

FRP 음향창의 음향성능 설계기법 연구

Acoustic Performance Study of FRP Acoustic Window

서 영 수† · 강 명 환* · 신 구 균** · 전 재 진**

Young-Soo Seo, Myeng-Whan Kang, Ku-Kyun Shin and Jae-Jin Jeon

(2011년 5월 27일 접수 ; 2011년 9월 20일 심사완료)

Key Words : Transmission Loss(투과손실), Acoustic Window(음향창), Sonar Dome(소나돔)

ABSTRACT

For developing acoustic window, transmission loss in accordance with incident angle was calculated and compared with measurement results. In design stage, the material choice of acoustic window is very important because the material is one of main parameters of transmission loss and structural strength. In order to analyze the effect of material properties on transmission loss, the parametric studies were carried out and the results were discussed in this paper. And, to verify the design specification of acoustic window, measurement was carried out and the results were compared and analyzed.

1. 서 론

수중에서 적, 또는 물체나 상대 음향 신호를 탐지하기 위해 사용되는 소나는 음향 에너지를 수중에 방사하거나 목표물로부터 전달되어오는 음향 신호를 수신, 분석하기 위하여 수많은 하이드로폰 어레이로 구성된 음향 센서부를 탑재 함정의 외부에 설치한다. 이 음향 센서부를 외부 유체유동에 의한 유체소음을 차단하고 외부 해양 환경과 함 운항에 의한 다양한 하중으로부터 음향 센서부를 보호하기 위하여 소나돔을 설치하게 된다.

소나돔 구조물 중에서 음향 에너지가 출입할 수 있는 부분을 음향창(acoustic window)이라 하며 이 음향창은 구조적 측면에서 충분한 강도 및 강성을

보유하여야할 뿐 아니라 음향적 측면에서는 최소한의 음향 에너지 투과손실을 갖는 형상 및 재질로 설계 및 제작되어야 한다. 즉, 음향 투과손실을 최소화하기 위해서는 음향창의 두께를 가능한 줄여야 하나 이는 구조적 안전성을 저해하는 요인으로 작용한다. 따라서 음향창의 음향특성을 나타내는 투과손실과 구조적 안전성은 음향창을 설계할 때 동시에 고려되어야할 요소이다. 이러한 음향특성과 구조특성은 음향창의 재질과 두께에 따라서 결정된다. 따라서 설계된 음향창과 동일한 재질 및 공법, 두께로 시편을 제작하고 이를 이용한 음향 투과손실 시험의 실시는 실제 음향창 제작에 앞서 진행되어야 할 필수적 단계이다.

설계단계에서 음향창의 음향특성은 음향창을 무한평판으로 가정하고 음향창 재질의 물성치와 두께를 이용하여 평면파에 대한 음향투과손실을 계산할 수 있다^(1,2). 정우진 등⁽³⁾은 특정 주파수 대역에서 1 dB이내의 음향투과손실 측정과 관련하여 시편 회전 에 따른 회절 영향, 시편 크기, 투과손실 레벨 산정 방법 및 다 파장 정현파를 이용한 측정 결과들에 대하여 분석하였다. 이지혜 등⁽⁴⁾은 소나돔에 적용되

† 교신저자; 정회원, 국방과학연구소
E-mail : sys@add.re.kr
Tel : (055)540-6343, Fax : (055)542-3737
* 국방과학연구소
* 정회원, 국방과학연구소

이 논문의 일부는 2011년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되어 우수논문으로 추천되었음.

는 음향창에 대한 삽입손실에 대하여 연구하였고 이소정 등⁽⁵⁾은 경사 입사하는 음파에 대한 음향창의 음향특성을 분석하였다. 그리고 Humphrey 등⁽⁶⁾은 파라메트릭 어레이(parametric array)를 음원으로 이용하여 평판의 투과계수를 측정하여 이론값과 비교 분석하였다.

이 논문에서는 음향창의 음향성능 설계를 위하여 음파의 입사 각도별 투과손실 예측을 위한 해석 기법을 정립하고 음향창 재질 요소가 투과손실에 미치는 영향을 해석하였다. 그리고 음향창 설계요구 사양을 검증하기 위해 평판 시편을 제작하고 투과손실 시험 후 해석 및 시험 결과를 비교 분석하였다.

2. 이 론

2.1 지배방정식

Skelton⁽²⁾은 다층구조를 각 층의 경계에서의 연속 조건을 이용하여 해석하는 방법을 제안하였다. Fig. 1은 일정한 크기의 두께를 가지고 xy 평면에서 무한한 크기를 갖는 M 개의 층으로 구성된 무한평판 구조물을 나타낸다. 그는 무한 영역의 탄성층과 유체층으로 구성된 다층구조에서 각 층의 상부와 하부의 경계면에서 직교좌표계의 세 방향에 대해 변위와 응력 또는 변위와 압력 연속조건을 이용하여 각 층에서 동강성행렬과 변위 및 힘의 관계식을 유도하였다.

(1) 유체층 모델

두께가 h 인 유체층 모델에 작용하는 스펙트럼 표면 응력, S_z 와 경계면에서의 변위, u_z 를 Fig. 2에 나타내었고, 유체층 내부의 음압(p)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p(\alpha, \beta, z) = A_1 \exp(j\gamma z) + A_2 \exp(-j\gamma z) \quad (1)$$

여기서, α , β , γ 는 각 방향의 파수이고 $\gamma = \sqrt{k^2 - \alpha^2 - \beta^2}$, $k = \omega/c$ 이다. 이때 c 는 음속, A_1 과 A_2 는 임의의 적분상수이다.

Fig. 2에 나타난 유체층 모델에서 경계조건에 대한 스펙트럼 압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial p(\alpha, \beta, z)}{\partial z} = \rho \omega^2 u_z(\alpha, \beta, z) \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체층의 밀도이다. 위쪽 경계 $z = h$ 와 아래쪽 경계 $z = 0$ 에서 위의 식들을 행렬 형태로 표현하면 스펙트럼 압력은 식(3)으로, 경계에 수직인 z 방향의 변위 $u_z(\alpha, \beta, z)$ 는 식(4)로 된다.

$$\begin{pmatrix} p(\alpha, \beta, h) \\ p(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(j\gamma h) & \exp(-j\gamma h) \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j\gamma / \rho \omega^2 \left(\exp(j\gamma h) & -\exp(-j\gamma h) \right) \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 적분상수 A_1 과 A_2 를 제거하면 다음의 관계가 구해진다.

$$-\left(\rho \omega^2 / \gamma \sin \gamma h \right) \begin{pmatrix} \cos \gamma h & -1 \\ 1 & -\cos \gamma h \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(\alpha, \beta, h) \\ p(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} \quad (5)$$

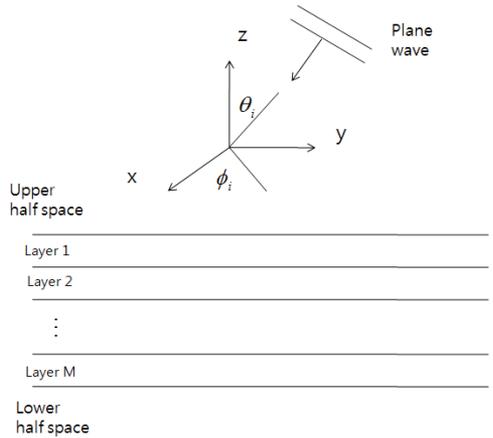


Fig. 1 Planar layered model

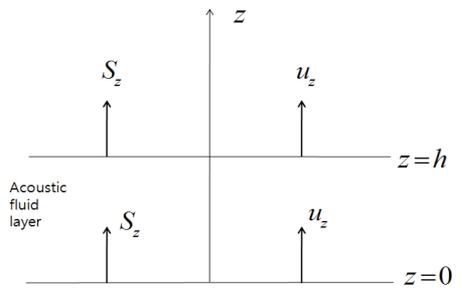


Fig. 2 Layer of acoustic fluid

스펙트럼 표면 응력, S_z 는 위쪽 경계와 아래쪽 경계에서 $S_z(\alpha, \beta, h) = -p(\alpha, \beta, h)$ 과 $S_z(\alpha, \beta, 0) = p(\alpha, \beta, 0)$ 가 된다. 이때 (+) 부호는 z 방향의 (+)방향으로 응력이 작용할 때이다. 이를 식 (5)에 적용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$[D(\alpha, \beta)] \begin{pmatrix} u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_z(\alpha, \beta, h) \\ S_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} \quad (6)$$

(2) 등방성 탄성체 모델

등방성 탄성체의 동강성행렬을 구하기 위하여 등방성 탄성층의 xz 단면을 Fig. 3에 나타내었다. 변위와 압력은 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)의 합성으로 표현이 가능하다.

$$\mathbf{u} = \nabla F + \nabla \times \mathbf{P} \quad (7)$$

$$\mathbf{P} = (0, 0, G) + \nabla \times (0, 0, -H) \quad (8)$$

여기서 F , G 그리고 H 는 유일하게 결정되는 스칼라 포텐셜이고 \mathbf{P} 는 임의의 벡터 포텐셜이다. 위의 조건을 만족하는 탄성체에서의 선형 변위 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 F + k_l^2 F = 0 \quad (9)$$

$$\nabla^2 G + k_s^2 G = 0 \quad (10)$$

$$\nabla^2 H + k_s^2 H = 0 \quad (11)$$

이때 $k_l = \omega/c_l$ 이고, $k_s = \omega/c_s$ 이다. 여기서 c_l 과 c_s 는 경계가 없는 매질에서 탄성층의 순수한 종파와 횡파의 속도이다. 위 방정식들의 푸리에 변환을 통한 일반해는 지수함수형태로 다음과 같이 표현된다.

$$F(\alpha, \beta, z) = A_1 \exp(j\gamma_l z) + A_2 \exp(-j\gamma_l z) \quad (12)$$

$$G(\alpha, \beta, z) = A_3 \exp(j\gamma_s z) + A_4 \exp(-j\gamma_s z) \quad (13)$$

$$H(\alpha, \beta, z) = A_5 \exp(j\gamma_s z) + A_6 \exp(-j\gamma_s z) \quad (14)$$

여기서 A_1 에서 A_6 까지는 적분상수이고, γ_l 과 γ_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_l = \sqrt{k_l^2 - \alpha^2 - \beta^2} \quad (15)$$

$$\gamma_s = \sqrt{k_s^2 - \alpha^2 - \beta^2} \quad (16)$$

식 (12)~(14)를 식 (9)~(11)에 대입하면 스펙트럼 변위를 식 (17)~(19)와 같이 구할 수 있다.

$$u_x(\alpha, \beta, z) = j\alpha A_1 \exp(j\gamma_l z) + j\alpha A_2 \exp(-j\gamma_l z) + j\beta A_3 \exp(j\gamma_s z) + j\beta A_4 \exp(-j\gamma_s z) + \alpha\gamma_s A_5 \exp(j\gamma_s z) - \alpha\gamma_s A_6 \exp(-j\gamma_s z) \quad (17)$$

$$u_y(\alpha, \beta, z) = j\beta A_1 \exp(j\gamma_l z) + i\beta A_2 \exp(-j\gamma_l z) - j\alpha A_3 \exp(j\gamma_s z) - i\alpha A_4 \exp(-j\gamma_s z) + \beta\gamma_s A_5 \exp(j\gamma_s z) - \beta\gamma_s A_6 \exp(-j\gamma_s z) \quad (18)$$

$$u_z(\alpha, \beta, z) = j\gamma_l A_1 \exp(j\gamma_l z) - j\gamma_l A_2 \exp(-j\gamma_l z) - \alpha^2 A_3 \exp(j\gamma_s z) - \alpha^2 A_4 \exp(-j\gamma_s z) - \beta^2 A_5 \exp(j\gamma_s z) - \beta^2 A_6 \exp(-j\gamma_s z) \quad (19)$$

직교 좌표계에서 힘과 변위의 방정식을 이용하여 탄성층에서의 응력을 구하고 탄성층의 아래 경계와 위 경계에서의 연속조건을 이용하여 미지수 행렬에 대해 정리하면 다음과 같은 강성행렬, 변위행렬 그리고 힘 행렬로 표현되는 관계식을 구할 수 있다.

$$[D(\alpha, \beta)] \begin{pmatrix} u_x(\alpha, \beta, h) \\ u_y(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_x(\alpha, \beta, 0) \\ u_y(\alpha, \beta, 0) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x(\alpha, \beta, h) \\ S_y(\alpha, \beta, h) \\ S_z(\alpha, \beta, h) \\ S_x(\alpha, \beta, 0) \\ S_y(\alpha, \beta, 0) \\ S_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} \quad (20)$$

만일 M 개의 유체층과 탄성층으로 구성된 다층구조물은 각층에서 유도된 식을 조합하면 식 (21)과 같은 지배방정식을 만들 수 있게 된다.

$$[Z(\alpha, \beta)] \{u(\alpha, \beta)\} = \{E(\alpha, \beta)\} \quad (21)$$

이때 $[Z(\alpha, \beta)]$ 는 $3(M+1) \times 3(M+1)$ 행렬이고, $\{E(\alpha, \beta)\}$ 는 $3(M+1)$ 크기의 가진력 벡터 그리고

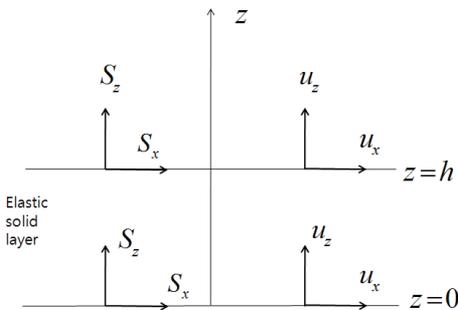


Fig. 3 Layer of elastic solid

$\{u(\alpha, \beta)\}$ 는 $(M+1)$ 경계면의 변위이다. 가진력 벡터 및 경계면의 변위는 아래와 같다.

$$\{E(\alpha, \beta)\} = [S_{x1}, S_{y1}, S_{z1}, \dots, S_{x(M+1)}, S_{y(M+1)}, S_{z(M+1)}]^T \quad (22)$$

$$\{u(\alpha, \beta)\} = [u_{x1}, u_{y1}, u_{z1}, \dots, u_{x(M+1)}, u_{y(M+1)}, u_{z(M+1)}]^T \quad (23)$$

(3) 외부 평면파 가진 및 투과계수

Fig. 1에서와 같이 평면파가 외부에서 다층구조로 임의의 크기, A 와 각, (θ_i, ϕ_i) 으로 입사될 때 입사파의 음압(p_i)와 반사파의 음압(p_r)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$p_i(x, y, z) = A \exp(-j\alpha_i x - j\beta_i y - j\gamma_i z) \quad (24)$$

$$p_r(x, y, z) = A \exp(-j\alpha_i x - j\beta_i y + j\gamma_i z) \quad (25)$$

여기서, $\alpha_i = k_t \sin\theta_i \cos\phi_i$, $\beta_i = k_t \sin\theta_i \sin\phi_i$, $\gamma_i = k_t \cos\theta_i$, $k_t = \omega/c_t$, c_t 는 다층 구조물 상부 무한영역 매질의 음속이다. 음향창의 음향성능을 나타내는 복소 투과 계수, $T(\theta_i, \phi_i)$ 는 다층 구조물의 상부와 하부의 경계조건을 적용하여 정리하면 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{-\rho_b \omega^2 U_b(-\alpha_i, -\beta_i)}{jA \sqrt{(k_b^2 - k_t^2 \sin^2 \theta_i)}} \quad (26)$$

이때, ρ_b 는 다층구조 모델 하부의 반 무한영역의 유체 밀도, $U_b(-\alpha_i, -\beta_i)$ 는 다층 구조물의 맨 아래 경계에서의 변위이다. 변위 U_b 는 식 (21)을 이용하여 구할 수 있으며 가진력은 입사파와 반사파의 합으로 평면파가 입사되는 맨 위 경계면에 작용하며 식 (22)의 가진력 벡터는 다음 식과 같다.

$$\{E(\alpha, \beta)\} = [0, 0, -2A, \dots, 0, 0, 0]^T \quad (27)$$

평면파가 경계면을 투과될 때 투과각, θ_t 는 Snell의 법칙을 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$k_t \sin\theta_i = k_b \sin\theta_t \quad (28)$$

$$\theta_t = \tan^{-1}(k_t \sin\theta_i / \sqrt{(k_b^2 - k_t^2 \sin^2 \theta_i)}) \quad (29)$$

특히, Snell의 법칙에 의해 $c_t > c_b$ 일 경우 음파가 항상 투과되지만 $c_b > c_t$ 일 경우, 입사각 $\theta_i = \sin^{-1}(c_t/c_b)$ 에 대하여 음파가 투과되지 않는 임계각이 발생한다. 여기서, c_t 은 음파가 입사하는 영역의 음속이고 c_b 는 음파가 투과하는 영역의 음속이다.

3. 재질 요소가 투과손실에 미치는 영향 분석

재질 요소가 투과손실에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 1에 나타낸 음향창 평판시편에 대한 파라메트릭 해석을 수행하였다. 음향창의 설계 사양은 소나의 운용주파수 및 탐지각 범위에서 1 dB 이하의 음향 투과손실 값과 음탐기의 운용환경에서 구조 안전성이다. 따라서 음향성능과 구조성능에 영향을 미치는 요소로 두께, 밀도, 탄성계수, 푸아송비를 선정하였다. 요소의 변동량은 각 요소의 변화 특징에 따라 해석을 수행하여 Figs. 4~7에 나타내었다.

Fig. 4는 F1 주파수에서 음향창의 두께 변화에 대한 투과손실 변화값을 나타낸다. 두께가 증가할수록 일정한 값을 가지고 투과손실값이 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 입사각이 증가할수록 투과손실 증가값이 작아지는 것을 알 수 있었으며 약 25° 근처에서 아주 작지만 임계각에 의한 투과손실 증가가 생기는 것을 알 수 있다. Table 1에서 제시된 값을 이용하여 음향창으로 입사하는 음파의 임계각을 계산하면 다음과 같다.

$$\theta_i = \sin^{-1}(c_t/c_b) = \sin^{-1}(1500/3626) = 24.4^\circ \quad (30)$$

여기서, 음향창 내부 종파의 음속은 약 3626 m/s이고 투과된 물속의 음속은 1500 m/s이다. 음향창의 밀도 변화에 대한 투과손실 변화값을 Fig. 5에 나타

Table 1 Spec. of acoustic window

Material		Glass fiber pre-preg epoxy resin
Thickness		20 mm
Mechanical properties	Tensile modulus	24.9 GPa
	Density	1900 kg/m ³
	Poisson's ratio	0.04

내었다. 밀도 변화는 두께 변화와 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 6과 7은 탄성계수 및 푸아송비의 변화에 따른 투과손실 값을 나타내었다. 두 경우 모두 투과손실 값이 앞의 두 경우와 같이 5%씩 변화할 경우는 투과손실에서 크게 차이가 없어 0.1배에서 10배에 해당하는 값을 이용하여 해석을 수행하였다. 탄성계수의 경우 값이 작아지면 투과손실이 작아져 음향 성능이 좋아지지만 강성이 떨어져서 구조적인 문제점이 발생할 가능성이 있다. 푸아송비의 경우 현재의 값보다 작을 경우는 투과손실에 큰 차이가 없었

으며 증가할 경우 그림과 같이 큰 변화를 보였다. 특히 5배와 10배에 해당하는 값을 적용하였을 경우, 임계각에 의한 영향이 크게 나타났으며 푸아송비가 증가함에 따라 임계각의 크기가 감소하고 동시에 투과손실이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 해석 결과, Table 1에 제시된 음향창의 요구사양에서 10% 증가해도 투과손실이 1 dB 이내로써 음향적인 측면에서는 허용이 가능할 것으로 생각된다. 탄성계수의 경우, 10배 줄어든다면 아주 우수한 투과손실 값을 가지는 음향창을 만들 수 있으나 구조 안전성 측면에서 검토한 후 제작을 고려해야 할 것이다.

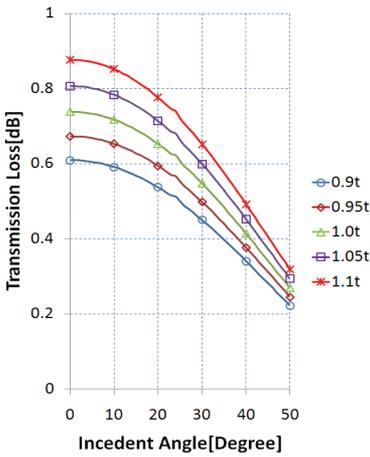


Fig. 4 Comparison of the transmission loss according to thickness

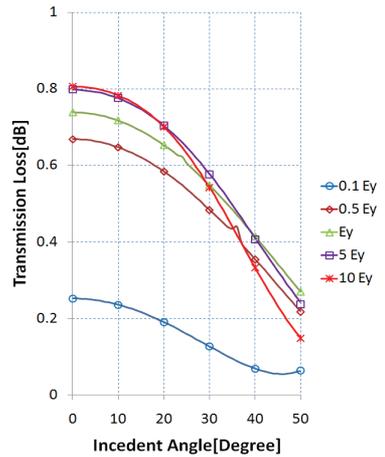


Fig. 6 Comparison of the transmission loss according to Young's modulus

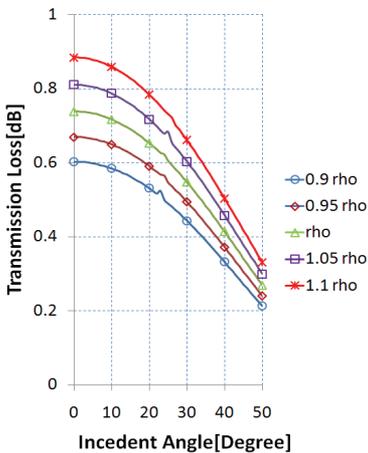


Fig. 5 Comparison of the transmission loss according to density

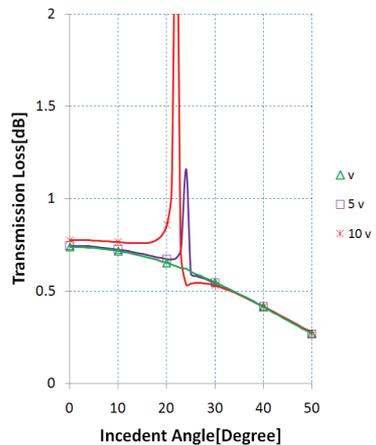


Fig. 7 Comparison of the transmission loss according to Poisson's ratio

그리고 푸아송비가 증가할 경우 임계각에 의한 투과손실값이 커짐을 알 수 있었다. 이 논문에서는 음향창의 구조성능과 음향성능을 고려하여 음향창의 두께를 20 mm로 선정하고 음향창의 투과손실을 시험하고 해석 결과와 비교하였다.

4. 시험

음향창의 음향성능을 설계하기 위한 해석 방법을 검증하기 위하여 평판 시편에 대하여 시험을 수행하였다. 이 시험의 대상이 되는 평판 시편의 적용 소재는 Table 1과 같다. 음향 투과손실 측정에 사용된 시편은 2,000 mm×2,000 mm×20 mm(가로×세로×두께) 크기의 평판으로 제작되었다.

4.1 시험절차

(1) 시험 전 확인 사항

트랜스듀서와 하이드로폰 사이의 거리 및 벽면에서의 거리 그리고 출력신호의 펄스 길이, 파장을 조절하여 수면이나 벽면의 반사파로 인한 영향이 없도록 위치를 결정하였다. 시험장치의 구성은 Fig. 8과 같다.

(2) 기준 음압 수준 측정 시험

음향 시편이 설치되지 않은 상태에서 측정 주파수의 1파장 및 3파장 신호를 표준 트랜스듀서를 통하여 각각 방사하고 하이드로폰으로 기준 음압 수준을 측정하였다.

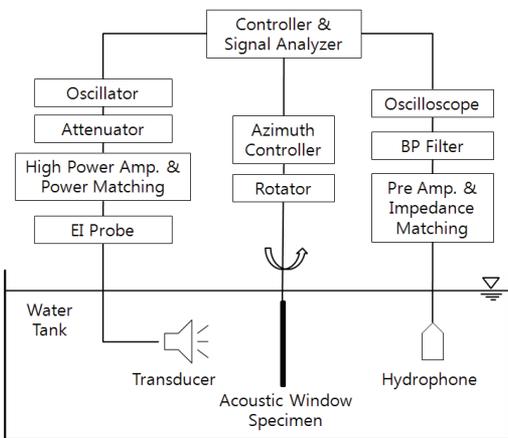


Fig. 8 Measurement setup

(3) 시편투과 음압 수준 측정 시험

트랜스듀서와 시편의 수직거리는 4.35 m로 하고 시편과 하이드로폰의 거리가 회절 효과 방지를 고려하여 0.1 m가 되도록 배치한다. 초기에 트랜스듀서의 방사방향과 시편의 평면이 수직이 되도록 위치시키고 음압 수준을 측정한다. Rotator를 이용하여 음향시편이 0°~50°가 되도록 5° 간격으로 회전시키며 각 각도로 시험하였다.

4.2 시험 및 결과

획득된 시험 데이터의 분석은 참고문헌⁽³⁾을 참조하여 3파장 신호에 대하여 계측하여 분석을 실시하였다. 평판 시편에 대하여 계측된 결과와 다층 무한 평판의 투과손실 해석기법을 적용하여 수치 해석한 결과와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 F1~F4는 시험 주파수이고 M은 측정 결과, A는 해석한 결과를 의미한다. 주파수는 F1<F2<F3<F4의 순서이다. F1 주파수와 F2 주파수에서는 입사각에 따라 1 dB 이내의 투과손실값을 가지는 것을 시험과 해석 결과를 통해서 확인할 수 있다. 시험과 해석 모두 주파수가 증가함에 따라 투과손실이 증가함을 알 수 있고 각 주파수에 대한 입사각의 증가에 대해서는 투과손실이 감소함을 확인할 수 있다. 시험의 경우 25°를 전후로 하여 투과손실이 증가하는데 이는 앞서 언급한 임계각에 의한 영향으로 생각

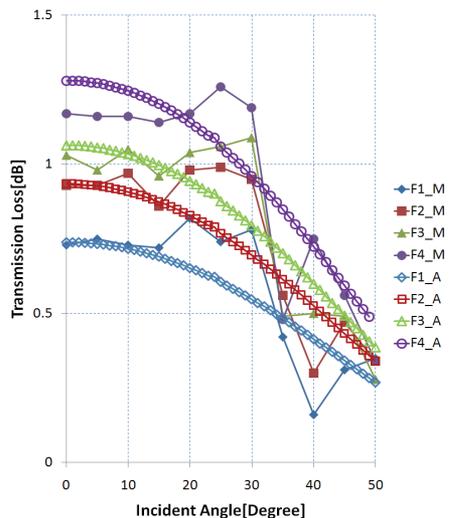


Fig. 9 Comparison of transmission loss : measurement and analysis results

된다. 그러나 해석상에서는 거의 나타나지 않았다. 또한, 입사각 40° 이후로 투과손실이 증가하는 원인은 현재로는 명확하지 않으나 시험상의 오차 및 입사각의 증가에 따른 회절음의 증가에 의한 영향 등으로 추정된다. 해석 결과는 시험 결과의 경향 및 투과손실값을 잘 따르고 있으며 신뢰할 수 있는 해석 결과 및 시험값을 얻을 수 있었다.

5. 결 론

이 논문에서는 음향창의 투과손실에 대해 살펴보았다. 먼저, 음향창의 투과손실을 계산하기 위하여 음향창을 무한평판이라고 가정하고 유체층과 탄성층으로 구성된 동강성 행렬을 구성하였다. 음향창의 설계 사양인 음향 투과손실 1 dB를 만족하는 음향창을 제작하기 위하여 음향창의 요구 물성치를 기준으로 해석을 수행하였다. 먼저 음향 투과손실에 영향을 미치는 요소로 두께, 밀도, 탄성계수 그리고 프와송 비로 선정하고 각 요소의 변화에 따른 투과손실의 변화를 해석하였다. 해석 결과, 음향창의 요구 물성치로 제시된 값의 10% 변화에 대해서는 음향창 설계사양을 만족할 만한 수준의 음향 투과손실 값을 얻을 수 있었다. 이는 복합재 재질로 만들어지는 음향창의 제작공장 상 발생할 수 있는 오차 범위 내로 판단되며 10% 정도의 물성 변화에 대해서는 설계 사양을 만족할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 두께와 밀도의 변화에 대해서는 투과손실이 민감하게 변화하였으나 탄성계수와 프와송비에 대해서는 투과손실의 변화가 크지 않았다. 그러나 프와송비의 경우 임계각 및 임계각에 따른 음향 투과손실 증가에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

수치해석 결과 및 음향창 설계요구 사양을 검증하기 위하여 음향창 평판 시편을 제작하여 투과손

실 시험을 수행하였다. 시험 및 이론 해석 결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 검증할 수 있었으며 시험에서 나타난 일정한 각도에서의 음향 투과손실 증가가 임계각에 의한 영향임을 알 수 있었고 이는 재료의 프와송비에 따라 임계각 및 투과손실이 변화하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Brekhovskikh, L. M., 1980, *Waves in Layered Media*, Academic Press, London.

(2) Skelton, E. A. and James, J. H., 1997, *Theoretical Acoustics of Underwater Structures*, Imperial College Press.

(3) Jung, W. J., Han, S. J., Kim, W. H., Shin, K. K. and Jeon, J. J., 2006, A Study on the Measurement and Analysis Method for the Acoustic Transmission Loss of the Material for the Acoustic Window of Sonar Dome, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 729~738.

(4) Lee, J. H., Kim, B. N., Shin, K. K. and Yoon, S. W., 2010, Insertion Loss of Sound Waves Through Composite Acoustic Window Materials, *Current Applied Physics*, Vol. 10, No. 1, pp. 138~144.

(5) Lee, S. J. and Yoon, S. W., 2010, Acoustic Characteristics of Composite Materials as Acoustic Window at Oblique Incident of Sound Waves, *Current Applied Physics*, Vol. 10, No. 2, pp. 381~385.

(6) Humphrey, V. F. and Berklay, H. O., 1985, The Transmission Coefficient of a Panel Measured with a Parametric Source, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 101, No. 1, pp. 85~106.