

大貨車應用低滾阻輪胎之適用性與成本效益分析

廖慶復^{1*}、溫智升²、王傳賢³

^{1,3}財團法人車輛研究測試中心(工程師)

²財團法人車輛研究測試中心(副工程師)

E-mail*: chingfu@artc.org.tw

能源局編號: 106-E0404

摘要

目前全球約有 30% 能源消費納入效率標準管制，其中又以運輸部門與工業部門之改善潛力最大。輪胎是汽車高速運轉行走之部件，在汽車行駛過程中需抵抗輪胎本身滾動阻力，此阻力佔車輛能耗的 15~30%，僅次於車輛發動機，目前歐盟已推動輪胎性能標籤達 4 餘年，透過標籤制度影響消費者選擇的趨勢，實施以來對節能減碳為正面性提升。本研究將透過節能成效評估模型及參考歐盟道路油耗測試之規範，於國內封閉跑道與實際道路安裝低滾動阻力輪胎進行暫/穩態油耗測試，以估算在國內貨運營運行駛型態之節能效益，作為未來國內輪胎標籤政策推動及國內貨運車隊導入之參考。測試結果顯示市售 26 噸大貨車搭載歐盟 A 級低滾動阻力輪胎，車輛行駛時所需克服之滾動阻力相對可減少 57.4 公斤，在涵蓋市區、郊區及高速三種道路型態之特定路線下，整體燃油效率平均可提升 0.19 km/L (改善 6.6%)；成本效益分析部分，低滾動阻力輪胎導入於國內城際型與都會型之貨運路線型態皆具投資還本效益(7.0~16.0 個月)，可符合國內貨運業者 2~4 年還本期目標值，且輪胎壽年內最高淨效益為 67,109 元。

關鍵詞：道路油耗、低滾動阻力輪胎、成本效益。

1. 前言

台灣地狹人稠，天然資源有限，傳統化石能源大部分需仰賴進口，根據能源局 2015 年的統計[1]，台灣能源供給量中有 97.8% 為進口能源，而在所有能源耗用量中，運輸部門又佔整體能源消費量約 12%，為主要耗用能源項目之一。因此，提升車輛燃油效率為改善運輸部門能源消耗之重點方向。而提升車輛的燃油效率有許多種方法，包含改善引擎效率、減輕車體重量、降低車輛風阻、提升輪胎節油性能等等。2015 年國際能源總署(International Energy Agency, IEA)以及國際綠能運輸理事會(The International Council on Clean Transportation, ICCT)於研究重型車輛耗能管理時，因引擎效率以及輪胎性能對於整車油耗表現的提升為最具成本效益之指標技術，故建議將引擎效率以及輪胎性能列為重型車輛耗能管理之標準[2]。且根據 IEA 統計，輪胎於行駛過程中產生的滾動阻力佔整體車輛能耗的 15~30% [3]，可知每年消耗在輪胎滾動阻力上的能源是

多麼龐大，這也突顯出輪胎節能性能提升與管理的重要性。

輪胎的滾動阻力主要來自胎紋與地面接觸部分會受力產生變形、接合面相對的滑動，當變形量越大消耗的能量也越大，其他影響的因素如輪胎直徑、行進速度、表面粗度、胎壓、胎紋深度等。輪胎滾動阻力因行駛路面的狀態而有很大的不同，在一般道路路面行駛，滾動阻力中有 90% 以上是因遲滯現象(Hysteresis)所導致[4]，另外 10% 則是由於風阻損失以及輪胎與地面摩擦造成，其中輪胎滾動行駛中造成的遲滯現象主要來自於橡膠材料，由於橡膠材料本身為一非線性的材料行為，因此橡膠材料在輪胎滾動時承受快速的施載與卸載，內部分子會產生劇烈的運動造成分子間摩擦產生能量損失，此能量損耗會轉換成熱來釋放，使得車胎溫度升高，而此現象是橡膠材料的黏彈性材料行為所造成[5]。目前國內外輪胎廠商均已投入低滾動阻力輪胎研發，以米其林公司為例，將含有二氧化矽的材料添加至輪胎表面，相較當時最先進的子午線輪胎滾動阻力大幅下降 20% 以上。二氧化矽的配方就像是潤滑劑可以填平作為輪胎胎面膠的溶聚丁苯膠分子的間隙，減少橡膠分子之間的摩擦，避免輪胎溫度提高，同時降低輪胎胎體重量，減少輪胎滾動阻力達到節能效果；若以卡車胎而言，由於本身用生膠的量較多，則需再搭配輪胎本身的結構與花紋設計，才能展現低滾動阻力的特性[6]。

因應運輸能源效率改善，許多國家已陸續推動輪胎效率分級標籤強制性法規，標示的項目主要有三項，分別為燃油效率分級(根據輪胎滾動阻力進行分級)、濕抓能力分級以及外部滾動噪音分級，其中輪胎滾動阻力與濕抓能力通常具有一定的關聯性，意即輪胎滾阻越小可能導致抓地能力變差，因此若僅考慮單一指標可能會影響到另一項性能要求。目前國際上實施輪胎分級管制的國家，為兼顧節能與安全，其管制項目至少都包含了燃油效率(滾動阻力)以及濕地抓地力兩項。國際間已實施輪胎分級管制的主要國家為：歐盟、日本、韓國及沙烏地阿拉伯等，而中國大陸也在近期陸續發布管理辦法並規劃實施，不僅可幫助消費者選擇節能安全的輪胎，亦有助於促進輪胎製造商技術提升[7]。

商用運輸車輛普遍排氣量較大、油耗高且平均行駛里程高之特性，因此其能源使用及排碳量之佔比相對較

高，因此美國加州空氣資源局 CARB 「Tractor-Trailer Greenhouse Gas Regulation」計畫中則要求所有 2010 車型年以前之聯結車車輛，自 2013 年 1 月 1 日起均需使用美國 SmartWay 認可之低滾動阻力輪胎。同時，低滾動阻力輪胎技術也是美國西南研究所評估在重型長途拖車、市區巴士等車種應用之節能技術中，預估投資可在 18 月內回收之技術之一[8]。

綜觀上述，低滾動阻力輪胎不僅在車輛能源消耗中具有一定的節能效益，並可應用於各類型的車輛上，加上國內輪胎的技術成熟、成本相對不高，亦因不涉及車輛動力系統，故不需重新進行車輛規格變更，因此，國內已有部份貨運業者正試行此項技術中；然而同一項節能技術應用於不同營運類型之車輛(例如城際型或都會型)，其節能成效將有所差異，須同步評估國內車隊的營運特性與節能投資決策。為此，本研究將透過節能成效評估模型及國外節能評估模式，於國內封閉跑道與實際道路以實車安裝低滾動阻力輪胎進行暫/穩態油耗測試，以估算國內貨運營運行駛型態之節能效益，以供國內貨運車隊導入低滾動阻力輪胎技術之參考。

2. 實驗方法與步驟

為減少運輸部門二氧化碳的排放，現階段許多國家已相繼推動輪胎效率分級標籤法規，國際輪胎廠亦同步研發新的胎面膠料配方、胎體結構與胎面花紋設計來降低輪胎滾動阻力，目前已具備生產符合歐盟燃油效率 A 級之低滾動阻力輪胎能力，進而減少車輛行駛滾動所需之能源。

商用大貨車依其車軸功能特性，可區分成轉向軸、驅動軸專屬輪胎，其中轉向軸輪胎主要著重在行駛方向穩定性及排水性，且由於扁平比較低的因素，輪胎滾動阻力等級介於 A~C 之間；而驅動軸輪胎早期主要著重在荷重與驅動性能，近期已將省油特性納入設計參數，輪胎滾動阻力等級介於 A~E 之間。本研究依測試車輛軸組型態與市場輪胎效率分布級距，規劃節能組(轉向輪 A 級與驅動輪 A 級)與對照組(轉向輪 C 級與驅動輪 E 級)兩種測試配置進行節油效益測試評估，測試流程圖與輪胎規格表如圖 1、表 1 所示。

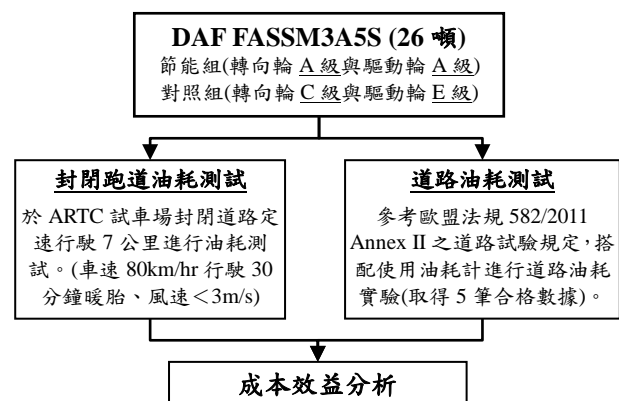


圖 1 大貨車油耗測試規劃

表 1 測試輪胎與車輛規格

測試車型		DAF FASSM3A5S (26 噸)		
測試車輛	排氣量	12,902 c.c.		
	最大馬力	340kW / 1500-1900rpm		
	最大扭力	2,300N-m / 1000-1400rpm		
	測試荷重	轉向輪：385/65R22.5、5.5 噸 驅動輪：315/80R22.5、15.1 噸		
測試輪胎	節能組	轉向輪	滾動阻力係數	3.9 kg/t(A 級)
			輪胎規格	385/55R22.5
	驅動輪	滾動阻力係數	4.0 kg/t(A 級)	
		輪胎規格	315/70R22.5	
	對照組	轉向輪	滾動阻力係數	5.7kg/t(C 級)
			輪胎規格	385/65R22.5
驅動輪		滾動阻力係數	7.15kg/t(E 級)	
		輪胎規格	315/80R22.5	

2.1 封閉/道路油耗測試

油耗測試首先規劃於車輛中心之封閉跑道進行實車定速油耗測試，測試前新胎會參考 CNS D3017 汽車滑行試驗法規定先於封閉跑道進行實車道路 200 km 磨合程序，環境條件風速設定在 3 m/s 以下，且於正式測試前輪胎會以車速 80km/h 條件下行駛 30 分鐘進行暖胎動作，暖胎完畢再立即進行測試輪胎胎壓調整，測試期間車輛空調關閉，藉以了解在穩定環境以及控制行駛條件下，各等級輪胎之滾動阻力值與實際油耗之對照關係。

接著為了更完整反映實際節油效果，另參考歐盟法規 582/2011 Annex II 之道路試驗規定，首先設定測試載重 6.4 公噸(符合最大載重 50~60%)，並於國內實際道路行駛狀態下，依據規劃路線和實際環境下的條件(大氣壓力 ≥ 82.5 kPa；溫度 ≥ 266 K)透過精密油耗計取得實際道路油耗測試結果，測試設備規格如表 2 所示；實際道路測試路線中須包含市區道路(車速 0~50 km/h)、郊區道路(車速 50~75 km/h)及高速公路(車速 > 75 km/h)三種道路型態，其各分段速度及時間分配需符合比例規定，且車輛執行測試過程須為連續不可中斷、量測設備電力來源為額外供應等。本研究規劃之實際道路測試路線總行駛路線規劃執行總里程數為 198.8 公里(約行駛 2 小時 40 分鐘)，市區道路行駛時間約為 41.6 分鐘(約為總行駛時間之 20.8%)、郊區約 48.9 分鐘(約為 24.4%)及高速公路約 110 分鐘(約佔 54.9%)，行駛路線如表 3 所示。

表 2 道路油耗測試儀器規格

儀器名稱	廠牌型式	量測範圍
體積式燃油流量計	KISTLER DFL3x-5bar	1.流量量測範圍：1~50l/h 2.解析度：0.33cm ³ 3.精確度： $\pm 0.5\%$ F.S
氣壓感測器	VAISALA PMT 16A	1.量測範圍：600~1100hPa 2.精確度： $< \pm 0.3$ hPa
溫度感測器	VAISALA HMP45D	1.量測範圍：-40~60°C 2.精確度：Pt-100 型 IEC 751 1/3 Class B

儀器名稱	廠牌型式	量測範圍
速度輛測/資料紀錄器	RACELOGIC VBOX III 100Hz	量測經/緯度、速度、方向、距離、時間、加速度等。 1.速度部份 量測範圍：0.1~1600km/h 精確度：0.1km/h 解析度：0.01km/h 2.距離部份 精確度：0.05% 解析度：1.0cm

表 3 道路油耗測試路線規劃

型態	目標車速	道路行駛路線	累積距離(km)	累積時間(min)	時間占比	法規規範
市區	0~50 km/h	車輛中心-鹿工路-海浴路-復興南路-中正路-平等路-縣道 135	13.6	41.6	20.8%	20±5%
郊區	50~75 km/h	縣道 135-縣道 134-縣道 134 甲-台 19 縣-員林大排	21.2	48.9	24.4%	25±5%
高速	>75 km/h	埔鹽系統交流道-國道 1 號-高雄苓雅區中正一路	164.0	110.0	54.9%	55±5%
總計			198.8	200.5	100.0%	

2.2 成本效益分析

國內貨運業者對於節能技術的投資，多數仍為保守的態度，因此一項節能技術要能夠吸引業者，除了本身需具節能改善潛能外，其投資利潤與還本年期更是業者重視的因子，大部分業者均認為投資一項節能技術設備，應能夠在 2~4 年還本才願意投資。因此，本研究依據國內貨運業者營運資料、及輪胎相關成本與油耗評估參數，透過本研究建立之節能技術成本績效模式[9]，估算在不同營運型態之節能效益，以探討低滾動阻力輪胎導入國內大貨車之合適性。

由於低滾動阻力輪胎屬於後裝式的節能技術，貨運業者需要額外購買輪胎並加裝於車輛。因此，本研究將輪胎成本設定為一次性成本，亦即低滾動阻力輪胎與一般輪胎在輪胎達到使用里程後皆須更換，使用期間並無保修成本；而效益項目則主要考量燃油節省，本研究採用車輛之車年度行駛里程、輪胎技術的節能效益以及每公升燃油可行公里數，據以求得車輛導入低滾動阻力輪胎在技術壽年內可以節省的燃油量與相關金額。考量低滾動阻力輪胎使用壽年約在 2 年以內，故本研究將忽略資金的時間價值影響。

在評估指標的部份，本研究為將導入低滾動阻力輪胎技術後，對於貨運業者可能造成的影響納入考量，初步列出下列的評估指標，包含經濟效益指標、業者財務指標、以及配套政策指標，評估流程與參數如圖 2、表 4 所示。

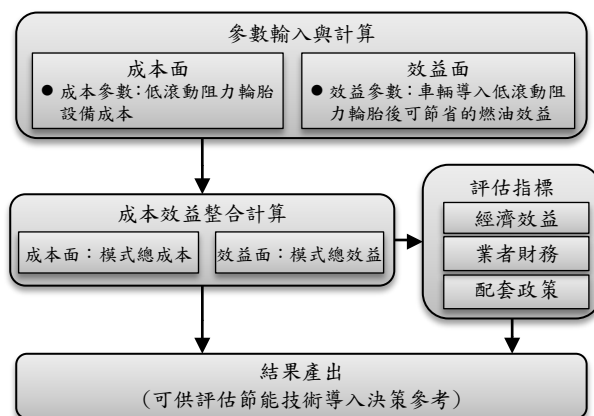


圖 2 導入低滾動阻力輪胎之成效評估模式架構

表 4 低滾動阻力輪胎技術導入之參數表

假設與參數類別		城際型	都會型	資料來源
輪胎特性	低滾動阻力輪胎成本	171,400元/整車		輪胎業者
	一般輪胎成本	140,800元/整車		輪胎業者
	低滾動阻力輪胎節能效益	8.3%	5.37%	本研究
	輪胎行駛里程	20萬公里	12萬公里	輪胎業者
	燃油價格	21.6元/公升 (2017/01-2017/08)		中油官網
車輛行駛	平均每日行駛里程(公里)	402.5	200	貨運業者
	駕駛員休息天數(天/月)	8	8	
	燃油效率(公里/公升)	3.57	2.56	

3. 結果與討論

3.1 輪胎滾動阻力與大貨車油耗相關性分析

歐盟是最早倡導輪胎標籤法對輪胎滾動阻力強制實施限制的國家地區，於 2016 年已邁入第二階段標準管制，其中針對各種類載重輪胎設定最低限值標準為 6.5kg/t，達不到最低限值標準的輪胎禁止在歐盟銷售與使用；美國加州空氣資源委員會，針對聯結車輪胎效率也制定強制標準，要求 2017 年 1 月所有替換胎市場相關車型聯結車，必須裝配通過 Smart Way 認證的輪胎，其中轉向輪滾動阻力限值为 5.8 kg/t，驅動輪滾動阻力限值为 7.3 kg/t，以提升運輸車輛能源使用效率。

輪胎滾動阻力是一種能量損失的度量，在正常行駛的工作溫度環境下，其與車輛負荷呈線性關係，故國際間目前已實施輪胎分級管制的主要國家皆以滾動阻力係數作為效率指標，即輪胎在運動方向上的滾動阻力與所乘載的垂直方向的負載比值。本研究油耗測試車輛為市售 26 噸大貨車，測試總重設定為 20.6 公噸(最大負載車重 54.5%)，其轉向軸與驅動軸分布載重分別為 5.5 與 15.1 公噸，然再分別乘上節能組與對照組所搭載的輪胎滾動阻力係數即可求得輪胎行駛總阻力，由計算結果可看出節能組滾動阻力為 81.8kg，對照組滾動阻力為 139.3kg，其車輛行駛所需克服之輪胎滾動阻力差異就

達 57.4 公斤，相當市售小客車行駛 100km/hr 所需克服之行駛阻力。

輪胎滾動阻力與實車油耗測試結果彙整如圖 3 所示，由結果可看出輪胎滾動阻力係數測試值與實車油耗有直接對等關係，當輪胎滾動阻力變小，車輛油耗節油效益越大。其中節能組相較於對照組輪胎約可減少 41.2% 滾動阻力，在封閉跑道 65kph 定速條件下，平均每公升燃油約可多行駛 1.04 km (+21.8%)、80kph 可多行駛 0.41 km(+9.2%)；本研究另針對歷年不同滾動阻力特性之客貨運車輛油耗量測結果進行相關性分析(如圖 4 所示)，由測試結果可看出市售 5 組不同廠牌不同滾動阻力特性輪胎之燃油經濟性表現具相關性($R^2=0.89$)，線性迴歸式為 $y=-0.0217x+7.7666$ ，可作為國內運輸車隊各級別輪胎油耗水準推估參考使用。

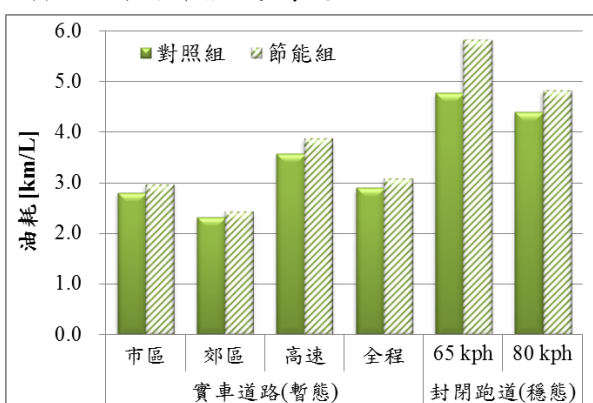


圖 3 封閉/實際道路輪胎油耗測試

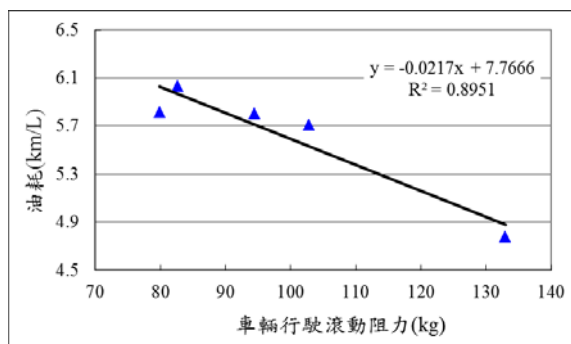


圖 4 滾動阻力與實車油耗關係(定速 65km/hr)

貨運車隊之行駛型態直接影響車輛能耗表現，其中城際型多屬長途運輸類型，有行駛於高快速路網，特徵是行駛距離長、行車速率高、可保持高速巡航、停等占比低；都會型屬於短途運輸類型，行駛於都會區內為主，特徵與城際型相反。因此本研究為了能更貼近國內貨運運輸營運型態，亦參考歐盟道路試驗規範，規劃連結市區、郊區與高速三種道路類別路線，整體行駛型態分析結果如圖 5 所示，

可看出國內市區與郊區路段相對於封閉跑道測試型態，額外增加了加速減速與怠速停等情境之能量消耗，其中怠速停等就分別占市區與郊區道路之時間占比 19% 與 31%，故整體油耗水準相對會比封閉跑道來的低，

其中在市區道路型態平均每公升燃油約可多行駛 0.15 km (+5.4%)、郊區為 0.12 km (+5.3%)；然對於巡航比例較高的高速路段，則相對會較有穩定的節能效益呈現，平均每公升燃油約可多行駛 0.30 km (+8.3%)，整體平均約為 0.19 km (+6.6%)。

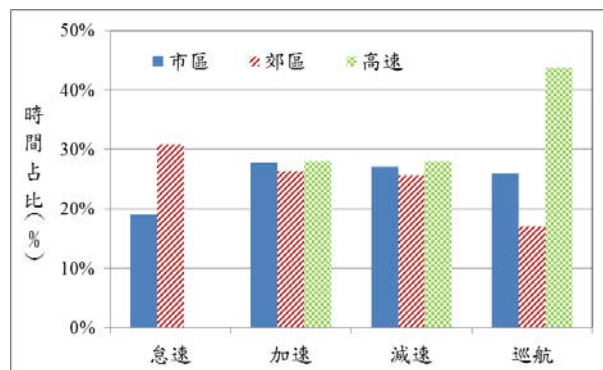


圖 5 道路油耗測試型態分析

3.2 低滾動阻力輪胎成效評估

由上述調查統計可知國內業者所生產之輪胎在降低滾動阻力技術上已具有一定水準，也證明降低滾動阻力對於車輛油耗表現有明顯的改善作用，然而實際上推動後能帶動多少節油效益，是否值得投入推動，仍需由成本效益分析來評估。在輪胎成本部分，依據表 4 可估算出一般輪胎與低滾動阻力輪胎成本差額為 30,600 元，此成本差額在於輪胎本身的原料與胎體設計所增加的成本。對於貨運業者而言，低滾動阻力輪胎導入的成功與否取決於一般輪胎與低滾動阻力輪胎成本差額，是否可於輪胎使用里程期間，藉由低滾動阻力輪胎的節能效益填補此差額，並進一步可以創造額外的效益。

由圖 6 可看出城際型 (97,709 元) 和都會型 (53,828 元) 路線的節能效益皆大於成本差額，顯示低滾動阻力輪胎技術導入城際型及都會型貨運路線，節能效益可以涵蓋成本差異，最高將可獲得 67,109 元的效益。然而，節能效益固然為貨運業者評估導入節能技術之一項誘因，但還本期亦是貨運業者決定是否導入節能技術關鍵因素之一，由圖可看出城際型及都會型路線效益與成本差額皆存在交點，表示低滾動阻力輪胎技術導入存在回本期，分別為城際型第 7.0 個月、都會型第 16.0 個月，兩者皆符合貨運業者期望的還本期 2~4 年，表示導入於國內貨運路線皆具投資還本效益。

另從政府及社會角度，以經濟效益及配套政策進行低滾動阻力輪胎技術導入之可行性探討，由表 5 可看出低滾動阻力輪胎導入城際型貨運路線之經濟效益 (NPV、B/C Ratio) 皆大於都會型路線，顯示怠速占比低與巡航占比高之營運型態，除可延長輪胎使用壽命外，亦可提升車輛燃油使用效率，其經濟效益將越為明顯；另一方面，節能技術導入城際型與都會型貨運路線估算之損益兩平的油價皆低於現況油價，顯示現況油價有助於提升低滾動阻力輪胎技術之導入誘因。

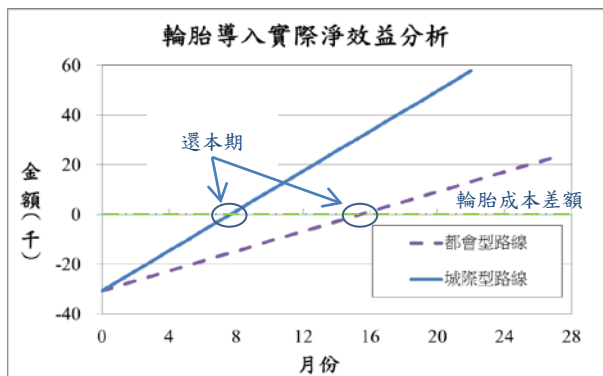


圖 6 低滾動阻力輪胎技術還本期

表 5 評估指標與決策判準

評估指標		決策判準	評估結果	
			城際型	都會型
經濟效益	淨現值 (NPV)	$NPV \geq 0$ 接受	67.1 千元	23.2 千元
	經濟益本比 (B/C ratio)	$B/C \geq 1$ 接受	3.19	1.76
業者財務	技術還本期 (PPM)	> 評估年期 接受	0.58 年-	1.33 年-
配套政策	損益兩平的油價	< 當年油價 接受	6.76 元/公升	12.28 元/公升

4. 結論

全球每天約有 39 億條輪胎在道路上使用，相當於使用 200 萬公噸燃油用來克服行駛時輪胎與路面所產生的阻力，可見輪胎滾動阻力已成為影響車輛耗能的關鍵因素之一。根據本研究調查，提升輪胎性能對車輛行駛的油耗改善為具投資成本效益的選項。自 2012 年 11 月起歐盟實施強制性輪胎最低性能標準與輪胎分級標示制度後，已帶動世界主要國家與地區之輪胎相關產業積極投入低滾動阻力輪胎研發，並陸續實施輪胎分級標示制度。本研究透過節能成效評估模型及參考歐盟道路油耗測試之規範，評估低滾動阻力輪胎導入國內貨運營運型態之節能效益。綜合評估獲得以下結論：

- (1) 輪胎性能標籤可明顯區分出不同效率等級之輪胎，提供車輛駕駛及車隊更換輪胎時之資訊參考，對於改善車輛行駛耗能及溫室效應具效益。
- (2) 低滾動阻力輪胎為目前國際間建議可直接選擇應用之節能技術，經本研究測試國內市售歐盟 A 級之大貨車輪胎約可減少 41.2% 之滾動阻力，在實際道路整體燃油效率平均可提升 0.19 km/L (改善 6.6%)，適合應用於國內貨運運輸車隊使用。
- (3) 低滾動阻力輪胎導入於國內城際型與都會型之貨運型態皆具投資還本效益，可符合國內貨運業者 2~4 年還本期目標值，輪胎壽年內之淨效益為 67,109 元。

5. 致謝

本研究承蒙經濟部能源局 106 年度「重型車輛耗能管制執行與節能應用技術推廣計畫」(1/3)贊助，計畫編號 106-E0404，始得完成，謹此致謝。

6. 參考文獻

- [1] 經濟部能源局能源統計月報「104 年能源供需概況」，2015 年
- [2] “Cost-effectiveness of engine technologies for A potential heavy-duty vehicle fuel efficiency Regulation in india”, ICCT, June 2015
- [3] EU (2009b), Regulation (EC) No 1222/2009: The labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters, Brussels.
- [4] Y. Wong. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1993. ISBN 0-471-52496-4.
- [5] 倉定國，「充氣輪胎之遲滯現象之研究」，國立成功大學碩士論文，民國 92。
- [6] Ed Pike, “Opportunities to Improve Tire Energy Efficiency,” ICCT, July 2011
- [7] 蘇博，「全球輪胎標籤制度現狀」，橡膠科技，第四期，2017 年，頁 5-10
- [8] 孟嬰，「SmartWay 輪胎認證研究」，輪胎工業，2012 年第 32 卷(2)，頁 67-69
- [9] 陳學恆，溫蓓章，陳欣怡，廖慶復，“大客車應用節能輪胎之成效及適用路線分析”，中華民國第十六屆車輛工程學術研討會，November 11, 2011，臺北
- [10] 林大鈞，陳柏君，王傳賢，“國內貨運車隊能耗特性與節能技術應用調查與分析”，中華民國運輸學會學術論文研討會，2012 年 12 月