

中華民國音響學會
九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會
2009 Annual Meeting and 22th Symposium of
Acoustical Society of the Republic of China

夾層結構複合材料之隔音預估模擬

The Prediction of Sound Insulation by Multilayer Composite Material

陳金文/中山科學研究院

摘 要

本文模擬於不同材質參數包括表面材及芯材之彈性模數、厚度、面密度等之改變與分析組合，瞭解敏感參數對隔音性能提升程度之影響，作為選用及設計該等夾層材料之參考。結果顯示採用軟性蜂窩芯材於 300Hz~1600Hz 之隔音量性能遠優於泡沫芯材。芯材及表面材不同厚度及部分彈性模數控制吻合頻率之相對位置。而 E_{55} 彈性模數為控制軟性蜂窩芯材最重要參數，其最佳值之掌控，將使夾層結構複合材料之隔音性能不亞於厚重之雙層輕隔間隔音性能。

關鍵字：複合材料、夾層結構、泡沫、蜂窩、隔音量、穿透損失、吻合頻率

A b s t r a c t

The prediction of sound insulation of different composite materials by changing the material properties will be used to understand the key parameters of their relative sensitivities. The simulation results show the transmission loss of softer honeycomb core is better than the hardness honeycomb and foam core by more than 15~20 dB improvement between the frequency range 300 Hz and 1600 Hz.

Keywords : Composite material, Layer Structure, Foam, Honeycomb, Sound Insulation, TL.

一、前言

夾層結構係由上下兩層之面板材料，配合夾層中心之芯材，藉由膠黏劑之合成加工，所組合而成具備質輕、高強度、抗彎曲、耐疲勞振動等特性之複合材料，目前已廣泛應用於航空飛機之機身、機翼、引擎整流罩、旋翼；太空工業之衛星太陽能板、通訊碟型天線、載體；運輸工業之火汽車車體、天花板及地板；船艙之船殼構造件、甲板、

隔間；建築業之帷幕外牆及非承重之輕質隔間等用途。夾層結構複合材料除具備上述之特性外，本文特別強調於隔音性能之提昇驗證，由於高樓集合性住宅之成熟發展與需求，鋁蜂窩夾層帷幕外牆(1mm 鋁板+鋁蜂窩芯+0.5mm 鋁板)、紙蜂窩夾層內牆(石膏板或木質裝飾板+紙蜂窩芯)、活動隔間牆(0.5mm 鋼板+聚苯乙烯泡沫塑膠)等新輕質建材已大量應用於此等高樓建築體，其材質特性對隔音性能之影響有需進一步瞭解之必要。

二、文獻回顧

單層材料之隔音性能於中低頻頻寬分別由質量律(Mass law)、剛性及阻尼所掌控，高頻由於入射聲波與材料之彎曲波動共振穿透之吻合效應影響其穿透損失之性能，吻合頻率以上之高頻由材料之內部阻尼決定其隔音效果，此一無限單板隔音特性於 Beranek 之著書[1]便已明確揭曉。Watters/Kurtze[2]分析三層夾板之隔音性能，以中心芯層之剪性變形降低整體夾板振動波速，將吻合頻率移至極高頻，以達到提升隔音性能之目的，由於其假設芯材為剛性特質，僅考慮材料整體剛性之反對稱彎曲模態振型(Anti-symmetric mode)。Lord/Ford/Dym/James 等[3/4/5]假設芯材係柔性特質，進一步考量夾層材料厚度變形所產生對稱模態振型(Symmetric Mode)，獲得更準確之隔音性能特性，上述材料統稱為剪力牆(Shear Wall)。Holmer[6]採用等值剛性及高阻尼之特性，將吻合頻率之低穿透損失控制於需高隔音性能之頻寬外，以達到提升隔音之目的，並將此類材料歸稱為吻合牆(Coincidence Wall)。本文主要引用 Lord 等剪力牆之理論基礎，作為預估模擬之計算，分析材料參數對隔音性能之效果。

三、研究目的

本文藉由 Matlab 程式之開發，模擬於不同材質參數包括表面材及芯材之彈性模數、厚度、面密度等之改變與分析組合，瞭解敏感參數對隔音性能提升程度之影響，作為選用及設計該等夾層材料之參考。程式之正確性以文獻[5]之實驗數據及材料參數作為驗證，驗證無誤後，方執行進一步之參數分析。藉由參數分析後之資料，掌控此等材料之高隔音特性。

四、基本理論

對稱模態振型之表面材將產生 180 度之反相位垂直變形運動及 0 度之同相位水平變形運動(in plane deformation of in phase)，反對稱模態振型之表面材將產生 0 度之同相位垂直變形運動及 180 度之反相位水平變形運動(in plane deformation of out of phase)。藉由上述對稱及反對稱模態變形調整相關材料特性之設計參數及調降夾層材料之傳遞波速，使其接受側之面板模態振幅產生相互抵銷作用，將有效提升其隔音性能。其理論數學推演詳述於文獻[3/4/5/6]，不再詳述，僅說明其重點運算式及模擬演算之步驟及公式。假設表面材為均質等向(Homogeneous and Isotropic)材料、芯材為均質直交異向性(Homogeneous and Orthotropic)材料、表面材及芯材均為軟變形(Compliance)，依據彈性理論及板殼波動理論等推演出對稱及反對稱模態變形之聯立矩陣方程式詳如式 1 及式 2。

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{sym} \\ \beta_{sym} \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式 1}$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_{asym} \\ \beta_{asym} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式 2}$$

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{2E_{33}}{L} + \frac{E_{55}k_1^2L}{6} + \frac{E_{11}^{fs}k_1^4t_p^2}{3} - \frac{\rho_c w^2L}{6} - \rho_p w^2 \left(1 + \frac{k_1^2 t_p^2}{3} \right) \\ A_{12} &= -E_{13}k_1 + \frac{E_{11}^{fs}k_1^4t_p^3}{2} - \frac{\rho_p w^2k_1t_p}{6}, \quad A_{13} = -\frac{2E_{13}k_1}{\pi} - \frac{2E_{55}k_1}{\pi} \\ A_{22} &= \frac{E_{11}k_1^2L}{2} + E_{11}^{fs}k_1^2t_p - \frac{\rho_c w^2L}{2} - \rho_p w^2, \quad A_{23} = \frac{E_{11}k_1^2L}{\pi} - \frac{\rho_c w^2L}{\pi} \\ A_{33} &= \frac{E_{11}k_1^2L}{4} + \frac{E_{55}\pi^2}{4L} - \frac{\rho_c w^2L}{4}, \quad A_{21} = A_{12}; \quad A_{31} = A_{13} \\ B_{11} &= \frac{E_{55}k_1^2L}{2} + \frac{E_{11}^{fs}k_1^4t_p^3}{3} - \frac{\rho_c w^2L}{2} - \rho_p w^2 \left(1 + \frac{k_1^2 t_p^2}{3} \right) \\ B_{12} &= E_{55}k_1 - \frac{E_{11}^{fs}k_1^3t_p^2}{2} + \frac{\rho_p w^2k_1t_p}{2} \\ B_{22} &= \frac{E_{11}k_1^2L}{6} + E_{11}^{fs}k_1^2t_p - \frac{\rho_c w^2L}{6} - \rho_p w^2 + \frac{2E_{55}}{L} \\ B_{21} &= B_{12}, \quad k_1 = \left(\frac{w}{c_0} \right) \sin \theta \end{aligned}$$

式中 E_{ij} , L , ρ_c 分別代表芯材各方向之彈性模數、厚度、密度； E_{11}^{fs}, t_p, ρ_p 分別代表表面材之彈性模數、厚度、面密度； w, c_0, θ, f_0 分別代表角頻率、聲波波速、聲波入射角度、單位面積作用力。 $\alpha_{sym}, \beta_{sym}, \alpha_{asym}, \beta_{asym}$ 代表複合材料對稱及反對稱模態之垂向及水平變形量， ζ 代表芯材水平變形量。計算求得式 1 及式 2 之複合材料變形量後，帶入式 4 求得相對之阻抗，阻抗再帶入式 3 換算各角度之穿透係數，各角度穿透係數之積分值由式 5 求得，進一步計算穿透損失之 dB 值。再針對各頻率重複計算上述步驟至所需之頻寬之穿透損失值。換算 1/3 倍頻帶穿透損失值，以便於與實驗室數據比較。

$$\tau(\theta) = \left| \frac{\frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta} (Z_{sym} - Z_{asym})}{(Z_{asym} + \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta})(Z_{asym} + \frac{\rho_0 c_0}{\cos \theta})} \right| \quad \text{式 3}$$

$$Z_{sym} = \frac{f_0}{-i\omega\alpha_{sym}} \quad Z_{asym} = \frac{f_0}{-i\omega\alpha_{asym}} \quad \text{式 4}$$

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\theta_{lim}} \int_0^{\phi} \tau(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{\theta_{lim}} \int_0^{\phi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi}, \quad \text{式 5}$$

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\bar{\tau}} \right) \quad \text{式 6}$$

式中 Z_{sym} , Z_{asym} , ρ_0 , $\tau(\theta)$, $\bar{\tau}$, TL 分別代表對稱及反對稱模態之阻抗、聲波密度、各角度之穿透係數、及平均穿透係數及穿透損失值。 θ_{lim} 採用 78° , ϕ 範圍為 2π 。

五、模擬計算結果

表 1 為泡沫、硬質蜂窩、軟質蜂窩芯材及木質表面材之材料參數。圖 1 及圖 2 為泡沫芯材厚度 7.6cm 及 3.8cm 之預估實驗比較，預估及實驗之隔音穿透損失值趨勢與數值相當，吻合頻率分別為 1.3k Hz 及 2.0k Hz。圖 3 及圖 4 為硬軟質蜂窩芯材厚度 7.6cm 及 8.4cm 之預估實驗比較，預估及實驗之隔音穿透損失值趨勢相當，硬質蜂窩全頻寬之數值略有差異，軟質蜂窩之數值於高低頻寬差異較大，吻合頻率分別為 300 Hz 及 200 Hz。

圖 5 為泡沫芯材厚度參數變化之預估，吻合頻率隨芯材厚度之增加而往低頻移動，吻合頻率以上之隔音穿透損失值相對增加。圖 6 為泡沫芯材/表面材厚度參數變化之預估，吻合頻率隨表面材厚度之增加而往低頻移動，吻合頻率以下之隔音穿透損失值相對增加。

圖 7 為軟質蜂窩芯材 E_{11} 參數變化之預估，吻合頻率隨芯材 E_{11} 之增加而往高頻移動，吻合頻率以上之隔音穿透損失值相對減低。圖 8 為軟質蜂窩芯材 E_{55} 參數變化之預估，吻合頻率隨芯材 E_{55} 之增加而不變，吻合頻率以上之隔音穿透損失值相對先增後減，存在最佳值。圖 9 為軟質蜂窩芯材 E_{12} 參數變化之預估，吻合頻率隨芯材 E_{12} 之增加而不變，吻合頻率以上之隔音穿透損失值相對亦不變動。圖 10 為軟質蜂窩芯材厚度參數變化之預估，吻合頻率隨表面材厚度之增加而往低頻移動，吻合頻率以上之隔音穿透損失值相對增加。

六、結論

夾層結構複合材料採用軟性蜂窩芯材於 300Hz~1600Hz 之隔音量性能遠優於泡沫

芯材。芯材及表面材不同厚度及部分彈性模數控制吻合頻率之相對位置。而 E_{55} 彈性模數為控制軟性蜂窩芯材最重要參數，其最佳值之掌控，將使夾層結構複合材料之隔音性能不亞於厚重之雙層輕隔間隔音性能。

七、誌謝

本文感謝李新權博士之指導及修正。

八、參考文獻

1. Berbank Leo, "Noise and Vibration Control", McGraw Hill, 9171.
2. B. C. Watters and G. Kurtze, "New Wall Design for High Transmission Loss or High Damping", JASA Vol. 31. NO. 6. pp. 739-748, 1959.
3. R. D. Lord, P. Ford and A.W. Walker, "Sound Transmission Through Sandwich Construction", J. Sound and Vibration, Vol. 5 No.1, pp.9-21, 1966.
4. C. L. Dym, and M. A. Lang, "Transmission of Sound Through Sandwich Panels", JASA, Vol.56, No.5, pp.1515-1532, 1974.
5. James Moore, "Sound Transmission Loss Characteristics of the Three Layer Composite Wall Construction", Ph.D. thesis, Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Sep/29/1975.
6. J.A. Moore and R.H. Lyon, "Sound Transmission Loss Characteristics of Sandwich Panel Constructions", JASA, Vol. 89, No.2, pp.777-791, 1991.
7. Holmer C. I., "The Coincidence Wall, A new Design for High Transmission Loss or High Structural Damping", 77th JASA Meeting Paper, Section K4, 1969.

表 1 夾層材質分類及其材料參數

均質等向性泡沫芯材 (Closed Cell Styrofoam)	均質直交異向性蜂窩芯材 (硬質)	均質直交異向性蜂窩芯材 (軟質)
$E_{11} = E_{22} = 1.26 * 10^7 N / m^2$ $E_{33} = 1.26 * 10^7 N / m^2$ $E_{12} = E_{13} = E_{23} = 6.3 * 10^6 N / m^2$ $E_{44} = 3.1 * 10^6 N / m^2$ $E_{55} = 3.1 * 10^6 N / m^2$ $E_{66} = 3.1 * 10^6 N / m^2$ $L = 0.0762m / 0.0381m$ $\rho_c = 16kg / m^3$ $\rho_p = 3.78kg / m^2$ $t_p = 0.00635m$ $E_{11}^{fs} = 6.95 * 10^9 N / m^2$	$E_{11} = E_{22} = 4 * 10^6 N / m^2$ $E_{33} = 3.7 * 10^8 N / m^2$ $E_{12} = E_{13} = E_{23} = 4 * 10^5 N / m^2$ $E_{44} = 5 * 10^7 N / m^2$ $E_{55} = 2.3 * 10^7 N / m^2$ $E_{66} = 2 * 10^5 N / m^2$ $L = 0.0762m$ $\rho_c = 28kg / m^3$ $\rho_p = 4.2kg / m^2$ $t_p = 0.00635m$ $E_{11}^{fs} = 6.95 * 10^9 N / m^2$	$E_{11} = E_{33} = 4 * 10^5 N / m^2$ $E_{22} = 9.5 * 10^7 N / m^2$ $E_{12} = E_{13} = E_{23} = 4 * 10^4 N / m^2$ $E_{44} = 4.6 * 10^7 N / m^2$ $E_{55} = 1.65 * 10^5 N / m^2$ $E_{66} = 4.2 * 10^6 N / m^2$ $L = 0.0841m$ $\rho_c = 20.8kg / m^3$ $\rho_p = 5.7kg / m^2$ $t_p = 0.009525m$ $E_{11}^{fs} = 6.95 * 10^9 N / m^2$

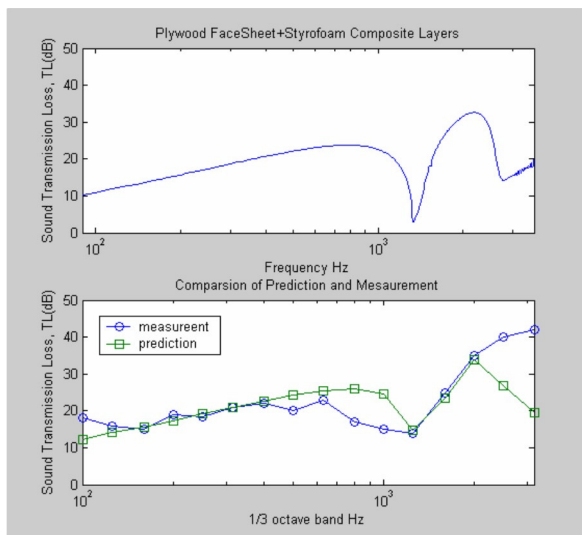


圖 1 泡沫芯材厚度 7.6cm 之預估實驗比較

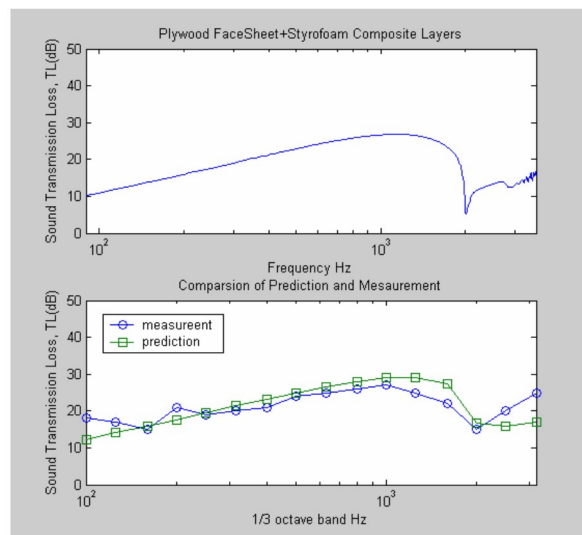


圖 2 泡沫芯材厚度 3.8cm 之預估實驗比較

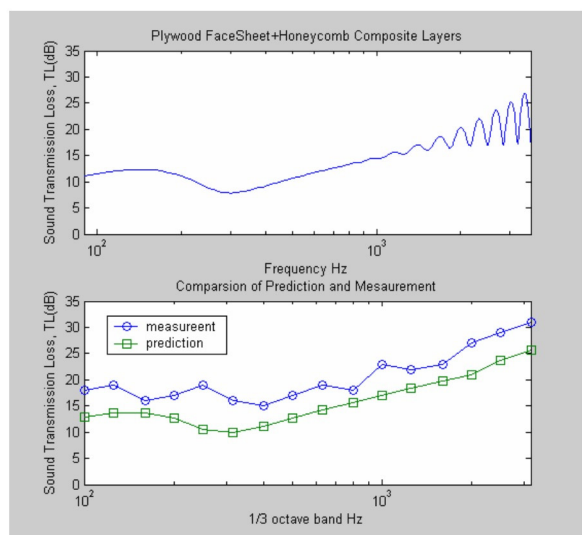


圖 3 硬質蜂窩芯材之預估實驗比較

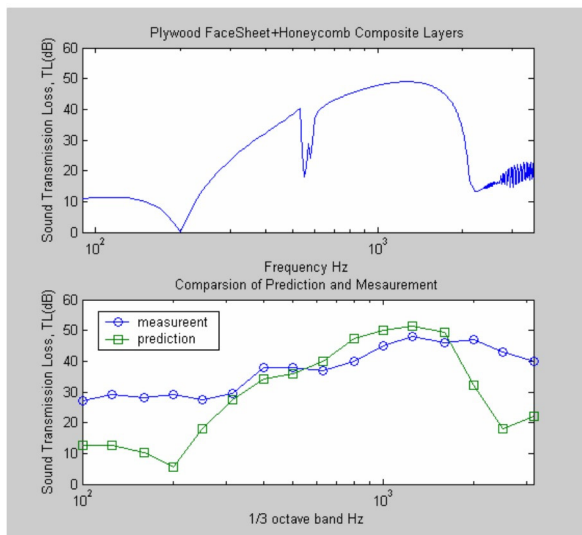


圖 4 軟質蜂窩芯材之預估實驗比較

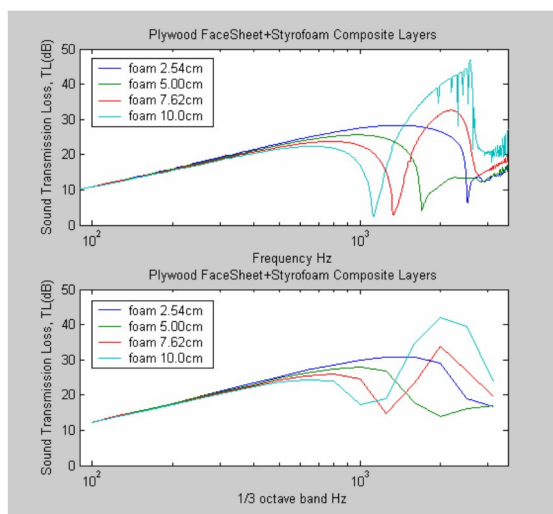


圖 5 泡沫芯材厚度參數變化之預估

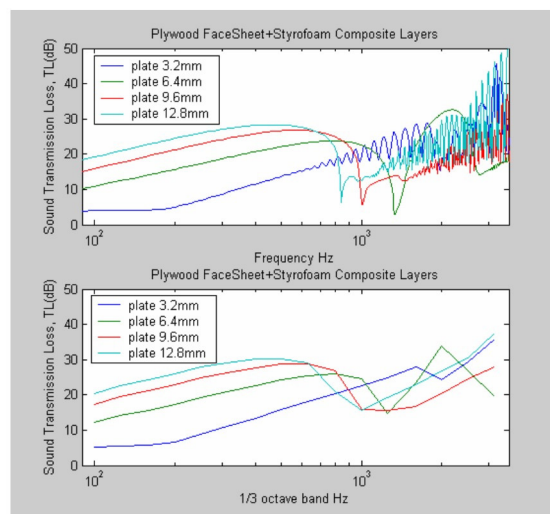


圖 6 泡沫芯材表面材厚度參數變化之預估

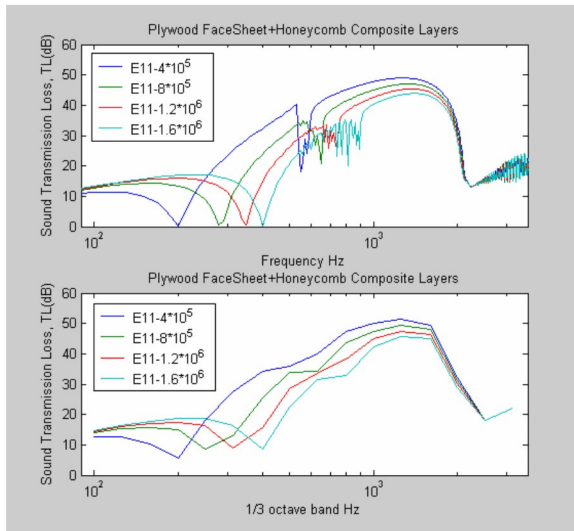


圖 7 軟質蜂窩芯材 E11 參數變化之預估

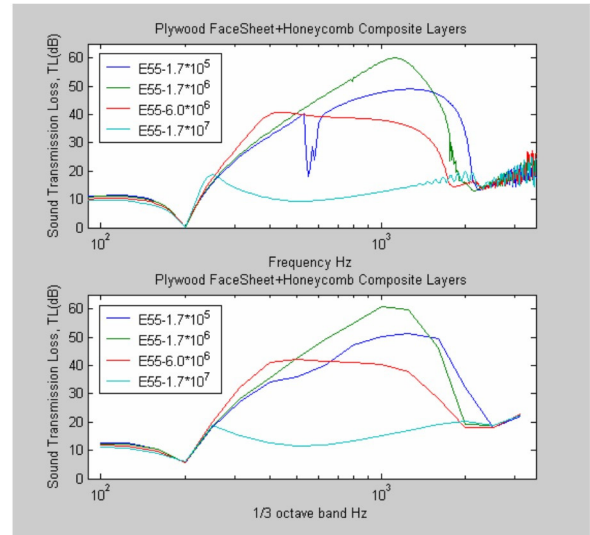


圖 8 軟質蜂窩芯材 E55 參數變化之預估

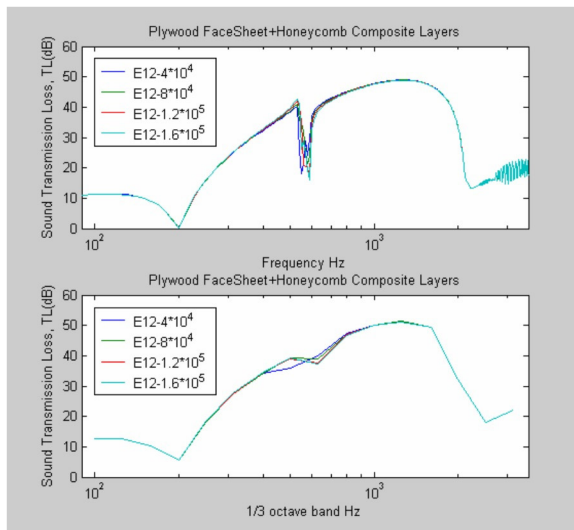


圖 9 軟質蜂窩芯材 E12 參數變化之預估

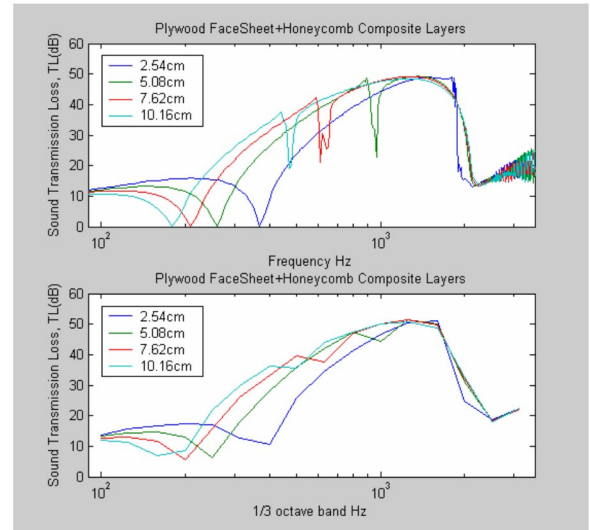


圖 10 軟質蜂窩芯材厚度參數變化之預估