

高速船機艙噪音分析與抑制

劉家誌¹ 王偉輝²

¹國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系碩士

²國立台灣海洋大學系統工程暨造船學系教授

地址：基隆市北寧路二號 Email:whwang@sena.ntou.edu.tw

電話：(02)24622192ext.6015 傳真：(02)24625945

摘要

高速船艇多設計採用大功率之推進主機安裝於佈置緊湊的機艙空間內，因此引起甚高之噪音位準。本研究定位在建立選用適當吸音材佈置於機艙壁的方法，以降低機艙內空氣噪音位準，及減低空氣噪音經由隔艙壁振動輻射至鄰近艙區所形成之面音源強度。本文利用沙賓公式，對機艙內主要噪音頻帶範圍，選擇吸音效果較佳的吸音材，進行降音效果之初估。並且利用 Raynoise 3.0 軟體對機艙內混合音源進行聲場分析，及模擬不同吸音材的佈置對機艙噪音之影響，並評估噪音改善效果。根據本文方法，就一機艙結構模型進行機艙聲場之模擬分析與實驗量測之驗證，由結果比較顯示於 2000Hz 以下之中低頻範圍十分吻合；而在 2000Hz 以上之高頻範圍，則有相當誤差，主要肇因於實驗時艙蓋縫隙之高頻漏音較大，使得實驗音壓值低於分析值。選用之吸音材，能降低機艙內 4~5dB 之噪音量，來改善機艙內噪音問題。本文建立之分析方法與流程，可應用在新船設計階段機艙噪音的模擬及防治評估。

關鍵字：空氣音、機艙噪音、吸音材、噪音改善

Airborne Noise Analysis and Attenuation in Engine Room of a Fast Vessel

C.J.Liu W.H.Wang

Department of System Engineering and Naval Architecture
Nation Taiwan Ocean University

ABSTRACT

Most fast Vessels are designed to fitted with powerful engine which are installed in confined engine space and , as a consequence , cause an extremely high level of noise . In this paper , a methodology for selecting proper absorptive material used in engine-room bulkhead has been established, in order to reduce the airborne noise in engine space and attenuate the surface radiated noise intensity induced by bulkhead vibration to the adjacent compartment. According to the main contribution frequency band of engine-room noise , relatively higher absorption coefficient of the absorptive material in such frequency range should be selected , and the effectiveness of noise reduction can be estimated at the first step by utilizing Sabine's formula . Sound field simulation of combined sound sources in engine-room and the noise improvement assessment by diverse layout design of absorptive

materials have been carried out by the software Raynoise 3.0. Based on the established procedure a scaled engine-room model has been constructed to conduct the vibration test. Comparison of the sound pressure results by simulation and measurement shows fairly coincident below frequency 2000 Hz and deviated in higher frequency owing to some leakage of sound power in the experiment. According to simulation analysis, proper selection of the absorptive material used in engine room can reduce the engine-room noise by an amount of 4~5dB. The developed method and procedure can be applied to the simulation of engine-room noise and improvement assessment in the design stage of a new ship.

Keywords: Airborne sound, Engine room noise, Sound absorptive material, Noise improvement

一、前言

近年來在高性能船艇之開發方面，國內迭創佳績。唯大部份高速船艇之設計，為提昇性能之目的，船體均採輕構造，並安裝大功率之推進主機於佈置緊湊的機艙空間內，因此引起甚高之音源位級。此主機音源功率流經由彈性墊通路在船艇結構中傳播，稱為結構噪音。或藉由空氣直接輻射擴散，經由聲波在機艙圍壁的反射、吸收及穿透作用使機艙形成一個混響聲場，此稱為空氣噪音。本研究即考慮選用適當的吸音材佈置於機艙壁，以降低機艙內空氣噪音位準，及減低空氣噪音經由隔艙壁之共振再以結構音輻射至鄰近艙區所形成之面音源強度。

二、理論基礎

2.1 船艙噪音之傳遞模式

機艙主機引起之振源，透過結構傳遞至隔板面而輻射出聲音。當機艙中機械振源驅動點處同時產生一單向簡諧激振力 F_1 與諧振速度 V_1 時，結構體會因振動而產生應力波，將能量由驅動點傳遞至各鄰接艙區之底板與壁板結構，該底板與壁板也會因應力波而振動，其速度場為 $V_2(x, y)$ ，此結構板面速度場即會產生艙區內之輻射聲場 $p(x, y, z)$ 。

由於驅動點激振力與速度是結構聲音來源，可將輻射聲壓場與其建立以下之線性關係：

$$p(x, y, z, f) = H_{tF} F_1(f) \quad (1)$$

$$p(x, y, z, f) = H_{tV} V_1(f) \quad (2)$$

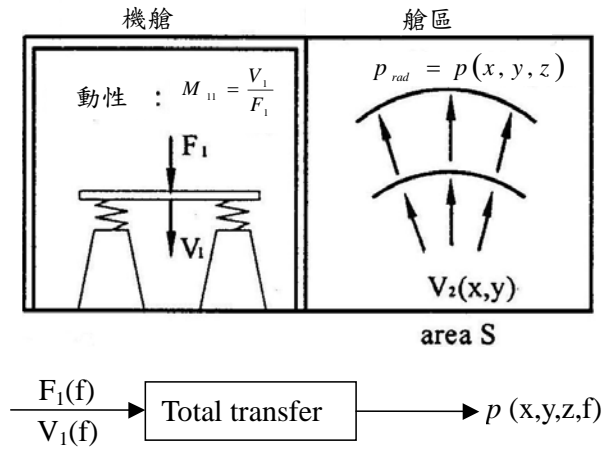
H_{tF} 及 H_{tV} 稱為頻率反應函數，分別描述被激振力與激振速度所影響之結構輻射聲壓。基本上，這些頻率反應函數在各頻率下是複數值，亦即同時包含大小及相位。

在驅動點之動性定義為

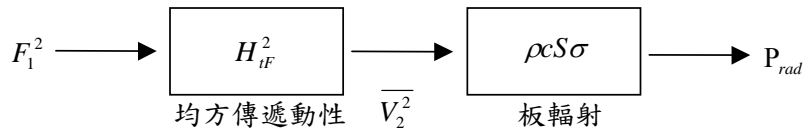
$$M_{11} = \frac{V_1}{F_1} \quad (3)$$

故在給定激振力 F_1 時， M_{11} 愈大表示振動速度愈大。

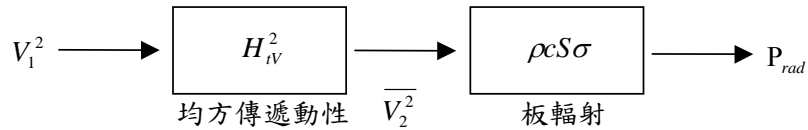
在實際船舶機艙，要同時量測主機座處之振動速度 V_1 和振動傳遞力 F_1 是非常困難的，但是如果量測 V_1 及給定之 F_1 則比較容易，經求出轉換函數，再以實際擾動速



(a) 線性模型



(b) 力激振之能量模型



(c) 速度激振之能量模型

圖 1 機艙機器擴散之噪音模型

度之均方值，將式(1)、(2)式改成能量模型。 F_1^2 、 V_1^2 及輻射功率 P_{rad} 是使用其 1/3 八音帶幅值，在圖 1(b)及圖 1(c)之能量模型中，再將應力波傳遞鏈分成兩方塊，第一方塊代表結構傳遞，即底板振動均方速度 $\overline{V_2^2}$ 與振點 F_1^2 或 V_1^2 之比值關係為：

$$H_{iF}^2 = \frac{\overline{V_2^2}}{F_1^2}, \quad H_{iV}^2 = \frac{\overline{V_2^2}}{V_1^2} \quad (4)$$

H_{iF}^2 稱為均方傳遞動性， H_{iV}^2 稱為速度轉換函數。

第二方塊代表板輻射，即輻射聲功率與 $\overline{V_2^2}$ 之關係為：

$$\rho c S \sigma = \frac{P_{rad}}{\overline{V_2^2}} \quad (5)$$

(5)式左邊包含四周流體之特徵阻抗 ρc ，輻射面之面積 S 及輻射效率 σ 等三項因素。為便於設計考量對聲音傳遞相關之諸因素，將(4)、(5)兩式結合為：

$$\frac{P_{rad}}{F_1^2} = (H_{iF}^2 S \sigma) \rho c = (M_{11}^2 H_{iV}^2 S \sigma) \rho c \quad (6)$$

$$\frac{P_{rad}}{V_1^2} = (H_{iV}^2 S \sigma) \rho c \quad (7)$$

由(6)及(7)式可知要降低結構輻射音之基本原理即在降低 $\overline{H_{iV}^2}$ 、 M_{11} 、 σ 三項。降低 $\overline{H_{iV}^2}$ 及 M_{11} 可用隔振器(彈簧避振器)與吸振器(黏彈性阻尼材)達成，國內也有相關研究[1][2]；而降低結構壁面輻射率 σ 之法則是於壁面敷貼阻尼材，或選擇低輻射率的結構材料作為隔艙壁，或選擇適當高吸音率的吸音材料，一方面減少機艙內噪音量，另一方面可降低艙壁激振時所產生的輻射音能，便能有效改善機艙內空氣噪音。

2.2 吸音材吸音基本理論

敷布吸音材料於結構，可轉換入射音能為熱能。能量轉換為熱能散之機構有兩個：(1)黏滯流動損失及(2)內部摩擦。

1. 空氣介質黏滯流動損失：有效之吸音材料結構含有很多互相連接的孔隙，音波傳入孔隙內時，音波中空氣粒子速度與孔隙內之吸音材料表面造成相對速度，而產生邊界層損失。
2. 內部摩擦：部分吸音材料具有彈性的纖維狀結構或彈性的多孔性結構，由於音波的傳入而造成纖維狀結構被壓縮、彈回，或造成多孔性結構的伸縮、鬆緊，產生吸音材料本身之內部摩擦損失。

吸音材料散失能量的能力與內部結構有關，其主要因素為以下兩點：

1. 如果結構體對音波傳送的阻力太小，則能量散失小，音能自背後物質反射，多數能量反射至周圍環境。如果吸音材料厚度對波長比值太小或材料結構太開放，吸音材料對音波變成透明(transparent)。
2. 如果結構體對音波傳送的阻力太大，多數的能量自結構體表面反射，在結構體內能量散失很小。高阻力的產生，由於表面衝孔太少或太小無法讓音波傳入結構體內；或由於內部孔隙間沒有足夠的開口。

2.3 評估防音材性能之方法

評估隔吸音材料性能的方法有三種，穿透損失、插入損失及吸音係數，若將吸音材安裝於室內，可從其穿透損失與吸音係數了解其對室內噪音改善，及減低噪音傳遞到鄰近房間的效果。而插入損失多用於道路防音牆性能的判斷。本研究主要針對機艙內空氣噪音的改善，並不考慮機艙噪音對鄰近艙間的影響，所以對吸音材性能的要求，只講究其吸音係數。附吸音材之防音牆可減少反射音其吸音係數 α 定義為：

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad (8)$$

其中 I_i ：入射音強度； I_r ：反射音強度。

一般對於隔吸音材之選用，較常用的多孔質吸音材有岩綿(Rockwool)、礦物綿(Mineralwool)、玻璃綿(Glasswool)及泡綿(Foam)等。而板狀隔音材則有鉛板(Lead)、鋼板(Steel)、鋁板(Aluminium)、合板(Plywood)、軟木(Cork)、橡膠(Rubber)等高比重層材質。在實際使用上，為了降低各分類噪音，可能同時選用

多種吸音材及隔音材[3]，由於安裝上較為麻煩，因此廠家就開發出一系列的複合式隔音材，兼具吸音及隔音作用，並可簡化施工的作業，節省工時。

2.4 沙賓殘響時間公式

沙賓以擴散聲場的觀點，來探討聲音能量在密閉空間中降低 60dB 的殘響時間 T_{60} 為：

$$T_{60} = 13.8\tau = 13.8 \frac{4V}{Ac} = 55.26 \frac{V}{Ac} \quad (9)$$

式中假設室溫為 20°C，聲速 c 為 343 m/s。由此公式可以很容易的看出：如果空間愈大(容積與長度 3 次方成正比；而內壁表面積與長度平方成正比)或平均吸音率愈小，則殘響時間 T_{60} 越長。

2.5 分貝的合成

對於不同音壓位準的聲音或某聲音各分頻之分貝值的合成，可依下式計算：

$$L = 10 \times \log \left[10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right] \quad (10)$$

其中 L = 合成後的總音值； L_1 、 L_2 、……、 L_n 為各音源之音壓。

三、Raynoise 機艙聲場模擬

3.1 實船機艙噪音量測

為了了解機器運轉直接散射之空氣噪音在機艙內的影響，遂利用噪音計在高速船主機運轉時量測機艙內的空氣噪音，但因所量測到的數據中包括結構噪音的影響，故再利用加速規量測機艙內的振動訊號，經過轉換可與噪音計所得到的音壓位準比較，了解直接輻射空氣噪音真正所佔的貢獻量及其頻譜。

圖 2 為高速船以 75% 出力時，由加速規以及噪音計所量測到的振動及噪音位準。把加速規所量測的振動加速度積分為速度，再將振動速度參考值為設為 1×10^{-6} in/s 後，可比較其特性。

由圖 2 可知，機艙內以噪音計量得的聲壓位準相當高，總音量可達到 110dB(A)，而主機底座所測得的振動速度位準比艙壁所測得的振動位準高出許多，可以知到艙壁對機艙內振動噪音的影響較主機底座小。

主機運轉時產生振動與噪音，噪音經由機殼輻射至機艙內形成空氣噪音，振動經由底座傳遞至船體結構中形成結構噪音。可以利用多組麥克風將主機罩住行成半球形的量測面量測主機輻射聲強在計算主機輻射之聲功率；於底座佈置加速規量測振動速度並利用衝擊錘測試其動性可以求出主機經底座所傳遞之振動能量。如此可以了解主機在機艙中產生振動與噪音的總功率。

主機產生的振動能量，一部份會傳遞至船體形成結構的振動，一部份的會輻射成聲音，在機艙或鄰艙內形成輻射噪音。機艙壁所輻射的噪音，可以利用麥克風貼近艙壁表面量測，並配合加速規量測艙壁表面振動速度，可比對麥克風所量測的音壓位準，是否與結構振動產生的輻射噪音吻合。

機艙內噪音的總功率，為機殼直接輻射的聲功率，以及結構表面輻射噪音聲功率的總合。經由以上的量測，可以了解其分別佔主機產生總功率的比率，掌握機艙噪音的特性，才可以用正確的方法進行噪音的控制。

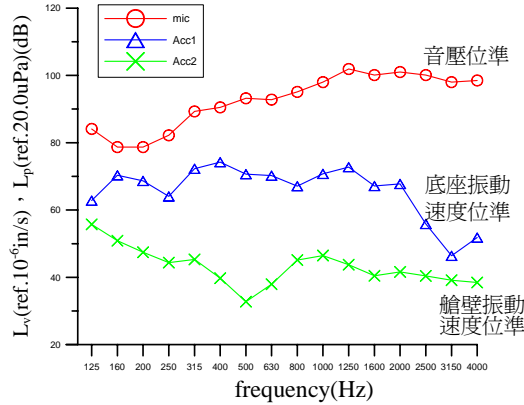


圖 2 實船機艙內振動與噪音量測

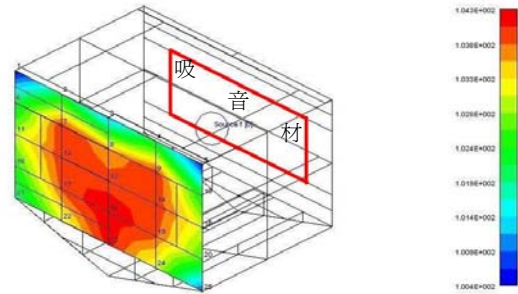


圖 3 安裝吸音材後之機艙聲場模擬

3.2 機艙模型內貼吸音材且受單頻音源情況之吸音效果模擬

在利用 Raynoise 軟體預估吸音材在機艙模型內的吸音效果前，先在無吸音材狀況下，將實船量測所得的機艙噪音放入機艙模型，並模擬模型內聲場的音壓位準。接著在機艙模型內加入不同的吸音材，模擬其吸音效果。最後模擬結果將與第四章的機艙模型實驗做比對，看其結果是否吻合。

在單音源情況下，模擬機艙模型內更換不同吸音材十種，吸音材安裝位置於端壁，其尺寸為 1050mm×400mm，分別計算其對機艙之吸音效果，將整理其吸音後機艙模型內的音壓位準，選出效果最好的吸音材，再對多音源的情況下進行分析。根據沙賓公式，若機艙模型內鋼板總面積為 S_1 如圖 3，鋼板吸音率為 α_1 ，當機艙模型內無吸音材時，機艙模型內的殘響時間為：

$$T_1 = 0.161 \frac{V}{A_1} = 0.161 \frac{V}{\alpha_1 S_1} \quad (11)$$

當機艙內安裝面積為 S_2 的吸音材，吸音材的吸音率為 α_2 時，機艙模型內的殘響時間為：

$$T_2 = 0.161 \frac{V}{A_2} = 0.161 \frac{V}{\alpha_1(S_1 - S_2) + \alpha_2 S_2} \quad (12)$$

由(11)及(12)式可知到未安裝吸音材前機艙總吸音量 A_1 及安裝吸音材後機艙總吸音量 A_2 ，因此機艙模型內噪音降低量 NR 為：

$$NR = 10 \log \frac{A_2}{A_1} = 10 \log \frac{\alpha_1(S_1 - S_2) + \alpha_2 S_2}{\alpha_1 S_1} \text{ dB} \quad (13)$$

由(13)式可以發現機艙內條件皆固定時安裝的吸音材吸音率 α_2 越高，則能降低的噪音量也越高，所以吸音材的選擇需針對音源的特性，了解音源各分頻的音壓大小，再針對所需改善的分頻去選擇對該分頻有較高吸音率的吸音材。若吸音材較佳的吸音頻率範圍，無法顧及音源中所有對聲場有較大貢獻的頻率時，應針對音

源中聲壓位準最高的頻率去選擇吸音材，若吸音材在該頻率有最好的吸音率，則能降低的總音量為最高。

在 Raynoise 的模擬中可以發現，No.8 材料的吸音效果最好。根據實驗室利用全迴響室吸音率量測法，其每個分頻的吸音率均可達到 1 以上，代入(13)式時，大於 1 之吸音率均取為 1，所以不論那個頻率都可以有很好的吸音效果，也是改善機艙噪音的優良選擇。

3.3 機艙模型內雙音源合成聲場之模擬

由 2.5 節可知，聲音的合成是需要經過計算才能得知結果的。所以，在機艙內若有兩個以上的音源，就必須經過計算才能得到聲場正確的音壓位準。將兩個大小不同的音源，在機艙模型內以 Raynoise 軟體進行模擬，以了解不同特性的聲源在同樣的空間內，有什麼不同的合成效果。

根據了解，兩音源若相差 9dB 以上，則音壓位準較小的音源並不會對較大音源產生的聲場產生影響。但是，若兩音源相差不到 3dB，則會增加較高聲源 2~3dB 的音壓位準。因此這次的模擬就針對這兩種不同的情況進行討論，以了解在機艙內不同特性的聲源合成後對聲場所造成的影響。其中情況 1 為音源 1 與音源 2 兩個音源相差 3dB；情況 2 為音源 1 與音源 3 兩音源相差 15dB。其結果如圖 4 及圖 5。

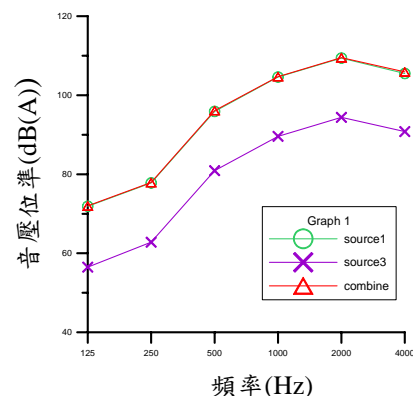
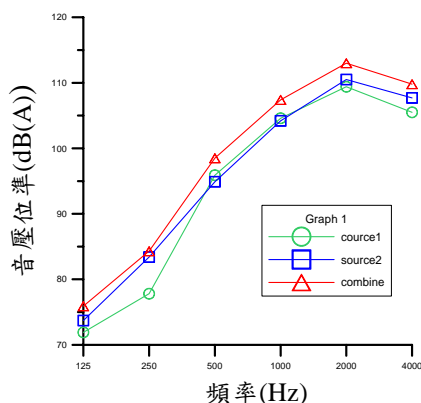


圖 4 音源 1 與音源 2 合成後之聲壓位準 圖 5 音源 1 與音源 3 合成後之聲壓位準

3.4 機艙模型內貼吸音材受雙音源情況之吸音效果模擬

若兩個音源差距太大，將對較大音源產生的聲場不造成影響。因此，若兩個音源聲壓位準相差太大，預估機艙噪音時，可以不去考慮較小音源的影響

根據沙賓公式，可知吸音率越大的吸音材在機艙內有越好的吸音效果。No.8 材料在實驗室所測量得到的吸音率，每個分頻都可以達到 1 以上，可以說是非常好的吸音材並且適用在各種情況，所以選為這次比較的材料之一。另外，選擇在之前模擬中效果最佳的 No.7 吸音材，及效果較差的 No.10 吸音材，三者搭配使用並改變安裝位置，其模擬結果如圖 7。

將不同的吸音材對機艙內噪音的吸音效果加以比較如圖 7，在雙音源情況下，更換不同的吸音材料對機艙內的吸音效果並沒有太多的改變，因為若兩個音源音壓位準相差太大，則較小音源不會對較大音源產生的聲場產生影響，若兩音源音壓位準相差不大，雖然會增加合成後的音壓位準，但是兩音源所適合的吸音材特性

應該相差不大，所以機艙內若有兩個以上的音源，吸音材應該是針對聲源合成後的分頻聲壓位準來選擇。

四、機艙模型內之聲場模擬與實測比較

4.1 實驗目的

本實驗主要目的是比對 Raynoise 對機艙內聲場模擬的正確性。將利用無指向性喇叭模擬點音源，放入機艙模型後，量測無吸音材及有吸音材時模型內的聲壓位準，並將量測結果與 Raynoise 所模擬的結果比較，以瞭解模擬值之準確性。

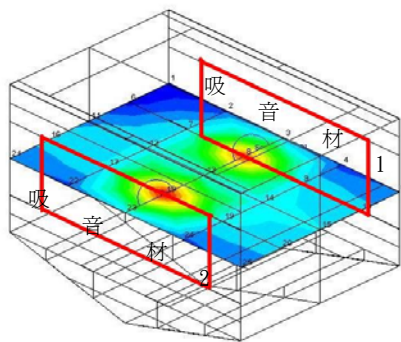


圖 6 雙音源情況搭配不同吸音材
相對位置圖

4.2 實驗儀器與佈置

本實驗的音源是在 35 噸巡邏艇高速航行時，在機艙內利用數位記錄儀連接麥克風所錄製取得。回實驗室後，經過放大器連接到無指向性喇叭，模擬機艙內的噪音情況，將喇叭及麥克風放入機艙模型後，亦可從量測分析系統了解模型內的聲壓位準，該聲壓量測結果將與 Raynoise 模擬結果比較。

4.3 實驗與 Raynoise 模擬結果與比較

1. 實驗結果

將無指向性喇叭放入機艙模型中，並將機艙模型以鋼板密閉，用麥克風量測機艙模型內之聲壓位準。之後，再將 No.8 吸音材安裝於機艙模型端壁上，以鋼板密封進行量測。其結果如圖 8。

2. Raynoise 模擬結果

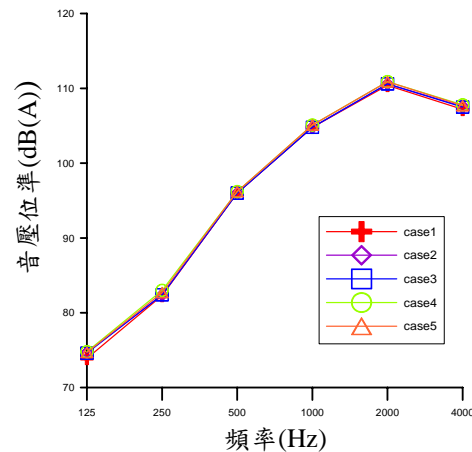


圖 7 情況 1~情況 5 之吸音效果比較
利用 Raynoise 軟體，模擬機艙模型內不加吸音材與安裝 No.8 吸音材後，機艙模型內之聲壓位準。其結果如圖 9。

3. 實驗與 Raynoise 模擬之比較

經過實驗與 Raynoise 模擬的比對如圖 10、11，可以發現在 125Hz 與 500Hz 兩個頻率相當吻合，250Hz、1kHz 與 2kHz 則有一些誤差，該誤差仍在可接受的範圍，但在 4000Hz 產生了較大的誤差，其原因是在機艙模型內安裝吸音材附近的鋼板有部份的變形，導致吸音材與機艙模型間有空隙產生，雖然經過簡單的填補，不過還是有漏音的情況產生，導致實驗結果在高頻的部份產生較大的誤差，改善的方法可以使用橡膠墊圈減少船模與吸音材間的空隙，或修補機艙模型變型的部份，使漏音情況改善後，模擬與實驗的結果應會更加接近。

船模實驗所需的時間較長，也需較多的人力和費用，產生誤差的因素也比

較多，經過這次分析與實驗的比較研究，可以發現，利用 Raynoise 模擬的結果與實驗結果接近，而且可以節省時間與成本，因此在往後機艙內聲場的預估，或加裝吸音材後噪音問題改善的效果，都可以利用這套軟體進行模擬。

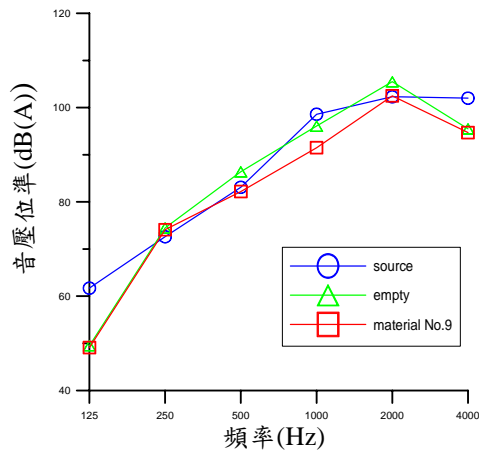


圖 8 實驗結果

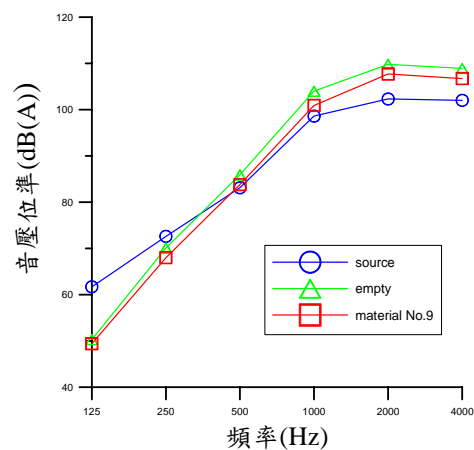


圖 9 Raynoise 模擬結果

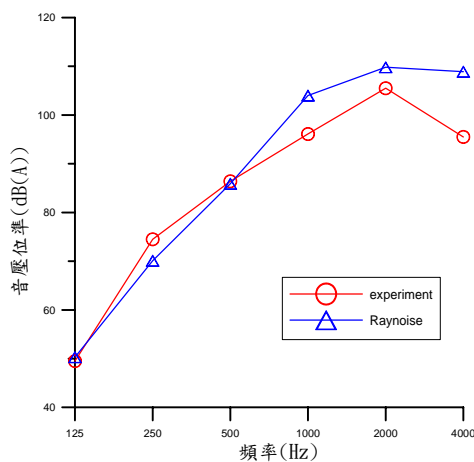


圖 10 機艙模型內無吸音材實驗與模擬之比較

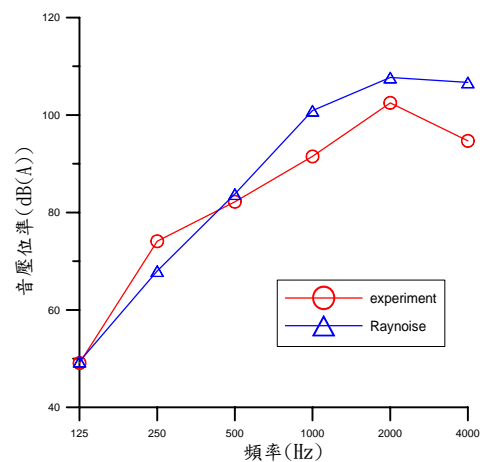


圖 11 機艙模型內安裝 No.8 吸音材後實驗與模擬之比較

五、高速船機艙內噪音預估及改善

高速船機艙內的基本模型如圖 12，包括主機、副機及減速齒輪箱。利用 Raynoise 軟體將音源聲功率依照安裝的位置輸入模型中，輸入聲功率大小，並模擬機艙內聲場情況，並利用第三章研究中吸音效果最好的 No.8 吸音材安裝於四周艙壁，測試其改善噪音的效果。

高速船機艙內大部份表面是金屬材質，少部份為與船體相同的玻璃纖維材質，所以這次的模擬在未安裝吸音材的情形中，除了機艙底部使用玻璃纖維板其餘材料皆使用鋼板，而音源皆使用面音源分部於模型表面。其材料吸音率，Raynoise 模擬之機艙聲場如圖 13。

利用 No.8 吸音材模擬機艙內之噪音改善情形，在受音點 3 位置的噪音量一共減低了 4.6dB(A)，如圖 14。但是因為 Raynoise 模擬中，其邊界條件相當理想，所以可能使模擬之吸音效果較實際將吸音材安裝於實船機艙之吸音效果差，因此如果將 No.9 吸音材實際安裝於機艙內，其對機艙內噪音的改善應更為顯著。

根據這次模擬的方法，只要有機艙基本尺寸、機艙內音源的音壓位準及所使用材

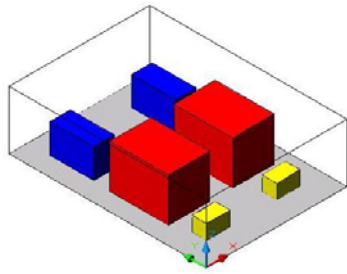


圖 12 高速船機艙內基本模型

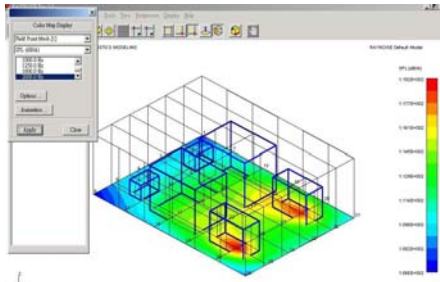


圖 13 Raynoise 模擬之機艙聲場

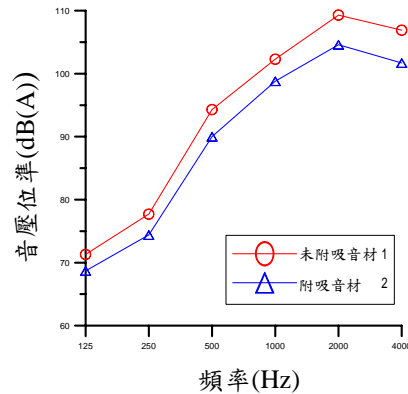


圖 14 Raynoise 模擬機艙聲場之情況

料的吸音係數，就可以預估機艙內空氣噪音的音壓位準。在機艙壁材料改為欲使用的吸音材，就能模擬該吸音材在機艙內對空氣噪音改善的效果。此方法運用在實船的噪音預估相當便利，其結果也與實船量測所得的數據相當接近，值得運用在往後新船機艙內吸音材的設計及選擇上。

六、結論與建議

1. 吸音材的運用可以改善高速船機艙內空氣噪音的問題，但吸音材的選擇需先對機艙噪音源做頻譜分析，再先針對噪音量大的分頻去選擇適當的吸音材，才能使吸音材發揮應有的整體降音功效。
2. 機艙內的音源往往不只一個，在多音源混合的情況下，應該先了解其混合後音場的狀況，再選擇適當的吸音材。在本文中利用 Raynoise 軟體預估機艙內音源合成後的聲場，並可模擬安裝吸音材後空氣噪音有改善 4~5dB(A)的效果。所建立之分析方法與流程可實際運用在新船的降音設計與建造上。
3. 未來研究方向之建議:利用阻尼材及隔振墊改善機艙內結構噪音問題，並建立預估模式，使船舶機艙內振動噪音的問題，能構於船舶設計階段就徹底防治。

參考文獻

- [1]王偉輝、許榮均、張建仁，” 阻尼材料與船底縱樑貼板對結構振動與噪音特性之影響分析”，經濟部八十六年度科技發展專案，1997。
- [2]楊登傑，” 擠壓氣膜阻尼板對結構噪音傳播之效應”，國立台灣海洋大學系統工程暨造船研就所碩士論文，1999。
- [3]王偉輝、劉德源、許榮均、盧威宇、羅明華、劉詩麒、李兆安、陳智隆，高速鐵路沿線隔音材料之研究，交通部高速鐵路工程局，計畫報告 1-0-91-09-02-0038，2002 年 7 月。