

空氣動力節能套件應用於重型車輛之設計與分析

張祐誠¹、廖慶復²、蔡起源³

^{1,2,3}財團法人車輛研究測試中心(副工程師)

¹E-mail: uc.chang@artc.org.tw

能源局計畫編號: 104-E0404

摘要

重型運輸車輛高速行駛易造成空氣阻力上升，影響燃油經濟性，加裝空力套件可減少空氣阻力，而結合側方防止捲入裝置結構加裝空力套件側裙，承載結構單純，安裝簡易與費用低廉，投資回收期短，最符合國內業者的使用狀況，但加裝側裙勢必造成重量增加，因此本文參考國內車輛安全檢測基準、ECE R73 與 89/297/EEC 等防止捲入裝置法規，設計側方防止捲入裝置結構，並輔以電腦輔助工程分析(CAE)了解側方結構特性後，再進行結構輕量化改良設計並加裝空力套件側裙；其研究結果顯示，經由 CAE 分析設計後，在加裝空力套件減少空氣阻力並提升車輛燃油效率，亦兼顧結構強度與輕量化，進一步提升節能效果，最後進行國內業者實車製造安裝，以便拓展國內技術應用，達到增進業者落實節能減碳及減少開發時間成本。

關鍵詞：空力套件，節能，輕量化。

1. 前言

我國能源多仰賴進口，面對全球資源蘊藏有限及國際能源價格波動，節能減碳已成為我國政策推動之重點項目，而國內車輛運輸整體耗油量，若能有效降低客貨運輸業者燃油成本、提升燃油效率，即能達到節能減碳目的。

重型運輸車輛行駛時，影響車輛燃油經濟性的阻力為空氣阻力與滾動摩擦阻力，由圖 1 可知，車輛在低速時，所需克服的阻力主要來自於滾動摩擦阻力，而隨著車輛行駛速度提升滾動摩擦阻力及空氣阻力會隨著上升，但當車輛行駛速度到達 80km/hr(50mph)時，空氣阻力開始大於滾動摩擦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。

根據研究顯示[1]，重型運輸車輛之空氣阻力主要來自於，車頭迎面風處、車頭與後方貨櫃之間隙、貨櫃下方空隙及貨櫃末端，車輛高速行駛氣流易在車身空隙處形成滯流區，如圖 2 所示，造成空氣阻力上升，影響車輛的燃油經濟性，因此，可透過加裝空力套件減少空氣阻力，而在重型車輛空力套件研究中，貨櫃下方加裝側裙最廣為討論研究，且逐漸被應用於實務上，主要原因為貨櫃承載結構單純，安裝簡易與費用低廉，投資回收期短，但安裝時仍需考量車體側方防止捲入裝置法規、日常使用與維修保養空間，另多篇文獻研究指出重型運

輸車輛加裝不同型式側裙可減少空氣阻力係數 5~18%，進而增加燃油效率 2~9%[1~6]。因此，結合側方防止捲入裝置(Lateral Protective Devices)結構設計加裝側裙最符合國內運輸業者的使用狀況，然而加裝側裙勢必造成重量增加，因此如何在符合法規下同時達到空力套件節能性與結構輕量化為本文研究議題。

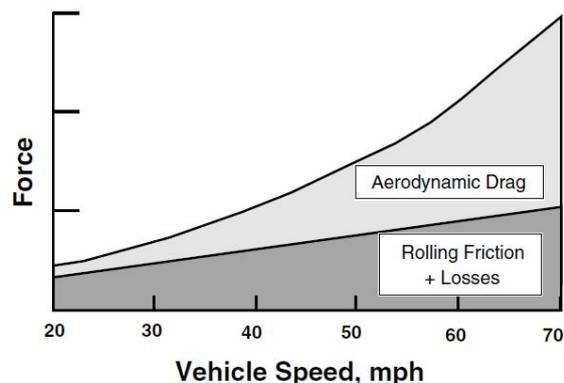


圖 1 拖車於不同速度下的空氣阻力及滾動阻力變化[1]

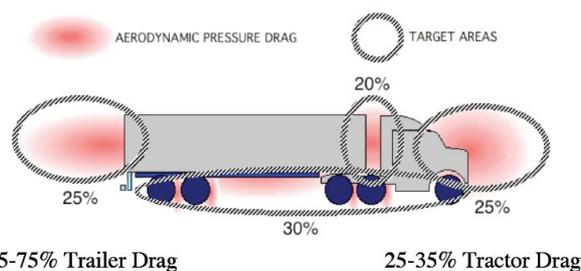


圖 2 重型運輸車輛風阻力產生區

目前，國內外應用於車身結構輕量化技術主要有兩種方法，一為高強度或輕質材料技術的應用，如鋁合金、鎂合金、塑膠、高強度鋼、複合材料...等[7-13]；二為 CAE 結構輕量化技術[14~19]。本文以上述兩種方法相輔相成，依據國內車輛安全檢測基準、ECE R73 與 89/297/EEC 等防止捲入裝置法規[20-24]，設計原始側方防止捲入裝置結構，並輔以電腦輔助工程分析(CAE)了解原始側方結構特性後，再進行結構輕量化設計並加裝空力套件側裙減少空氣阻力，亦達到結構強度與輕量化，進一步提升節能效果，最後進行國內業者實車製造安裝，以便拓展國內技術應用、創新研發及推動

技術國產化，達到增進業者落實節能信心、降低成本、減少開發成本與時間、提升產業競爭力及廣收節能減碳之綜效。

2. 研究方法與步驟

本文研究流程，如圖3所示，依據防止捲入裝置法規，以國內現行重型運輸車輛為雛形，利用電腦輔助設計軟體(2D-AutoCAD/3D-Inventor)建立貨櫃下方結構空間規劃與側方防止捲入裝置設計之2D草圖/3D模型，再藉由工程分析軟體(HyperMesh)建構有限元素模型，依據防止捲入裝置法規設定拘束與負載條件，以LS-DYNA進行擠壓強度模擬分析，以了解側方防止捲入裝置結構受力情況後，依其結構空間使用規劃、結構形式及材質，進行結構輕量化與側裙設計，最後進行實車製造安裝。

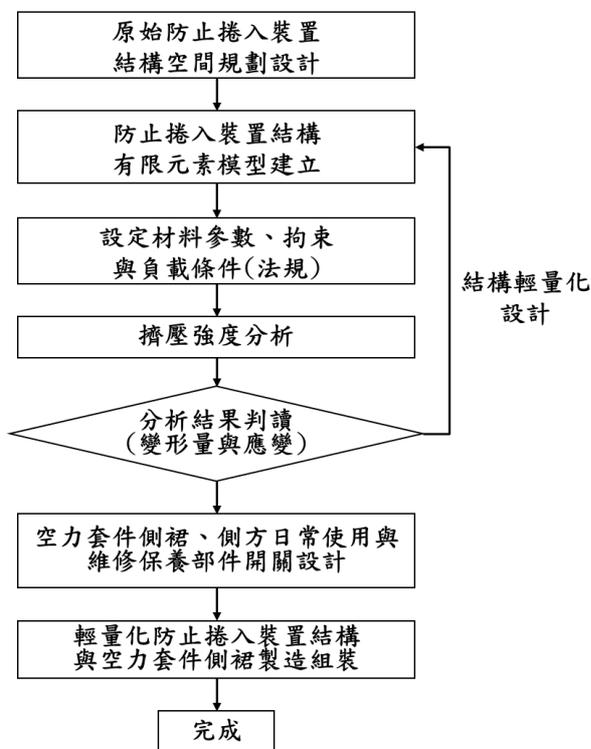


圖3 研究流程圖

3. 側方防止捲入裝置(Lateral Protective Devices)規範

3.1 側方防止捲入裝置之介紹與國際規範

在國外，無論是歐洲、美國還是日本等先進國家，大貨車或拖車側方結構設計均須遵守側方防止捲入裝置法規規範，避免事故發生時，被撞倒的路人或機車騎士被捲入大型車車底下面，而造成傷亡，保護側方車輛及乘員安全，故本文結合側方防止捲入裝置結構設計加裝側裙時，亦需考量其相關設計與規範。一般防止捲入裝置結構設計上主要以金屬欄杆、金屬板、金屬網狀板件結合，如圖4所示，並與車輛底盤大樑或其他車體主結構部份連接，裝設之位置需在最外側後輪輪胎接地面

與車輛行進方向平行之中心線之外側，如圖5所示，並規範其下緣距地高、機車把手高度範圍設置連續橫向平面或外側表面(含突出物)不得突出車身及表面應平滑，以達到有效防止被捲入之風險。

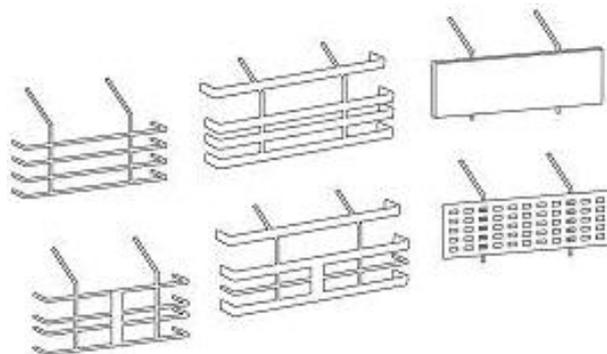


圖4 常見左右兩側防止捲入裝置型式

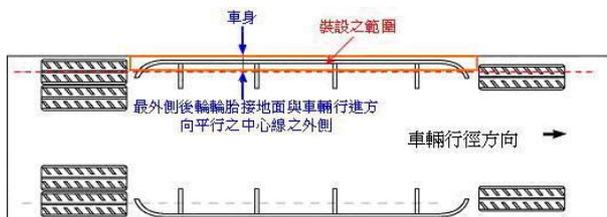


圖5 左右兩側防止捲入裝置安裝位置示意圖

國際側方防止捲入裝置法規有 ECE R73 與 89/297/ECE 法規規範，而國內早在 1998 年實施車輛安全型式認證時，即開始要求大型車輛必須符合該項之法規要求，現行只要針對貨車之總重量逾 3.5 公噸(N2 類)及拖車之總重量逾 750kg(O2 類)，則必須安裝左右側方防止捲入裝置，訂定有「車輛安全檢測基準 070」左右兩側防止捲入裝置與後方安全防護裝置(或保險槓)規範，其國內與國際防止捲入裝置法規規範比較整理如表 1。

表 1 側方防止捲入裝置法規比較總表[14-19]

法規	適用車種	尺寸要求	強度要求
ECE R73 (E.U.)	N2, N3, O3, O4	O	O
89/297/EEC (E.U.)	N2, N3, O3, O4	O	O
車輛安全檢測基準 070	N2, N3, O3, O4	O	X

[註]: 依據歐洲經濟共同組織(EEC)對於車輛種類定義

N1: 最大重量不得超過 3.5 噸之貨車。

N2: 3.5 噸以上 12 噸以下之貨車。

N3: 12 噸以上之貨車。

O1: 最大重量不得超過 0.75 噸之拖車(含半拖車)。

O2: 0.75 噸以上 3.5 以下之拖車(含半拖車)。

O3: 3.5 噸以上 10 噸以下之拖車(含半拖車)。

O4: 10 噸以上之拖車(含半拖車)。

3.2 側方防止捲入裝置之強度規範

89/297/EEC 及 ECE 73 法規標準強度規範如下：

1. 適用車種：N2，N3，O3，O4
 2. 壓頭：壓頭尺寸為圓形平面壓頭，直徑=220±10 mm。
 3. 強度規範：1KN 水平靜力施於側方防止捲入裝置之任意處。
 4. 強度要求：
 - (1)防止捲入裝置之最後250 mm 最大變形量<30 mm。
 - (2)防止捲入裝置之其他部分最大變形量<150 mm。
- 89/297/EEC 及 ECE 73 中有提及在製造廠要求下，且經技術測試服務單位同意，測試程序可以運用計算的方式模擬。

4. 原始側方防止捲入裝置結構有限元素模型建立與分析設定

4.1 有限元素模型

目前裝置在大型車及拖車上之側方防止捲入裝置之結構型式種類繁多，本文以 17 公噸大型貨車為目標車型，依據法規標準規劃距地高、桿件間距與前後輪距離，以實車尺寸繪製建構貨櫃下方空間使用規劃與原始側方防止捲入裝置結構，支撐結構由方形管、C 形管及折形板搭接而成，三角形搭接側方焊在車身大樑上，空間使用規劃與側方防止捲入裝置結構佈置圖，3D CAD 模型，如圖 6,7 所示。



圖 6 整車側方防止捲入裝置外觀圖

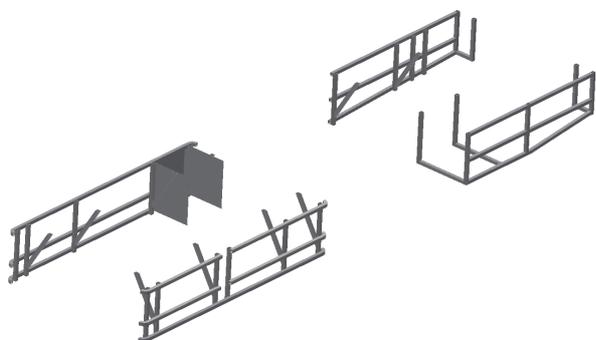


圖 7 側方防止捲入裝置結構圖

4.2 有限元素模型與材料參數

本文以有限元素模型建立前處理工具 Hypermesh，將幾何模型取中性面以薄殼元素

(Belytschko-Tsay shell element)完成模型網格化，建立側方防止捲入裝置有限元素模型，如圖 8 所示，結構以方型鋼管與角鋼焊接而成，主結構材料為 SAPH440，斜撐與輔助支撐為 SS400，材料參數與規格，如表 2,3 所示，並建立壓頭模型給予負載，模擬實際測試方式，利用非線性動態有限元素分析軟體 LS-DYNA 來模擬側方防止捲入裝置受到半靜態力擠壓過程，輸出擠壓變形量和應力。

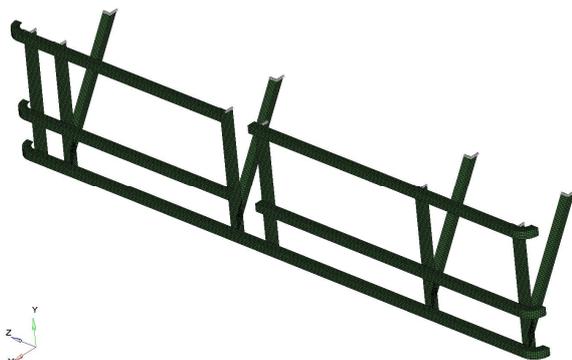


圖 8 側方防止捲入裝置有限元素模型

表 2 構件幾何材料表

編號	名稱	材料	厚度
1	立桿	SAPH440	3mm
2	斜撐	SAPH440	3mm
3	主橫桿	SAPH440	3mm
4	輔助橫桿	SS400	3mm
5	隔板	AL7005	1.2mm

表 3 材料特性表

特性	SAPH440	SS400	SGHC	單位
楊氏係數	210,000	210,000	210,000	MPa
浦松比	0.3	0.3	0.3	-
密度	7.8e-9	7.8e-9	7.8e-9	ton/mm ³
真實降伏強度	305	245	205	MPa
真實極限強度	536	484	324	MPa

4.3 負載條件與邊界條件設定

1. 邊界條件

側方防止捲入裝置結構與車體大樑或車體主結構連接焊接，故接合處進行六個自由度拘束，如圖 9 紅圈所示。

2. 負載條件

依據 89/297/EEC 及 ECE 73，側方防止捲入裝置測試過程在壓頭施加 1KN 水平靜力以非常低的等速度去擠壓側方防止捲入裝置剛性最弱之位置，如圖 10 所示，並參考規範與車體結構擠壓文獻[23~25]進行設定，一般擠壓速度在 20~90mm/min 之間，若速度設定

過高，則會造成動態效應明顯；但在模型元素龐大時，其速度設定過低，將造成分析時間過長。

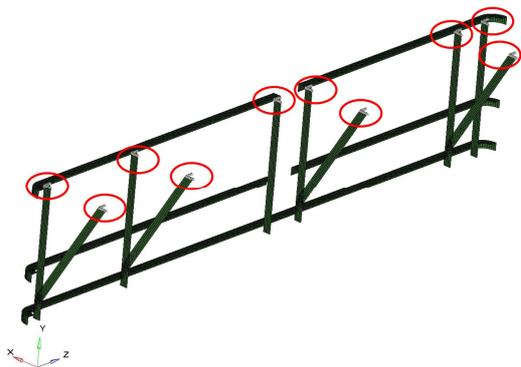


圖 9 側方防止捲入裝置邊界示意圖

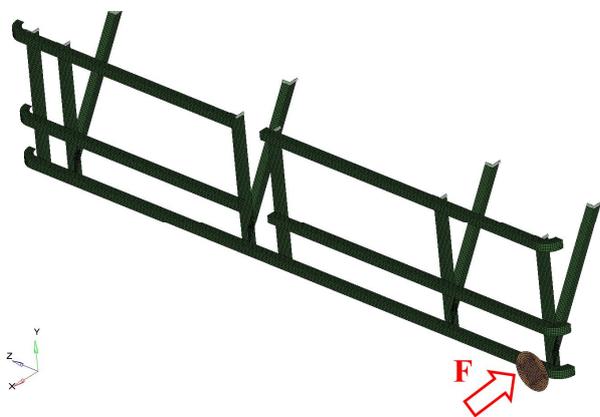


圖 10 側方防止捲入裝置負載示意圖

4.4 側方防止捲入裝置結構分析結果

側方防止捲入裝置結構在承受壓頭負載擠壓條件下，進行擠壓分析後，取其右下方結構最弱處之變形量結果，其最大變形量為 0.25mm，如圖 11 所示，而結構最大 VonMises 應力為 60.9MPa，如圖 12、13 所示，側方防止捲入裝置所有構件均未產生破壞(應力未超過材料之破壞強度)，其變形量與應力均符合法規之要求。

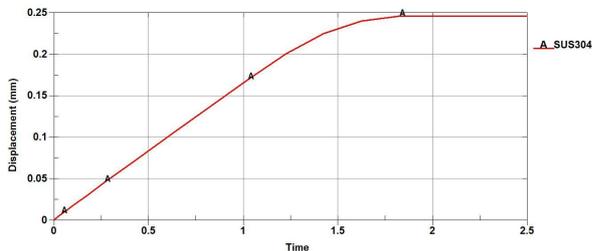


圖 11 側方防止捲入裝置負載最大變形量圖

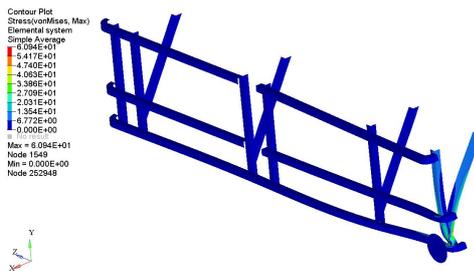


圖 12 側方防止捲入裝置 VonMises 應力分佈圖

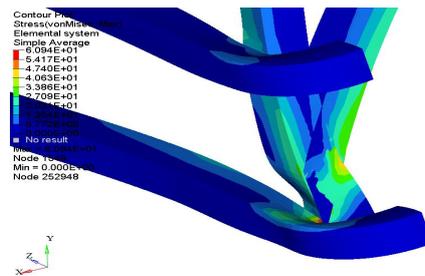


圖 13 側方防止捲入裝置 VonMises 應力分佈圖
(局部放大)

5. 側方防止捲入裝置結構輕量化與空力套件側裙加裝設計分析

5.1 結構輕量化與空力套件側裙加裝設計

國內重型運輸車輛運輸業者於貨櫃下方結合側方防止捲入裝置結構設計加裝側裙，可減少空氣阻力係數，進而增加燃油效率，然而側方防止捲入裝置加裝側裙勢必造成重量增加，因此，藉由 CAE 分析技術，了解側方防止捲入裝置結構受力情況後，依其結構空間使用規劃、結構形式及材質，進行結構輕量化與側裙設計，同時達到設計節能空力套件與結構輕量化，依據原始側方防止捲入裝置結構分析結果，進行有效的輕量化與結構改善設計，材料由鋼材變更為鋁合金 AL5052，材料之楊氏係數 68,900 MPa、浦松比 0.33、密度 2.7e-9 ton/mm³、真實降伏強度 193 MPa、真實極限強度 255 MPa，鋁合金密度僅鋼材 1/3，可將結構輕量化，其強度僅微幅降低，但其楊氏彈性係數亦相對大幅降低，將造成變形量增加。而由原始側方防止捲入裝置結構分析結果可知，所受負載主要來自外側水平負載，故改良設計均佈結構，加強下方管件，並將角鋼改為封閉結構之長方管，縮小長方管高度增加深度，如圖 14 所示，提升水平負載強度，增加其抗彎強度，在相同的強度與變形量下，有效提升結構強度與輕量化，亦能減少自重負載造成變形量，配合安裝空力套件，減少風阻並提升車輛燃油效率，並同時兼顧結構強度與輕量化，提升整體節能效應。

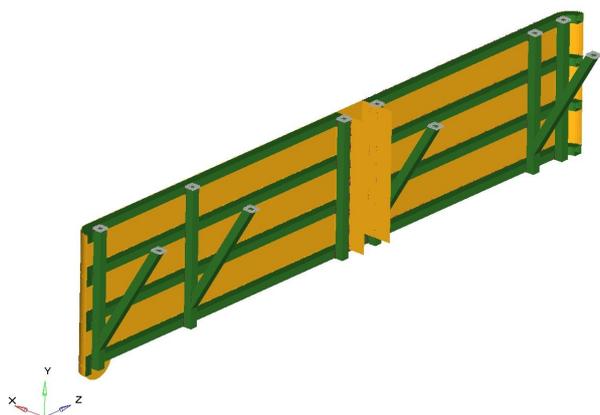


圖 14 側方防止捲入裝置結構輕量化與空力套件側裙加裝設計外觀圖

而加裝空力套件側裙設計，除須考量車體側方防捲入裝置法規尺寸之上緣距地高、前後輪距與彎角設計等，尚需考量日常使用與維修保養空間，日常使用上須考量滅火器、加油孔、上車踏板、板車、尾門開關、電燈開關、工具箱、方向燈、照輪燈與倒車燈等，此外，須注意維修時所需空間開關門，如電瓶、尾門機構、油壓與氣瓶等，空力套件側裙設計上，亦可使用輪弧減少空氣流入，更可有效提升節能效果，並依據空力套件 CAE 流體力學分析與風阻係數研究文獻[26]，進行其空力套件側裙造型設計，其空力套件側裙設計示意圖，如圖 15、16 所示。

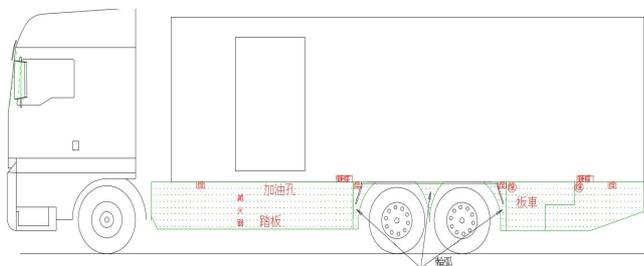


圖 15 車輛左方空力套件側裙設計示意圖

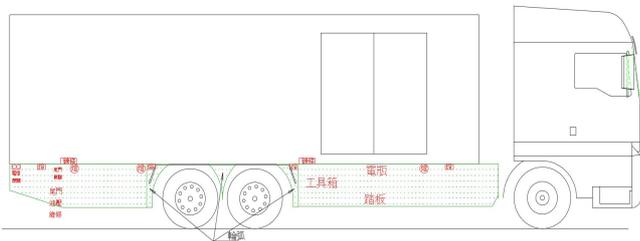


圖 16 車輛右方空力套件側裙設計示意圖

5.2 側方防止捲入裝置結構輕量化與空力套件側裙加裝分析結果

側方防止捲入裝置結構輕量化與側裙加裝設計後，其有限元素模型如圖 17 所示，依據法規進行負載擠壓分析，在相同邊界與負載條件下，如圖 18、19 所

示，取其右下方結構最弱處之變形量結果，其最大變形量為 0.26mm，如圖 20 所示，而結構最大 VonMises 應力為 16.6MPa，圖 21、22 所示，側方防止捲入裝置所有構件均未產生破壞(應力未超過材料之破壞強度)，其變形量與應力均符合法規之要求。經由 CAE 分析進行側方防止捲入裝置結構輕量化並考量加裝空力套件側裙設計，與原先側方防止捲入裝置結構比較其結果，如表 4 所示，其單邊原始側方防止捲入裝置重量由 41.3kg 減輕為 31.7kg，輕量化 23%，其 VonMises 應力則由 60.9MPa 改善為 16.6MPa，強度增加 73%，然而以鋁材減輕重量造成變形量相對增加，但透過 CAE 改善設計，變形量由 0.25mm 增加為 0.26mm，僅微幅增加 4%。



圖 17 側方防止捲入裝置結構與空力套件側裙有限元素模型

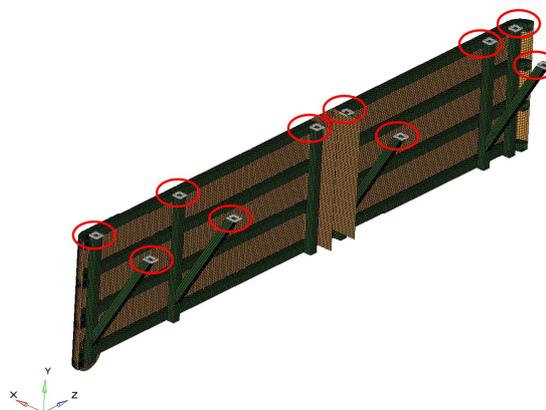


圖 18 側方防止捲入裝置邊界示意圖

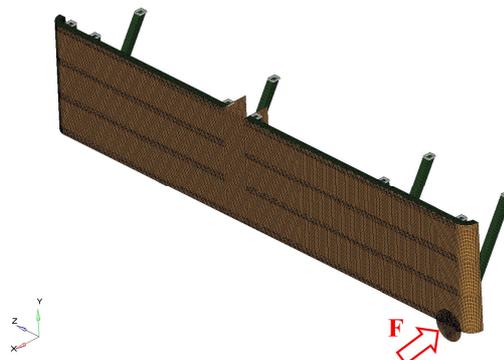


圖 19 側方防止捲入裝置負載示意圖

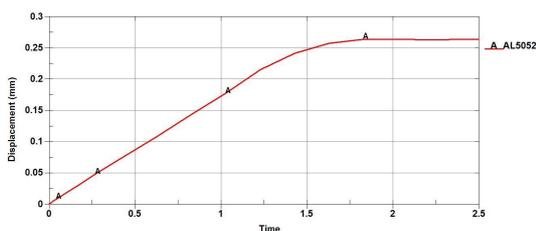


圖 20 側方防止捲入裝置負載最大變形量圖

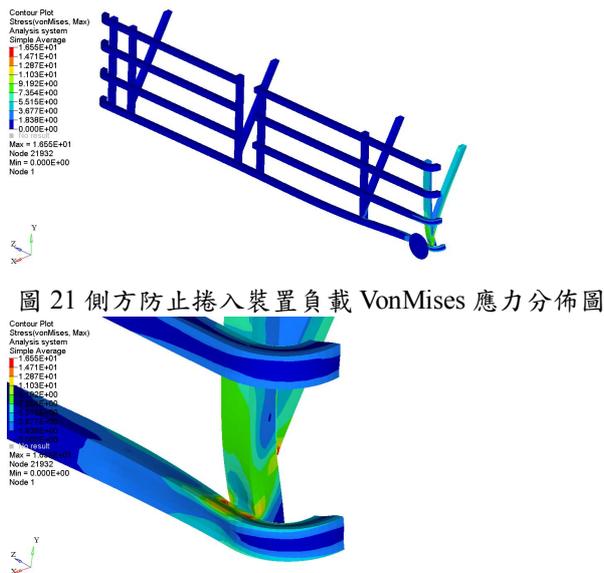


圖 21 側方防止捲入裝置負載 VonMises 應力分佈圖

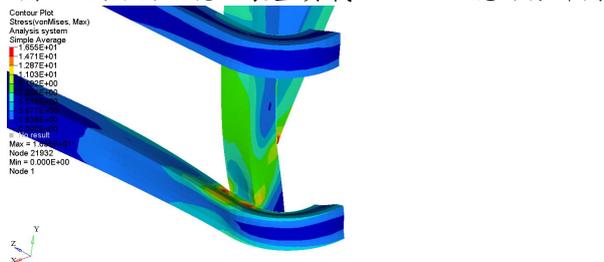


圖 22 側方防止捲入裝置負載 VonMises 應力分佈圖

表 4 輕量化側方防止捲入裝置與加裝側裙結果比較表

項目	原始側方防止捲入裝置	輕量化側方防止捲入裝置與加裝側裙	改善率
變形量 (mm)	0.25	0.26	-4%
應力 (MPa)	60.9	16.6	73%
重量 (kg)	41.3	31.7	23%

6. 結論

本研究以國內重型運輸車輛運輸業者之實車模型，依據法規運用 CAE 分析並採用鋁合金輕質材料進行側方防止捲入裝置輕量化與加裝空力套件側裙設計計算，以優化結構形狀位置與材料分佈，達到安裝空力套件降低空氣阻力提升車輛燃油效率，並滿足結構強度與輕量化，提升節能效應，經由分析計算其變形量與應力均符合法規標準，最後進行國內業者實車製造安裝，如圖 23,24 所示，以便拓展國內技術應用、創新研發及推動技術國產化，達成節能減碳之效果，以下綜合幾點結論：

1. 鋁合金相對鋼材成本比一般高，可提升結構輕量

化，提升車輛燃油效率，但仍需注意剛性降低造成變形量增加，可經由 CAE 分析進行結構改善設計或與鋼材搭配使用。

- 防止捲入裝置結構可使用長方形管，依據主要受力負載方向設計佈置，相較於門型與角鐵支架開放性結構較佳。
- 防止捲入裝置結構設計與位置，除考量日常使用與維修空間，以均佈設計較能提升結構強度，並針對結構下方採用規格較佳之支架。
- 設計空力套件側裙時，可使用輪弧設計，防止氣流於輪胎處形成滯流區，更能有效提升節能效果。
- 設計空力套件側裙設計時，前端側邊防止捲入裝置結構可設計彎角，以防止發生擦撞時勾住路人或機車騎士，並可依其設計增加導流效果。
- 空力套件側裙安裝簡易與費用低廉，投資回收期短，目前已納入新車設計或列為配備選用，可有效的增加燃油效率，達到節能效果，本文再藉由 CAE 分析進行結構強度提升與輕量化，更能雙重提升節能效應。
- 國內在空力套件側裙設計打造時，並無側邊防止捲入裝置法規強度要求，大多依據經驗，可藉由測試或分析進行改善強度與重量。



圖 23 左側空力套件側裙實體



圖 24 左側空力套件側裙實體

7. 致謝

本研究係經濟部能源局委託財團法人車輛研究測試中心辦理之「重型車輛耗能管制與節能應用技術推廣計畫(2/3)」(計畫編號：104-E0404 的部分成果)，謹此致謝。

8. 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] Lin, Dian-Yong, Hu, Huiwen, "A Study of the Welding Procedure for Aluminum Vehicle Body Structure", *The Society of Taiwanese Welding*, 2010-10-22.
- [8] Overhagh W.H. , "Use of aluminum in automotive space frame", *SAE Technical Paper*, 1995.
- [9] Schretzenmayr H. , "Technical report:the aluminum body of the Audi A8", *International Journal of Vehicle Design*, 1999, 21(2) : 303-312.
- [10] Saito M., Iwatsuki S., Yasunaaga k. et al., "Development of aluminum body for the most fuel efficient vehicle", *SAE Review*, 2000, 21(4) : 511-516.
- [11] 杜明義, 用鋁合金材料實現汽車輕量化, 輕合金加工技術, 2007, (2), 11。
- [12] 錢人一, Audi A2 車身鋁合金空間框架[J], 世界汽車, 2001, (4) : 8-15。
- [13] 肖軍, 現代轎車全鋁車身的研究進展[J], 上海有色金屬, 2006, 27(1) : 24-27。
- [14] S. Laxman and R. Mohan, "Structural Optimization: Achieving a Robust and Light-Weight Design of Automotive Components", *SAE technical paper series*, 2007-01-0794, 2007.
- [15] S. Laxman and R. Mohan, "Achieving Light-Weight Design of Automotive Bodies with Advanced High Strength Steels via Structural Optimization", *SAE Technical Paper Series*, 2009-01-0795, 2009.
- [16] 林育正, 大客車車體結構安全之優化與設計技術, 財團法人車輛研究測試中心, 2006年。
- [17] 陳奕安, "大客車骨架結構優化設計之研究" Altair 2010 台灣地區HyperWorks 技術大會論文集, 台灣, 2010。
- [18] 丁建成、陳勇全, "大客車底盤結構輕量化與靜剛性分析", 中華民國第十七屆車輛工程學術研討會, 高雄, A11, 2012年11月9日, 。
- [19] 黃成豐、陳勇全、楊峻緯、許峰玠, "電動車車體結構輕量化及碰撞分析", 中華民國第十九屆車輛工程學術研討會, 台灣中壢, A15, 2014。
- [20] 蔡世欽, "大型車輛安全防護裝置之探討", 大葉大學, 中華民國93年2月。
- [21] 車輛安全檢測基準, "07左右兩側防止捲入裝置與後方安全防護裝置(或保險槓)", 中華民國104年4月14日。
- [22] 蔡世欽, "車輛防止捲入裝置介紹", 財團法人車輛研究測試中心知識庫, 2013年 http://www.artc.org.tw/chinese/03_service/03_02detail.aspx?pid=2381&nPage=1&year=0&skind1=0&skind2=0&skeyword=%E9%98%B2%E6%AD%A2%E6%8D%B2%E5%85%A5。
- [23] Raich Horst and DaimlerChrysler AG, "Safety Analysis of the New Actros Megaspace Cabin According to ECE-R29/02", *Stuttgart, Germany*, 4th European LS-DYNA Users Conference, May 2003.
- [24] 林南君, "大貨車安全防護裝置之結構分析與設計", 中正大學, 民國93年。
- [25] 黃朝琴, "大貨車安全防護裝置強度分析與檢測技術建立報告", 車輛研究測試中心, 民國91年。
- [26] Kao-Chun, Su, Ching-Cheng Chou, Chung-Yi Chen, "Wind Tunnel and Fuel economy Tests of Truck-trailer with Side skirts", 中華民國第十八屆車輛工程學術研討會, 台灣屏東, 2013。