

通風隔音窗隔音性能之研究

A Study on Sound Insulation Performance of Ventilated and Soundproof Windows

黃士賓¹、朱文松²、賴榮平³

摘要

本研究於成功大學建築系音響實驗室，利用音強法進行通風隔音窗聲音透過損失量測，探討影響通風隔音窗隔音性能之變因，包括消音箱長度、消音片數、玻璃厚度及空氣層厚度等，建立通風隔音窗之較佳基本型式，以利後續應用及開發。結果發現以裝設4片消音片之試體，其隔音性能均超過ISO(CNS)之 R_w 值34以上，ASTM之STC值34以上，CNS之 T_s 值30以上，顯示已具有良好之隔音等級評價，另外，裝設4片消音片在高頻部分比2片消音片之透過損失明顯提高約20dB，顯示消音片為主要影響通風隔音窗高頻域透過損失特性之關鍵。

關鍵字：隔音、通風隔音窗、片式消音箱、玻璃、聲音透過損失

Abstract

This study measures those specimens in acoustics laboratory in Department of Architecture, National Cheng Kung University, by the standard of sound intensity this research discusses some factors those are silencer length, silencers chips, glass thickness, then recommends the optimum type of Ventilative soundproof windows for application and development in future. The results shown the dissipative silencers with four-chips have the values over 34 dB by R_w index in ISO(CNS) standard, the STC value in ASTM is over 34 dB, the TS value of CNS is over 30 dB, shows it have well acoustic performances, the installation of four chips in the high-frequency its values is 20dB than two chips, the result shows that silencer chips could high frequency the characteristics of Sound Transmission Loss.

Keywords: Sound Insulation, Ventilated and Soundproof Windows, Dissipative Silencers, Glass, Sound Transmission Loss

¹高苑科技大學建築研究所副教授

²國立成功大學建築研究所博士班研究生

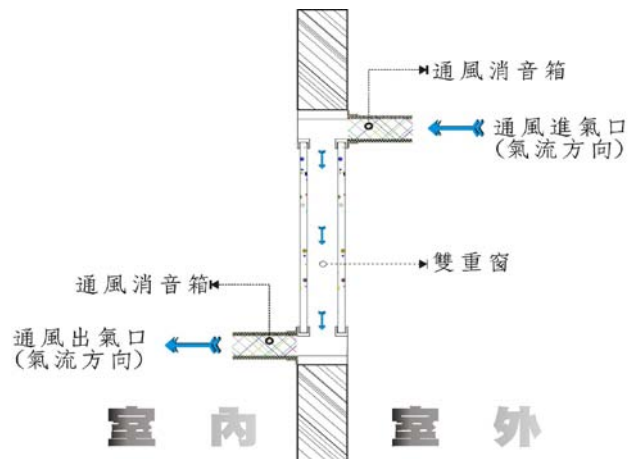
³國立成功大學建築研究所教授

1. 緣起與目的

回顧台灣地區過去都市化發展過程，『噪音』，一直以來是社會大眾困擾及討論的一個問題，隨著人們生活水準提高，對於環境生活品質需求也日益殷切，然而目前環境上，卻因都市過度密集發展下，許多建物居室大都採用單一窗，造成隔音與通風效果不良等問題伴隨而來，建築物窗戶生產因強調隔音性能而加強窗戶之氣密性，相較之下，反而造成室內通風不佳及室內汙染物無法自然排出，室內通風換氣因氣流不均勻及換氣量不足，嚴重影響居住者之舒適與健康，然而目前國內對於建築物之隔絕外部噪音之方式，絕大多數採用隔音窗及通風箱或風扇，但兩者整合探討之技術改善則無相關探討。因此本研究乃針對此問題，著重於建築物窗戶及通風之整合研究，期望透過相關實驗研究，發展出通風隔音窗之基本物理效能，以利後續應用及開發。

由於目前建築物之窗戶要同時兼顧隔音及通風性能尚不容易，為了讓窗戶同時具有隔音及通風之性能，本研究擬定之相關研究目的如下：

圖 1 通風隔音窗示意圖



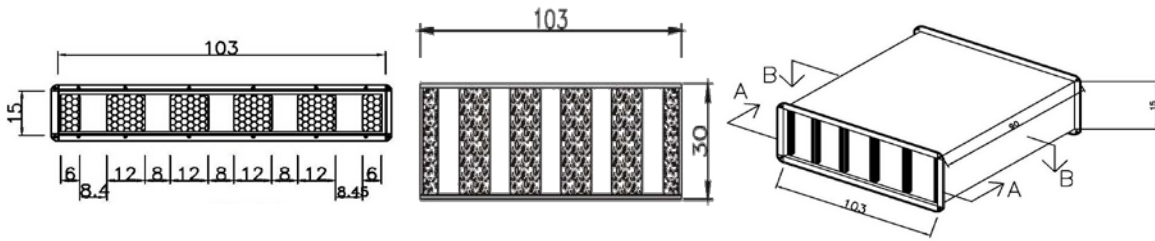
1. 探討隔音窗與消音箱整合之性能，相關機制如圖 1 所示，並建立通風隔音窗基本型式。
2. 透過通風隔音窗之各種型式，進行實驗驗證，並探討其整合效能。
3. 提出送風扇應用於通風隔音窗之最佳形式。
4. 分析各影響因子對於隔音性能之差異。
5. 提出最佳通風隔音窗之設計型式。

2. 通風隔音窗之型式設計

本研究通風隔音窗之實驗試體，係參照相關理論及設計經驗後自行設計，茲分述如下：

1. 通風消音箱：

消音箱採用工程界常用之片式消音箱，實際尺寸為 103(寬) x 15(高)，長度為 60cm 與 30cm 共兩組試體，外殼由 1.22mm 鍍鋅鋼板組成，內殼消音片由 1.2mm 鍍鋅鋼沖孔板與 32kg/m³ 玻璃纖維棉組成，其鍍鋅鋼沖孔板穿孔率為 23%，沖孔孔徑為 2.5mm，消音箱外殼與消音片係由“1/4”自攻螺絲銜接，消音片前後端為尖形 1.2mm 鍍鋅鋼板導流片，相關設計圖參閱圖 2 通風消音箱試體設計詳圖。



A-A 剖面圖

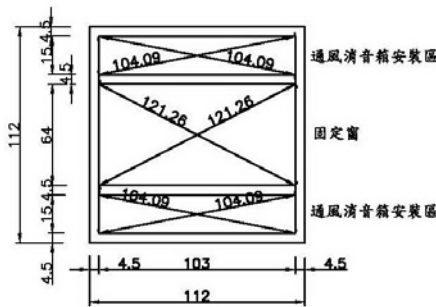
B-B 剖面圖

消音箱透視圖

圖 2 消音箱試體設計圖

2. 窗框：

窗框採用一般建築常用之鋁框，窗框總尺寸為 112cm x 112cm，鋁窗框上下開口(15cm x 103cm)提供消音箱通風安裝，鋁窗框中間玻璃開口(63cm x 103cm)，雙層隔音玻璃框兩窗框中間留有空氣層，相關設計圖如圖 3 窗框試體設計詳圖，兩者結合如圖 4 所示。



雙重窗框立面圖

圖 3 窗框試體設計圖



雙重窗框透視圖

圖 4 消音箱與窗框結合 3D 示意圖

3. 送風扇：

採用一般常用的交流軸流風扇如圖 5 所示，風扇尺寸為 172 mm x 150 mm x 50mm，安裝固定在通風消音箱的入風處共五顆，加裝送風扇之通風隔音窗 3D 示意圖如圖 6 所示。

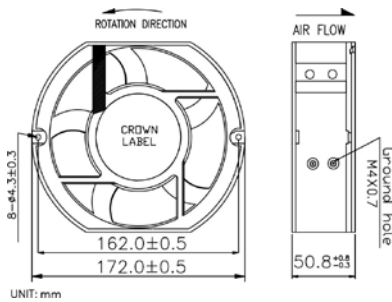


圖 5 送風扇



圖 6 消音箱加裝送風扇與窗框結合 3D 示意圖

3.研究方法

本研究以隔音性能為優先，故首先於成大音響實驗室中進行隔音量測，探討各種因子影響下之透過損失值，其中通風消音箱採用工程界常用之片式消音箱，主要原因為理論基礎成熟、具有消音量大、參數容易控制、施工簡單、材料價格便宜等優點。之後於高苑科技大學之省能實驗屋中進行自然通風與加裝機械裝置後之通風量測，透過實驗數據分析比對探討各種因子影響下之換氣量以及換氣效率，以及探討自然通風與機械通風之差異，實驗量測及分析方法茲分述如下：

(一) 實驗探討因子

1.片式消音箱之長度變化

片式消音箱屬於阻性消音箱之一，對中高頻消音效果較佳，理論上阻性消音箱之消音量與消音箱有效長度成正比，因此，提高消音量就必須增加消音管道有效長度，本研究以 30cm 與 60cm 長度為因子，探討長度影響關係，如表 1 所示。

2.片式消音箱之消音片變化

片式消音箱之消音量與每個通道的寬度有關，寬度越小，消音量越大，而與通道個數和高度無關，故針對片式消音箱之片數因子，分別為沒裝(僅靠兩側消音片半厚度之消音片)、兩片及全裝(四片)三種變因下，探討寬度變化對通風隔音窗整體效能之影響關係，如表 1 所示。

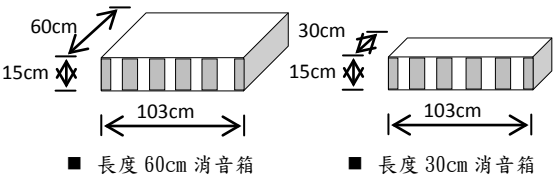
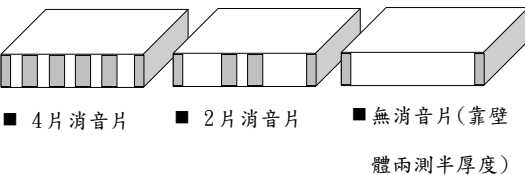
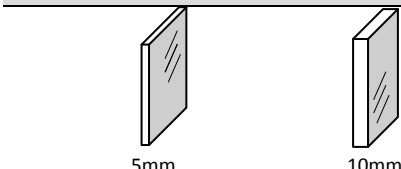
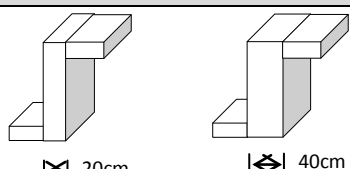
3.玻璃厚度變化

通風隔音窗試體設計可供 3mm、5mm、8mm、10mm 等四種玻璃厚度任意拆換，本研究則設定為 5mm、10mm 之玻璃厚度為實驗變因，如表 1 所示。

4.雙重窗之空氣層變化

通風隔音窗試體變化，分別為 20cm 與 40cm 空氣層變因，如表 1 所示。

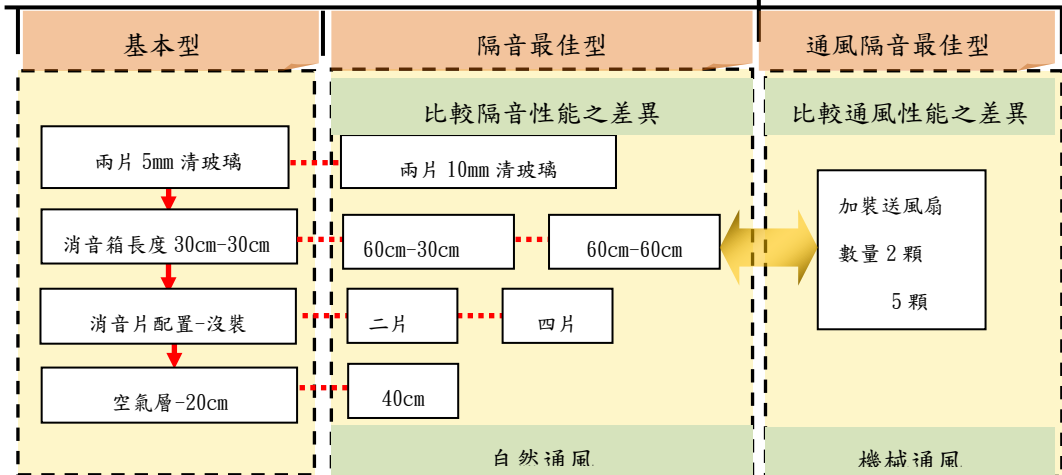
表 1 通風隔音窗之隔音性能量測試體變因說明表

| 片式消音箱之長度變化 | 片式消音箱之消音片變化 |
|---|---|
|  <p> 長度 60cm 消音箱 長度 30cm 消音箱 </p> |  <p> 4片消音片 2片消音片 無消音片(靠壁體兩側半厚度) </p> |
| 玻璃厚度變化 | 雙重窗之空氣層變化 |
|  <p> 5mm 10mm </p> |  <p> 20cm 40cm </p> |

5.自然通風與機械通風之差異

透過送風扇在通風隔音窗上加以組合，將室外空氣引入室內增加其室內換氣量，藉由控制器將風扇控制單顆風速分成弱、中、強 3 個段速如表 2 所示，送風扇具有安裝簡易、材料價格便宜等優點，比較通風隔音窗自然通風與加裝送風扇後之差異，

進而比較出通風隔音窗之最佳型式，相關實驗項目說明如圖 7 所示。



(二) 實驗量測及分析方法

1. 隔音性能測試

本研究係利用成功大學音響實驗室(Acoustical laboratory)，利用音強法之測試原理進行通風隔音窗聲音透過損失量測，音響實驗室包括一間標準之餘響室(音源室)及一間無響室(受音室)，實驗室基本資料如表 3 及圖 8 所示。

表 3 音響實驗室平面圖

| | 無響室(南室) | 餘響室(北室) |
|------|---------------------|---------------------|
| 形狀 | 長方體 | 不整型六面體 |
| 地板面積 | 37.1m ² | 32.8m ² |
| 室容積 | 211.6m ³ | 171.6m ³ |
| 室表面積 | 214.7m ² | 184.3m ² |

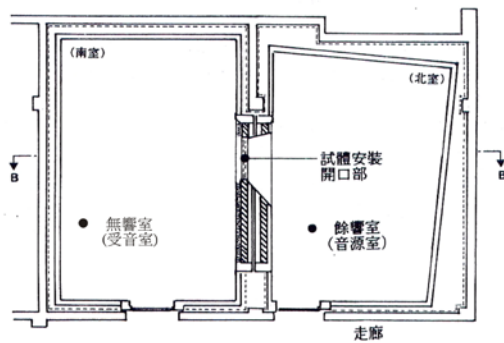


圖 8 音響實驗室平面圖

測試系統及儀器如圖 9 所示，於餘響室量測室間對角線的五個平均分佈點，計算其平均音壓；另於半無響室以音強探測器量測透過實驗試體音強級，將試體受音測部份分割成數個小面積，量測各小面積垂直透過之音強級。並採用 25 個測點，開口部大小為 118cm×118cm，有效測試面積為 112cm×112cm，測點涵蓋面積為 501.7 cm²，音強探測器麥克風間距離分別為 12mm 與 50mm，測試與試體間距為 4cm。測試聲音透過損失值係帶入公式運算而得，如圖 10 及 11 所示。

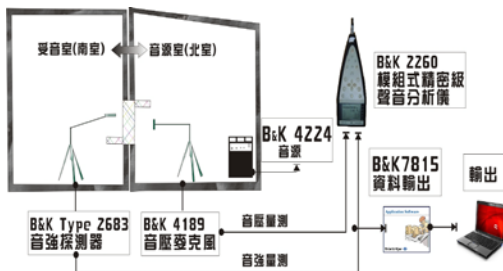


圖 9 儀器連線示意圖



圖 10 音源室試體現況



圖 11 受音室試體現況

2.通風性能測試

本研究透過高苑科技大學省能實驗屋進行通風量測，實驗室包括一間實驗屋及監測屋如表 4 所示，實驗屋內部的窗戶可以自由拆解。量測方式以風速計器量測通風隔音窗之室內外進氣氣流變化，並透過送風扇風速的改變及室外氣流的變化進行實驗的監測，進一步探討室內通風換氣效果，實驗室之平面圖如 12 所示。

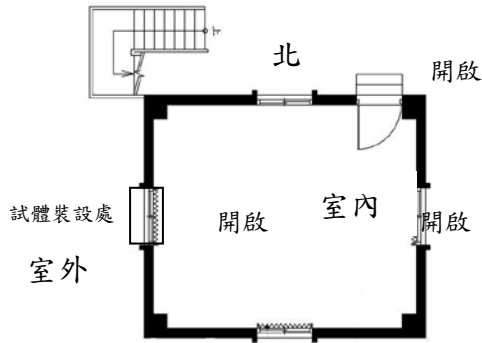


圖 12 實驗屋平面圖

表 4 省能實驗屋構造說明

| | 實驗屋 | 監測屋 |
|--------|---------------------|-------------------|
| 形狀 | 長方體 | 長方體 |
| 地板面積 | 6.5×4×2.8 m | 6×5×2.5 m |
| 室容積 | 72.8 m ³ | 75 m ³ |
| 室表面積 | 26 m ² | 30 m ² |
| 開口部窗尺寸 | 120 × 120 cm | |

測試系統儀器主要以熱線式風速計(ALNOR CompuFlow8585)進行量測，儀器架設示意圖如圖 13 所示，量測時間以一天八小時為主，量測時間為早上九點至下午五點，量測方式為將試體裝上省能實驗屋西側開口如圖 14 所示，並開啟東側窗戶以及北側門增加對流，在試體室內室外開口處，距離開口 1m 以三角架定位固定並將儀器附加伸縮活節探測針延伸至高度為 1.1m，使用風速計同部自動 5 分鐘紀錄一筆八小時共 96 筆樣本數據，並記錄室內外風速、溫度、濕度之變化，量測面積為消音箱開口面積 0.15m² 有效通風面積為 0.06 m²。

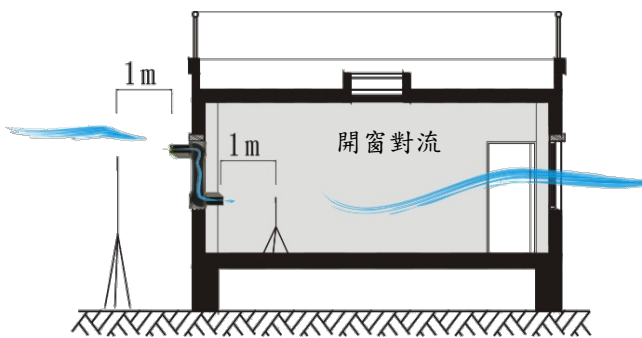


圖 13 儀器架設示意圖



圖 14 室外室內試體裝設現況

4.實驗結果及討論

(一)所有試體隔音性能之綜合比較

36 組試體之 ISO、STC 隔音等級與 CNS Ts 等級整理如表 6 所示，其趨勢大致相同，儘管增加消音箱之長度，其透過損失改善有限，裝滿 4 片消音片情形下，其通風隔音窗之隔音性能為最優，在 4 片消音片所有通風隔音窗之試體，均超過 ISO 與 CNS 之 Rw 值 34 以上，ASTM 之 STC 值 34 以上，CNS 之 Ts 值 30 以上，顯示具有良好之隔音等級評價。另外，以 5mm+5mm 清玻璃，搭配 30cm-30cm 消音箱之

通風隔音窗，其隔音性能已達到 STC 37，CNS Ts 值 35，顯示此基本型式已具備良好的隔音性能。

表 6 通風隔音窗試體整體聲音透過損失綜合比較表

| 實驗試體 | | ISO(CNS) | ASTM | CNS | 實驗試體 | | ISO(CNS) | ASTM | CNS |
|------|----|----------|-------|------|------|----|----------|-------|------|
| 編號 | 代碼 | R_w 值 | STC 值 | Ts 值 | 編號 | 代碼 | R_w 值 | STC 值 | Ts 值 |
| A | 1 | 19 | 19 | - | G | 19 | 20 | 19 | - |
| | 2 | 27 | 27 | 25 | | 20 | 26 | 26 | 25 |
| | 3 | 34 | 34 | 30 | | 21 | 37 | 36 | 30 |
| B | 4 | 19 | 19 | - | H | 22 | 20 | 20 | - |
| | 5 | 26 | 26 | 25 | | 23 | 27 | 27 | 25 |
| | 6 | 36 | 37 | 35 | | 24 | 37 | 36 | 30 |
| C | 7 | 21 | 21 | - | I | 25 | 20 | 20 | - |
| | 8 | 29 | 29 | 25 | | 26 | 29 | 30 | 25 |
| | 9 | 37 | 37 | 35 | | 27 | 38 | 39 | 35 |
| D | 10 | 19 | 19 | - | J | 28 | 20 | 20 | - |
| | 11 | 29 | 29 | 30 | | 29 | 30 | 30 | 30 |
| | 12 | 37 | 37 | 30 | | 30 | 38 | 38 | 35 |
| E | 13 | 22 | 22 | - | K | 31 | 21 | 21 | - |
| | 14 | 31 | 31 | 30 | | 32 | 33 | 33 | 30 |
| | 15 | 40 | 40 | 35 | | 33 | 40 | 40 | 35 |
| F | 16 | 23 | 23 | - | L | 34 | 21 | 21 | - |
| | 17 | 32 | 32 | 30 | | 35 | 32 | 32 | 30 |
| | 18 | 40 | 38 | 35 | | 36 | 40 | 41 | 35 |

*註：CNS Ts 值未標示者，即代表未達 Ts-25 等級線。

(二) 通風隔音窗型式之頻率特性

如圖 15 所示為填裝 5mm 厚玻璃及 30cm 消音箱之通風隔音窗頻率特性，在 4 片、2 片、無消音片 3 種因子情形下，低頻部分因雙重窗中間有空氣層的彈性變形具有減振作用，傳至第二層窗戶時震動大為減弱，使低頻部分隔音量不至下降太多；當頻率繼續增高，質量法則起主要控制作用，這時隔音量隨頻率增高而增加，至高頻時因重合效應則有透過損失下降之趨勢。因阻性消音箱之特性為具良好中高頻消音效果，消音片距越小，消音量越故導致於高頻時差異之主要原因。

(三) 消音箱片數變化對透過損失之影響

圖 15 及圖 16 為填裝 5mm 與 10mm 厚玻璃在 30cm-30cm 消音箱之消音片數變化影響關係，可知消音片為影響通風隔音窗隔音性能之關鍵，4 片情形下低頻至高頻都具有良好的隔音效果，尤其在高頻音域明顯比 2 片消音片提高約 20dB。

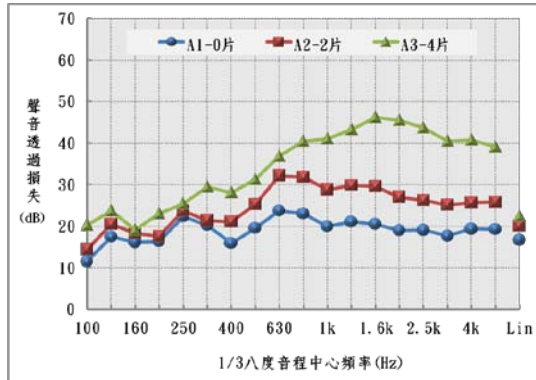


圖 15 5mm 玻璃不同消音片數比較

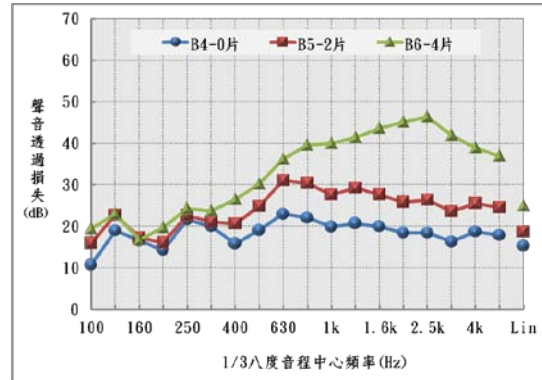


圖 16 10mm 玻璃之不同消音片數比較

(四) 不同消音箱長度變化對透過損失之影響

圖 17 及圖 18 為填裝 5mm 與 10mm 厚玻璃在 30cm-30cm、30cm-60cm、60cm-60cm 在皆為 4 片消音片下三種消音箱長度變化影響關係，顯示在消音箱長度增加時，中低頻音域之透過損失因低頻共振現象產生，故改善量並不顯著，而在 3.15KHz 左右亦受到重合效應之影響而呈現透過損失低下之趨勢，平均而言，三種變化長度每提高一個因子其平均隔音量約可提高 3~4dB

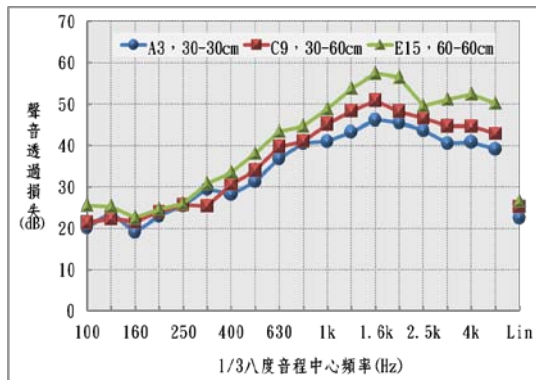


圖 17 玻璃 5mm 不同消音箱長度比較

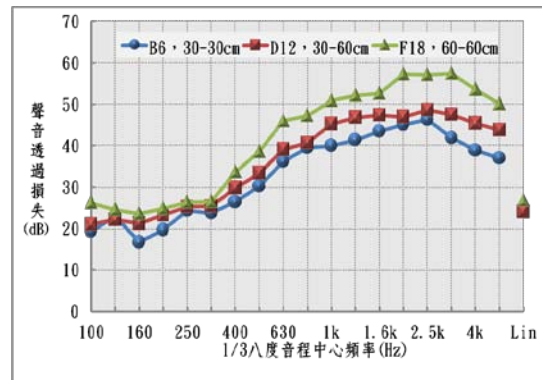


圖 18 玻璃 10mm 不同消音箱長度比較

(五) 不同玻璃厚度對透過損失之影響

以相同 30cm-30cm 消音箱，玻璃厚度 5mm 及 10mm 兩種因子做比較，如圖 19 及圖 20 中可發現，兩相比較隔音曲線並無明顯差異，中低頻率趨近於一致。

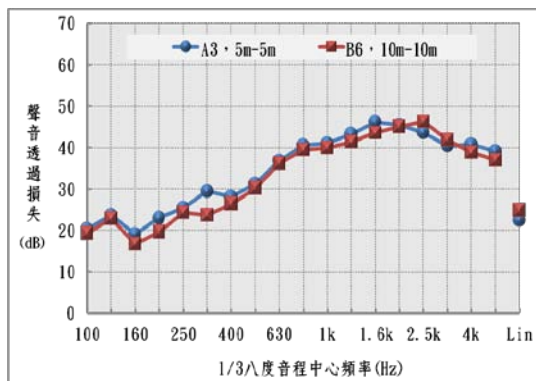


圖 19 消音箱 30cm-30cm 不同厚度玻璃

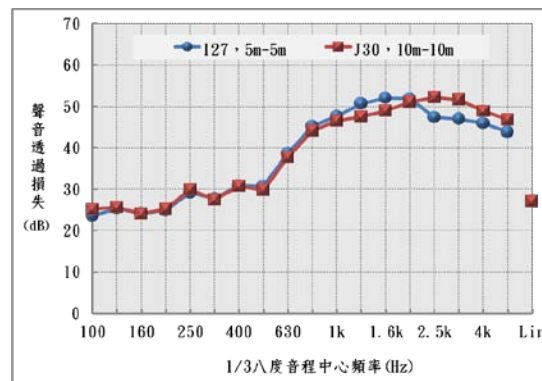


圖 20 消音箱 60cm-60cm 不同厚度玻璃比

較

(六) 不同空氣層距離對透過損失之影響

以變換空氣層 20cm 與 40cm，取相同消音箱長度、片數及玻璃厚度進行比較如圖 21 及 22 所示，當空氣層厚度增加至 40cm 時，透過損失值有提升趨勢，但低頻提升較明顯，中高频效果不大，顯示增加玻璃厚度對低頻較有效果。

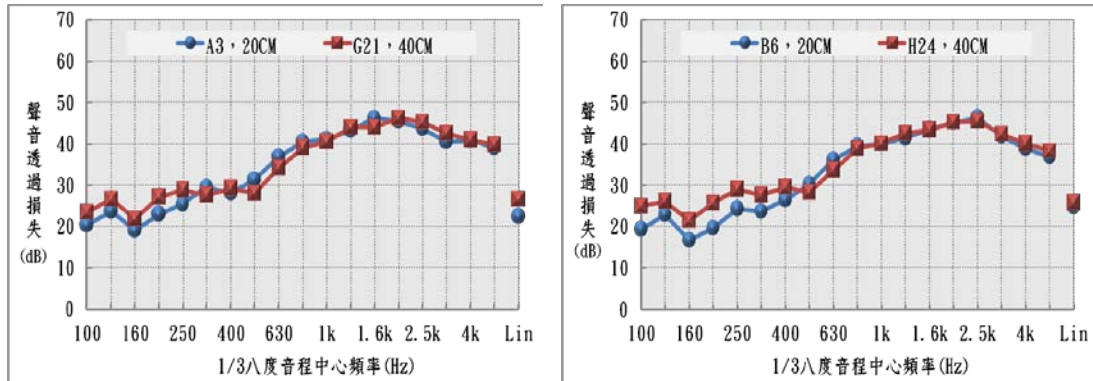


圖 21 玻璃 5mm 厚之不同空氣層距離比較 圖 22 玻璃 10mm 厚之不同空氣層距離比較

(七) 通風隔音窗之通風效能分析

實驗結果整理如表 7 及表 8 所示，顯示自然通風在一天八小時中所量測之換氣量與 ACH 值皆未達標準，表示在自然通風許可之條件之下，通風隔音窗之通風效果不佳，而加裝送風扇後，隨著送風扇的增加，通風隔音窗之換氣量與 ACH 值之符合標準比率顯著提升，加裝至 5 顆送風扇後換氣量與 ACH 值皆達到 100%，由表可知 A-1 2 顆風扇、A-2 2 顆風扇、A-3 2 顆風扇、A-3 5 顆風扇，換氣量與換氣次數均未達樣本數 96 的一半，因此不符合標準，B-2 5 顆風扇、B-3 5 顆風扇，換氣量與換氣效率均達標準值，室內通風換氣的部分以 B-3 5 顆風扇為最佳通風效能，顯示加裝送風扇後確實對通風隔音窗之通風性能有較佳的幫助。

表 8 通風隔音窗通風量測符合標準之比較表

| 編號 | 項目 | | 換氣量標準 8 | | 換氣次數標準 3~6 | |
|-----|-----------|-------|---------|------|------------|------|
| | | | 符合% | 不符合% | 符合% | 不符合% |
| 0-1 | 自然通風 | | 0 | 100 | 0 | 100 |
| A-1 | 送風扇 數量 | 2 顆 弱 | 12.5 | 88 | 9 | 91 |
| A-2 | | 2 顆 中 | 4.20 | 96 | 2 | 98 |
| A-3 | | 2 顆 強 | 37.5 | 63 | 18 | 82 |
| B-1 | | 5 顆 弱 | 16.7 | 83 | 10 | 90 |
| B-2 | | 5 顆 中 | 87.5 | 13 | 77 | 23 |
| B-3 | | 5 顆 強 | 100 | 0 | 100 | 0 |

5. 結論與未來展望

(一) 通風隔音窗整體之隔音性能

1. 裝滿 4 片消音片之隔音性能，隔音性能最高均超過 RW 值與 STC 值 34 以上，CNS 之 Ts 值 30 以上，顯示消音片數為整體隔音性能之關鍵，亦顯示 4 片消音片之情形下，通風隔音窗具良好隔音等級評價。
2. 本研究通風隔音窗之基本型，以 5mm+5mm 清玻璃，搭配 30cm-30cm 消音箱之試體，隔音性能已達 ISO 之 RW 值 34 以上，ASTM 之 STC 值 34 以上，CNS 之 Ts 值 30 以上，顯示此基本型式具備良好的隔音性能。

(二) 消音片數為影響通風隔音窗整體透過損失之關鍵

實測發現，消音箱長度增加時，中低頻音域之透過損失因低頻共振現象故改善量並不顯著，平均而言，三種變化長度每提高一個因子其平均隔音量約可提高 3~4dB。然而在消音片之角度下，在 4 片消音片情形下，無論是低頻至高頻都具有良好的隔音效果，尤其在高頻音域之隔音性能明顯比 2 片優異，整體來說，4 片消音片在高頻部分比 2 片消音片之情形下，其透過損失約可提高 20dB，顯示消音片為主要影響整體通風隔音窗透過損失特性之關鍵。

(三) 增加玻璃厚度對通風隔音窗之透過損失較無幫助

實測結果發現，有裝消音箱之通風隔音窗與沒有裝消音箱之雙層雙比較下，以變換玻璃厚度發現沒裝消音箱之雙層窗，在中低頻音域隔音效果與質量法則特性相同，而裝消音箱之通風隔音窗在低頻部分，無論增加消音片數及消音箱長度，對透過損失之影響皆無幫助，顯示此型式設計之通風隔音窗，裝設 5mm-5mm 之清玻璃已足夠，增加玻璃厚度對整體隔音性能較無幫助。

(四) 通風隔音窗之通風效能

本實驗結果顯示通風隔音窗之自然通風效果不佳，而此種形式設計之下通風隔音窗，在加裝送風扇後之應用下，均可以彌補自然通風作用下所無法達成之換氣量與換氣次數之標準，顯示此設計形式之通風隔音窗具有隔音及通風之性能。

(五) 通風隔音窗未來願景

對於建築窗戶性能而言，本研究主要針對通風隔音窗隔音性能及各因子對整體影響進行探討，希望可供應用與開發之初瞭解其隔音性能，最後仍需導向最佳化設計，須對適用性及地域性仍有諸多考量，如於室內可與傢俱或植栽整合等，如圖 23 所示，故須投入更多新思維及創新的想法，使通風隔音窗能有更多發展前景。

圖 23 通風隔音窗未來願景 3D 示意圖



6. 誌謝

本研究承蒙成功大學建築系賴榮平教授大力支持提供音響實驗室進行量測，及成功大學建築系博士班研究生劉鎧華、江仲傑兩位在實驗過程之相助，俾使本文順利完成，在此向所有參與本研究之相關人員一併致謝。

7. 參考文獻

1. 王錦堂，建築應用物理學，臺隆書店，1968年12月
2. 賴榮平、江仲傑，隔音窗之隔音性能檢測現況及檢討，中華民國音響學會，「第十三屆學術研討會論文集」，pp.C40-C48，2000。
3. J.Kang、M.W.Brocklesby，Feasibility of applying micro-perforated absorbers in acoustic window systems
Applied Acoustics，66(6)，pp. 669-689，2005。
4. F.Asdrubali、C.Buratti，Sound intensity investigation of the acoustics performances of high insulation ventilating
windows integrated with rolling shutter boxes，Applied Acoustics，66(9)，pp.1088-1101，2005。
5. 沈保羅，片式消聲器的設計及其在環境噪聲控制中的應用，應用聲學，15(3)，pp.18-22，1996。
6. 朝倉 巧、坂本慎一、力竹洋明、樋口 豊、崎本 佑、佐藤史明、橘 秀樹，ダクト型換気ユニットの遮音性能
上に関する検討，日本建築學會大會學術講演梗概集，pp.83-84，2005。
7. 沈保羅，片式消聲器的設計及其在環境噪聲控制中的應用，應用聲學，15(3)，pp.18-22，1996。
8. Tadeu、Mateus，Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation，Applied Acoustics，62(3)，
pp. 307-325，2001。