

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫八：潛艦覆蓋材水中吸音特性之理論分析(2/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2611-E-002-011-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：王昭男

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 26 日

摘要

本文為一三年計劃之第二年，旨在探討聲波斜向入射至水中吸音材時之吸音特性。由第一年之推導可知滲透力(permeability)對吸音性能之影響相當顯著，因此本年度首先探討了滲透力(或流體阻力)與幾何尺寸、黏滯係數以及孔隙率間之關係。其次對適用於水中吸音之材質進行比較與選取，之後則將第一年所推導之公式加以擴展，進行聲波斜向入射至水中吸音材之分析。文中分別探討了孔隙率與孔徑大小改變對流體阻力以及吸音性能之影響，此外，黏性所引起之摩擦以及其所引起之熱能交換損失，文中將其影響分別置於體積彈性係數與剪力模數之虛數部分，探討此兩參數對吸音性能之影響，發現體積彈性係數對聲波傳播之影響要比剪力模數明顯許多。

關鍵字：多孔材、吸音、斜向入射

Abstract

The purpose of this study is to investigate the sound absorption characteristics for the sound oblique incident into the absorbent material in water. This is the second year for a three years project. From the results of first year, one can understand that permeability (or flow resistance) is the most important parameter for sound absorption material. Thus, first we derive the relationship of flow resistance, hole's dimension, viscosity and porosity in this year. And then the equations derived last year have been extended to investigate the absorption characteristics of materials for sound oblique incident. The influences of the porosity and diameter of the porous hole on the sound absorption performance are studied. Further, the energy dissipation due to the viscosity is included in the imaginary part of the bulk and shear modulus and also conducted to study their effects on the sound absorbent capability.

Keyword: porous material, sound absorption, oblique incidence

一、前言

Biot 在 1956 年提出充滿流體之多孔彈性體的波傳理論[1,2]，之後 Allard 等人則以彈性理論建立多孔材的轉換矩陣關係[3]。利用此兩學者的理論即可在空氣中對多孔材料吸音與隔音的性能理論分析。但本文主旨在探討水下多孔性材料對於聲波的反應，所以引用了 Stoll 對於聲波入射海底底床的波傳理論。Stoll [4] 以 Biot 理論為基礎分析了聲波在不同深度之沙與泥中的聲速，同時也探討剪力波與壓縮波之衰減係數(前一年度所提及)，而 Yamamoto[5] 也探討多孔彈性底層下海中聲波之傳播，發現剪力模數與頻率-孔隙-黏性合成數為兩個最重要參數。其後，Stoll [6, 7] 分析了水與沉積物介面之反射係數，並對於剪力模數與體積彈

性模數虛部衰減項做了探討。去年度在建立分析理論隻階段即以水中沉積物作為分析之對象，並與 Stoll 之分析比較以驗證本文之理論。今年度則將進行水中吸音材在不同角度入射時之吸音性能分析，因此，除了進行流體阻力與幾何尺寸、黏滯係數以及孔隙率間之關係之推導外，也對適用於水中吸音之材質進行比較與選取，其次則對各種性能參數改變對材料吸音性能之影響進行分析探討，但仍須進一步之實驗驗證。

二、滲透力之理論推導

由去年度之研究可知[8, 9]，在密度為 ρ_1 、孔隙率 ϕ 、流動阻力 σ 之多孔材中彈性應力波之控制方程式可表為

$$-\omega^2(\tilde{\rho}_{11}\mathbf{u}^s + \tilde{\rho}_{12}\mathbf{u}^f) = (P - N)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}^s + N\nabla^2\mathbf{u}^s + Q\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}^f \quad (1)$$

$$-\omega^2(\tilde{\rho}_{22}\mathbf{u}^f + \tilde{\rho}_{12}\mathbf{u}^s) = R\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}^f + Q\nabla\nabla \cdot \mathbf{u}^s \quad (2)$$

依據 Allard[8]之研究，可得到兩壓縮波(δ_1 與 δ_2)與一剪力波(δ_3)之波數分別表示為

$$\delta_1^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)}[P\tilde{\rho}_{22} + R\tilde{\rho}_{11} - 2Q\tilde{\rho}_{12} - \sqrt{\Delta}] \quad (3)$$

$$\delta_2^2 = \frac{\omega^2}{2(PR - Q^2)}[P\tilde{\rho}_{22} + R\tilde{\rho}_{11} - 2Q\tilde{\rho}_{12} + \sqrt{\Delta}] \quad (4)$$

$$\delta_3^2 = \frac{\omega^2}{N}(\frac{\tilde{\rho}_{11}\tilde{\rho}_{22} - \tilde{\rho}_{12}^2}{\tilde{\rho}_{22}}) \quad (5)$$

其中 $\Delta = (P\tilde{\rho}_{22} + R\tilde{\rho}_{11} - 2Q\tilde{\rho}_{12})^2 - 4(PR - Q^2)(\tilde{\rho}_{11}\tilde{\rho}_{22} - \tilde{\rho}_{12}^2)$ ，

$$\tilde{\rho}_{11} = \rho_1 + \rho_a - j\frac{\nu}{k_s}\phi^2\frac{F(\omega)}{\omega}, \quad \tilde{\rho}_{12} = -\rho_a + j\frac{\nu}{k_s}\phi^2\frac{F(\omega)}{\omega}$$

$$\tilde{\rho}_{22} = \phi\rho_0 + \rho_a - j\frac{\nu}{k_s}\phi^2\frac{F(\omega)}{\omega}, \quad F(\kappa) = \frac{1}{4}\frac{\kappa T(\kappa)}{1 - 2T(\kappa)/i\kappa}$$

$$T(\kappa) = \frac{ber'(\kappa) + ibei'(\kappa)}{ber(\kappa) + ibei(\kappa)}, \quad \kappa = a(\omega\rho_0/\nu)^{1/2}, \quad \rho_a = \phi\rho_0(\alpha_\infty - 1)$$

P, Q, R 則為固體與流體之體積彈性模數 K_b 與 K_f 以及剪力模數 N 與固流體合成之體積彈性模數 K_s 所組成，表示為

$$P = \frac{(1-\phi)\left[1-\phi-\frac{K_b}{K_s}\right]K_s + \phi\frac{K_s}{K_f}K_b}{1-\phi-K_b/K_s+\phi K_s/K_f} + \frac{4}{3}N,$$

$$Q = \frac{\left[1-\phi-\frac{K_b}{K_s}\right]K_s\phi}{1-\phi-K_b/K_s+\phi K_s/K_f}, \quad R = \frac{K_s\phi^2}{1-\phi-K_b/K_s+\phi K_s/K_f}$$

由去年之結果得知滲透力為一相當重要之參數，因此，擬對此參數做一探討。本文所欲分析之材質為橡膠加上孔洞，考慮孔洞加工之方式應為圓形直管，假設管

中流體之流速不大，在層流之範圍內，若不考慮重力之作用，則在直管兩端之壓力差可表示為[13]

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{8\eta VL}{r_0^2} \quad (6)$$

其中 r_0 為圓管之半徑， L 為管長， η 為流體之黏滯係數， V 則為管中流體之平均流速。而依據地質學之定義[12]，在多孔質材料之孔洞中流體通過孔隙之平均速度與壓力梯度間之關係可表示為

$$V = \left(\frac{k_s}{\eta}\right)\left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (7)$$

其中 k_s 為滲透力(permeability)，用以表示流體通過孔隙時之特性參數。由(6)與(7)兩式比較得知滲透力係數 k_s 可表示為

$$k_s = \frac{r_0^2}{8} \quad (8)$$

由此式可知滲透力 k_s 與孔隙尺寸有關之參數。又依據定義介質之流體阻力(fluid resistivity)可表示為[9]：

$$\sigma = \frac{\Delta p}{VL\phi} \quad (9)$$

故可得到流體阻力與滲透力間之關係為

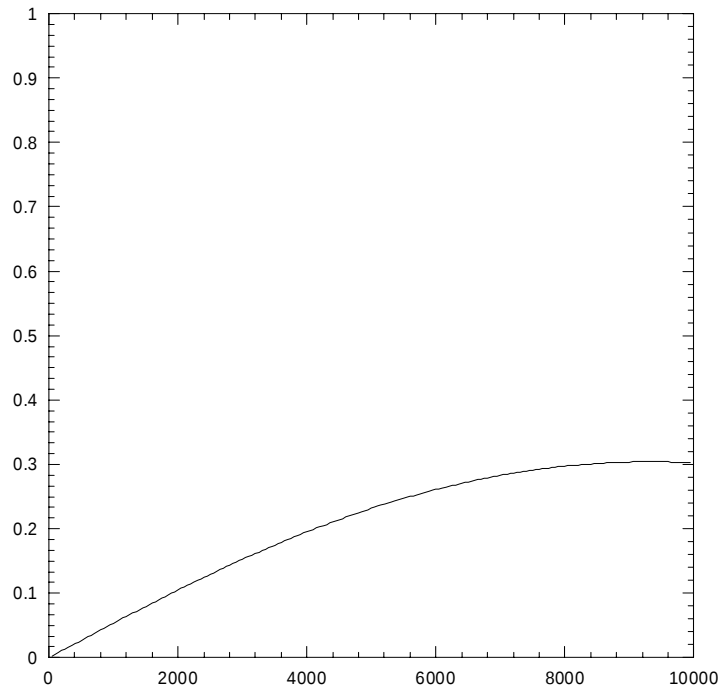
$$\sigma = \frac{\eta}{k_s\phi} = \frac{8\eta}{\phi r_0^2} \quad (10)$$

三、水下吸音材料之選取

吸音材料的選定，主要在其特徵阻抗能與傳播介質之特徵阻抗互相匹配，使聲波能夠儘量不被反射的進入材料內部，再利用此材料的內耗機構諸如流體的黏滯摩擦損失或熱傳效應，將聲波的能量在材料內部被消耗掉。欲吸收在水中傳播之聲波，材質之特性須儘可能與水相近，據此一原則對市面上之較軟固體材質加以選取比較，發現橡膠材質應是一相當適用之物質。表(一)[8]為空氣、水及橡膠的密度、壓縮波波速與體積彈性模數的比較，由表中可以發現橡膠的阻抗與水的阻抗相當，所以本文選用橡膠來當做水下的吸音材料。

Materials	$\rho(g/cm^3)$	$C_d(cm/s)$	$K_s(dyn/cm^2)$
Air	0.0012	0.344×10^5	1.420×10^6
Sea Water	1.03	1.522×10^5	2.386×10^{10}
Rubber	1.13	1.4073×10^5	2.22×10^{10}

表(一) 空氣、水及橡膠的密度、壓縮波波速與體積彈性模數



圖（一）聲波垂直入射水中橡膠之反射係數圖

為了驗證此一想法文終將橡膠置於水中，以聲波垂直入射分析其反射係數，結果如圖（一）所示，反射係數小於 0.3，亦即有 90%以上之能量可透過，說明橡膠之特徵阻抗與水相當匹配，適合當水中吸音材使用。

四、結果分析與討論

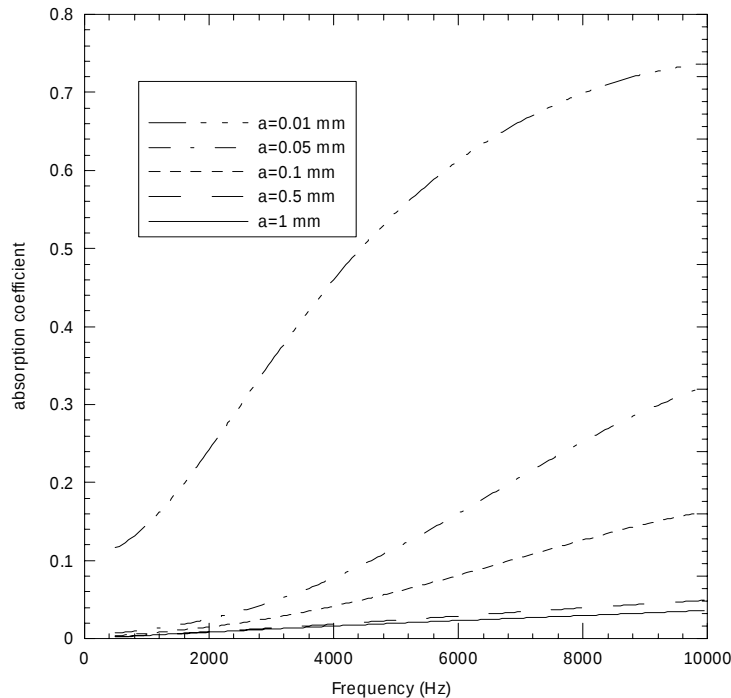
由於本文之研究係以二維無限平板為基礎加以推導，所以工型樑在理論中並不能直接處理，為了包含此部分之影響，文中將工型樑的所造成的勁度(stiffness)等效成鋼板，藉由改變鋼板的厚度，來達到等效工型樑加上鋼板的勁度，本文原考慮厚度 5 公分之鋼板，加上工型樑後，其等效之厚度為 16cm 的鋼板以承受音壓。文中計算所需之材料相關參數如下表所示

Material property	
Bulk modulus of grains , $K_s(N/m^2)$	3.833×10^9
Bulk modulus of frame , $K_b(N/m^2)$	$(2.183+0.107 i) \times 10^9$
Bulk modulus of fluid , $K_f(N/m^2)$	2×10^9
Mass density of grains , $\rho_1(kg/m^3)$	1000
Mass density of fluid , $\rho_0(kg/m^3)$	1000
Viscosity of fluid , $\eta(N-sec/m^2)$	1×10^{-3}
Pore size parameter , $a(m)$	$10^{-5}m \sim 10^{-3}m$
Shear modulus of frame , $N(N/m^2)$	$(8.2143+0.4i) \times 10^8$
Porosity , ϕ	0.3 ~ 0.9

表(二)、材料係數相關參數表

a. 孔徑尺寸對吸音率之影響

圖(二)所示為在固定孔隙率 0.9 時，不同孔徑下吸音率之變化，由圖中可以明顯看出，當孔徑尺寸很小時，吸音效果相當良好，但隨著孔徑逐漸增大，吸音率快速下降，當圓孔半徑大於 0.1mm，吸音率已不到 0.1。此一現象說明，當孔徑夠小時，流體的黏性得以發揮作用，由(10)式亦可看出此時流體阻力相當大，聲波之能量在傳遞過程中將造成相當大之損失，因此吸音率較高。反之，當孔徑漸大，則對聲波傳播之阻卻能力漸減，消音能力亦明顯下降。



圖(二)、不同孔徑尺寸對吸音率之影響

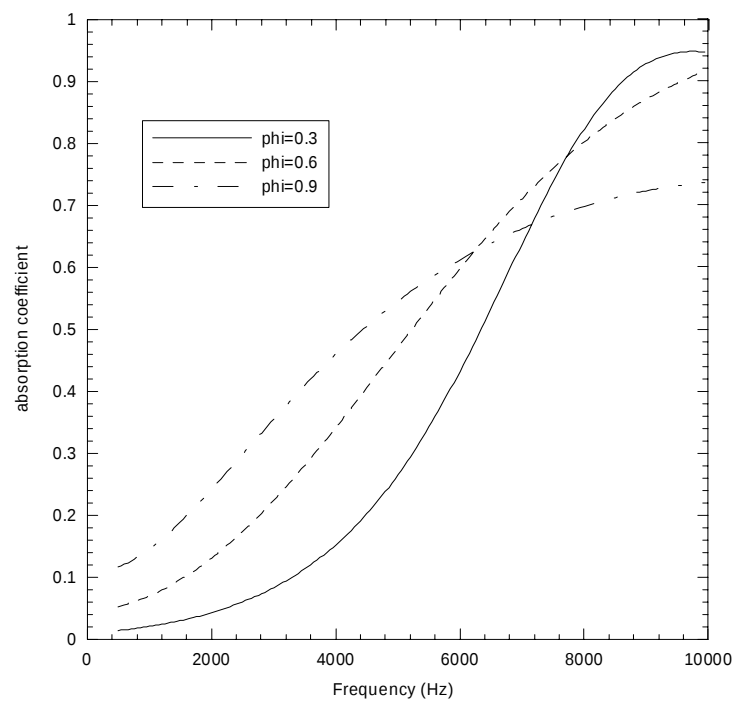
b. 孔隙率對吸音率之影響

多孔材料之吸音能力與其孔隙之多寡有著相當大之關係，在此將針對此一參數作一探討，若將孔洞之半徑固定為 0.01 mm，則多孔橡膠之吸音率隨著孔隙率之改變如圖(三)所示，隨著孔隙率增加，低頻區之吸音率提高，但高頻區則反而下降，整體平均而言，吸音能力有隨著孔隙率增加而增加之趨勢。

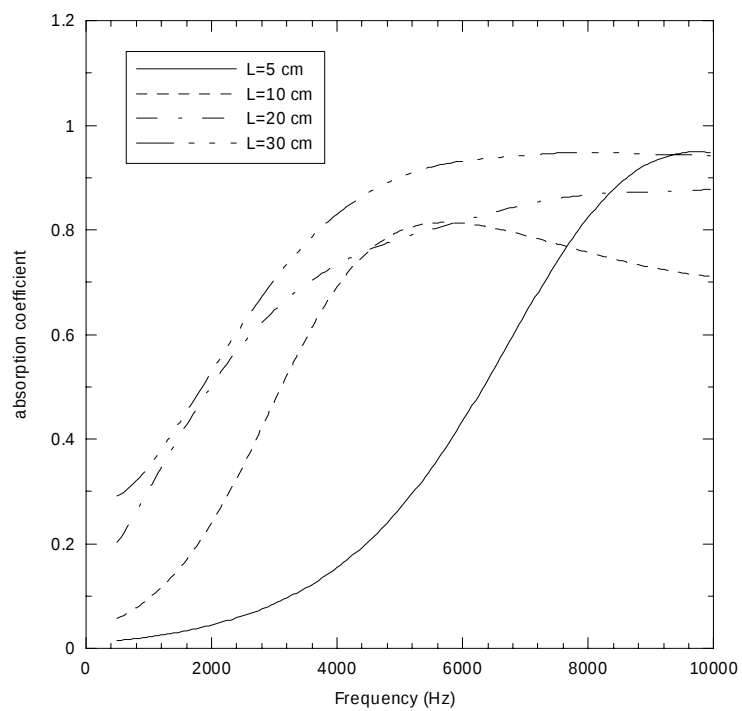
c. 多孔吸音材厚度對吸音率之影響

吸音材之性能好壞除了孔隙率是一重要因素外，厚度因素對頻率之影響亦相當重要，由空氣中研究得知，當材料之厚度等於波長之四分之一時，材料在該頻率之吸音效果最佳，但在水中之聲波傳播，背板部分無法視為剛體，因此，四分之一波長理論無法直接套用，文中則對材料厚度之影響作一探究，圖(四)為厚度 5 至 30 公分之多孔橡膠之吸音能力比較，圖中可看出，吸音能力隨著厚度之增加而增加，尤其是中低頻區域更是明顯，而高頻區因其吸音能力較佳，改變不

很明顯，偶而尚有稍稍降低之現象。整體而言，此現象與空氣中吸音材之分析呈現一致之結果。



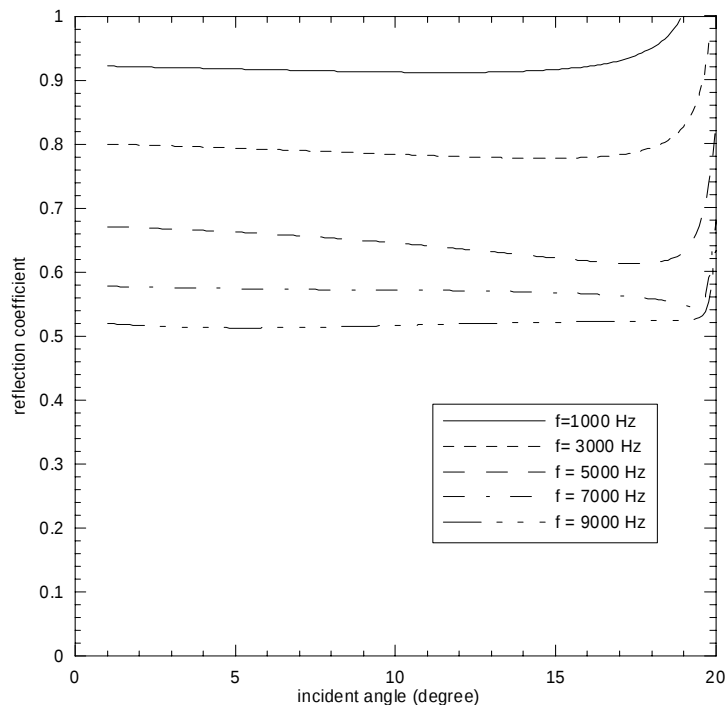
圖(三)、不同孔隙率對吸音率之影響



圖(四)、吸音材厚度對吸音率之影響

d. 不同角度入射對吸音率之影響

在空氣中聲波由不同角度入射至吸音材，其吸音能力將隨角度改變，此處亦將此因素列入探討，若將孔隙率與孔洞半徑分別固定為 0.9 與 0.01mm，材料厚度 5cm，則各頻率之聲波在不同角度入射之反射係數如圖（五）所示，在此選擇以反射係數表示主要之目的是表現臨界角較為方便，由圖中可看出，入射角度對反射係數之改變相當細微，但當入射角度接近 20 度時，反射係數急遽上升，此一角度稱之為臨界角，大於此角度入射，聲波將被全反射，此一現象之產生主要是因為背板為鋼材，其音速較水為大，根據 Snell 定理，此角度約為 20 度，與本文之分析一致。

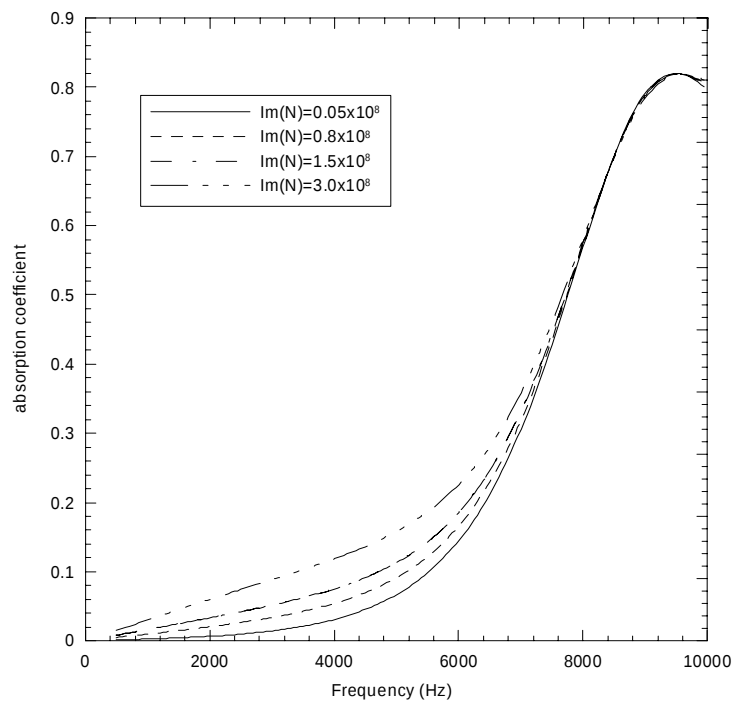


圖(五)、不同入射角對反射係數之影響

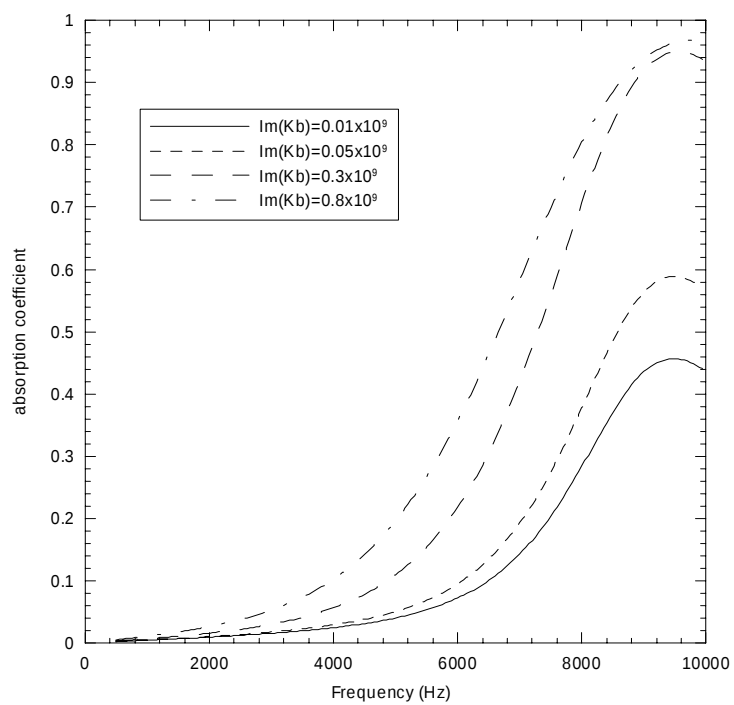
e. 剪力模數與體積彈性係數虛部對吸音率之影響

由於多孔材之剪力與黏性所產生之黏彈性作用，將造成聲波傳遞之損耗，一般將此作用之影響表示於剪力模數 N 與體積彈性係數 K_b 之虛部[4]，為了瞭解其作用，文中分別對其進行數值之分析研究。首先考慮剪力模數虛部之影響，圖(六)為不同虛部數值下之吸音率，在頻率 7000 Hz 以下，吸音率隨著剪力模數虛部之增加而增加，但改變之幅度並不大，最多僅增加 10% 之吸音率，而高頻區域則完全不受剪力模數虛部之影響。其次改變體積彈性係數 K_b 之虛部，吸音率如圖(七)所示，由圖中可看出體積彈性係數 K_b 改變呈現出與剪力模數不同之面貌，對所有頻率而言，體積彈性係數虛部增加吸音係數皆隨之增加，而越往高頻區域

則吸音率增加之幅度越明顯。由此兩圖形之比較可看出能量耗損確實提高了吸音率，但體積彈性係數之作用顯然比剪應力要明顯許多，亦即壓縮波對聲波傳播之影響比剪力波來得重要。



圖(六)、剪力模數虛部改變對吸音率之影響



圖(七)、體積彈性係數虛部改變對吸音率之影響

五、結論

本計劃從第一年度開始推導水下多孔吸音材之聲波傳播理論，並與文獻的結果比對與驗證；本年度則進行了適用水下吸音材料的選取，滲透力與幾何尺寸關係之推導，同時探討了孔隙率與孔徑大小改變對吸音性能之影響，此外，黏性所引起之摩擦以及其所引起之熱能交換損失，文中將其影響分別置於體積彈性係數與剪力模數之虛數部分，探討此兩參數對吸音性能之影響，發現吸音率隨著體積彈性係數虛數之增加而增加，且程度相當明顯，而剪力模數虛數之改變僅在低頻區稍稍增加吸音率而已。而有關斜向入射的分析顯示，只要入射角度大於 20 度，則幾乎產生全反射之作用，亦即沒有吸音效果，這是將來需要留意與改善之處。此外，由厚度之分析可知，由於水中聲波之波長較空氣中要長的多，要有較好之吸音效果則厚度需要 10 公分以上，若能達到 20 公分甚至 30 公分則吸音效果更佳，但若要在潛艦之外加上如此厚之吸音材，其對潛艦流體動力之影響將相當大，這部分將提供另一子計劃作為分析流體動力之參考。

參考文獻：

1. Biot, M. A., The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range., J. Acoust. Soc. Amer., 28, 168-178 (1956).
2. Biot, M. A., The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. High frequency range., J. Acoust. Soc. Amer., 28, 179-191 (1956).
3. Allard, J. F., Champoux, Y. and Depollier, C., Modelization of layered sound absorbing materials with transfer matrices., J. Acoust. Soc. Amer., 82, 1792-1796 (1987).
4. Stoll, R. D., Acoustic waves in ocean sediments, Geophysics, 42(4), 715-725, 1977.
5. Yamamoto, T., Acoustic propagation in the ocean with a poro-elastic bottom, J. Acoust. Soc. Amer., 73(5), 1587-1596, 1983.
6. Stoll, R. D., Experimental studies of attenuation in sediments, J. Acoust. Soc. Amer., 66(4), 1152-1160, 1979.
7. Stoll, R. D. and Kan, T. K., Reflection of acoustic waves at a water-sediment interface, J. Acoust. Soc. Amer., 70(1), 149-156, 1981.
8. J. F. Allard, Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing materials, Elsevier Applied Science, London, 1993.
9. 王昭男，潛艦關鍵性技術之基礎研究—子計畫八：潛艦覆蓋材水中吸音特性之理論分析(2/3),國科會研究報告 NSC 91-26111-E-002-018, 2003

10. P.D. Jackins, G.C. Gaunard, Resonance reflection of acoustic waves by a perforate bilaminar rubber coating model, Naval Surface Weapons Center, 25 August 1982
11. Allard, J. F., Propagation of sound in porous media: Modeling sound absorbing materials, Elsevier Applied Science, London, 1993.
12. L. W. LeRoy, D. D. LeRoy and J. W. Raese, Subsurface Geology : Petroleum Mining Construction, Colorado School of Mines • Golden, Colorado, 1977.
13. Richard H. F. Pao, Fluid Dynamics, Charles E. Merrill Books, Inc., Columbus, Ohio, 1980.