

# FRP 음향창의 음향성능 설계기법 연구

## Acoustic performance study of FRP acoustic window

강명환\* · 서영수\* · 신구균† · 전재진\*

Myengwhan Kang, Youngsoo Seo, Ku-kyun Shin and Jaejin Jeon

**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 parameter 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.

### 1. 서 론

수중에서 적, 또는 물체나 상대 음향신호를 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 유체 유동에 의한 유체 소음을 차단하고 외부 해양 환경과 함 운항에 의한 다양한 하중으로부터 음향 센서부를 보호하기 위하여 소나돔을 설치하게 된다. 소나돔 구조물 중에서 음향 에너지가 입출입할 수 있는 부분을 음향창(acoustic window)이라 하며 이 음향창은 구조적 측면에서 충분한 강도 및 강성을 보유하여야 할 뿐 아니라 음향적 측면에서는 최소한의 음향 에너지 투과 손실을 갖는 형상 및 재질로 설계 및 제작되어야 한다. 즉, 음향 투과손실을 최소화하기 위해서는 음향창의 두께를 가능한 줄여야 하나 이는 구조적 안전성을 저해하는 요인으로 작용한다. 음향창의 음향특

성을 나타내는 투과손실과 구조적 안전성은 음향창의 설계할 때 동시에 고려되어야 할 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.

음향창의 음향특성은 설계단계에서 무한평판으로 가정하여 설계된 재질의 물성치와 두께를 이용하여 평면파에 대한 음향투과손실을 계산하여 음향창의 성능을 구할 수 있다.<sup>(1), (2)</sup> 정우진 등<sup>(3)</sup>은 특정 주파수 대역에서 1dB이내의 음향투과손실 측정과 관련하여 시편 회전에 따른 회절 영향, 시편 크기, 투과손실 레벨 산정방법 및 다 파장 정현파를 이용한 측정결과들에 대하여 분석하였다. 이지혜 등<sup>(4)</sup>은 소나돔에 적용되는 음향창에 대한 삽입손실에 대하여 연구하였고 이소정 등<sup>(5)</sup>은 경사 입사하는 음파에 대한 음향창의 음향특성을 분석하였다. 그리고 Hump-hrey<sup>(6)</sup>는 파라메트릭 어레이(parametric array)를 음원으로 이용하여 평판의 투과계수를 측정하여 이론값과 비교 분석하였다.

본 논문에서는 음향창의 음향성능 설계를 위하여 음파의 입사 각도별 투과 손실 예측을 위한 해석 기법을 정립하고 시편 시험 결과와 비교하여 타당성을

† 교신저자; 정회원, 국방과학연구소

E-mail : ooo@add.re.kr

Tel : 055-540-6333, Fax : 055-542-3737

\* 국방과학연구소

확인하였고 해석된 결과를 이용하여 음향장 재질 요소가 투과 손실에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 이론

### 2.1 지배방정식

Skelton은 다층구조를 각 층의 경계에서의 연속조건을 이용하여 해석하는 방법을 제안하였다. 그는 그림 1에서와 같이 다층으로 구성된 탄성층과 유체층 모두 상, 하의 경계면에서 직교좌표계의 세 방향에 대해 변위와 응력 또는 변위와 압력의 연속조건을 만족시키는 행렬을 유도할 수 있고 이 관계를 이용하여 각 층에서 강성행렬과 변위와 힘으로 표현되는 관계식을 유도하였다. 이 행렬의 조합으로 다층구조에 대한 지배방정식을 유도할 수 있다.

#### (1) 유체층 모델

유체층에서의 음압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,  $\gamma = \sqrt{k^2 - \alpha^2 - \beta^2}$  이고,  $k = \omega/c$ 이다. 이때  $c$ 는 음속,  $p(\alpha, \beta, z)$ 는 스펙트럼 압력,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 임의의 적분상수이다.

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

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

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.

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

$$\begin{pmatrix} u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} =$$

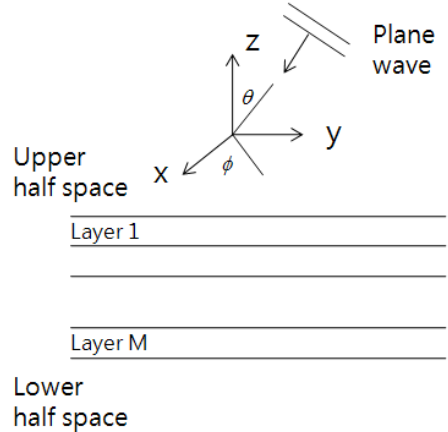


Fig. 1 Planar layered media model

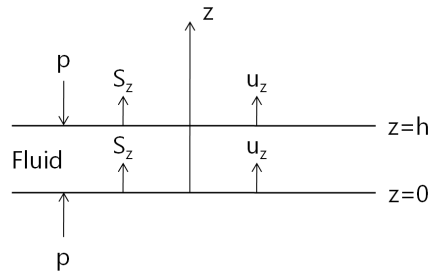


Fig. 2 Layer of acoustic fluid

$$(i\gamma/\rho\omega^2) \begin{pmatrix} \exp(i\gamma h) & -\exp(-i\gamma h) \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 유체층의 밀도이고,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 임의의 적분상수이다. 식 (3)과 식 (4)에서 적분상수  $A_1$ 과  $A_2$ 를 제거하면 다음의 관계가 구해진다.

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

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 적용

하면 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 탄성체 모델에 대한 개념을 그림 3에 나타내었다. 변위와 압력은 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)의 합성으로 표현이 가능하다.

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

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

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 순수한 종파와 횡파의 속도이다. 위 방정식들의 푸리에 변환을 통한 일반해는 지수함수형태로 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

여기서  $A_1$ 에서  $A_6$ 까지는 적분상수이고,  $\gamma_l$ 과  $\gamma_s$ 는 다음과 같이 표현된다.

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

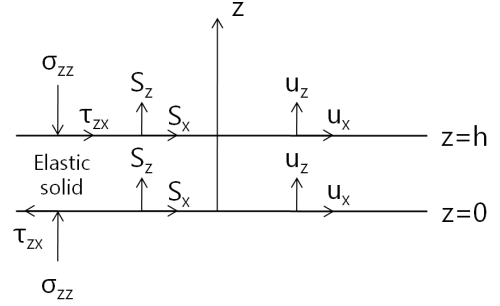


Fig. 3 Cross-section of layer of elastic solid

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

위의 식들을 식 (9) ~ 식 (11)에 대입하면 스펙트럼 변위를 구할 수 있다.

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

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

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

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.

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

유체층과 탄성체층으로 구성된 다층구조물은 각 층에서 유도된 식을 조합하면 지배 방정식을 만들 수 있게 된다.

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

### (3) 외부 평면파 가진 및 투과계수

그림 1에서와 같이 평면파가  $(\theta_i, \phi_i)$ 에서 입사될 때 입사파의 음압은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$p_i(x, y, z) = A \exp(-i\alpha_i x - i\beta_i y - i\gamma_i z) \quad (22)$$

여기서,  $\alpha_i = k_i \sin\theta_i \cos\phi_i$ ,  $\beta_i = k_i \sin\theta_i \sin\phi_i$ ,  $\gamma_i = k_i \cos\theta_i$ ,  $k_i = \omega/c_i$ ,  $c_i$ 는 다층 구조물 상부의 음속이다.

식 (22)를 이용하여 다층 구조물의 상부와 하부의 연속 조건을 적용하여 복소 투과 계수,  $T(\theta_i, \phi_i)$ 를 구할 수 있다.

$$T = \frac{-\rho_b \omega^2 U_b(-\alpha_i, -\beta_i)}{iA \sqrt{(k_b^2 - k_i^2 \sin^2 \theta_i)}} \quad (23)$$

이때  $U_i(-\alpha_i, -\beta_i)$ 와  $U_b(-\alpha_i, -\beta_i)$ 는 적층 모델의 맨 위와 아래 경계에서의 변위이다.

## 3. 재질 요소가 투과 손실에 미치는 영향 분석

무한 평판 모델에 대한 표 1에 나타난 음향장 평판시편에 대한 파라메트릭 해석을 수행하였다. 음향장의 설계 사양은 소나의 운용주파수 및 탐지각 범위에서 1dB 이하의 음향투과손실 값과 음탐기의 운용환경에서 구조 안전성이다. 따라서 음향성능과 구조성능에 영향을 미치는 파라미터인 두께, 밀도, 탄성계수, 프와송비를 FRP의 제작을 고려하여 -10%에서 10%까지 5%간격으로 변화시켜 음향투과손실 값을 계산하였다.

그림 4는 F1 주파수에서 음향장의 두께 변화에 대한 투과손실 변화값을 나타내었다. 두께가 증가할수록 일정한 값을 가지고 투과손실 값이 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 입사각이 증가할수록 투과

**Table 1** Spec. of acoustic window

구분	내용	
재질	Glass Fiber Pre-preg Epoxy Resin	
두께	20mm	
기계적 물성치	Tensile Modulus	24.9 GPa
	Density	1900 kg/m <sup>3</sup>
	Poisson's Ratio	0.04

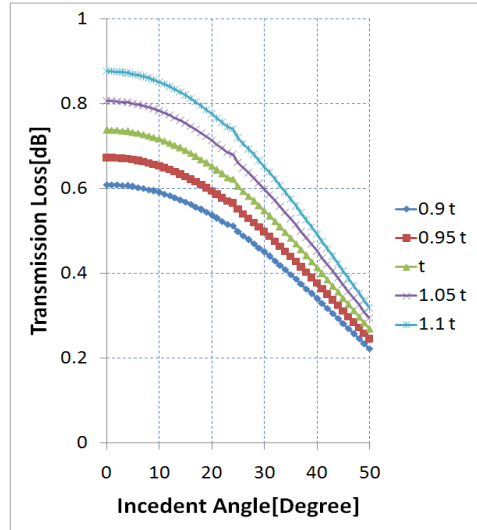


Fig. 4 Comparison of the transmission loss according to thickness

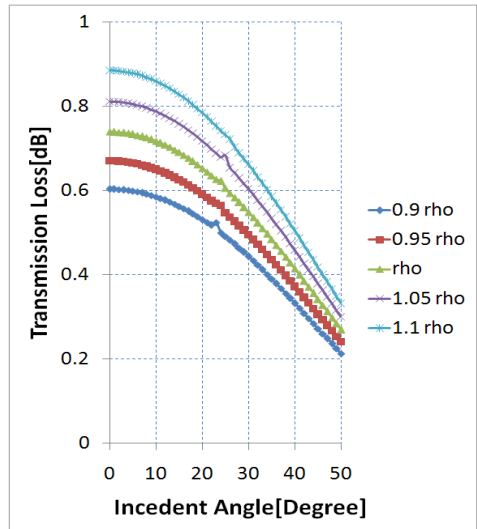


Fig. 5 Comparison of the transmission loss according to density

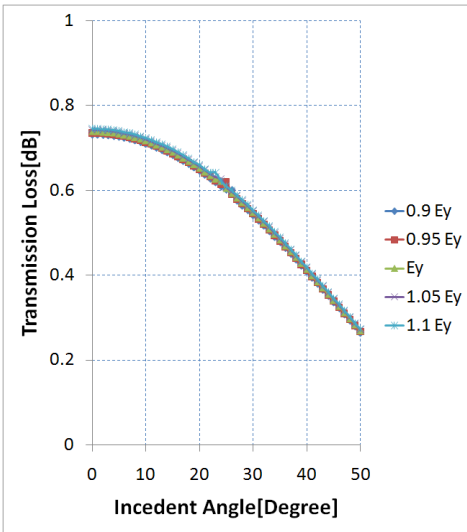


Fig. 6 Comparison of the transmission loss according to Young's modulus

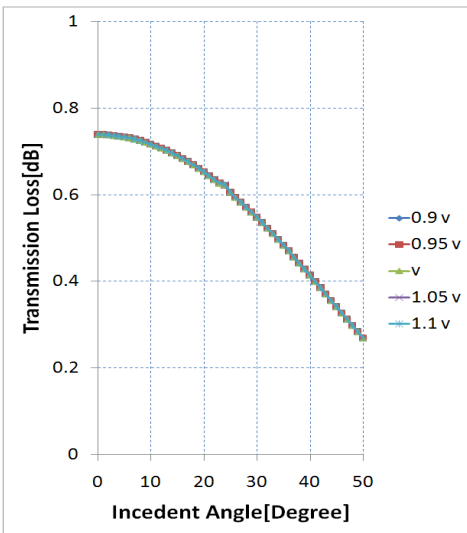


Fig. 7 Comparison of the transmission loss according to Poisson's ratio

손실 증가값이 작아지는 것을 알 수 있었다. 음향장의 밀도 변화에 대한 투과손실 변화값을 그림 5에 나타내었다. 밀도 변화는 두께 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 그림 6과 7은 탄성계수 및 프와송비의 변화에 따른 투과손실 값은 나타내었다. 두 경우 모두 투과손실 값이 앞의 두 경우, 두께 및 밀도 변화에 비하여 변화 폭이 작음을 알 수 있었다. 따라서 음향장의 투과손실은 밀도 및 두께에 지배적인

영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 음향장의 구조성능과 투과손실을 고려하여 음향장의 두께를 20mm로 선정하고 음향장의 투과손실을 시험하고 해석결과와 비교하였다.

## 4. 시험

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

### 4.1 시험절차

#### (1) 시험 전 확인 사항

트랜스듀서와 하이드로폰 상이의 거리 및 벽면에서의 거리 그리고 출력신호의 펄스 길이, 파장을 조절하여 수면이나 벽면의 반사파로 인한 영향이 없도록 위치를 결정하였다.

#### (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.

#### (3) 시편투과 음압 수준 측정 시험

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

### 4.2 시험 및 결과

획득된 시험 데이터의 분석은 참고문헌<sup>(3)</sup>을 참조하여 3파장 신호에 대하여 계측하여 분석을 실시하였다. 평판 시편에 대하여 계측된 결과와 다층 무한 평판의 투과손실 해석기법을 적용하여 수치 해석한 결과와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림에서

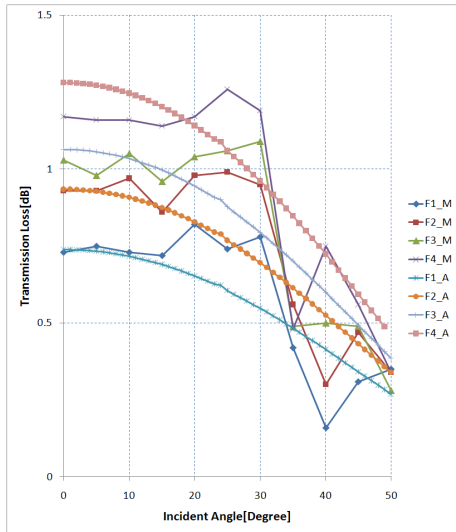


Fig. 8 Comparison of transmission loss : measured and analysis results

F1~F4는 시험 주파수이고 M은 측정결과, A는 해석한 결과를 의미한다. 주파수는  $F1 < F2 < F3 < F4$ 의 순서이다. F1 주파수와 F2 주파수에서는 입사각에 따라 1dB 이내의 투과손실 값을 가지는 것을 시험과 해석결과를 통해서 확인할 수 있다.

그리고 시험과 해석 모두 주파수가 증가함에 따라 투과손실이 증가함을 알 수 있고 각 주파수에 대한 입사각의 증가에 대해서는 투과손실이 감소함을 확인할 수 있다. 해석결과는 시험결과와 경향 및 투과손실 값을 잘 따르고 있으며 신뢰할 수 있는 해석결과 및 시험 값을 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 음향창의 투과손실에 대해 살펴보았다. 먼저, 음향창의 투과손실을 계산하기 위하여 음향창을 무한평판이라고 가정하고 유체층과 탄성층으로 구성된 동강성 행렬을 구성하고 해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 검증하기 위하여 음향창 평판 시편을 제작하여 투과손실 시험을 수행 후 이론 해석결과와 비교하여 해석모델의 타당성을 확인하였다. 시험과 해석결과를 바탕으로 음향창의 음향투과손실을 설계하기 위한 설계기법을 연구하였다. 먼저 음향투과손실 해석에 사용된 파라미터인 두께, 밀도, 탄성계수 그리고 프와송 비를 -10%에서 10%까지

5% 간격으로 변화시켜 투과손실을 계산하였다.

해석결과, 두께와 밀도의 변화에 대해서는 투과손실이 민감하게 변화하였으나 탄성계수와 프와송 비에 대해서는 투과손실의 변화가 크지 않았다. 따라서 음향창의 투과손실을 설계할 때에는 두께와 밀도가 주요한 설계 요소임을 알 수 있었다.

## 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.