac{RPM}{RPM_{ref}} \right)^{RPMEXP} \quad (3)$$

其中 $CA50$ 為燃料蒸發 50%所需的時間(曲軸角度)，參考轉速 (RPM_{ref})、溫度 (T_{ref}) 分別為 4000RPM 及 600K， $RPMEXP$ 及 $TMPEXP$ 為其指數參數。先前研究[5]機車引擎缸內直噴油滴尺寸最佳化時，除建立最大允許油滴大小與轉速關係外，亦發現在不同轉速下油滴蒸發隨曲軸角變化曲線沒有太大變化，因此在 GT-SUITE 考慮油滴蒸發模式時則不考慮轉速影響，故分析中的 $RPMEXP$ 設定為 0。

在前研究[2, 3]完成引擎容積效率及缸內壓力實驗量測及模擬計算比較圖，參數如表 1 所示，並進行 DOE 大範圍參數分析，取得不同噴射正時(Fuel Injection Timing)及不同點火正時(Ignition Timing)在最佳化範圍，並且針對氣門升程做進一步的探討，找出最佳升程可以得到較好的引擎輸出結果及最佳的油耗表現。並已完成引擎轉速設定在 1500 至 6000RPM 間的模擬分析與實驗量測之容積效率比較，兩者十分相近，可驗證引擎進氣行程之設定參數大致相符，並驗證缸內燃燒模式設定所計算出缸內壓力與實驗引擎量測數據相當吻合，因此將採用 GT-SUITE 所建構之引擎模式，在沒有負載下，進行實驗引擎可操作控制條件之分析，以建立出引擎操作控制相關數據。

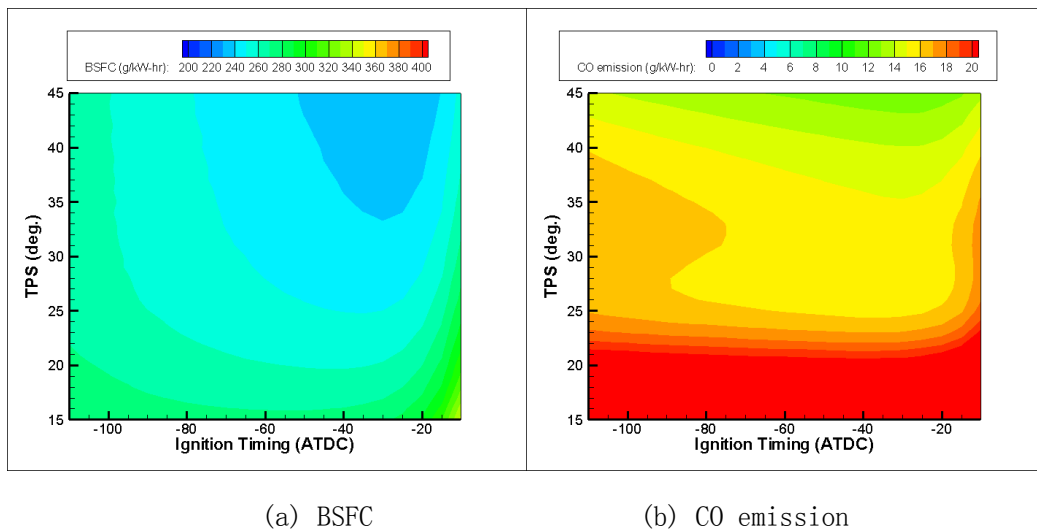


圖 3 4500RPM 時不同點火正時角度及不同節氣門開度對 BSFC 及 CO 排放之影響

圖 3 為 4500 RPM 在不同點火正時角度及不同節氣門開度對 BSFC 及 CO 排放之分析結果[2]。當提高引擎轉速，為得到最佳 BSFC 值，較高的 TPS 開度下，點火正時需要提早 20~30 CAD 左右，但在低 TPS 下，點火正時則有很明顯的提前，在 6000RPM 時提早到近 80 度才可以得到最佳的點火角。在 CO 的排放部份，點火正時的提前並未對 CO 排放產生很直接的關連，但在提高轉速後，也是隨著引擎轉速而提前，但似乎沒有 BSFC 來的多，這部份則需未來的更進一步探討。在利用 GT-POWER 引擎數值模擬軟體比對實驗引擎及模擬結果後，成功計算引擎於最佳的燃油消耗率操作參數，包括最佳的噴油時機及點火正時均可以在實驗引擎操作。本研究為配合引擎實驗量測資料及操作安全性，並沒有將節氣門開度加大。

2.2 引擎實驗測試

本研究採用了新型式活塞幾何，如圖 1 所示，該突起圓錐則是要適應前導噴霧之撞擊，以便能增強油膜破裂及蒸發效果，在考量所選定 GDI 噴嘴在噴油時在安置後可能會偏心下，因此將突起圓錐移動軸心位置，以便能夠讓前導噴霧直接撞擊到圓錐頂，因此使得整體引擎之壓縮比由原本引擎之壓縮比為 10.5 提高至 12.4。因高壓縮比，使得在引擎操作上需十分謹慎，未避免過大震動與引擎因震動損毀，本次實驗資料僅止於探討不同噴油參數與無負載情況下操作，採用兩段噴油模式，分別對 1500, 3000, 4500, 6000RPM 進行實驗測試後，因無負載、節氣閥開度不大，因此所得容積效率約落在 41~51%左右，未來可以在引擎架設上更進一步加強治具的結構，方可再使引擎負載加大測試，將同時調整引擎性能分析軟體及實驗測試規劃後再進一步測試。

3 CFD 模擬分析結果與討論

本研究事先設計出 4 種不同活塞幾何並且進行噴霧蒸發分析以評斷燃油蒸發與分佈狀況，透過 CFD 分析發現圖 4 之活塞構型在點火前產生較佳的混合燃氣，因此後續實驗先採用該活塞幾何進行實驗測試，因此在確定構型後進行製作，實驗組規劃了一系列的測試參數表；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，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，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。

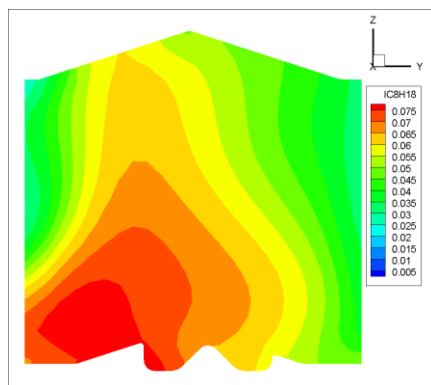


圖 4 在 3000RPM 之 220 CAD 時中心剖面燃油分佈圖

根據實驗參數進行 CFD 噴油燃燒分析，主要分析過程需與實驗所量測之空氣流量進行比對，首

先每個案例必須確認吸入空氣量及比對容積效率，並且與實驗比對，方能進行噴油與燃燒計算，圖 5 為不同轉速下實驗及 CFD 分析所得之容積效率比較圖，兩者誤差相當低。

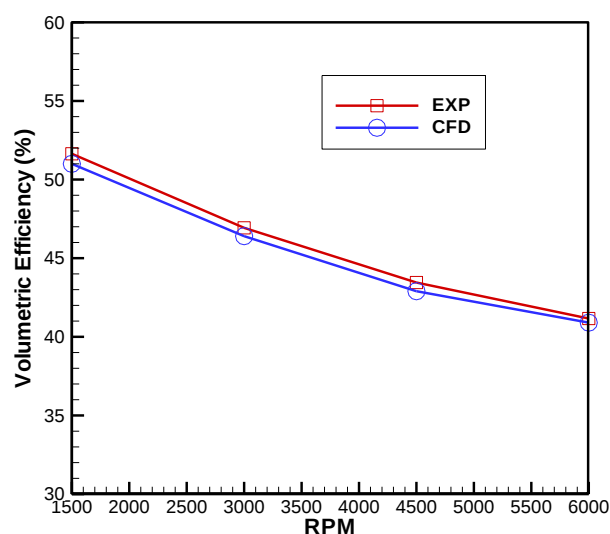


圖 5 不同轉速下實驗及 CFD 分析之容積效率比較圖

圖 6 為新式活塞構型在 2500RPM 下初期噴霧發展與蒸汽分佈之變化圖，在選用噴霧破裂模式方面使用 LISA 破裂模式，相關參數還是需要與實驗量測觀察噴霧特性後，找出噴霧校正與破裂參數、壁面撞擊模式相關參數之修正，以便能比較真實描述噴霧發展與混合氣形成過程。

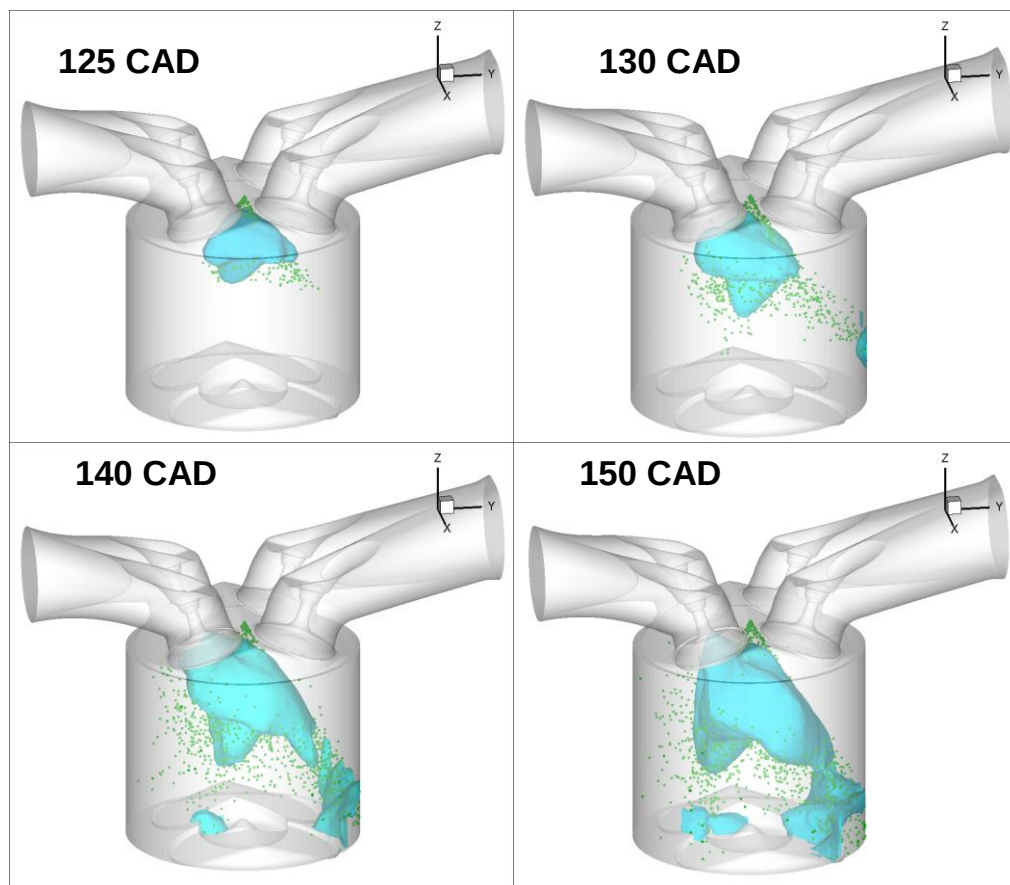


圖 6 在轉速 2500RPM 下之燃油從噴入缸內之噴霧與燃油蒸汽之初期發展變化圖

因此再由 CFD 程式分析噴霧、燃油蒸發、混合燃氣形成、點火、燃燒等過程之分析，分別針對 1500, 3000, 4500, 6000RPM 進行 CFD 分析，在缸內壓力隨曲軸角變化比較，如圖 7 所示，在 3000RPM 時具有最高缸內壓力，其次為 4500RPM 案例，可看出在此噴油參數及點火時機條件最為適當。在完成不同轉速之噴油燃燒分析後，首先比較油膜在壁面累積量，從圖 8 可看出在 4500RPM 時油膜累積為最少量，其次為 3000RPM 案例。

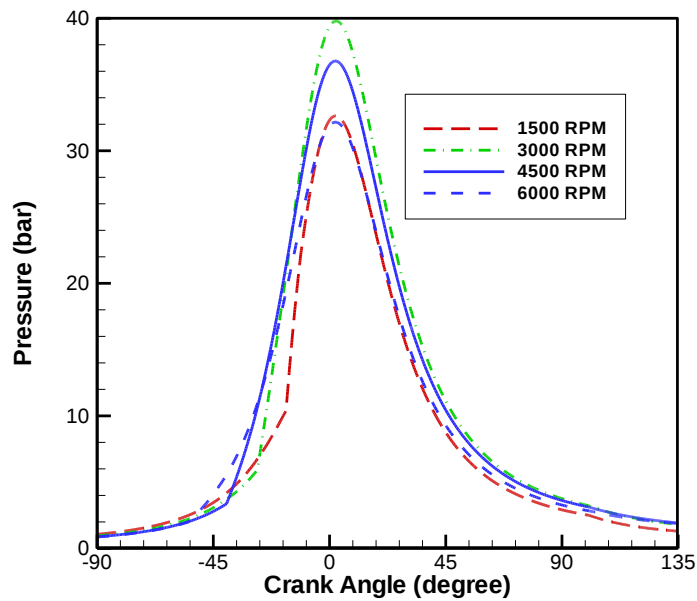


圖 7 在不同轉速下 CFD 分析之缸內壓力隨曲軸角變化比較圖

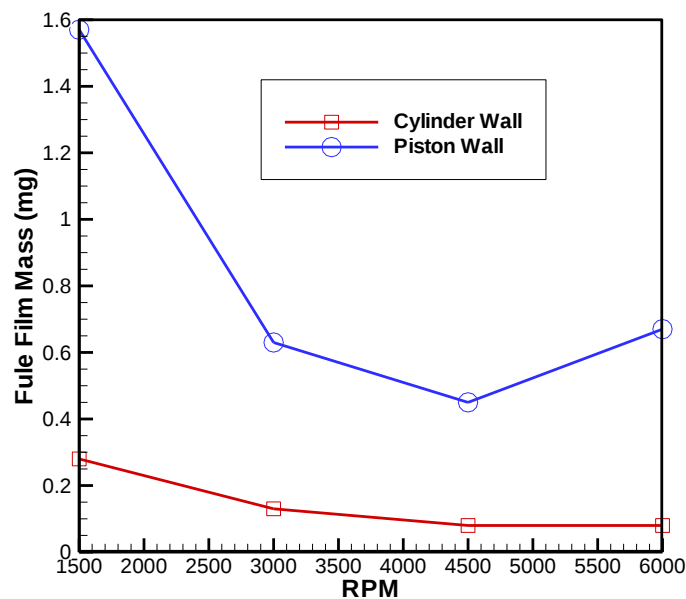


圖 8 在不同轉速下 CFD 分析缸壁及活塞壁面油膜累積量之比較圖

本研究自行開發發動機性能分析後處理程式，進行每個案例之結果資料後處理計算，圖 9 為燃燒區間、燃燒效率及熱效率在不同轉速下之比較圖，可看出在油膜累積最少、缸內壓力最高之案例 (3000RPM) 之燃燒效率為最高且熱效率也最高，與前述分析結果有一致性，而 4500RPM 之性能次之，在 1500RPM 及 6000RPM 時則為較差性能表現，因此所採用之實驗參數非為最佳狀況，主要是考量到實驗平台在高轉速會不穩定，需要再規劃不同進氣條件，以便能找出最佳條件。分析與實測存在部分差異，這方面之差異性尚須從許多方面再驗證，包括：實驗量測方法與驗證、CFD 方面可能需要調整燃燒模型之相關參數、點火能量與範圍等因素，因此將會再與實驗測試數據進行相關案例比對與驗證。

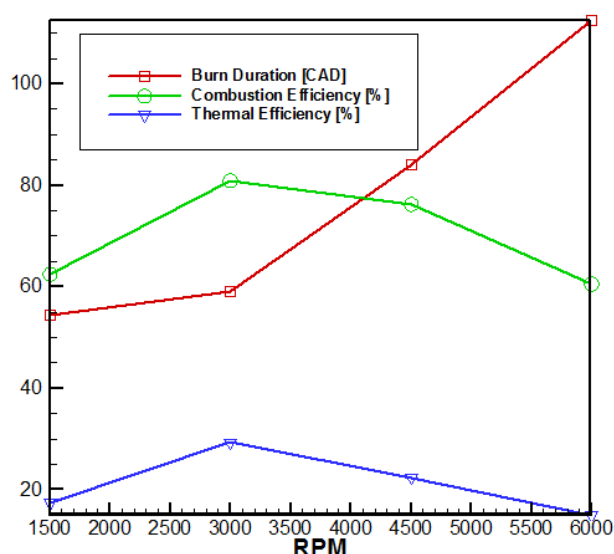


圖 9 在不同轉速下 CFD 分析引擎性能：燃燒區間、燃燒效率與熱效率之比較圖

4 結論

本研究採用 GT-SUITE 發動機整體分析工具進行發動機大範圍參數之分析，並提供數據進行實驗規劃與測試，並將實驗資料提供作為 CFD 分析之用，以探討缸內直接噴霧在缸內流動、蒸發、點火、燃燒及壁面油膜之分析與比較。因此透過專業發動機性能分析工具及 CFD 工具進行實驗設計、規劃與實測，將能有效地節省發動機開發程序與資源。

5 參考文獻

- [1] GT-SUITE, USER MANUAL.
- [2] 張學斌、蔡欣倫，“單缸缸內直噴汽油引擎點火正時之研究”，第十六屆車輛工程學術研討會，台北，2011.11.11。
- [3] 蔡欣倫，“單缸缸內直噴汽油-乙醇引擎點火正時之研究，”第 22 屆燃燒與能源學術研討會，高雄路竹，2012 年 04 月 21 日。
- [4] 專利名稱：引擎的活塞結構，證書號數：M410104，公告日期：2011.08.21。
- [5] 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.