

함정의 해수 배관소음 저감을 위한 흡음형 소음기 연구

A Study on the Absorptive Silencer for Reducing Noise Propagation in Seawater Pipes on Ship

서 영 수* · 박 경 훈* · 전 재 진*

Youngsoo Seo, Kyenghoon Park and Jaejin Jeon

(Received June 19, 2013 ; Revised July 18, 2013 ; Accepted July 25, 2013)

Key Words : Absorptive Silencer(흡음형 소음기), Seawater Pipe(해수배관), Transmission Loss(투과손실)

ABSTRACT

Fluid-borne noise produced by seawater circulating pumps propagates through the seawater connected pipes and radiates from the hull opening of a ship. This noise causes the increases of underwater radiated noise and self noise of ship. To reduce the noise propagation through the seawater connected pipes, absorptive silencer must be needed. In this paper, theoretical model to analyze the transmission loss of absorptive silencer was presented and the design parameters of absorptive silencer were verified. Theoretical calculations were performed according to a thickness, a length, an internal pressure and mechanical properties of its absorptive material in order to analyze the characteristics of absorptive silencer. From the theoretical calculation results, the absorptive silencer was manufactured and transmission loss was measured in the test facilities. The results of theory and measurement are compared and discussed.

1. 서 론

함정 내부에서 발생하여 외부로 전파되는 소음은 적에게 함정의 위치를 노출시키므로 매우 중요한 문제이다. 이러한 함정의 소음을 감소시키기 위하여 오래전부터 많은 연구가 진행되었다. 대표적인 소음원으로 함정 내부의 기계류가 있다. 기계류는 냉각을 위하여 함정 외부의 해수가 사용된다. 해수를 냉각수로 공급하기 위하여 펌프가 작동되고 발생한 진동과 소음이 펌프에 연결된 배관 구조와 배관 내부의 유체를 따라 소음이 전파하게 된다. 선체에 부착된 배관 구조에 따라 전파되는 진동은 마운트 등의

저감 장치를 이용하여 저감한다. 그러나 배관 내부의 해수를 따라 외부로 전파되는 소음은 직접 외부의 해수와 접촉하게 되어 수중방사소음에 큰 영향을 준다. 따라서 배관 내부의 유체를 따라 전파되는 소음을 줄이기 위하여 소음기가 반드시 필요하며 소음기의 성능은 음향투과손실로 나타낸다.

일반적으로 사용되는 단순확장형, 간섭형 및 천공형 소음기 등은 내부유체가 해수일 경우 그 사용에 제한이 있다. 소음기 내부로 해수가 흐르기 때문에 소음기 내부의 지름이 변할 경우 2차적인 소음이 발생할 수 있으므로 직경이 변하는 소음기의 사용이 제한된다. 또한 공기에 비해서 해수는 음의 파장이 5배정도 길어서 공기중에서의 성능과 유사한 성능을

† Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development
E-mail : sys@add.re.kr
Tel : +82-55-540-6419, Fax : +82-55-542-3737
* Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

발휘하기 위해서는 5배정도의 큰 소음기가 필요하다. 그러나 함정 내부의 협소한 공간에서는 그 사용이 제한적이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 흡음형 소음기가 필수적으로 사용된다.

Cumming⁽¹⁾은 수치적으로 구한 모드별 전파 상수와 모드매칭방법을 이용하여 유한한 길이의 흡음형 소음기의 전달 손실을 구하였다. Peat⁽²⁾는 4단자 정수를 이용하여 유한한 길이의 원형소음기의 전달손실을 구하였는데 전파상수 및 임피던스의 경계식을 저주파 근사식을 사용하였고 이에 따라 덕트 내의 평면파 영역으로 한정하였다. Kirby⁽³⁾는 Peat에 비해 좀 더 많은 항의 근사식을 사용하여 전달 손실의 정확도를 높였다. 김회전⁽⁴⁾은 2차원 사각 덕트에 대해서 저주파 근사식을 사용하여 덕트 내 전파 상수를 구하고 모드매칭기법 및 경계요소법을 이용하여 흡음형 소음기의 전달 손실을 구하였다. 김재영⁽⁵⁾은 송풍기에서 발생하는 소음을 감소시키기 위하여 3차원 경계요소법을 이용하여 흡음형 소음기를 설계 및 제작하여 그 결과를 제시하였다. Kohmann⁽⁶⁾은 흡이 있는 고무를 사용한 소음기를 제안하고 실험을 통하여 그 성능을 제시하였다. 박경훈⁽⁷⁾은 해수연결 배관계를 모사한 시험장치를 구현하고 단순확장형 및 공명형 소음감소기에 대한 투과손실을 측정하여 이론값과 비교하였다.

이 연구에서는 함정의 광대역 해수배관소음을 저감하기 위하여 사용되는 흡음형 소음기를 설계하기 위하여 필요한 소음기 내부 흡음재의 재질 및 두께, 길이에 따른 음향투과손실을 이론적으로 구하였다. 소음기 내부의 흡음재를 해수와 임피던스가 유사한 폴리우레탄을 적용한 흡음형 소음기를 제안하였다. 흡음형 소음기의 전달손실을 측정할 수 있는 시험장치를 구성하고 이론값 및 측정결과를 비교분석하였다.

2. 본 론

2.1 흡음형 소음기의 음향투과손실 이론

Fig. 1은 단순한 형태의 흡음형 소음기의 단면을 나타낸다. 소음기 외부는 흡음재료에 비해서 단단한 절로 고정되어 있어 반지름방향으로 변형이 없고 내부 압력은 길이에 따라서 일정하게 분포하여 길이 방향의 변형을 무시할 만큼 작다고 가정한다. 내부

의 압력(p_i)이 작용할 때 안지름의 변화는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{1}$$

여기서 σ_r 은 반지름방향 응력, σ_θ 는 원주방향 응력 그리고 r 은 중심에서의 거리이다. 반지름 및 원주방향 응력은 응력과 변형률의 관계로부터 다음과 같은 2차 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \tag{2}$$

여기서 u 는 반지름방향 변위이다. 식 (2)의 해는 다음과 같다.

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} \tag{3}$$

여기서 C_1 과 C_2 는 임의의 상수이다. 임의의 상수 C_1 과 C_2 는 경계조건, $u(r=b)=0$ 과 $\sigma_r(r=a) = -p_i$ 를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_1 = \frac{1-\nu^2}{E_R(1+j\eta)} \frac{-p_i}{(1+\nu) + (1-\nu) \frac{b^2}{a^2}} \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{1-\nu^2}{E_R(1+j\eta)} \frac{b^2 p_i}{(1+\nu) + (1-\nu) \frac{b^2}{a^2}} \tag{5}$$

여기서 E_R 는 흡음재의 탄성계수, η 는 감쇠계수 그리고 ν 는 푸아송의 비이다. 위의 식 (4)와 (5)를 식 (2)에 대입하면 흡음재 내부 경계면에서의 변위는 다음 식과 같다.

$$u_r(r=a) = \frac{a}{E_R(1+j\eta)} \frac{(1-\nu^2) \left(\frac{b^2}{a^2} - 1 \right)}{(1+\nu) + (1-\nu) \frac{b^2}{a^2}} p_i = n p_i \tag{6}$$

$$n = \frac{a(1-\nu^2) \left(\left(\frac{b}{a} \right)^2 - 1 \right)}{E_R(1+j\eta) \left(1+\nu + (1-\nu) \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right)} \tag{7}$$

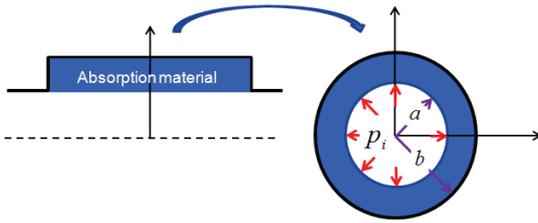


Fig. 1 Model of absorptive silencer

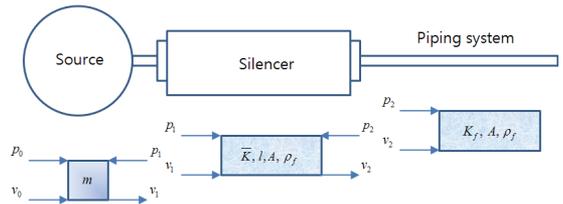


Fig. 2 Model of silencer and piping system

이상적인 압축성 유체의 관계식을 이용하면 내부 압력과 체적의 변화는 아래의 식과 같다.

$$p_i = -K_f \frac{\Delta V}{V_0} \tag{8}$$

여기서 K_f 는 유체의 체적탄성계수이다. 위의 식을 이용하면 흡음형 소음기의 흡음재료에 대한 등가 체적탄성계수 \bar{K} 를 구할 수 있다.

$$\bar{K} = \frac{(a + n p_i)^3}{2a^2 n} \tag{9}$$

흡음형 소음기의 성능을 해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 배관시스템을 구성할 수 있다. 소음기의 성능 측정 시 필요한 음원, 흡음형 소음기 그리고 반사파가 발생하기 않는 무반사 경계조건을 가진 무한 길이의 배관계로 구성하였다.

먼저 음원에서 소음기의 입구단까지의 영역에 대해서는 아래와 같은 압력과 속도 조건으로 이상화할 수 있다.

$$p_0 = p_1 + j \frac{\omega m v_0}{A} \tag{10}$$

여기서 m 은 음원과 소음기 사이 배관 내부의 유체 질량이고 A 는 배관 내부의 단면적이다.

흡음형 소음기 영역은 앞절에서 구한 흡음재료의 체적탄성계수를 이용하여 아래와 같은 전달행렬을 구성할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos kl & j Z_m \sin kl \\ j \frac{1}{Z_m} \sin kl & \cos kl \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_2 \\ v_2 \end{pmatrix} \tag{11}$$

여기서 k 는 유체의 파수, l 은 소음기의 길이 그리고 $Z_m = \rho_f c = \rho_f \sqrt{K/\rho_f} = \sqrt{\rho_f \bar{K}}$ 이다. 마지막으로 소음

기를 통과한 음압은 음향 무반사 조건을 적용하면 아래와 같이 음압을 얻을 수 있다.

$$p_2 = Z_\infty v_2 = \sqrt{\rho_f \bar{K}_f} v_2 \tag{12}$$

앞에서 구한 식 (10)~(12)를 이용하여 압력과 속도 연속조건을 이용하여 전달행렬을 구성할 수 있고 이 전달행렬을 이용하여 음향투과손실을 구하면 아래와 같다.

$$TL = 20 \text{Log} \left| \cos kl + j \frac{Z_m}{Z_\infty} \sin kl - \frac{\left(\frac{\omega m}{A} \right)}{Z_m} \sin kl + j \frac{\left(\frac{\omega m}{A} \right)}{Z_\infty} \cos kl \right| \tag{13}$$

2.2 해석결과

식 (13)을 이용하여 흡음형 소음기의 설계요소를 식별하고 각 설계요소가 흡음형 소음기의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 흡음형 소음기의 제원은 안지름(a) 50 mm, 바깥지름(b) 100 mm 그리고 길이(l)는 200 mm, 흡음재로 사용된 재료는 폴리우레탄으로 탄성계수(E_R)는 200 MPa이고 푸아송비(ν)는 0.485를 기준으로 해석을 수행하였다. 먼저 소음기 내부의 흡음형 재료의 감쇠계수에 따른 영향을 분석하여 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 250 Hz 부근에서 음향투과손실이 급격히 줄어들어 음의 값을 가지는 것은 펌프와 흡음재 사이의 유체 질량과 흡음재의 강성에 의한 공진 때문이며 나머지 구간에서 음향투과손실이 감소하는 이유는 소음기 내부의 흡음재에 의한 내부 공진모드의 영향으로 판단된다.

Fig. 3에서 흡음재의 감쇠계수를 증가시키면 공진모드의 영향이 줄어들어서 투과손실이 증가하는 경향을 보였다. Fig. 4는 흡음재의 탄성계수에 따른 변

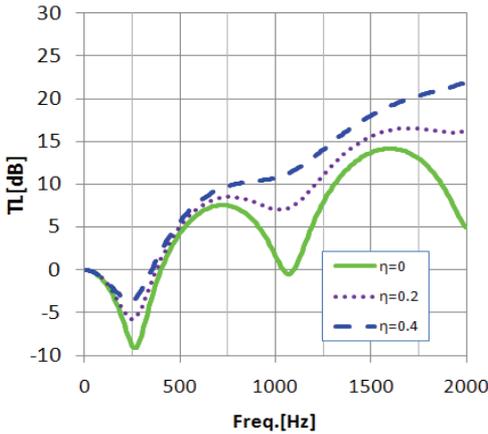


Fig. 3 Theoretical transmission loss according to loss factor of absorptive material

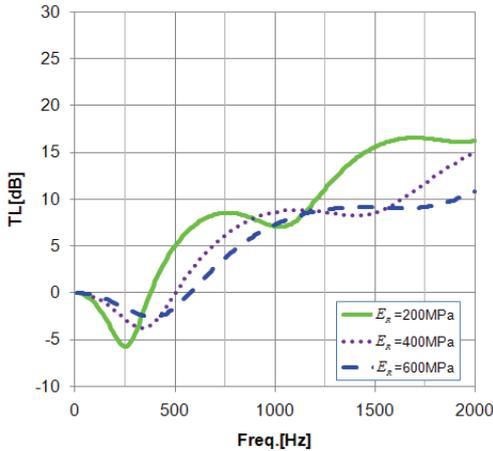
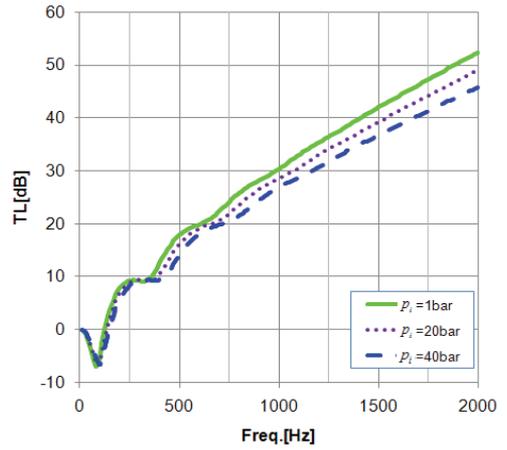


Fig. 4 Theoretical transmission loss according to elastic modulus of absorptive material

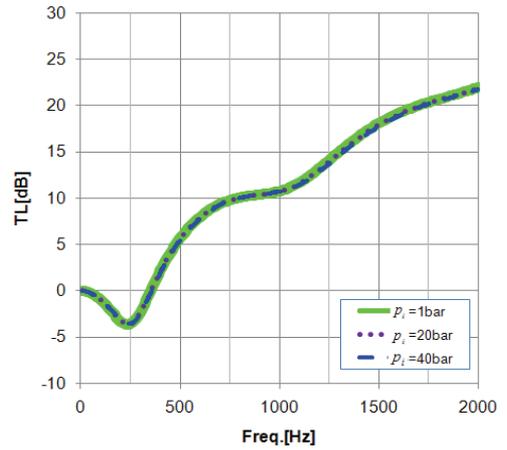
화이다. 흡음재의 탄성계수가 높아지면 첫 번째 공진 주파수가 증가하고 흡음재가 딱딱해져서 음향투과손실이 감소하였다.

Fig. 5는 소음기의 내부압력 변화에 따른 음향투과손실을 해석한 결과이다. 흡음재의 탄성계수가 작을 경우 압력이 증가함에 따라 흡음재가 수축하여 음향투과손실이 감소하는 경향을 보였으며 탄성계수가 높아지면 압력에 따른 변화가 없는 것을 확인하였다.

마지막으로 흡음재의 두께와 길이에 따른 음향투과손실 변화를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 흡음재의 두께가 증가할 경우 투과손실이 증가하는 경향을



(a) $E_R=20$ MPa



(b) $E_R=200$ MPa

Fig. 5 Theoretical transmission loss according to internal pressure of absorptive material

나타났으나 그 영향은 미미하였다. 그리고 흡음재 즉 소음기의 길이가 길어지면 상대적으로 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

2.3 시험장치 및 음향투과손실 측정

흡음형 소음기의 음향성능을 시험하기 위하여 Fig. 8과 같이 시험장치를 구성하였다. 소음기의 음향투과손실은 4개의 하이드로폰을 이용한 음파분리 방법을 사용하였으며 이는 평면파 전파 조건을 만족하여야 한다. 이 시험장치 배관의 안지름은 108 mm 이고 두께는 12 mm이다. 따라서 시험장치의 평면파상한 주파수는 약 8000 Hz이다. 배관 내부의 음압은 하이드로폰(B&K 8103)을 통하여 신호분석기

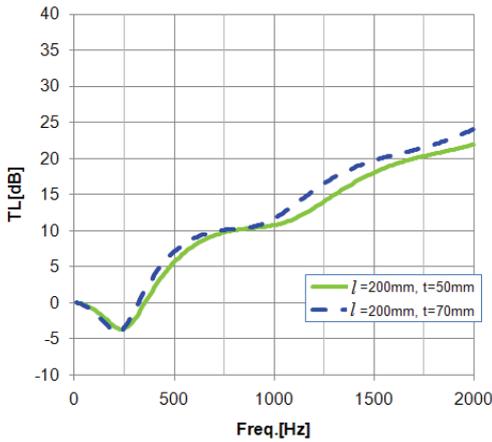


Fig. 6 Theoretical transmission loss according to thickness of absorptive material

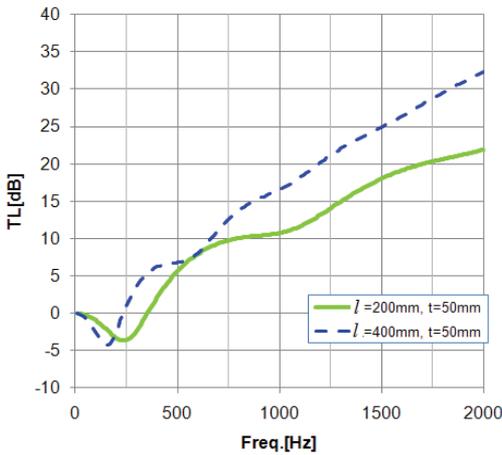


Fig. 7 Theoretical transmission loss according to length of absorptive material

(B&K Pulse)에서 계속된다. 하이드로폰은 시험대상 소음기가 설치된 배관의 상류측(#1, #2)과 하류측(#3, #4)에 각각 2개씩 설치 후 음압을 측정하여 입사파와 반사파를 분리하였다.

하이드로폰은 수중스피커(UW-30)로부터 배관 지름의 최소 5배 이상 떨어지도록 설계하여 평면파가 충분히 발달하도록 하였다. 하이드로폰의 음향중심이 배관 내 물에 충분히 접하면서도 배관 내부의 음파 흐름을 방해하지 않도록 하였으며 하이드로폰 부근에 기포가 발생되어 측정결과의 오차를 증가시키지 않도록 센서를 배관 측면하부에 설치하였다. 배관계의 끝단 반사가 존재할 경우 실험적으로 소음기의

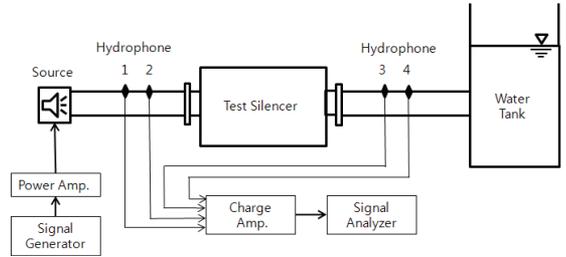


Fig. 8 Experimental setup for the measurement of transmission loss of absorptive silencer

음향투과손실을 측정하기 위하여 배관 내 음파를 입사파와 반사파로 분리하는 전달함수 기법을 적용하였다. 해수 배관계 내의 소음기의 음장은 강체 배관 내에서의 평면파 전파와 배관 내 유체의 비점성을 고려한다면 1차원 배관 내 음장으로 표현될 수 있다. 소음기가 설치되는 배관계의 소음원 특성 및 소음감소기 설치 위치 등과 같은 배관계의 특성을 배제한 소음기의 고유한 소음감소 표현 인자인 투과손실은 다음과 같이 표현될 수 있다⁽⁶⁾.

$$TL[dB] =$$

$$20 \text{Log} \left| \frac{1}{(1 - R_1 R_4) H_{13}} \frac{e^{jks} - H_{12}}{e^{jks} - H_{34}} \right| \quad (14)$$

이 때 상류측 배관의 첫 번째 하이드로폰에서 측정된 음압 반사계수 R_1 및 하류측 배관의 네 번째 하이드로폰에서의 음압 반사계수 R_4 는 상류측 배관에 위치한 2개의 하이드로폰 및 하류측 배관에 위치한 2개의 하이드로폰 사이의 전달함수를 이용하여 측정할 수 있으며 다음 식과 같다.

$$R_1 = \frac{H_{12} - H_{12i}}{H_{12r} - H_{12}} \quad (15)$$

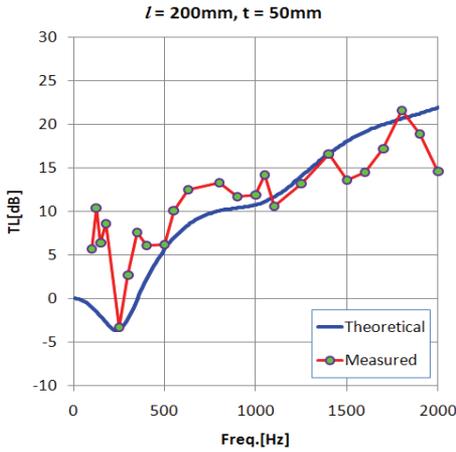


Fig. 9 Comparison between the theoretical result and measured result($l=200$ mm, $t=50$ mm)

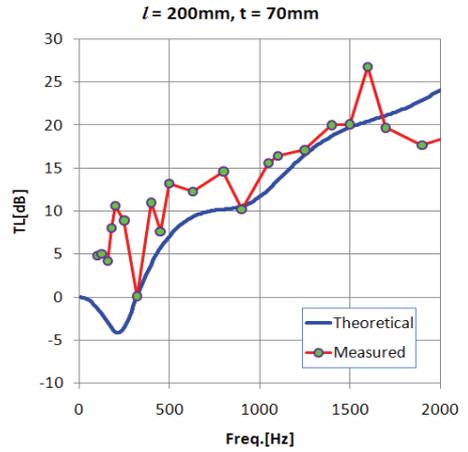


Fig. 10 Comparison between the theoretical result and measured result($l=200$ mm, $t=70$ mm)

$$R_4 = \frac{H_{34} - H_{34i}}{H_{34r} - H_{34}} \quad (16)$$

$$H_{12i} = \frac{p_{2i}}{p_{1i}} = e^{-jks}, H_{12r} = \frac{p_{2r}}{p_{1r}} = e^{+jks} \quad (17)$$

$$H_{34i} = \frac{p_{4i}}{p_{3i}} = e^{-jks}, H_{34r} = \frac{p_{4r}}{p_{3r}} = e^{+jks} \quad (18)$$

여기서 H_{xy} 는 x 번째 하이드로폰에서 측정된 음압에 대한 y 번째 하이드로폰에서 측정된 음압의 비인 전달함수이며, 아래첨자 i 는 입사파를 의미하며 r 은 반사파를 의미한다. 또한 k 는 파수이며, s 는 센서 간 간격이다.

2.4 이론값 및 측정결과 비교

Figs. 9~11은 폴리우레탄을 흡음재로 사용한 소음기의 이론 및 측정 결과이다. Fig. 9는 길이가 100 mm 그리고 흡음재의 두께가 50 mm인 소음기의 측정결과로 이론값과 잘 일치하고 있다. 흡음형 소음기의 음향투과손실이 고주파 영역으로 갈수록 음향 성능이 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 10은 길이는 200 mm, 두께가 70 mm인 소음기의 음향투과손실 측정결과이다. Fig. 9와 비교하여 두께가 20 mm 증가하였으나 음향투과손실 증가량은 2 kHz 기준으로 약 2 dB 정도로 그 효과가 미미하였다. Fig. 11은 길이는 400 mm 두께는 50 mm인 소음기의 측정결과 및 이론값이다. Fig. 8의 소음기와

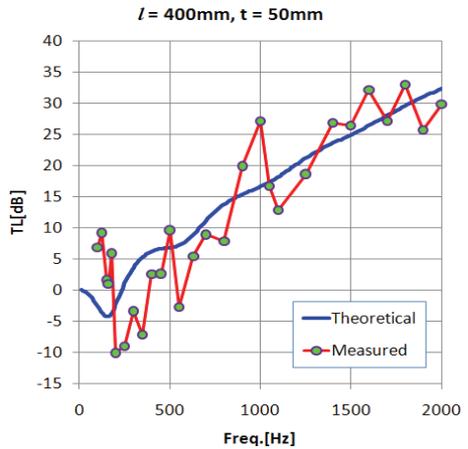


Fig. 11 Comparison between the theoretical result and measured result($l=400$ mm, $t=50$ mm)

비교하여 2 kHz 기준으로 약 11 dB 만큼 음향투과손실이 증가하였다. 그리고 Fig. 9와 11에서 나타난 250 Hz 부근에서의 음의 음향투과손실은 음향공진 및 시험상의 오차로 판단된다.

3. 결 론

이 논문에서는 이론적인 방법 및 측정을 통하여 함정에서 해수 배관 내부의 유체를 따라서 외부로 전파되는 소음을 저감하기 위해 사용되는 흡음형 소음기에 대해서 연구하였다. 흡음형 소음감소기의 음향투과손실에 영향을 미치는 주요인자인 흡음재의

두께, 길이 및 재질특성에 따른 음향투과손실의 이론값을 수치적으로 구하고 그 결과를 분석하였다. 흡음재로 해수와 임피던스가 유사한 폴리우레탄을 이용하여 흡음형 소음기를 제작하였다. 흡음형 소음기를 배관 끝단 반사가 존재하는 시험장치에 설치하여 음향투과손실을 실험적으로 측정하고 이를 이론값과 비교 분석하였다.

흡음형 소음기에 대해 음향투과손실을 측정 및 분석 결과, 흡음재의 두께가 증가할수록 또한 흡음재의 길이가 증가할수록 소음 저감효과가 크다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 소음기는 주파수가 증가함에 따라 음향투과손실이 증가하였다. 음원과 소음기 흡음재와의 공진은 실험상에서는 명확하게 나타나지 않았다. 소음기 내부 흡음재 길이에 따른 공진모드가 발생하는 주파수에서는 음향성능이 감소하는 것을 이론적으로 확인하였다. 그리고 이러한 현상은 흡음재의 감쇠계수를 증가시키면 완화되는 것을 알 수 있었다.

References

(1) Cummings, A., 1988, Sound Attenuation of a Finite Length Dissipative Flow Duct Silencer with Internal Mean Flow in the Absorbent, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 127, No. 1, pp. 1~17.

(2) Peat, K. S., 1991, A Transfer Matrix for an Absorption Silencer Element, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, No. 2, pp. 353~360.

(3) Kirby, R., 2001, Simplified Techniques for Predicting the Transmission Loss of a Circular Dissipative Silencer, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 3, pp. 403~426.

(4) Kim, H. J., Ih, J. G. and Jeong, J. H., 2002, A Comparison of the Transmission Losses of Two-dimensional Dissipative Silencers Predicted by Analytical Method and BEM, *Proceeding of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 1001~1004.

(5) Kim, J. Y. and Lee, I. J., 2011, Noise Reduction of a Blower for an Automatic Car Washer by Using Dissipative Silencer, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 21, No. 8, pp. 1001~1004.

(6) Kohmann, P. and Gaul, L., 1996, Noise Reduction in Fluid Filled Pipes on Ships by a New Muffler, *IMAC XIV-14th International Modal Analysis Conference*, pp. 1482~1487.

(7) Park, K. H., 2007, A Study on Determining the Transmission Loss of Water-borne Noise Silencer in a Sea-connected Piping System, *Journal of Acoustical Society of Korea*, pp. 207~213.



Youngsoo Seo is currently a senior researcher at Agency for Defense Development(ADD). He received the B.S degree, M.S. degree and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.



Kyunghoon Park received M.S. degree in Mechanical Engineering at KAIST in 2004. He works at ADD as a senior researcher. His research interests are in underwater radiated noise for naval ships.



Jae-Jin Jeon received Ph.D. in Mechanical Engineering at KAIST in 1987. He works at ADD as Principal Researcher. His research interests are structural acoustics, underwater radiated noise for naval systems.