

巴士車內噪音源與傳播路徑之評估

王栢村¹ 林鴻裕² 李俊賢³ 陳新正³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系教授

² 國立屏東科技大學機械工程系副教授

³ 國立屏東科技大學機械工程系研究生

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

巴士車內振動與噪音影響乘客之舒適性為重要研究課題，本文為瞭解巴士車廂內振動與噪音傳遞之現象，並探討主要噪音之來源，建立 (1)接受者測試、(2)噪音源測試、以及(3)噪音路徑測試等三種實驗規劃。測試之巴士狀態分為行進、車輛靜止狀態兩種測試，檢測各種不同行駛狀況下之車內噪音。振動源及噪音源測試在比較相同引擎轉速下，車輛在不同檔位(亦即變速箱)及不同行駛狀況(亦即路面)下，探討車內噪音與振動之影響。噪音路徑測試著重探討車內噪音與各部位振動噪音之頻譜關聯性。結果顯示，變速箱傳動系統在相同引擎轉速下，入檔對車後段噪音是有影響的，另外，車內主要振動與噪音量是隨著引擎轉速升高而增加，引擎高轉速所引發之激振為車內振動與噪音之主要來源。本文建立巴士車廂內各部位之振動與噪音傳輸路徑實驗規劃，可瞭解其傳遞效果之差異，有助於現況評估以及作為未來振動與噪音改善之參考依據。

關鍵詞：巴士、振動、噪音、路徑、八音頻帶、線性頻譜

1.前言

隨時代快速演進，人們對於車輛需求已到不可或缺的地步，對於車輛舒適性的要求日趨嚴格，其中車內振動與噪音的產生對乘坐舒適度的影響是相當大，因此要增加乘車的舒適度，降低長時間駕駛與乘坐在車內的疲勞，就必須依賴車內振動與噪音的改善來達成。

江等人[1]針對汽車車內噪音，進行量測分析，量測車輛在各種行駛狀況時的噪音，包括不同車速行駛時的定速噪音、緩加速緩減速時的噪音、急加速時的噪音、定檔定速時噪音，以及定檔急加速時的噪音，量測點包括引擎室、前座、後座、行李箱等位置。陳[2]根據造成車內共鳴音的各項主要因素，針對這些方向來進行問題點的原因調查。首先量測車子加速過程中在哪些轉速下會產生令人不悅的共鳴音，發現車內噪音總量部分於3000rpm附近及3600rpm附近有明顯峰值存在，故主要針對在加速過程中發生車內共鳴音的問題點(引擎轉速3000rpm及3600rpm附近)進行探討。

Nishimura et al. [3]研究引擎室的聲音傳播特性，發現聲音傳播特性在噪音源引擎表面與車身嵌板邊緣的相對位置會有所變化，使用BEM研究插入損失(insertion loss)對引擎室結構的影響。吳等人[4]針對車廂內駕駛者位置的主動式噪音控制進行研究，以汽車引擎所產生之噪音為主要噪音源，發現讓駕駛者戴上耳機作為控制音源，可以有好的噪音衰減效果，雖然不符合實際情況，但在駕駛者位置卻有一定的噪音改善。

王等人[5]探討巴士車廂內振動與噪音傳遞之現象，建立接受者測試、振動及噪音路徑測試等三種實驗規劃，發現行駛之路面激振易於激發低頻率之振動與噪音，隨著引擎轉速的增加，車內振動與噪音量也顯著提高，引擎高轉速引發之激振，為巴士車內主要振動與噪音之來源，並建立巴士車廂內各部位之振動與噪音傳輸路徑實驗規劃。

王等人[6]針對巴士車廂內之噪音進行檢測，並建立車廂內噪音整體量測標準作業程序，利用瞬時音頻譜分析儀進行量測，得到三分之一八音頻帶頻譜值，並以室內噪音評估模式，對巴士經隔音處理前後之噪音量測結果進行比較分析，發現經過隔音處理後的巴士車廂內噪音值有明顯下降，又由室內噪音評估指標可藉以瞭解車內噪音品質狀況，可做為未來評估類似車輛內部噪音之參考。

本文主要針對巴士內振動與噪音之傳輸路徑進行探討，瞭解巴士內振動與噪音來源與其貢獻度，並建立巴士車內振動與噪音傳遞之量測規劃，未來可作為巴士車內振動與噪音改善之參考。

2.實驗量測規劃

本文以圖1之巴士進行實驗，主要分析目標在建立車內振動與噪音傳遞之量測規劃、探討振動與噪音傳遞路徑分析、以及了解巴士內振動與噪音來源及其貢獻度。圖2為儀器架設照片，表1為量測設備總表，說明使用儀器名稱、型號以及用途。表2為測試規劃總表，巴士分為行進與靜止2種狀態，分述如下：

1. 行進(in-running)：巴士在行進狀態下量測各種不同狀況下之車內噪音，包括定速、上坡、下坡以及加速等狀況。量測頻道包括：車後段噪音、車中段噪音、引擎室噪音、引擎振動、車架振動、地板振動、座位振動以及車身振動等八個頻道。

量測示意圖及方塊圖如表 2。

2. 靜止(in-statics)：分為車輛在正常靜止狀態(A)及車輛後輪軸頂高(B)兩種測試狀態。在 A 狀態，分別量測在 0 檔位、不同引擎轉速下之振動與噪音量。在 B 狀態，則測試在不同檔位、不同引擎轉速下之振動與噪音量。量測頻道包括：車後段噪音、車外噪音、引擎室噪音、引擎振動、車架

振動、地板振動、座位振動以及車身振動等八個頻道。量測示意圖及方塊圖如表 2。

除行進狀態行駛於高速公路測試外，靜止狀態下之巴士量測選在安靜無干擾之地點，並量測背景噪音與振動，確認無週遭環境之影響。



(a)車外觀

(b)車內觀

圖 1 巴士實車照片



(a)引擎振動、車架振動、引擎噪音

(b)地板振動

(c)車後段噪音



(d)車中段噪音

(e)座位振動

(f)車身振動

(g)車外噪音

圖 2 儀器架設照片

表 1 量測設備總表

設備名稱	型號	說明
頻譜分析儀	SigLab20-4	頻譜分析
加速度計	KISTLER8704B100M1	引擎振動、車架振動
加速度計	KISTLER8732A500	車身振動、地板振動
麥克風	PCB130D20	車內噪音
地表振動儀	Seismic Accelerometer 731A	座位振動
噪音計	CEL593.C1	車後段噪音

表 2 測試規劃總表

項目	測試狀態	量測示意圖	方塊圖	量測頻道規劃
1	行進 (in-running)			車後段噪音量 p_i 車中段噪音量 p_{im} 引擎室噪音量 p_e 引擎振動量 a_e 車架振動量 a_c 地板垂直振動量 a_f 座位垂直振動量 a_s 車身側向振動量 a_b
2	靜止 (in-statics) A：正常靜止 B：後輪軸頂高			車後段噪音量 p_i 車外噪音量 p_o 引擎室噪音量 p_e 引擎振動量 a_e 車架振動量 a_c 地板垂直振動量 a_f 座位垂直振動量 a_s 車身側向振動量 a_b

3. 結果與討論

3.1 接受者測試

表 3 為噪音計量測車後段噪音之均能音量音壓位準結果比較表，針對各種不同行駛狀況下之車內噪音進行檢測，包括定速(V)、上坡(T)、下坡(L)、加速(U)、背景噪音(background)、靜止引擎(S,SV)不同轉速及不同檔位等狀況，綜合討論如下：

1. 定速行駛中，時速 80 公里(V-080)以上的噪音量都高於目標值 70dBA，以時速 100 公里(V-100-01)達 72.8dBA 為最高，可以看到噪音量是隨著巴士時速

- 升高而增加。
2. 上坡時的平均噪音量為 75.7 dBA(T-01)，下坡為 66.4 dBA(L-01)，加速情況為 73.5 dBA(U-01)；在靜止引擎不同轉速、不同檔位下，噪音量主要是隨著引擎轉速升高及檔位增加而增加，在檔位 5 檔、引擎轉速 1800rpm 時為最高，達 75.7dBA(SV-5-1800-03)。
 3. 整體而言，引擎入檔對車後段噪音量是有影響的，隨著檔位入到 4、5 檔位時，車後段噪音量會持續升高，以空檔與 5 檔為例，噪音量差異最多可達 5.4dBA。另外，同樣可以發現整體的車後段噪音量是隨著引擎轉速升高而增加的情況。

表 3 車後段噪音之均能音量音壓位準比較表

Case	$L_{eq,T}$ (dBA)	平均	檔位	轉速 (rpm)	$L_{5,T}$	$L_{10,T}$	$L_{50,T}$	$L_{90,T}$	$L_{95,T}$
V-060-01	68.5	68.6	4		70.0	70.0	69.0	67.0	66.0
V-070-01	69.5	69.5	5		71.0	71.0	69.0	68.0	67.0
V-080-01	70.1	70.1	5		72.0	71.0	70.0	68.0	68.0
V-090-01	71.3	71.3	5		73.0	73.0	71.0	70.0	69.0
V-100-01	72.8	72.8	5		74.0	74.0	73.0	71.0	71.0
T-01	76.4	75.7			77.0	77.0	77.0	75.0	75.0
L-01	64.6	66.4			67.0	66.0	65.0	60.0	59.0
U-01	73.5	73.5			76.0	75.0	73.0	72.0	71.0
background	61.6	61.6	0	0	62.0	62.0	62.0	61.0	61.0
S-0-1500-01	71.0	71.0	0	1500	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0
SV-3-1500-01	66.6	66.6	3	1500	68.0	68.0	67.0	65.0	65.0
SV-4-1500-02	67.9	67.9	4	1500	69.0	69.0	68.0	67.0	67.0
SV-5-1500-03	72.9	72.9	5	1500	74.0	74.0	73.0	72.0	72.0
S-0-1600-01	70.1	70.1	0	1600	71.0	71.0	70.0	70.0	70.0
SV-3-1600-01	71.3	71.3	3	1600	72.0	72.0	71.0	71.0	71.0
SV-4-1600-02	72.0	72.0	4	1600	73.0	73.0	72.0	71.0	71.0
SV-5-1600-03	73.3	73.3	5	1600	74.0	74.0	73.0	73.0	73.0
S-0-1700-01	71.1	71.1	0	1700	72.0	72.0	71.0	71.0	70.0
SV-3-1700-01	70.6	70.6	3	1700	71.0	71.0	71.0	70.0	70.0
SV-4-1700-02	72.2	72.2	4	1700	73.0	73.0	72.0	72.0	72.0
SV-5-1700-03	75.0	75.0	5	1700	76.0	76.0	75.0	74.0	74.0
S-0-1800-01	71.0	71.0	0	1800	71.0	71.0	71.0	71.0	71.0
SV-3-1800-01	71.7	71.7	3	1800	72.0	72.0	72.0	71.0	71.0
SV-4-1800-02	72.7	72.7	4	1800	73.0	73.0	73.0	72.0	72.0
SV-5-1800-03	75.7	75.7	5	1800	77.0	76.0	76.0	75.0	75.0

3.2 噪音源測試

3.2.1 變速箱與引擎之影響

為瞭解引擎轉速增加及變速箱檔位變化對車後段噪音之影響，表 4 為相同引擎轉速、不同檔位於車後段噪音量之比較表，綜合討論如下：

1. 由表 4，車後段噪音在變速箱入到 3 檔後，除在 600rpm、1500rpm 與 1600rpm 上升 1.3-2.7dBA 外，其餘轉速下噪音變化在±1dBA 之內；入到 4 檔與 5 檔時的車後段噪音量則幾乎都是上升的情況，噪音增加幅度在 0.02-4.88dBA。
2. 同樣由表 4 也可以發現，車後段噪音量是隨著引擎轉速增加而升高，引擎轉速每增加 100rpm 情況下，在靜止 0 檔位時，噪音量平均增加 0.91dBA，在靜止 3 檔及 4 檔位分別平均增加 0.68dBA 與 0.66dBA，靜止 5 檔位時則增加 0.86dBA。
3. 整體而言，自動變速箱入檔會造成車後段噪音量增加，且隨著檔位升高而增加，最高可達 4.88dBA，而噪音量是隨著引擎轉速增加而上升。

3.2.2 路面與變速箱之影響

為探討變速箱及行駛之路面激振對噪音之影響，表 5 為車後段噪音在靜止與定速之均能音量音壓位準與頻譜比較，其中(S-1500)為靜止，0 檔位，引擎轉速 1500rpm，(SV-4-1500)及(V-070)分別為靜止後輪頂高狀態及定速行駛於 70km/hr，分別為 4 檔及 D 檔，引擎轉速皆為 1500rpm，綜合討論如下：

1. 車後段噪音量在巴士檔位從 0 檔入到 4 檔後，噪音量增加約 4dB，由表 5(b)左欄頻譜比較可看出，頻

帶 315Hz-800Hz 有明顯高噪音量，此表示變速箱變換檔位會激發中頻之噪音響應。

2. 車後段噪音量在巴士定速時比靜止增加約 13.6dBA，由表 5(b)可看出主要來自低頻率，但是 dBA 值幾乎不變，因為 A 加權對於低頻率有較大之加權。
3. 由於靜止 (1500rpm) 與靜止後輪頂高狀態 (SV-4-1500)及定速行駛(V-070)之車內噪音，就 dBA 值來說幾乎相同，因此就車內噪音之評估，未來可免做定速狀態之噪音量測，靜止狀態之對應轉速，應該已有足夠之代表性。

為探討變速箱及行駛之路面激振對振動之影響，表 6 為車內不同部位之振動在靜止(S-1500)與靜止後輪頂高 (SV-4-1500) 及定速 (V-070) 之比較結果，其中 (S-0-1500) 為靜止，0 檔位，引擎轉速 1500rpm，(SV-4-1500)及(V-070)分別為靜止後輪頂高狀態及定速行駛於 70km/hr，分別為 4 檔及 D 檔，綜合討論如下：

1. 由表 6(a)，車身振動量在巴士檔位從 0 檔入到 4 檔後，振動量增加 5.7dB 為最高，就總振動量而言，入檔後各部位振動量都是增加的情形。
2. 由表 6(a)，在路面激振影響下，除地板下降 4.2dB 外，其餘部位振動量都是增加的情形，以座位振動增加 12.6dB 為最高。
3. 由表 6(b)頻譜比較可看出，引擎振動與車架振動在入檔後，除車架振動在 50Hz 處有高振動量產生外，整體變化並不明顯；而路面激振會引發 63Hz-1000Hz 中高頻部位之振動響應，未來應著重在產生高振動量之頻帶進行探討。

表 4 相同引擎轉速不同檔位於車後段噪音量之比較表(dBA)

引擎轉速	靜止，0 檔位	靜止，3 檔位	靜止，4 檔位	靜止，5 檔位	3-0	4-0	5-0
600rpm	61.413	64.159	65.766	66.298	2.7465	4.353	4.8855
700rpm	65.056	64.225	67.039	66.609	-0.83105	1.9823	1.5529
800rpm	64.888	65.076	65.654	67.519	0.18744	0.76609	2.6307
900rpm	66.438	66.221	67.13	68.017	-0.21748	0.69182	1.5789
1000rpm	67.559	67.865	69.073	69.768	0.30573	1.5145	2.2094
1100rpm	67.716	68.02	68.845	69.859	0.30446	1.1294	2.1432
1200rpm	68.971	68.555	70.004	70.102	-0.41608	1.0326	1.1306
1300rpm	69.215	68.839	69.234	70.63	-0.37652	0.018732	1.4145
1400rpm	71.33	70.89	71.04	73.12	-0.44009	-0.29022	1.7895
1500rpm	71.262	73.036	74.047	74.246	1.7742	2.7845	2.9837
1600rpm	71.496	72.883	73.779	75.114	1.3867	2.2836	3.6179
1700rpm	72.506	73.006	74.164	76.562	0.50015	1.6581	4.0561
1800rpm	73.259	73.023	74.3	77.41	-0.2365	1.0407	4.1506
dBA/100rpm	0.91	0.68	0.66	0.86			

表 5 車內噪音在靜止(1500rpm)與靜止後輪頂高(SV-4-1500)、定速(V-070)之結果比較表
(a)均能音量位準

均能音量位準	靜止(0 檔) 1500 rpm (S-0-1500)	靜止後輪頂高 4 檔,1500rpm (SV-4-1500)	70km/hr D 檔,1500rpm (V-070)	(SV-4-1500)-(S-1500)	(V-070)-(SV-4-1500)
$L_{eq,pt}$ (dB)	86.102	89.987	103.58	3.8847	13.588
$L_{eq,pt}$ (dBA)	71.262	74.047	73.576	2.7845	-0.47055

(b)1/3 八音頻譜比較

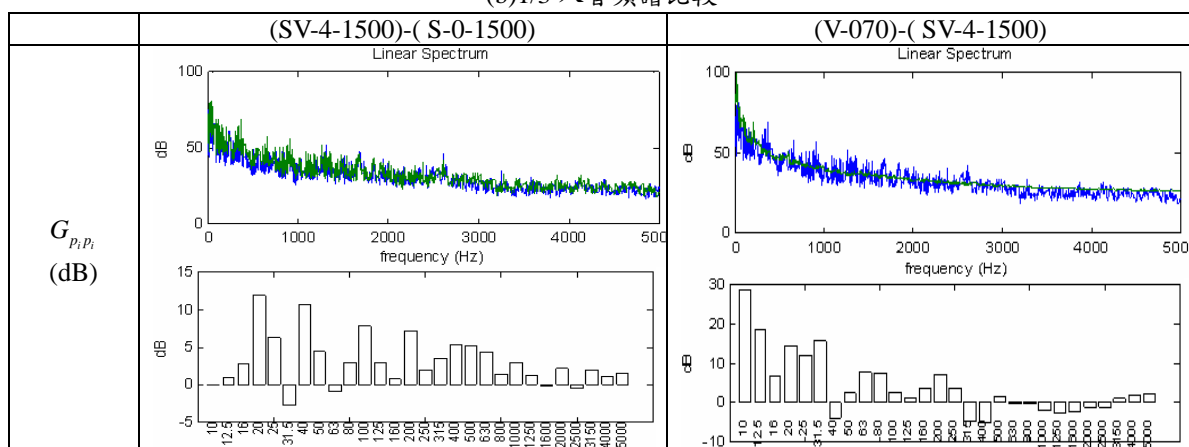
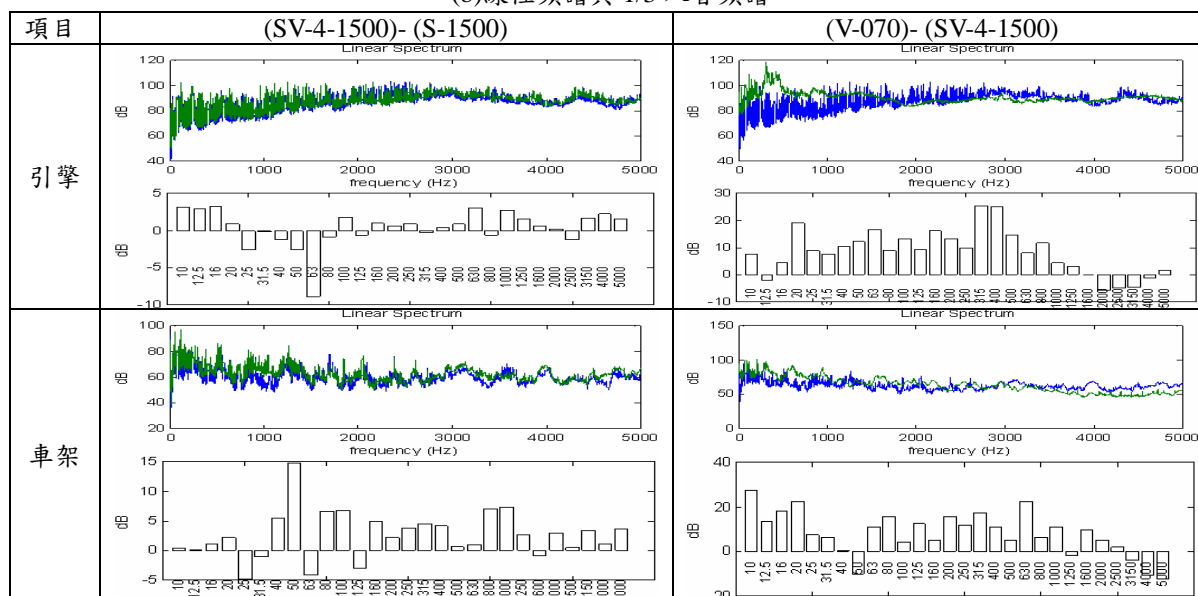


表 6 車內振動在靜止(1500rpm)與靜止後輪頂高(SV-4-1500)、定速(V-070)之結果比較表
(a)均能振動位準

均能振動位準(dB)	靜止(0 檔), 1500 rpm (S-1500)	靜止, 4 檔,1500rpm (SV-4-1500)	70km/hr, D 檔,1500rpm (V-070)	(SV-4-1500)- (S-1500)	(V-070)- (SV-4-1500)
引擎	125.38	126.12	131.34	0.74636	5.2141
車架	101.22	105.36	114.21	4.1359	8.8523
地板	96.345	98.631	94.423	2.2859	-4.2078
車身	89.688	95.451	96.135	5.7633	0.68312
座位	81.528	83.06	95.754	1.5325	12.694

(b)線性頻譜與 1/3 八音頻譜



3.3 噪音路徑測試

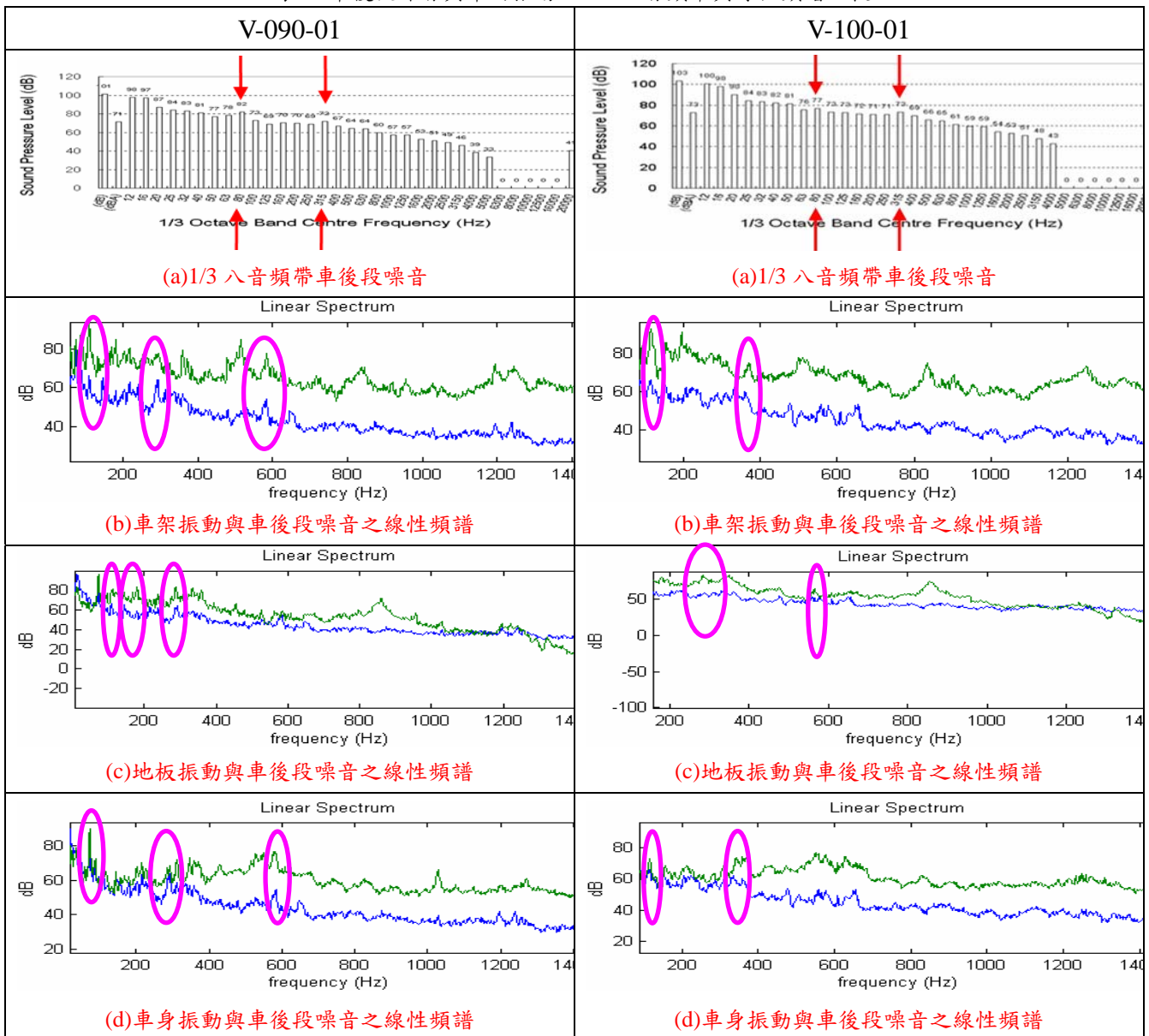
為探討車後段噪音量升高的原因，挑選兩個車後段噪音量高於目標值 70dBa 的實例進行比較分析，分別為定速 90km/hr(V-090-01)與 100km/hr(V-100-01)，其車後段噪音量分別為 71.3dBa 與 72.8dBa。表 7 分別為定速 90km/hr 與 100km/hr 下，車後段噪音與車架振動、地板振動以及車身振動之 1/3 八音頻帶與線性頻譜比較，綜合討論如下：

1. 由表 7 左欄(a)1/3 八音頻帶，觀察發現定速 90km/hr 時，頻帶 80Hz 及 315Hz 出現峰值，而由(b)、(c)車後段噪音與各部位振動線性頻譜比較，可看出車架振動、地板振動以及車身振動與

車後段噪音明顯產生許多共同峰值，而同樣在 80Hz 及 315Hz 出現峰值，因此可推測車後段噪音與車架振動、地板振動及車身振動有相當大之關聯性。

2. 由表 7 右欄(a)1/3 八音頻帶，在定速 100km/hr 時，看出同樣是在頻帶 80Hz 及 315Hz 出現共同峰值，而由(b)、(c) 車後段噪音與各部位振動線性頻譜比較，同樣可看出車架振動及車身振動與車後段噪音明顯產生許多共同峰值，所以也可推斷車後段噪音與車架振動及車身振動之關聯性。
3. 由表 7 可得知車後段噪音與懸吊以上結構共振影響大，主要影響為車架、地板以及車身部位，未來應就懸吊以上部位做進一步探討。

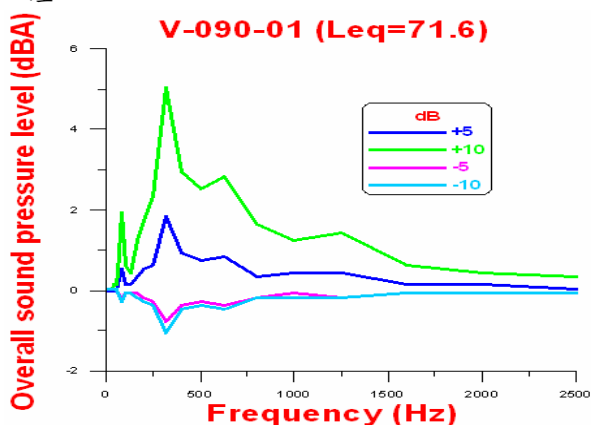
表 7 車後段噪音與車內振動之 1/3 八音頻帶與線性頻譜比較



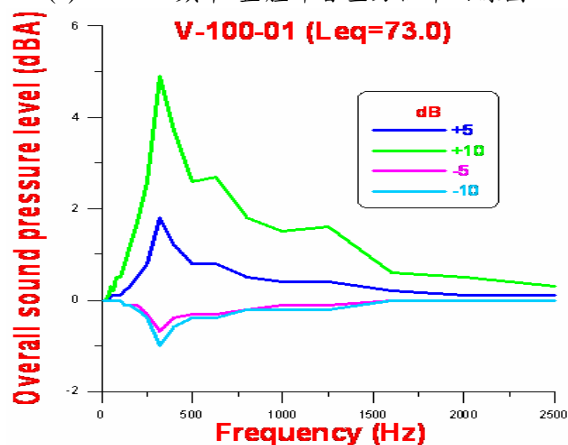
3.4 噪音改善策略探討

由 3.3 節得到懸吊以上之巴士結構共振對車後段噪音有相當大之影響，而此節主要是針對車後段噪音進行改善分析，同樣是以車後段噪音量超過目標值 70dBA 的定速 90km/hr 與 100km/hr 做探討。圖 3 為定速 90km/hr 與 100km/hr 之頻率-整體聲音壓力位準曲線圖，橫座標是車後段噪音之中心頻率(Hz)，縱座標是車後段噪音整體聲音壓力位準(dBA)，+5 與+10 表示在中心頻率增加 5dBA 及 10dBA，-5 與-10 則是減少 5dBA 及 10dBA，目的是要比較增加或是降低哪幾個中心頻率之噪音量後，整體車後段噪音量之變化結果，綜合討論如下：

1. 由圖 3(a)、(b)之頻率-整體聲音壓力位準曲線圖，以頻帶 315Hz 而言，降低 10dB 的情況下，可以降低整體車後段噪音量約 1dBA，若是增加 10dB，則整體車後段噪音量會增加多達 5dBA 左右。
2. 綜合 3.3 節與 3.4 節之結果，改善頻帶 315Hz 可以降低整體車後段之噪音量，而在車後段與引擎振動、車架振動及車身振動之頻譜關聯性發現 315Hz 為共同峰值，因此可推測改善車後段噪音最直接的方法，即是針對懸吊以上之結構進行隔振與隔音處理。



(a)90km/hr 頻率-整體聲音壓力位準曲線圖



(b)100 km/hr 頻率-整體聲音壓力位準曲線圖

圖 3 頻率-整體聲音壓力位準曲線圖

4. 結論

本文建立巴士車箱內各部位之振動與噪音傳輸路徑實驗規劃，評估車內噪音源及噪音傳播路徑，有助於現況評估及做為未來振動與噪音改善之參考依據，綜合討論如下：

1. 結果顯示，上坡及加速等高引擎轉速下的車後段噪音量都高於標準值 70dBA，而以上坡時的 75.7dBA 為最高，且可以發現整體的車後段噪音量是隨著引擎轉速升高而增加的情況。
2. 變速箱傳動系統在相同引擎轉速下，入檔對車後段噪音是有影響的，入到 3 檔位時噪音量有些微下降，當檔位升高至 4 檔及五檔時，噪音量跟著增加，在五檔時最高可增加達 4.88dBA，因此，改善變速箱傳動系統所引發之噪音是必要環節。
3. 整體而言，變速箱傳動系統以及引擎為主要振動與噪音來源，巴士本身之隔音與隔振效果已有良好成效，未來著重部分應放在改善變速箱以及引擎這兩個主要噪音來源方面。
4. 未來應針對懸吊以上之巴士結構進行振動模態測試以及結構上的探討，了解各部位振動對整體車內噪音量之影響，以期達到降低車內噪音之確切目標。

5. 參考文獻

1. 江文旺，何展效，簡惠子，2005，「小客車車內噪音改善研究」，中華民國第十三屆振動與噪音工程學術研討會，彰化，第 19-22 頁。
2. 陳柏徵，2005，「車內加速共鳴音之改善應用」，第十三屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，彰化，第 13-18 頁。
3. Nishimura, Y., and Shimizu, K., 1996, "Analysis of Acoustic Radiation Characteristics of Engine Compartment and Application to Reduction of Vehicle Pass-by Noise," *JSAE Review*, Vol. 17, pp. 133-137.
4. 吳建達，仲成伍，張智閩，白明憲，2000，「車廂內駕駛室之主動式噪音控制」，中華民國第二十四屆全國力學會議，桃園，第 9-14 頁。
5. 王栢村，林鴻裕，李俊賢，胡惠文，2006，「巴士車廂內振動與噪音之傳輸路徑探討」，第十一屆車輛工程學術研討會，彰化，第 A1-A5 頁。
6. 王栢村，林鴻裕，李俊賢，李建興，2006，「巴士車廂內之噪音檢測評估」，中華民國音響學會第十九屆學術研討會，台南，第 245-250 頁。

Evaluation of Bus Interior Sound Source and Propagation Path

Bor-Tsuen Wang¹, Hong-Yuh Lin², Chun-Hsien Lee³, and Syin-Jeng Chen³

¹Professor, ²Associate Professor, ³Graduate Student

Department of Mechanical Engineering

National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, 91207

TAIWAN

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

Bus interior noise and vibration affecting the passenger comfort is an important issue. This paper presents the experimental approach to discuss the noise source as well as the propagation path to bus interior noise and vibration. This work establishes three types of tests : (1) Receiver test, (2) noise source test, and (3) noise path test. The test bus conditions include both in-running and in-statics. For in-running conditions, the bus in constant speed, up-hill, down-hill, accelerating and deaccelerating states is tested, respectively. When the bus is in-statics, the normal static condition is tested as well as the rear wheelset with gear-power being raised up. The measurement experiments are planned to study the effect of transmission lines and road excitation on bus interior noise and vibration. The sound and vibration spectra are also studied to correlate their relation. Results show that the transmission line affects the bus interior noise increasingly at the same engine speed. The bus interior noise and vibration generally increase with engine speeds significantly. The noise reduction strategy is also studied and shows that the mid-frequency(315-1000Hz) noise is the major concern. This paper establishes the noise and vibration measurement layout to study the bus interior noise and vibration and carries out the experiments that can be used to evaluate and improve the bus interior noise and vibration problems.

key words : bus, vibration, noise, path, octave band, linear spectrum