NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH THỦY ÂM CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE CHẾ TẠO BẦU SÔ NA

Nguyễn Văn Số*, Vũ Quý Thà, Vũ Ngọc Vịnh

Tóm tắt: *Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu độ suy hao lan truyền sóng âm thanh trong môi trường nước xuyên qua lớp vật liệu composite có độ dày nhất định ở dải tần (8 ÷12) kHz. Xây dựng mô hình toán lý để mô tả bài toán và đưa ra cách thức tìm lời giải. Một vài trường hợp riêng được phân tích, tính toán để áp dụng cho mô hình thực tế. Tiến hành thí nghiệm đo đạc đặc tính thủy âm của vật liệu composite chế tạo bầu sô na. Độ suy hao của tấm vật liệu composite được đo trong dải tần (8 ÷12) kHz với các điều kiện khác nhau. Kết quả nghiên cứu được ứng dụng trong tính toán, thiết kế, chế tạo bầu sô na.*

Từ khóa: Thủy âm; Bầu sô na; Độ suy hao; Vật liệu composite.

1. MỞ ĐẦU

Ngày nay, với tầm quan trọng của không gian tác chiến ngầm và sự lớn mạnh của Hải quân các nước (trong đó có Hải quân Việt Nam), các tổ hợp và hệ thống sô na được trang bị nhiều trên các tàu ngầm và tàu mặt nước. Sô na sử dụng anten thủy âm để thu tín hiệu thủy âm nhằm phát hiện các mục tiêu dưới nước dựa trên cơ sở sóng âm ít bị suy hao khi lan truyền trong môi trường nước so với các loại sóng khác. Bầu sô na được trang bị để bảo vệ anten khỏi các tác động cơ học của dòng nước xô vào, tránh tác động sinh học (hà bám), hóa học (ăn mòn nước biển) và tránh nhiễu thủy động lực học của môi trường. Lịch sử ứng dụng và phát triển bầu sô na được đề cập trong [1].

Các yêu cầu đối với bầu sô na mâu thuẫn với nhau. Một mặt, vì là thành phần của thân vỏ tàu nên bầu sô na phải tương đối bền. Nó phải chịu được tải động lực học (bao gồm cả tải va đập) xuất hiện khi tàu vận động trong điều kiện tốc độ cao hoặc thời tiết sóng gió lớn. Mặt khác, bầu sô na phải đảm bảo độ trong suốt âm thanh, không làm sai lệch giản đồ hướng của anten, đảm bảo độ suy hao nhỏ nhất khi sóng âm xuyên qua bầu sô na. Độ trong suốt âm thanh của bầu sô na không đủ sẽ tạo ra độ suy hao tín hiệu lớn, ảnh hưởng đến khả năng làm việc của anten sô na. Các thành phần cấu trúc của bầu sô na và các hiện tượng vật lý liên quan đến chúng được nghiên cứu trong [2, 3].

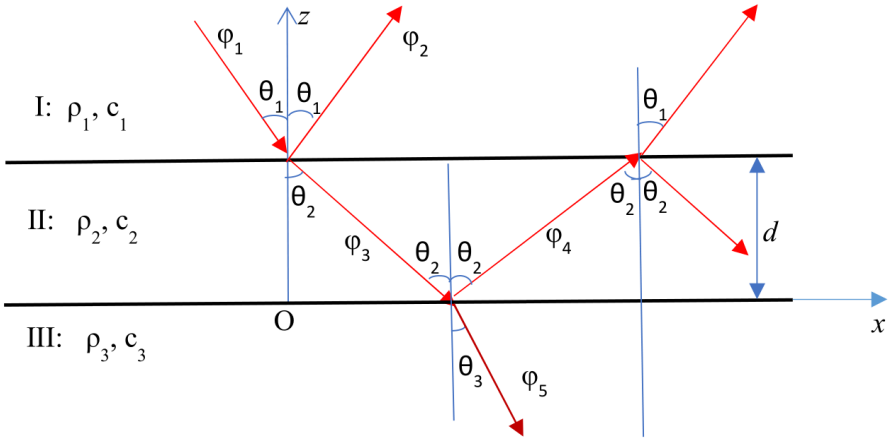
Ngày nay, người ta sử dụng ba loại vật liệu chính để chế tạo bầu sô na là: titan, composite và cao su tổng hợp. Vật liệu titan có độ bền cao, khối lượng riêng thấp (so với thép) và độ suy hao thấp, nhưng giá thành cao nên thường được dùng cho tàu ngầm và một số loại tàu chiến. Vật liệu composite có ưu điểm là nhẹ, có độ suy hao thấp và giá thành không cao nên thường được dùng cho sô na các tàu mặt nước cỡ nhỏ và vừa. Vật liệu cao su thường chỉ sử dụng cho những anten sô na có kích thước rất nhỏ vì nó dễ bị biến dạng khi chịu tác động của áp suất thủy tĩnh cũng như khi có tác động bên ngoài. Trong phạm vi bài báo này chỉ tập trung nghiên cứu vật liệu composite.

Lý thuyết lan truyền sóng âm thanh từ môi trường này sang môi trường khác được nghiên cứu chi tiết trong [4-6]. Trong [4] chỉ nghiên cứu bài toán truyền âm giữa hai môi trường. Trong [5-6] có nghiên cứu đến truyền âm trong ba môi trường, tuy nhiên chỉ tập trung vào tính toán hệ số phản xạ. Bài báo này nghiên cứu sự lan truyền âm thanh trong môi trường nước xuyên qua lớp vật liệu trung gian, trong đó tập trung xác định độ suy hao tín hiệu thủy âm qua tấm vật liệu composite.

Để chế tạo bầu sô na, trước hết cần chế tạo tấm vật liệu mẫu nhằm đo độ suy hao tín hiệu và độ bền cơ tính. Trên cơ sở đó sẽ chế tạo bầu sô na mẫu nhằm đạt được các thông số cần thiết theo yêu cầu kỹ thuật. Sau đó áp dụng công nghệ mẫu để chế tạo bầu sô na.

2. BÀI TOÁN LAN TRUYỀN SÓNG ÂM THANH TRONG MÔI TRƯỜNG NƯỚC XUYÊN QUA LỚP VẬT LIỆU TRUNG GIAN

Sau đây, ta xét bài toán lan truyền tia sóng âm thanh từ môi trường chất lỏng thứ nhất (I) xuyên qua lớp phân cách (II) có chiều dày *d* đến môi trường chất lỏng tiếp theo (III). Mô hình bài toán được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. *Mô hình bài toán lan truyền sóng âm qua lớp phân cách môi trường.*

Ta ký hiệu ρ_i, c_i lần lượt là tỷ trọng và vận tốc lan truyền sóng âm trong các môi trường thứ *i* (*i* = 1, 2, 3). Trong điều kiện thực tế, ta có thể coi môi trường I là nước biển bên ngoài bầu sô na, môi trường II là môi trường vật liệu làm bầu sô na, môi trường III là môi trường chất lỏng bên trong bầu sô na (có thể là nước biển, nước ngọt, dầu đặc chủng,...). Các môi trường được đặc trưng bởi tỷ trọng ρ và vận tốc âm thanh *c* lan truyền trong môi trường đó.

Vì thông thường tín hiệu mục tiêu từ cự ly ở xa nên sóng tới từ môi trường I có thể coi là sóng phẳng. Ta biểu diễn sóng phẳng lan truyền dọc theo trục *x* thông qua thế vận tốc dao động của các hạt trong môi trường như sau:

$$\varphi(x,t) = Ae^{j\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)} = Ae^{j(\omega t-kx)} \tag{1}$$

trong đó, A - biên độ; ω - vận tốc góc; *k* - số sóng; *t* - thời gian; *c* - vận tốc lan truyền sóng.

Áp suất âm thanh và vận tốc dao động được tính theo công thức sau [4]:

$$p = \rho\frac{\partial\varphi}{\partial t} = j\omega\rho Ae^{j(\omega t-kx)} = \omega\rho Ae^{j\left(\omega t-kx+\frac{\pi}{2}\right)} \tag{2}$$

$$v_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x} = jkAe^{j(\omega t-kx)} = kAe^{j\left(\omega t-kx+\frac{\pi}{2}\right)}. \tag{3}$$

Khi tia sóng âm (φ_1) đi qua lớp phân cách giữa hai môi trường I và II, sẽ xuất hiện tia phản xạ (φ_2) và tia khúc xạ (φ_3), năng lượng tia tới sẽ bằng tổng năng lượng của tia phản xạ và tia khúc xạ. Góc phản xạ bằng góc tới θ_1. Tia khúc xạ (φ_3) trong môi trường II đi đến mặt phân cách giữa hai môi trường II và III, tiếp tục tạo ra tia phản xạ (φ_4) và tia khúc xạ (φ_5). Theo định luật Snell, ta có:

$$\frac{\sin\theta_1}{c_1} = \frac{\sin\theta_2}{c_2} = \frac{\sin\theta_3}{c_3} \tag{4}$$

Không mất tính tổng quát, ta xét bài toán trong không gian hai chiều với trục tọa độ xOz như trên hình 1. Từ (1), ta có thể biểu diễn hàm thế vận tốc dao động của tia tới (φ_1) như sau:

$$\varphi_1(x,z,t) = Ae^{j\left[\omega t - k_1 x\sin\theta_1 + k_1(z-d)\cos\theta_1\right]}$$

Tương tự như vậy, ta được hệ 5 phương trình biểu diễn 5 loại tia sóng âm:

$$\begin{cases} \varphi_1 = Ae^{j\left[\omega t - k_1 x\sin\theta_1 + k_1(z-d)\cos\theta_1\right]} \\ \varphi_2 = AR_\varphi e^{j\left[\omega t - k_1 x\sin\theta_1 - k_1(z-d)\cos\theta_1\right]} \\ \varphi_3 = A\hat{D}_\varphi e^{j\left[\omega t - k_2 x\sin\theta_2 + k_2(z-d)\cos\theta_2\right]} \\ \varphi_4 = A\hat{R}_\varphi e^{j\left[\omega t - k_2 x\sin\theta_2 - k_2 z\cos\theta_2\right]} \\ \varphi_5 = AD_\varphi e^{j\left[\omega t - k_3 x\sin\theta_1 + k_3 z\cos\theta_3\right]} \end{cases} \quad (5)$$

trong đó, $k_i = \dfrac{\omega}{c_i}$ là số sóng của tia âm thanh trong môi trường thứ *i* (*i =1, 2, 3*). Hệ phương trình (5) có bốn tham số là R_φ, $\hat{R}_\varphi$, D_φ, $\hat{D}_\varphi$ đặc trưng cho hệ số phản xạ (có kí hiệu *R*) và hệ số truyền qua (có kí hiệu *D*).

Để giải hệ phương trình trên ta cần thiết lập các điều kiện biên tại các mặt phân cách giữa các môi trường. Tại mặt phân cách giữa hai môi trường, áp suất và thành phần pháp tuyến của vận tốc dao động (vuông góc với mặt phân cách, trong mô hình này là thành phần v_z) trong hai môi trường là bằng nhau. Vì vậy, ta có hệ phương trình điều kiện biên như sau:

$$\begin{cases} p^I\big|_{z=d} = p^{II}\big|_{z=d} \\ p^{II}\big|_{z=0} = p^{III}\big|_{z=0} \\ v_z{}^I\big|_{z=d} = v_z{}^{II}\big|_{z=d} \\ v_z{}^{II}\big|_{z=0} = v_z{}^{III}\big|_{z=0} \end{cases} \quad (6)$$

Thay các phương trình (2), (3), (4), (5) vào (6), sau khi rút gọn ta được hệ phương trình sau:

$$\begin{cases} \rho_1\left(1+R_\varphi\right) = \rho_2\left(\hat{D}_\varphi + \hat{R}_\varphi e^{-j\gamma}\right) \\ \rho_2\left(e^{-j\gamma}\hat{D}_\varphi + \hat{R}_\varphi\right) = \rho_3 D_\varphi \\ k_1\cos\theta_1\left(1-R_\varphi\right) = k_2\cos\theta_2\left(\hat{D}_\varphi - \hat{R}_\varphi e^{-j\gamma}\right) \\ k_2\cos\theta_2\left(e^{-j\gamma}\hat{D}_\varphi - \hat{R}_\varphi\right) = k_3\cos\theta_3 D_\varphi \end{cases} \quad (7)$$

trong đó, $\gamma = \left(k_2\cos\theta_2\right)d$ được gọi là độ dày sóng của lớp phân cách.

Hệ phương trình (7) là hệ 4 phương trình có 4 ẩn số R_φ, $\hat{R}_\varphi$, D_φ, $\hat{D}_\varphi$. Người ta thường quan tâm đến hai đại lượng chính, đó là hệ số phản xạ R_φ và hệ số truyền qua D_φ. Trong [5-6] đã đề cập đến công thức cho hệ số phản xạ R_φ. Tuy nhiên, đối với bầu sô na, ta chủ yếu quan tâm đến hệ số truyền qua D_φ để tính độ suy hao tín hiệu. Giải hệ phương trình (7) ta được:

$$D_\varphi = \frac{\rho_1}{\rho_3}\frac{4Z_3Z_2}{\left(Z_3+Z_2\right)\left(Z_2+Z_1\right)e^{j\gamma} + \left(Z_3-Z_2\right)\left(Z_2-Z_1\right)e^{-j\gamma}} \quad (8)$$

trong đó, $Z_i = \dfrac{\rho_i c_i}{\cos\theta_i}$ - được gọi là trở kháng sóng âm của môi trường thứ *i* đối với tia sóng có

góc nghiêng θ_i so với tia pháp tuyến của mặt phân cách.

Trong thực tế, người ta thường quan tâm đo đạc đại lượng áp suất âm thanh. Từ (2) ta có:

$$D_p = \frac{\rho_3}{\rho_1} D_\varphi \tag{9}$$

Thay (8) vào (9) ta được:

$$D_p = \frac{4Z_3Z_2}{(Z_3+Z_2)(Z_2+Z_1)e^{j\gamma} + (Z_3-Z_2)(Z_2-Z_1)e^{-j\gamma}} \tag{10}$$

Như vậy, ta đã tìm được lời giải cho bài toán đặt ra. Từ hệ số truyền qua D_p ta có thể tính được độ suy hao tín hiệu âm thanh (Insertion Loss) khi truyền qua tấm vật liệu phân cách theo công thức:

$$IL = -20\log|D_p|, \text{ dB.} \tag{11}$$

Sau đây, ta xét một vài trường hợp đặc biệt để áp dụng cho các mô hình thực tế:

a) <u>Trường hợp 1</u>: *d = 0.* Nghĩa là không có lớp phân cách II, mà chỉ có hai môi trường I và III. Như vậy, $\gamma = (k_2\cos\theta_2)d = 0$; $e^{-j\gamma} = 1$. Từ (10) suy ra:

$$D_p = \frac{4Z_3Z_2}{2Z_3Z_2 + 2Z_1Z_2} = \frac{2Z_3}{Z_3+Z_1} \tag{12}$$

Đây là trường hợp ứng dụng nhiều trong thực tế khi tính toán hệ số phản xạ và truyền qua của tín hiệu sóng âm truyền từ môi trường này sang môi trường khác. Kết quả này phù hợp với kết quả trình bày trong [4].

b) <u>Trường hợp 2</u>: tia tới vuông góc với mặt phân cách, nghĩa là $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$. Ta có $\gamma = k_2 d = \frac{2\pi d}{\lambda}$, trong đó, λ là bước sóng. Nếu độ dày *d* là bội của nửa bước sóng, nghĩa là $d = n\frac{\lambda}{2}$, với *n* là số tự nhiên, thì $\gamma = n\pi$ và ta cũng thu được biểu thức (12) như trường hợp 1 (nghĩa là không có môi trường II). Như vậy, với lớp phân cách có bề dày là bội số của nửa bước sóng thì lớp đó được coi là trong suốt âm thanh đối với những tia sóng âm có góc tới vuông góc với mặt phân cách. Đây là cơ sở quan trọng để thiết kế các bầu sô na nhằm đạt được độ trong suốt âm thanh tốt nhất đối với những tần số nhất định.

c) <u>Trường hợp 3</u>: $Z_1 = Z_3$, nghĩa là môi trường I và III là giống nhau. Trong thực tế, đây là trường hợp trong bầu sô na sử dụng nước biển thông với bên ngoài (ví dụ như tổ hợp sô na MGK-400EM hay máy thông tin ngầm UT-3000). Từ (10) ta có:

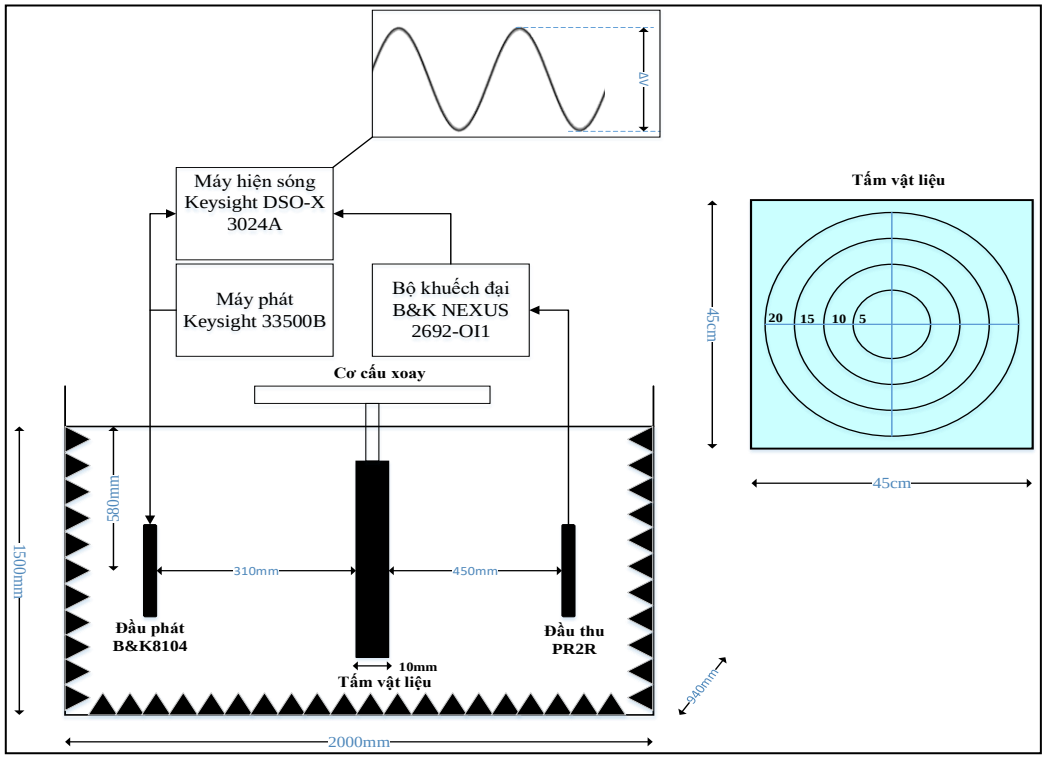
$$D_p = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)^2 e^{j\gamma} - (Z_1-Z_2)^2 e^{-j\gamma}} \tag{13}$$

Ta áp dụng các trường hợp này cho bài thí nghiệm trình bày dưới đây.

3. THÍ NGHIỆM ĐO ĐẠC ĐẶC TÍNH THỦY ÂM CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE

Trong phạm vi bài báo này chỉ thực hiện thí nghiệm với vật liệu composite làm bầu sô na trong dải tần (8 ÷ 12)kHz. Tấm composite mẫu được chế tạo bằng phương pháp hút chân không để loại bỏ các bọt khí bên trong nhằm làm giảm độ suy hao tín hiệu khi truyền xuyên qua chúng, cũng như tăng độ bền cơ tính cho sản phẩm. Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trên hình 2. Tấm composite được gắn vào giá đỡ có cơ cấu xoay, đặt trong bể thử thủy âm chuyên dụng (thành bể được gắn lớp cao su hấp thụ âm thanh) kích thước 2000 x 940 x 1500 mm. Các thiết bị đo là thiết

bị tiêu chuẩn của hãng B&K, Keysight và Oceanpribor. Phía trước và phía sau của tấm vật liệu lần lượt bố trí đầu phát và đầu thu thủy âm. Tín hiệu từ máy phát được đưa đến đầu phát. Tín hiệu từ đầu thu đi qua bộ khuếch đại, sau đó đưa lên máy hiện sóng để phân tích tín hiệu.



Hình 2. *Sơ đồ thí nghiệm.*

Ta áp dụng mô hình bài toán trình bày bên trên cho thí nghiệm này. Trong đó, môi trường I và III giống nhau và là nước ngọt (trường hợp 3), nghĩa là $\rho_1 = \rho_3 \approx 1000$ kg/m^3, $c_1 = c_3 \approx 1500$ m/s. Tấm composite có kích thước 450x450x10 mm là môi trường II có độ dày d = 1 cm, $\rho_2 = 1908$ kg/m^3, $c_2 = 2630$ m/s.

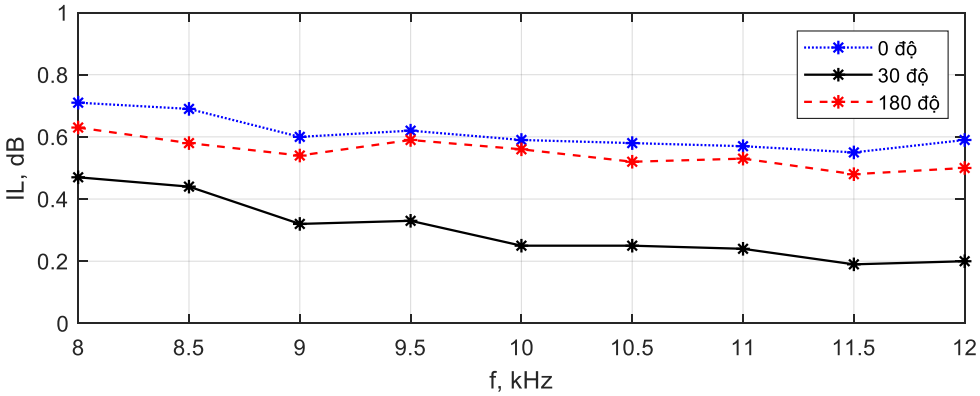
Khi không có tấm composite (d = 0), ứng với trường hợp 1 đã xét ở trên. Vì là môi trường đồng nhất ($Z_3 = Z_1$) giữa đầu phát và đầu thu, nên từ (12) và (11) ta có $D_p = 1$; IL = 0. Nghĩa là lúc này chỉ có độ suy hao đường truyền, chứ không có độ suy hao của vật liệu phân cách. Kết quả đo đạc trong trường hợp này được dùng để so sánh với trường hợp có tấm composite để tính độ suy hao mức tín hiệu thủy âm khi truyền qua tấm composite.

Trong mỗi lần đo, các điều kiện được giữ nguyên (vị trí đầu phát, đầu thu, mức phát, tần số phát, hệ số khuếch đại) khi có và không có tấm composite phân cách giữa đầu phát và đầu thu. Dải tần (8 ÷ 12) kHz được lựa chọn để đo đạc thí nghiệm vì thực tế nhiều hệ thống sô na sử dụng dải tần này.

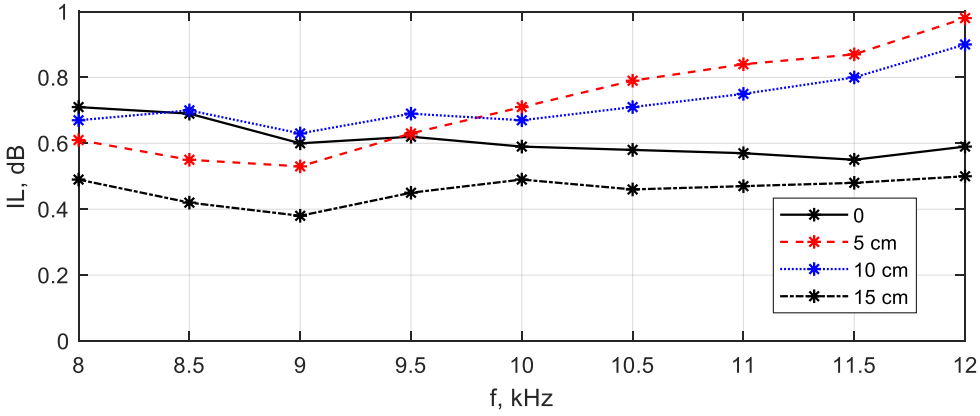
Điều kiện bài đo như sau: đầu phát là hydrophone BK8104, đầu thu là chấn tử PR2R; điện áp phát Vpp = 10 V; hệ số khuếch đại thu 10 mV/Pa; độ sâu đầu phát và đầu thu so với mặt nước 58cm; khoảng cách giữa đầu phát và đầu thu là 86 cm. Giá trị điện áp thu được trên máy hiện sóng Keysight DSO-X 3024 được ghi lại để tính độ suy hao. Mỗi điểm đo được thực hiện 3 lần để kiểm tra độ ổn định rồi lấy kết quả trung bình. Để khử nhiễu trong quá trình đo, ngoài việc tiếp địa tốt cho hệ thống, cần phát một chùm xung, rồi đo biên độ xung thích hợp thu được.

Trên hình 3 thể hiện kết quả đo độ suy hao của tấm composite tại vị trí tâm điểm với các tần số và góc tới θ_1 khác nhau (θ_1 lần lượt là 0º, 30º và 180º). Từ hình 3 ta thấy, độ suy hao *IL* của tấm composite khi góc tới là 30º nhỏ hơn độ suy hao khi góc tới là 0º trong cả dải tần này.

Trường hợp quy ước 180º nghĩa là khi ta xoay ngược tấm composite 180º từ trước ra sau nhằm mục đích so sánh với trường hợp 0º để kiểm tra tính đồng nhất của vật liệu. Từ hình 3 ta thấy, độ suy hao trong hai trường hợp 0º và 180º là gần như tương đồng. Sự khác biệt nhỏ thể hiện sự không đồng nhất của vật liệu dọc theo bề dày của tấm composite tại tâm điểm.



Hình 3. *Độ suy hao của tấm composite ở dải tần (8 ÷ 12) kHz.*



Hình 4. *Độ suy hao của tấm composite đo tại các vị trí khác nhau.*

Trên hình 4 thể hiện kết quả đo độ suy hao trong dải tần (8 ÷ 12) kHz của tấm composite đo tại các vị trí khác nhau cách tâm điểm của tấm composite lần lượt 0, 5, 10, 15 cm (xem hình 2). Độ suy hao dao động từ 0,38 dB đến 0,98 dB, trung bình đạt 0,6 dB. Đây là độ suy hao rất thấp nếu so với độ suy hao của một số loại composite lên đến trên 5 dB (xem trong [1, 7, 8]). Sự khác biệt của độ suy hao tại các vị trí khác nhau trên tấm composite là kết quả của quá trình đúc tấm composite. Ở đây sử dụng công nghệ hút chân không để chế tạo composite: tại vị trí tâm điểm là đầu vào (inlet), còn viền ngoài của khuôn là đầu ra (outlet). Kết quả đo đạc cho thấy tồn tại sự không đồng đều tương đối nhỏ về vật liệu trong phạm vi hẹp gần điểm inlet. Đây là yếu tố cần phải tính đến khi chế tạo bầu sô na bằng vật liệu composite sử dụng công nghệ hút chân không.

4. KẾT LUẬN

Kết quả chính của nghiên cứu là lựa chọn vật liệu composite có độ suy hao âm thanh rất thấp trong dải tần (8 ÷ 12) kHz với độ dày nhất định (khoảng 1 cm), dùng để chế tạo bầu sô na cho

ứng dụng quân sự. Ngoài ra, công nghệ hút chân không cũng giúp tạo ra vật liệu có độ bền cơ tính tốt. Nhóm tác giả đã áp dụng kết quả nghiên cứu để chế tạo bầu sô na mẫu và tiến hành thử nghiệm, kết quả thu được đáp ứng yêu cầu với độ suy hao dưới 1 dB ở tất cả các góc hướng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В., "*Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы*", СПб.: Наука (2004), 410 с.

[2]. Тендеров Е. Л., "*О физических процессах, возникающих при прохождении звука через обтекатель гидроакустической антенны"*, Гидроакустика, Вып. 3 (2002), с. 1-23.

[3]. Cook J., "*The Ship-Sonar Interface*", Naval Eng. J., 1969. June, p. 67-74.

[4]. Егоров Н.Н., Яковлев Л.А., "*Колебания и волны*", ГЭТУ. СПб (1997), 111 с.

[5]. Бреховских Л.М., Годин О.А., "*Акустика слоистых сред*", М.: Наука (1989), 416 с.

[6]. Шендеров Е.Л., "*Волновые задачи гидроакустики*", Л.: Судостроение (1972), 353 с.

[7]. Lee J.H., Kim B.N., Shin K.K., Yoon S.W., "*Insertion loss of sound waves through composite acoustic window materials*", Current Applied Physics, 10 (2010), p 138-144.

[8]. Lee S.J, Yoon S.W., "*Acoustic characteristics of composite materials as acoustic window at oblique incidence of sound waves*", Current Applied Physics, 10 (2010), p 381-385.

ABSTRACT

STUDY OF HYDROACOUSTIC PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL FOR SONAR DOME

The paper presents the research results of insertion loss of underwater sound waves through a composite layer with a certain thickness in the (8 ÷ 12) kHz frequency band. A mathematical-physical model describing the problem was builded and analytical procedure was developed. A few special cases are analyzed and calculated to apply to the actual models. The experiments were conducted to measure the hydroacoustic properties of composite materials for sonar dome. The insertion loss of the composite layers is measured in the (8 ÷ 12) kHz frequency band for different conductions. The research results are applied in the calculation, design and manufacture of sonar domes.

Keywords: Hydroacoustics; Sonar dome; The insertion loss; Composite material.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: Viện Kỹ thuật Hải quân.
*Email: nvsovn@gmail.com.