

# CFD 應用重型車輛節能設計之探討

## Using CFD for Discussion of Energy-saving Design in Heavy Vehicles

蔡憲旻、廖慶復、張祐誠

財團法人車輛研究測試中心、彰化縣、50544

**摘要:** 重型車輛在一般行駛時主要的阻力有車輛機件傳動阻力、滾動阻力及空氣阻力…等，這些阻力會影響車輛燃油經濟性，在不同速度下，所需要克服的阻力大小也不同。因此，本研究以重型車輛加裝不同設計之側裙方式探討其風阻係數及燃油效率，利用 Virtual Wind Tunnel 軟體進行模擬分析風阻係數，並用風洞測試實驗進行比對，最後再選擇較佳的側裙方式進行燃油效率測試。從風阻係數結果發現，模擬分析與實驗之趨勢是一致的，車輛加裝側裙後最高可減少整車空氣阻力係數約 20%，且以風阻係數最小的側裙設計進行燃油效率測試，其燃油經濟性最高可改善 5.7%。

**關鍵字:** Virtual Wind Tunnel、重型車輛、風阻係數、CFD

**Abstract:** In general, the main resistances of vehicles, which are driven-train losses, rolling friction and aerodynamic drag can influence fuel consumption. At different speeds to need overcoming aerodynamic drag was different. Therefore, this study is installation the several different design kinds of side skirts to explore the drag coefficient and fuel efficiency. The result found, the trend for drag coefficient of simulation and experimental were consistent. The maximum vehicle drag coefficient can be reduced by about 20%, and the lowest drag coefficient of side skirts in fuel efficiency testing, the fuel economy improvement of up to 5.7%.

**Key words:** Virtual Wind Tunnel, Heavy Vehicles, Drag coefficient, CFD

### 1 概述

車輛在一般行駛時主要的阻力有車輛機件傳動阻力、滾動阻力及空氣阻力…等，這些阻力會影響車輛燃油經濟性，在不同車輛行駛速度下，其所需要克服的阻力大小也不同。車輛在低速時，所需克服的阻力來要自於輪胎滾動阻力，而隨著車輛行駛速度提升滾動阻力及空氣阻力會隨著上升，但當車輛行駛速度到達 80km/hr 時，空氣阻力開始大於滾動阻力並以指數般增加，顯示車輛在高速時，空氣阻力為影響燃油經濟性的最大因素[1]。而商用重型車輛，因車身迎風面積大，結構存有許多空隙，故在車輛行駛時氣流將更容易在車身空隙處或貨櫃末端形成滯流區，進而造成車輛的阻力。當重型車輛外型設計較為流線或有裝設車頂導風板等導流設備時，其風阻係數均較未裝設導流設備或較不流線的車輛低。

目前國內重型車輛，多數已導入車頭導風板，故可減少因車頭與後方承載的貨櫃或車廂的

高低差因素所造成的空氣阻力。而車輛行駛時，貨櫃/廂式運輸重型車輛下方空隙形成空氣阻力主要原因乃為行駛時之氣流進入形成滯流區[2]，使得空氣阻力增加，故此類型車輛加裝側裙，則可避免氣流進入形成滯流區。因此，若減少車頭與車身貨櫃的間隙或避免氣流進入空隙處預期將可降低整車空氣阻力約 7%[3]，在貨櫃/廂式運輸重型車輛空氣動力學研究及討論，貨櫃下方加裝側裙是最被廣為討論研究且逐漸被應用於實務上。主要原因相較於前述二項空力套件，貨櫃/廂式承載車結構相對單純，且無需考量拆卸問題。惟需考量加裝時需預留貨櫃/廂式承載車輛進行保養所需的活動空間。另，多篇文獻研究指出貨櫃/廂式重型運輸車輛加裝不同型式側裙可減少空氣阻力係數約 5~18%[4,5]；燃油效率可增加約 2~9%[6,7]，因此，貨櫃/廂式運輸重型車輛燃油使用效率，可透過空氣動力技術提升減少空氣阻力來改善。

綜括上述說明，國內貨櫃/廂式重型車輛使用者或運輸業者以加裝側裙最符合國內業者的使用狀況，故本研究將使用 HyperWorks 軟體中 Virtual Wind Tunnel 風洞模擬模組進行分析，並進行縮小模型風洞測試來探討國內貨櫃運輸車輛加裝側裙之風阻效應及燃油經濟性。

## 2 有限元模型的建立

現今國內的重型車輛大多已加裝車頭導風板，但仍有許多重型車輛未加裝側裙，而不同側裙的樣式會影響風阻係數，因此，本研究以三種不同的側裙設計與未加裝側裙的重型車輛進行比較分析，如圖 1 所示。

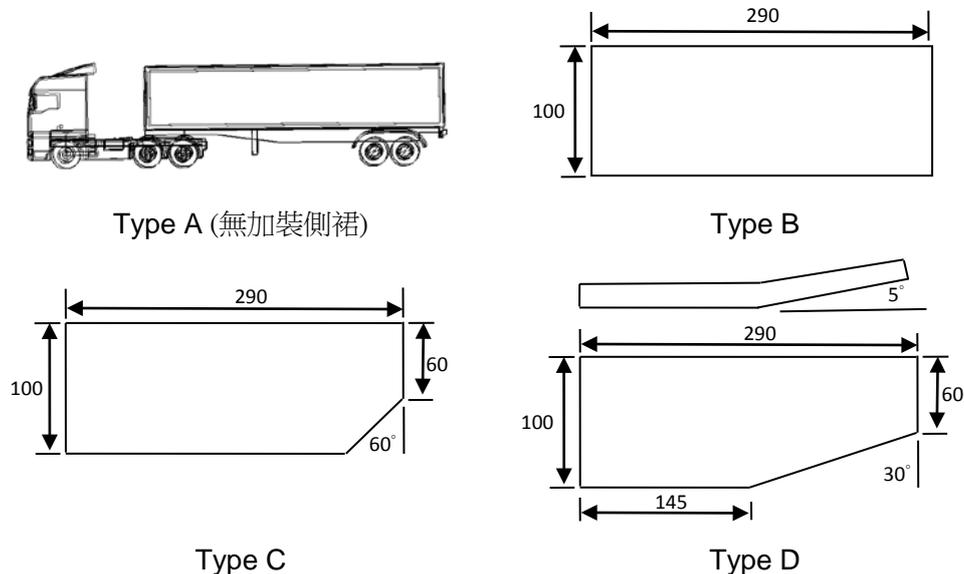


圖 1 不同側裙樣式

### 2.1 模型簡化

利用 HyperMesh 讀取建立之幾何外型 CAD 檔案，並在畫網格前預先將一些細小特徵移除，包含靠近的特徵線段、零件上的小導角、或是某些造型用圓角及 CAD 轉檔過程的破面，可以使用 HyperMesh 中 delete feature 與 toggle edge 工具，通過很短時間預先移除這些特徵，加

速網格式劃分的流程，提升網格式質量。

## 2.2 網格式劃分

Virtual Wind Tunnel的模型是以HyperMesh前處理對車身表面進行修整模型及網格式劃分，如圖 2 所示。檢查汽車網格式是否存在 Free Edge 和 duplicate element，然後輸出為 Nastran Fluent standard 匯入 Virtual Wind Tunnel。

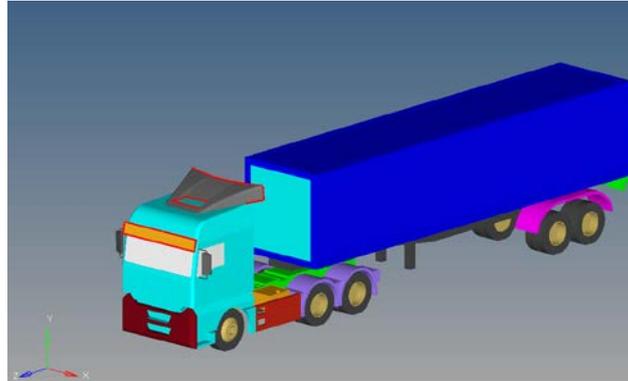


圖 2 HyperMesh 網格式劃分

在 Virtual Wind Tunnel 裡建立風洞，如圖 3 所示。風洞設定尺寸為 60m×10m×8m，風洞入口速度為 25m/s 及 30m/s 分別模擬重型汽車高速行駛狀態。之後在 Virtual Wind Tunnel 內以 AcuMeshSim 生成風洞的 Tetra 網格式，如圖 4 所示，並用 AcuSolve 求解器計算，最後計算出風阻係數。

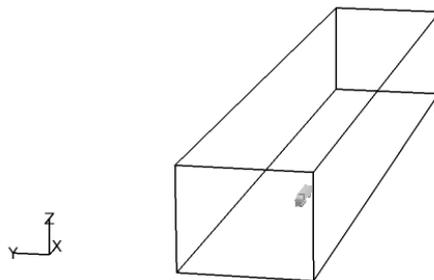


圖 3 風洞外型

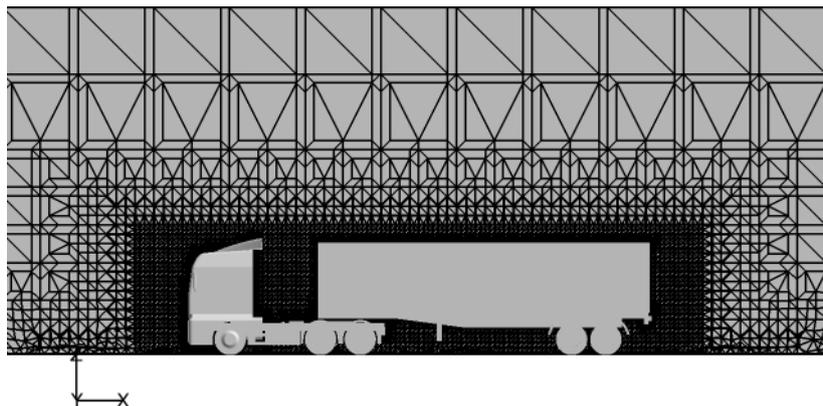


圖 4 Virtual Wind Tunnel 自動網格劃分

### 3 測試實驗

使用 1/14 拖車與 40 呎貨櫃子車之模型，於風洞模擬車輛於高速行進時，於貨櫃子車兩旁安裝 3 種側裙與無安裝測裙車身整體風阻係數是否有影響。

另外油耗測試以重型車輛加裝側裙之燃油效率測試，於財團法人車輛研究測試中心試車場進行，如圖 5 所示。實驗以重型車輛加裝油耗計量測分別量測定速及側裙加裝前/後燃油效率。



圖 5 高速周回路

#### 3.1 風洞測試實驗

利用縮小 1/14 大小的拖車與 40 呎貨櫃子車安裝側裙位置，如圖 6 所示。側裙前端需與貨櫃支架平行。測試風速為  $25\text{m/s}\sim 30\text{m/s}\pm 0.1\text{m/s}$ ，紊流強度為 0.35%，測得模型阻力係數已達穩定。以未安裝側裙之模型為基礎，與安裝 3 種不同型式側裙測得阻力做比較。模型投影面積為  $0.0561\text{ m}^2$ ，阻塞比 2.5%，安裝後實際模型照片如圖 7 所示。取樣頻率每秒 1000 筆，取樣時間 120 秒。

量測得受力值利用(1)式計算阻力係數:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho V^2 A} \quad (1)$$

其中  $F_D$  表示量測得模型阻力(N)， $V$  為測試風速， $A$  為模型投影面積， $\rho$  為空氣密度。

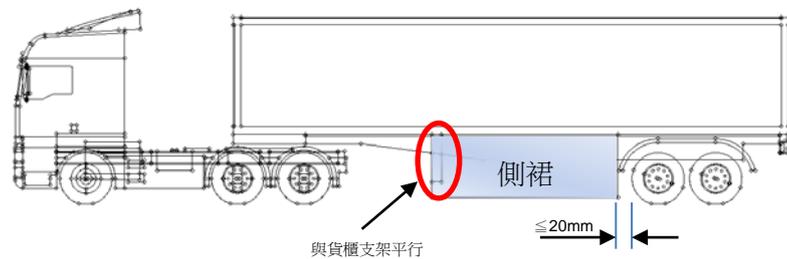


圖 6 側裙安裝位置示意圖



Type B



Type C



Type D

圖 7 實際模型側裙樣式

### 3.2 油耗測試實驗

油耗計量測分別量測定速 60km/h 和 90km/h 及側裙加裝前/後燃油效率。車輛裙樣式為 CAE 及風洞模擬結果中，最佳的 Type C；而為能避免因環境風速大小不同而影響車輛燃油效率，故實驗全程皆在環境風速低於 5m/s 的情況下進行。重型車輛全尺寸外型如圖 8 所示。



圖 8 全尺寸重型車外型

## 4 結果與討論

本研究針對國內重型車輛之外流場進行 CFD 模擬分析、風洞測試實驗及油耗測試實驗，探討在不同風速下加裝 3 種樣式側裙之風阻係數及有無加裝側裙之燃油效率，相關其結果如下。

### 4.1 CFD 模擬分析

利用 HyperWorks 軟體中 Virtual Wind Tunnel 風洞模擬模組進行分析，在 HyperMesh 修整完模型後匯入 Virtual Wind Tunnel 所產生的重型車輛幾何，如圖 9 所示。並設定風洞尺寸為 60m×10m×8m，入口速度設定分別為 25m/s (90km/hr)及 30m/s (108km/hr)，輪胎設定不轉動並以穩態計算。

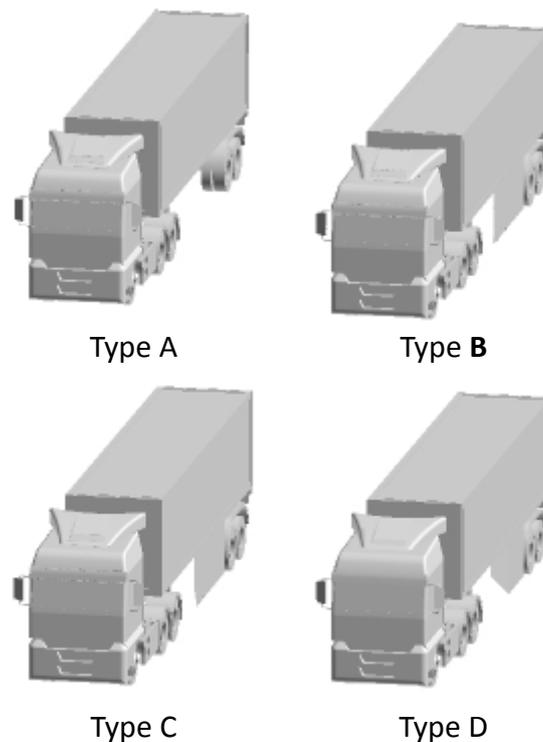


圖 9 Virtual Wind Tunnel 重型車輛幾何

入口速度設定為 25m/s (90km/hr)，Virtual Wind Tunnel 計算完成後所產生的結果，如圖 10 及圖 11 所示。圖 10 為 3 種側裙樣式及無加裝側裙的重型車輛速度場剖面圖，但從圖中 4 個 Case 的車頭至貨櫃之間的速度場分布及貨櫃後方的速度場分布並無明顯差異。

但從圖 11 觀察流線分布時則發現，在無加裝側裙時(Type A)較多流線經由重型車輛側邊流進再由貨櫃尾部流出，所形成的擾動較多，而有加裝側裙如 Type B 及 Type C 則阻擋許多流線進入車底，由兩側流過，但 Type D 因截角的角度太大，氣流流進車底較其他兩種側裙設計多，所以貨櫃尾部擾動增大。

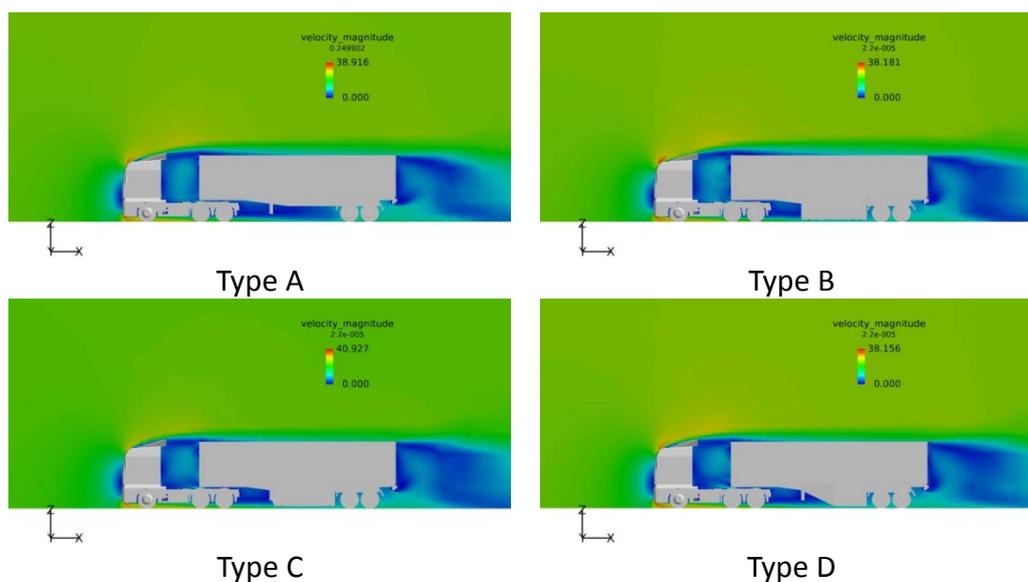


圖 10 入口風速 25m/s 速度場分布

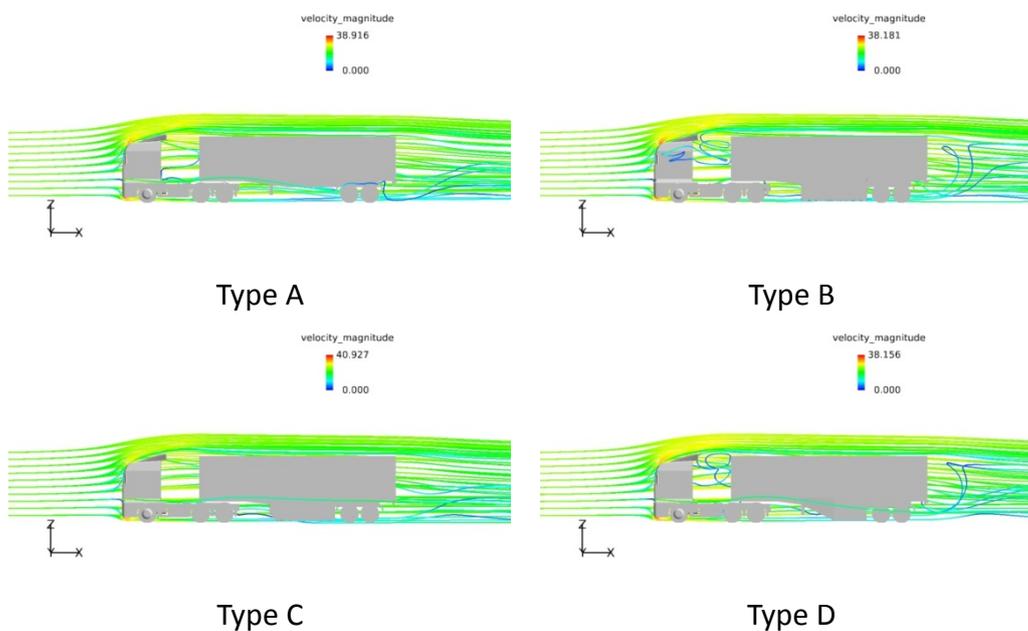


圖 11 入口風速 25m/s 流線分布

當入口風速增加至 30m/s (108 km/hr)，不同側裙的速度場剖面圖如圖 12 所示。但分布如同 25 m/s，4 個 Case 之間並無明顯差異性。

空氣流線如圖 13 所示。由圖中可以發現 Type C 的流場相較於其他側裙方式及無加裝側裙的重型車輛平整，Type A 及 Type D 則有較多流入車底的流線，且貨櫃尾部的流線較紊亂。

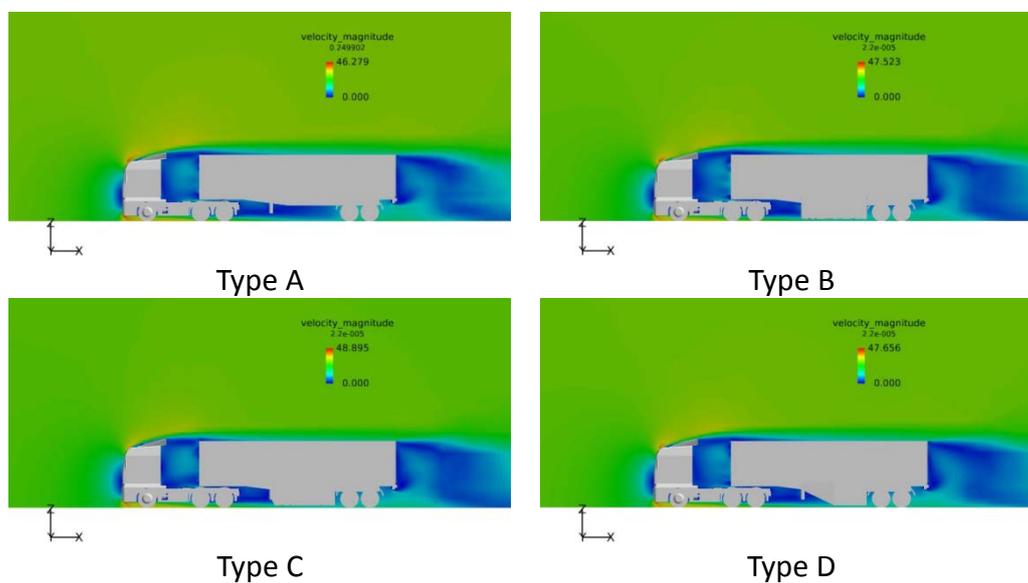


圖 12 入口風速 30m/s 速度場分布

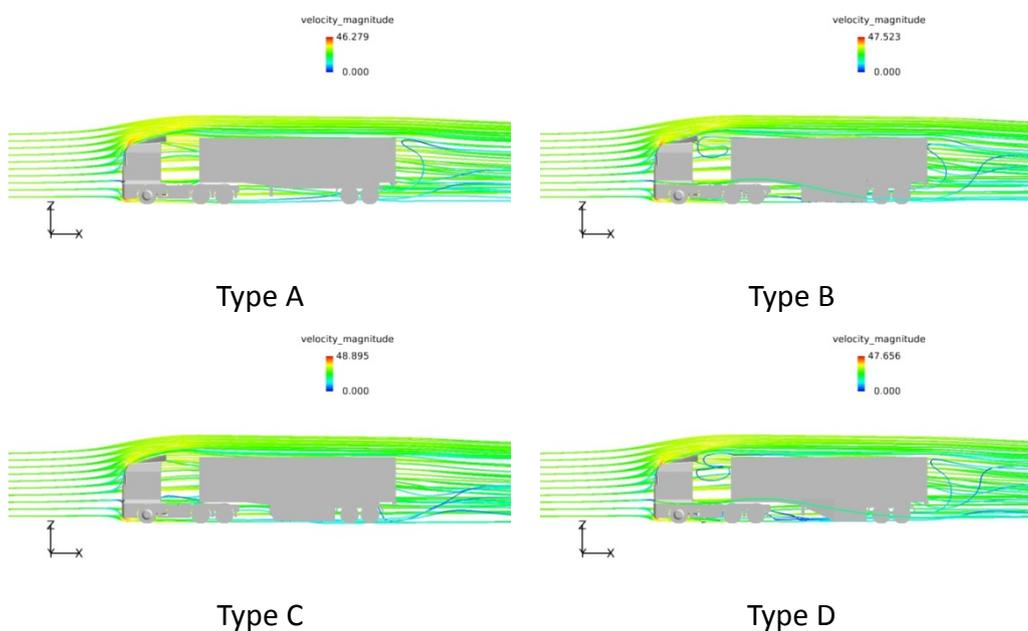


圖 13 入口風速 30m/s 流線分布

經 Virtual Wind Tunnel 分析後，兩種入口風速及 3 種不同側裙樣式的  $C_D$  值如表 1 所示。其中 Type A(無加裝側裙)與 Type D 的側裙樣式，在兩種不同風速下其兩者的  $C_D$  值差異較小且也較高，而  $C_D$  值最小的是 Type C 的側裙樣式，入口風速在 25m/s 及 30m/s 的  $C_D$  值分別為 0.699 及 0.701，次之的是 Type B 的側裙樣式，入口風速在 25m/s 及 30m/s 的  $C_D$  值分別為 0.728 及 0.734。

表 1 入口風速 25m/s 及 30m/s 之風阻係數( $C_D$  值)

側裙樣式 \ 風速	25 m/s	30 m/s
	A	0.785
B	0.728	0.734
C	0.699	0.701
D	0.787	0.785

#### 4.2 風洞測試實驗

在風洞測試實驗以重型車輛模型縮小比例為 1/14，風速為 25m/s 及 30m/s 吹入風洞並量測計算風阻係數( $C_D$  值)，Type A 入口風速 25m/s 及 30m/s 的  $C_D$  值分別為  $0.866 \pm 0.029$  跟  $0.875 \pm 0.022$ ，Type B 則分別為  $0.820 \pm 0.035$  及  $0.833 \pm 0.023$ ，Type C 則分別為  $0.673 \pm 0.040$  及  $0.637 \pm 0.032$ ，Type D 則分別為  $0.915 \pm 0.005$  及  $0.895 \pm 0.002$ ，如表 2 所示。從測試中發現風速越高  $C_D$  值越大，且加裝側裙後風阻係數會降低，但是側裙的前端截角角度過大時，則風阻係數又會再度提高。

表 2. 不同風速條件之風阻係數表( $C_D$  值)

側裙樣式 \ 風速	25 m/s	30 m/s
	A	$0.866 \pm 0.029$
B	$0.820 \pm 0.035$	$0.833 \pm 0.023$
C	$0.673 \pm 0.040$	$0.637 \pm 0.032$
D	$0.915 \pm 0.005$	$0.895 \pm 0.002$

在測試及 CFD 模擬比對後發現 Type A、Type B 及 Type D 三種側裙樣式的兩者趨勢接近，誤差約 11% 左右，且模擬的風阻係數較小，但在 Type C 的模擬與測試比對上雖然誤差約 10% 但模擬的風阻係數則較測試高，如圖 14 所示。

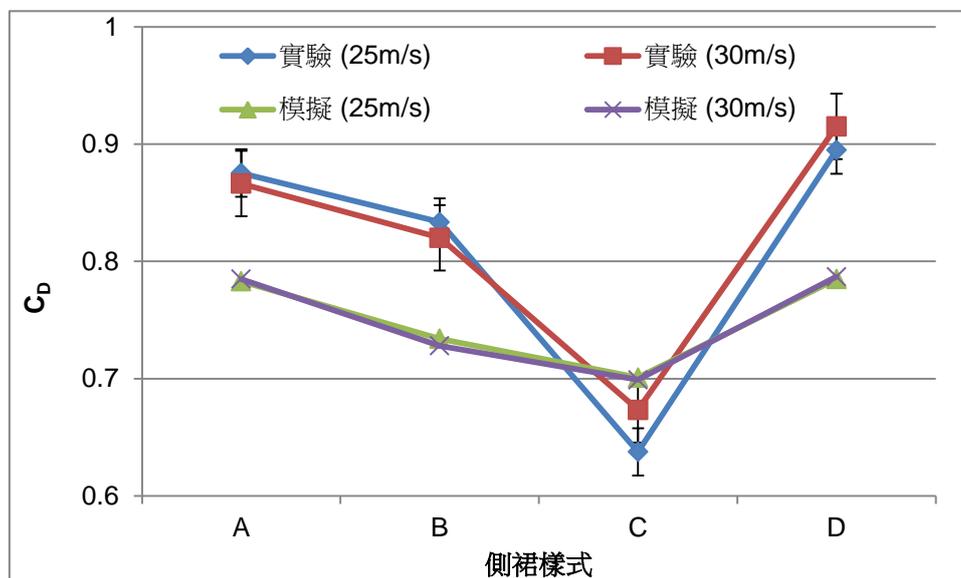


圖 14 不同風速及側裙樣式之風阻係數( $C_D$  值)模擬及測試比較

### 4.3 油耗測試實驗

燃油效率測試以 CFD 模擬及風洞測試中風阻係數最小的 Type C 來進行試驗加裝側裙後的燃油改善效應。由結果可得知，側裙的效應需在高速時(90km/h)燃油效率的才具有顯著的改善。而在時速 90km/h 時，燃油效率由原本的 2.98 km/l 提升至 3.15km/l，改善率為 5.7%，如表 3 所示。

表 3 車輛加裝各側裙前/後之燃油效率

側裙樣式	時速	60 km/h	90 km/h
	A		3.97 (km/l)
C		4.02 (km/l)	3.15 (km/l)

## 5 結論

在探討重型車輛之風阻係數( $C_D$  值)經 Virtual Wind Tunnel 模擬分析及風洞、燃油效率測試後，所得相關結論如下：

- 1.經模擬分析及風洞測試實驗比對發現，風速增加時如同行車速度加快，在有無加裝側裙的重型車輛之風阻係數( $C_D$  值)都有隨之增加的趨勢，但增加的幅度不大。
- 2.利用 Virtual Wind Tunnel 模擬分析重型車輛所得之風阻係數( $C_D$  值)與風洞測試實驗結果比對，兩者誤差接近 11%左右，原因應在模擬假設上省略許多條件，如風洞測試實驗時有架設高台置放重型汽車模型，但模擬中並無加入高台模擬。
- 3.空氣動力套件研究透過 Virtual Wind Tunnel 模擬及風洞測試，重型車輛加裝側裙最高可減少整車空氣阻力係數約 20%；而經由試車場實車油耗測試，其燃油經濟性最高可改善 5.7%。
- 4.由於目前台灣風洞測試實驗無法容納重型車輛的尺寸，故皆以縮小比例之模型進行測試，但測試中除雷諾數的探討之外，仍有許多與實際車輛測試的差距，如輪胎不轉動、無熱交換器影響及無引擎室內結構的影響等因素，但整體趨勢應與測試實驗趨勢一致。

## 6 致謝

本研究承蒙經濟部能源局 105 年度「重型車輛耗能管制與節能應用技術推廣計畫」(3/3) 贊助，計畫編號 105-E0404，始得完成，僅此致謝。

## 7 參考文獻

- [1] R. M. Wood and S. X. S Bauer, "Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks", SAE Technical Paper, 2003-01-3377.
- [2] K. R. Cooper, "Wind Tunnel and Track Tests of Class 8 Tractors Pulling Single and Tandem Trailers Fitted with Side Skirts and Boat-tails", SAE Technical Paper, 2012-01-0104.
- [3] K. R. Cooper and J. Leuschen, "Model and Full-Scale Wind Tunnel Tests of Second-Generation Aerodynamic Fuel Saving Devices for Tractor-Trailer", SAE Technical paper, 2005-01-3512
- [4] R. McCallen, R. Couc, J. Hsu, J. Ross, B. Storms, J. T. Heineck, D. Driver, J. Bell, G. Zilliac, F. Browand, M. Hammache, K. Salari and W. Rutledge, "Progress in Reducing Aerodynamic Drag for Higher Efficiency of Heavy Duty Trucks (Class 7-8)", SAE Technical Paper, 1999-01-238.
- [5] R. E. Schoon, "On-Road Evaluation of Devices to Reduce Heavy Truck Aerodynamic Drag", SAE Technical Paper, 2007-01-4294.
- [6] R. M. Wood and S. X. S. Bauer, "Simple and Low-Cost Aerodynamic Drag Reduction Devices for Tractor-Trailer Trucks", SAE Technical Paper, 2003-01-3377.
- [7] D. Landman, R. Wood, W. Seay and J. Bledsoe, "Understanding Practical Limits to Heavy Truck Drag Reduction", SAE Technical Paper, 2009-01-2890.