

수중 음향재료의 반향음 감소성능 연구

A Study on the Echo Reduction Performance of Underwater Acoustic Material

서 영 수* · 함 일 배* · 정 우 진*
Young Soo Seo, Il Bae Ham and Woo Jin Jung

(Received September 12, 2014 ; Revised November 7, 2014 ; Accepted November 7, 2014)

Key Words : Underwater Acoustic Material(수중 음향재료), Scatterer(산란체), Size Distribution(크기분포), Hydrostatic Pressure(정수압), Echo Reduction(반향음 감소량)

ABSTRACT

The requirement of acoustic material which is used in underwater environment more increases. The material is used to reduce acoustic signature and radiate noise for underwater vehicle. Underwater acoustic material was made by viscoelastic material such as rubber and polyurethane etc. The mechanical and acoustic characteristics of these material change with hydrostatic pressure. In order to improve an acoustic performance according to hydrostatic pressure, several kinds of scatterers were added to viscoelastic material. In this paper, acoustic modelling and analysis techniques of underwater acoustic material with hydrostatic pressure were introduced and proposed. The specimens for pulse tube test were made and echo reductions were calculated and measured with hydrostatic pressure. Also the characteristics of echo reduction of the specimens with hydrostatic pressure were obtained and discussed.

1. 서 론

수중환경에서 음파의 반사 및 투과를 위해서 사용되는 수중음향재료는 다양한 종류 및 형태로 제작되어 사용된다. 수중 음향재료는 주위 유체인 물과 임피던스를 유사하게 맞추기 위해서 주로 고무 또는 폴리우레탄 등의 점탄성 재료를 사용하여 제작되며 최적의 음향 성능을 발휘하기 위하여 기공 및 다양한 형태의 산란체가 사용된다. 수중환경은 수심에 따라 온도 및 수압이 변하고 이는 재료의 특성을 달라지게 하여 음향성능이 변하게 된다. 따라서 수중

음향재료가 사용되는 온도 및 수압에서의 음향특성을 파악하는 것이 중요하다.

정수압에 따라서 수중 음향재료의 특성을 모델링할 경우 정수압에 따라서 재료의 밀도, 음속 그리고 두께의 변화를 먼저 계산해야한다. 일반적인 점탄성 재료의 경우 정수압이 증가하면 재료의 두께가 감소하고 밀도는 증가하며 재질은 상대적으로 딱딱(stiff)해져 음속이 증가한다. 이러한 변화는 재료의 반향음 감소특성에 영향을 미치게 된다.

산란체 각각에 대해 정수압을 고려하여 음향성능 해석을 수행하는 것은 대단히 복잡하고 어려운 일이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 유효매질이론

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

* Member, Agency for Defense Development

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

을 적용하여 정수압 및 산란체의 효과에 따른 재료의 유효물성을 계산하면 좀 더 쉽게 산란체가 포함된 수중음향재료의 음향 특성을 구할 수 있다.

Gaunard⁽¹⁾는 다수의 동일한 크기의 구형 산란체가 포함된 점탄성 재료에 대해서 유효매질이론 (effective medium theory)을 적용하여 유효 체적탄성계수(effective bulk modulus), 밀도(effective density) 및 전단탄성계수(effective shear modulus)를 계산하였다. 이후 Kerr^(2,3)는 Gaunard가 제시한 모델의 유효체적탄성계수를 개선하여 실험결과와 비교하여 좀 더 향상된 결과를 제시하였다. Baird⁽⁴⁾는 Kerr와 함께 동일한 크기의 산란체가 아닌 다양한 크기의 산란체에 대해서 모델링을 수행하고 측정결과와 비교하여 모델의 신뢰도를 향상시켰다. Skelton 등⁽⁵⁾은 다층으로 이루어진 재료에 대해 동강성행렬(dynamic stiffness matrix)을 이용하여 음향성능 해석을 수행하였다. Seo⁽⁸⁾는 일반적으로 다층으로 이루어진 수중음향재료의 표면 임피던스(surface impedance)와 음향성능의 관계에 대해서 연구하였다. Kerr⁽⁹⁾는 압력에 따른 수중음향재료의 음향학적 모델링을 수행하고 해석결과를 제시하였다. Seo⁽¹⁰⁾는 정수압과 온도조건에 따른 수중음향재료의 음향성능을 시험하기 위하여 펄스튜브를 개발하고 그 성능을 검증하였다.

이 논문에서는 수중환경에서 정수압을 받는 조건에서 사용되는 수중 음향재료를 설계하기 위하여 수압에 따른 음향재료의 음향성능 해석을 위한 음향성능 해석 모델 및 해석기법을 소개하였다. 특히 수압에 따른 산란체의 거동을 모사하고 이를 해석 모델에 반영하였다. 그리고 실제 제작된 펄스튜브 시험용 시편에 대해서 정수압에 따른 반향음 감소량(echo reduction)을 측정하고 그 결과를 해석결과와 비교하였다.

2. 본 론

2.1 산란체의 크기분포

Fig. 1은 재료 내부에 크기가 다른 산란체가 포함된 음향재료의 개념도를 나타낸다. 산란체는 크기가 각각 다르며 재료 내부에 불규칙적으로 분포되어있다. 이러한 산란체를 일정한 크기와 매질의 특성을 가지는 구(sphere)로 가정할 수 있다. 그러면 외부에서

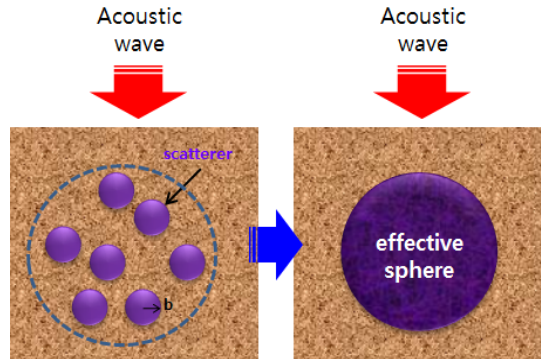


Fig. 1 Concept of multiple sphere problem

입사되는 음향전파에 의한 산란은 이론식을 이용하여 모델링 할 수 있으며 구에 의한 산란 효과를 쉽게 해석할 수 있다.

임의의 산란체의 내경(a_j), 외경(b_i) 그리고 셀 분량($\epsilon_{i,j} = 1 - a_j^3/b_i^3$)을 가진 산란체의 수를 $n_{i,j}$ 라고 하면 산란체의 전체 체적율(Φ)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Phi = \frac{4\pi}{3} \sum_{i,j} n_{i,j} b_i^3 = \frac{4\pi}{3} b^3 \sum_{i,j} n_{i,j} \quad (1)$$

여기서 b 는 산란체의 평균 외경이다. 산란체의 분포를 정규화된 크기 분포함수로 변환하면 다음 식과 같다.

$$\bar{n}_{i,j} = \frac{\frac{4\pi}{3} n_{i,j} b_i^3}{\Phi} = \frac{\frac{4\pi}{3} n_{i,j} b_i^3}{\frac{4\pi}{3} b^3 \sum_{i,j} n_{i,j}} \quad (2)$$

2.2 크기분포를 고려한 유효계수

모체의 특성을 첨자 1, 산란체의 특성을 첨자 x 그리고 산란체 내부 유체의 특성을 첨자 2로 나타내어 유효매질 이론을 적용하면 유효 질량(ρ^*), 전단계수(μ^*) 및 체적탄성계수(K^*)를 아래의 식과 같이 구할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\rho^* = \rho_1(1 - \Phi) + \rho_2\Phi \sum_{i,j} \bar{n}_{i,j}(1 - \epsilon_{i,j}) + \rho_x\Phi \sum_{i,j} \bar{n}_{i,j}\epsilon_{i,j} \quad (3)$$

$$\frac{6\mu_1\left(\frac{\mu^*}{\mu_1}-1\right)}{6\frac{\mu^*}{\mu_1}(K_1+2\mu_1)+(9K_1+8\mu_1)} = \phi \sum_{i,j} \bar{n}_{i,j} M_{1,i,j} \tag{4}$$

$$\frac{K^*-K_1}{K^*+\frac{4}{3}\mu_1} = \phi \sum_{i,j} \bar{n}_{i,j} M_{0,i,j} \tag{5}$$

여기서 $M_{0,i,j}$ 와 $M_{1,i,j}$ 는 참고문헌(4)에 제시되어 있다.

2.3 정수압에 따른 유효계수

음향재료가 정수압을 받게 되면 음향재료 및 산란체가 압축을 받게 된다. 정수압에 의한 산란체의 외경과 내경의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

정수압을 받기전 산란체에서 매질(substrate)이 차지하는 체적율은 $\phi = (a/b)^3$, 정수압을 받아서 변형된 체적율은 $\phi' = (a'/b')^3$ 이다. 그리고 산란체 내부의 압력은 Γ 에서 Γ' 로 증가한다. 산란체는 정수압에 따라 비압축성, 보일의 법칙 및 미소 변형조건을 적용하여 해석을 수행한다. 먼저 산란체의 미소방향 변위는 다음과 같다.

$$u_r = Ar + B\frac{1}{3r^2} \tag{6}$$

여기서 A 와 B 는 경계조건에 따른 상수이다. 반경 방향 응력(τ_{rr})은 아래와 같다.

$$\tau_{rr} = \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} = 3KA - \frac{4}{3r^3}\mu B \tag{7}$$

여기서 K 는 음향재료의 체적탄성계수, λ 와 μ 는 라메상수(Lamé constant)이다. 산란체의 내부와 외부의 하중 경계조건은 다음과 같다.

$$\tau_{rr}|_{r=a'} = -(\Gamma' - \Gamma) \tag{8}$$

$$\tau_{rr}|_{r=b'} = -P \tag{9}$$

여기서 P 는 정수압이다. 앞에서 언급한 산란체의 비압축성, 보일의 법칙 및 미소 변형조건을 적용하면 다음과 같다.

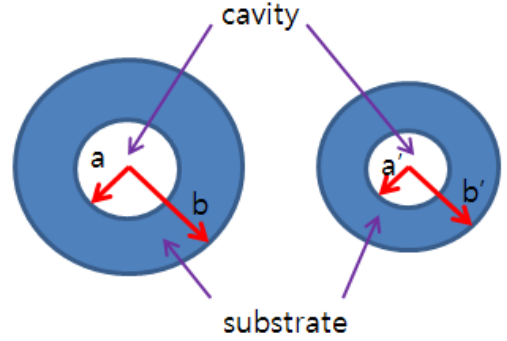


Fig. 2 Compression of a scatterer in an substrate

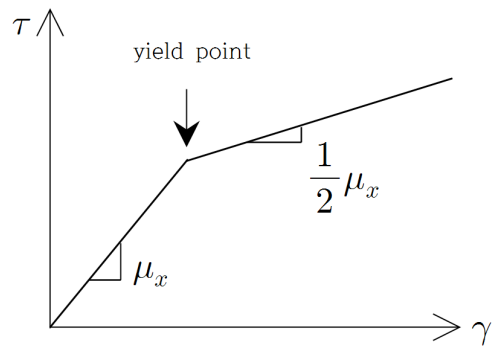


Fig. 3 Stress-strain curve of scatterer

$$b'^3 - a'^3 = b^3 - a^3 \tag{10}$$

$$\Gamma V = \Gamma' V' \text{ or } \Gamma a^3 = \Gamma' a'^3 \tag{11}$$

$$B \cong a'^3 - a^3 \tag{12}$$

산란체가 정수압을 받으면 일정 압력까지는 탄성 변형을 하며 압력에 따른 재료의 내부 응력이 항복응력을 넘어가면 소성변형을 한다. 이때의 압력을 임계압력(P_{cr})이라고 하며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{cr} = \frac{4\mu_x}{3}(\mathbf{x}-1) \left[\frac{(1-\phi)\mathbf{x}}{\phi+(1-\phi)\mathbf{x}} + \frac{3\Gamma}{4\mu_x} \frac{1}{1-\epsilon\mathbf{x}} \right] - \frac{4\chi}{3} \ln(1-\epsilon\mathbf{x}) \tag{13}$$

$$\mathbf{x} = \frac{\phi}{\phi'} \frac{1-\phi'}{1-\phi} \tag{14}$$

$$\chi = -\mu_x(1-x) \tag{15}$$

정수압에 따라 산란체가 변형할 때 산란체의 전단강성을 Fig. 3과 같이 가정하였다. 항복응력 이전의 탄성영역에는 산란체 재질 본래의 전단강성을 가지고 변형을 하고 항복응력 이후, 즉 소성영역에서는 산란체 재료 전단강성의 1/2의 값을 가지고 변형한다고 가정하였다. 산란체가 탄성변형을 하는 영역과 소성변형을 하는 영역에서의 체적률(ϕ')은 다음 식과 같이 구할 수 있다⁹⁾.

탄성영역 :

$$\begin{aligned} (\phi' - \phi) \left[1 - \phi' - \frac{\mu_x}{\mu} + \frac{1}{1 - \epsilon x} \left(\frac{\mu_x}{\mu} + \frac{3\Gamma}{4\mu} \right) \right] \\ + \frac{3P}{4\mu} \phi' (1 - \phi) = 0 \end{aligned} \tag{16}$$

소성영역 :

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{\phi}{\phi'} \right) \left[(1 - \phi')(1 - \epsilon x) + \frac{3\Gamma}{4\mu} \right] \\ + (1 - \phi) \left[\frac{3P}{4\mu} + \frac{\chi}{4\mu} \ln(1 - \epsilon x) \right] (1 - \epsilon x) = 0 \end{aligned} \tag{17}$$

정수압에 의해서 변경된 산란체의 체적률을 이용하면 재료 내부에 포함된 산란체의 전체 체적률(ϕ')을 구할 수 있고 또한 재료의 두께(l')도 다음 식을 통하여 구할 수 있다.

$$l'(1 - \phi') = l(1 - \phi) \tag{18}$$

여기서 l 은 정수압을 받기전 재료의 두께이다. 정수압에 따라 변경된 체적률, 두께 그리고 식 (14)~(18)를 이용하면 산란체의 크기분포와 정수압을 고려한 수중 음향재료의 등가 밀도, 전단계수 그리고 체적탄성계수를 구할 수 있다. 이 값들과 동강성행렬⁶⁾을 이용하여 음향성능 해석을 수행하면 산란체가 포함된 음향재료의 반향음 감소성능을 구할 수 있다.

2.4 음향 성능 측정 시스템

수중 음향재료의 음향 성능을 측정하는 시스템인 펄스 튜브는 내부가 물로 채워져 있고 음파가 평면파로 전파되는 것을 기본 전제로 한다. 따라서 원형 튜브내 고차 모드가 전파되기 전까지의 주파수 이하에서만 음향 성능 측정이 가능하다. 이 연구에서는



Fig. 4 Underwater acoustic performance measurement system(pulse tube)

Fig. 4에 나타난 튜브 내부의 직경이 70 mm인 튜브를 사용하였으며 측정가능한 주파수는 약 12 kHz 이하이다. 평면파를 가진하기 위한 소스와 입사파와 반사파를 측정하기 위한 수압센서(하이드로폰)가 필요하며 이 측정 시스템에 설치된 소스와 수압센서의 제원은 Tables 1, 2와 같다.

반향음 감소량은 Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 소스에서 발생된 음파가 펄스 튜브내에서 평면파로 진행한다고 가정하면 입사파와 음파가 시편에 의해서 반사되는 반사파를 각각 시간 영역에서 측정한 후 푸리에 변환(fourier transform)하여 그 크기의 비를 이용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$ER(f) = -20 \text{Log} \left(\frac{P_r(f)}{P_i(f)} \right) \tag{19}$$

여기서 P_i 과 P_r 은 입사파와 반사파의 크기이다.

2.5 이론값 및 측정결과 비교

산란체의 크기 분포를 고려한 수중 음향재료의 음향특성은 기존의 논문⁸⁾에서 제시된 물성치를 활용

Table 1 Specification of acoustic source

Contents	Spec.
Manufacturer	Neptune sonar
Model	T204
TVR	-150 dB re 1V/ μ Pa
Temperature range	-5 $^{\circ}$ C to 70 $^{\circ}$ C
Maximum pressure	15 MPa

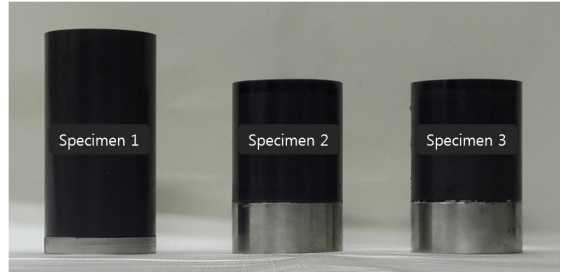


Fig. 6 Specimens

Table 2 Specification of dynamic pressure sensor

Contents	Spec.
Manufacturer	PCB
Model	112A22
Sensitivity	14.5 mV/ μ Pa
Temperature range	-73 $^{\circ}$ C to 135 $^{\circ}$ C
Maximum pressure	3450 kPa
Acceleration sensitivity	< 0.0014 kPa/(m/s ²)
Resonance frequency	> 250 kHz
Minimum frequency	0.5 Hz

되었으며 시편 3은 반향음 감소성능 및 다른 부가 기능을 가지도록 설계된 시편이다. 이 논문에서는 시편의 정확한 치수와 측정된 주파수 및 반향음 감소량의 크기는 생략한다. 시편을 펄스튜브에 삽입하여 정수압에 따른 반향음 감소량을 측정하여 Figs. 7~9에 나타내었다. 이때 펄스튜브 내의 물의 온도는 약 $10 \pm 1^{\circ}$ C로 조절하였으며 시편은 10° C의 물에 24시간 동안 담근 후 시험을 수행하였다.

Fig. 7은 시편 1에 대한 반향음 감소량에 대한 측정 및 해석이다. 정수압에 따른 측정결과를 살펴보면 정수압이 1bar에서 10bar로 증가함에 따라 반향음 감소량 최대값을 나타내는 주파수가 저주파로 이동하는 것을 볼 수 있다. 정수압을 20bar로 증가시키면 최대값을 나타내는 주파수는 다시 고주파로 이동하며 30bar의 경우도 역시 고주파로 점차 이동한다. 이러한 경향을 보이는 이유는 정수압이 증가함에 따라 시편의 두께가 점차 감소하여 강성이 증가함에 따라 주파수가 고주파로 이동하였으므로 판단된다.

해석결과 역시 측정에서 제시한 결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 정수압이 증가함에 따라 최대값을 나타내는 주파수가 저주파로 이동했다가 다시 고주파로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 수중음향 재료의 경우 정수압 환경에서 사용되는 재료이므로 이러한 정수압에 따른 재료의 반향음 감소특성을 파악한 후 설계 및 제작되어야 할 것이다.

Fig. 8은 시편 1과 유사한 재료를 사용하였으며 두께가 다른 시편 2에 대한 측정 및 해석 결과이다. 측정 및 해석결과 시편 1과 비교하여 최대값을 나타내는 주파수를 제외하고는 시편 1과 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 시편 2와 재료의 특성이 다르나 두께는 같은 시편 3에 대한

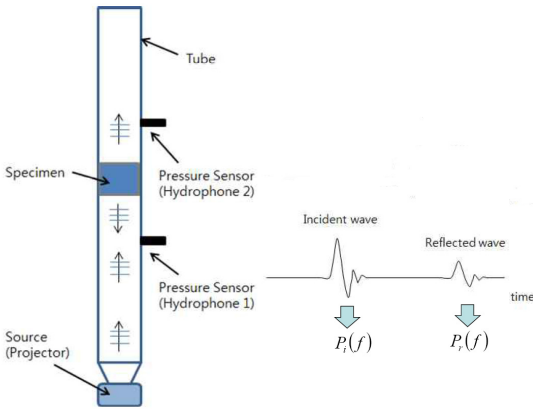
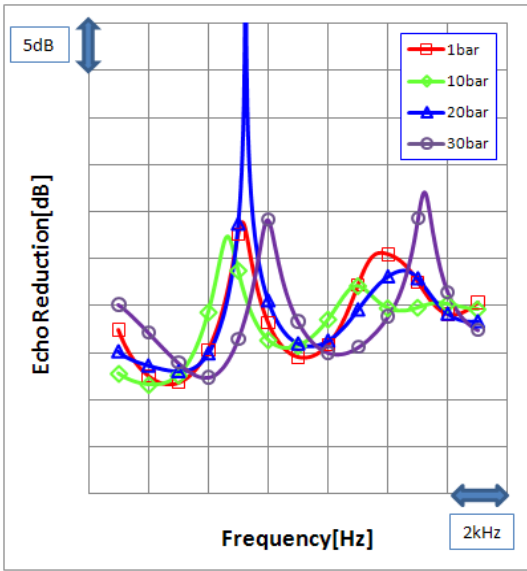


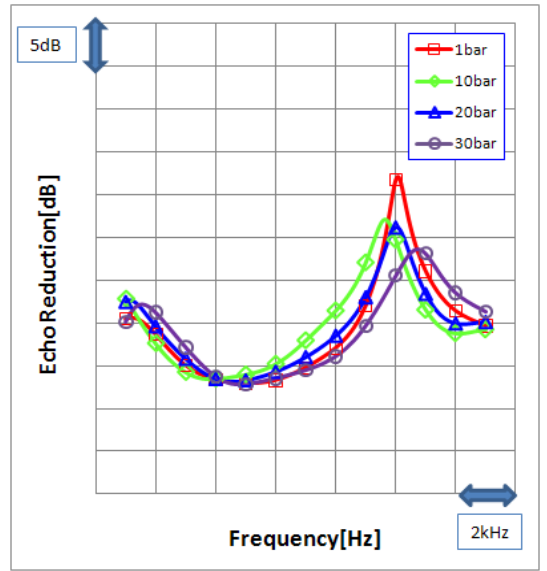
Fig. 5 Echo reduction measurement

하여 해석을 수행하였다. 산란체의 크기는 Rayleigh 분포를 가지는 것으로 가정하였다.

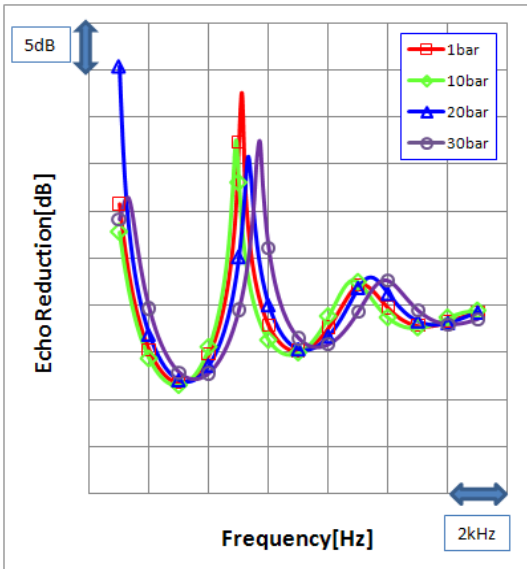
Fig. 6은 제작된 수중 음향재료 시편 1, 2, 3이다. 시편 1과 2는 반향음 감소성능이 우수하도록 설계



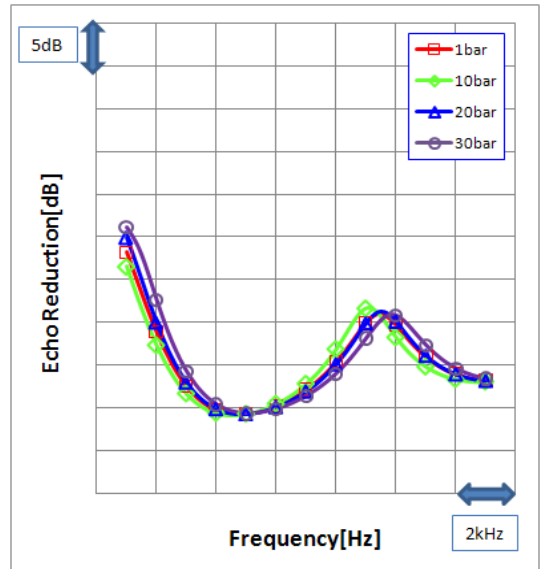
(a) Measurement



(a) Measurement



(b) Analysis



(b) Analysis

Fig. 7 Comparison between the measurement and analysis result(specimen 1)

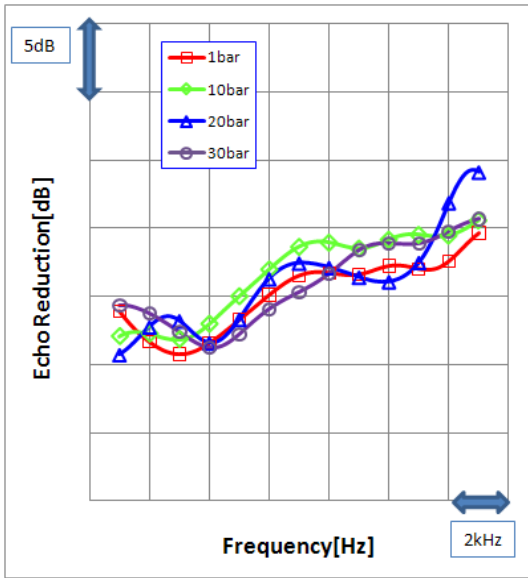
Fig. 8 Comparison between the measurement and analysis result(specimen 2)

측정 및 해석결과이다. 시편 3은 반향음 감소량이 특정 주파수를 지난 이후 주파수에 따라 점차 증가하고 있는 형태이다. 정수압에 따른 효과는 주파수에 따라 다르게 나타나고 있었으며 해석결과 역시 이런 경향을 보였다. 이러한 재료는 앞의 재료와는 달리 좀 더 넓은 주파수 구간에 대해서 일정한 반향음 감

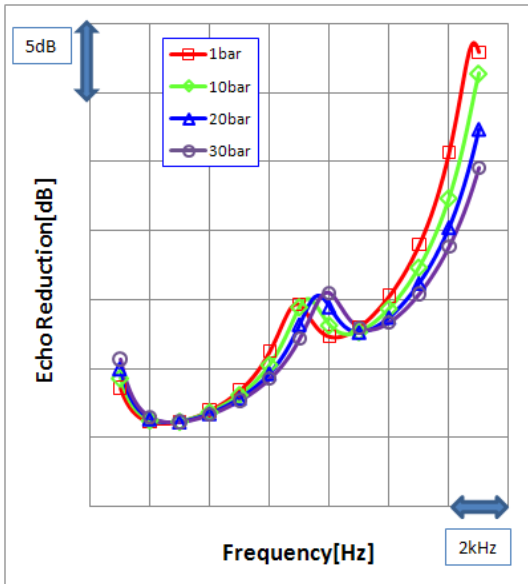
소량 이상을 요구하는 곳에 사용되어야 할 것으로 생각된다.

3. 결 론

이 논문에서는 측정 및 해석적인 방법을 이용하여



(a) Measurement



(b) Analysis

Fig. 9 Comparison between the measurement and analysis result(specimen 3)

수중에서 사용되는 음향재료에 대한 음향성능을 검토하였다. 사용 목적에 맞도록 3종의 수중음향재료를 설계 및 제작하였다. 각각의 재료에 대하여 시편을 제작하고 펄스튜브를 이용하여 반향음 감소량을 측정하였다. 펄스튜브 내부의 물의 온도는 10℃로 고정하고 정수압, 1bar, 10bar, 20bar 그리고 30bar

에 따른 반향음 감소량의 변화를 측정하였다.

측정결과 10bar에서 측정한 값은 1bar에서 측정한 값과 비교하여 반향음 감소량의 최대값을 나타내는 주파수가 저주파수로 이동하였으며 이후 20bar, 30bar로 정수압이 증가함에 따라 다시 고주파수로 이동하였다. 이러한 현상은 3종의 시편 모두에서 관찰되었다.

해석결과 역시 측정한 값과 비교하여 반향음 감소량의 크기 및 정수압에 따른 주파수 변화도 유사하게 계산되었다. 정수압에 따른 산란체의 응력과 변위를 모델링할 때 산란체 재료의 응력과 변위의 특성을 추정하여 해석 모델에 반영하였다. 그 결과 측정에서 나타난 정수압에 따른 경향을 잘 모사할 수 있었다. 이러한 수중음향재료는 정수압과 주파수에 따라서 반향음 감소량이 변하므로 음향재료가 사용되는 정수압 및 주파수 범위를 잘 고려하여 최적의 성능이 나올 수 있도록 설계되어야 할 것이다. 따라서 이 논문에서 제시한 기법을 적용하면 실제 제품을 제작하기 전에 정수압과 주파수에 따른 음향 특성을 사전에 예측하고 설계 변경을 통하여 최대의 효과를 나타낼 수 있도록 설계가 가능할 것으로 판단된다.

References

- (1) Gaunard, G. C. and Überall, H., 1982, Resonance Theory of Effective Properties of Perforated Solid, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 71, No. 2, pp. 282~295.
- (2) Kerr, F. H., 1992, The Scattering of a Plane Wave by Spherical Elastic Inclusion, International Journal of Engineering Science, Vol. 30, No. 2, pp. 169~186.
- (3) Kerr, F. H., 1992, An Effective Medium Approach to the Study of Plane Wave Propagation in an Elastic Matrix with Spherical Elastic Inclusions, International Journal of Engineering Science, Vol. 30, No. 2, pp. 187~198.
- (4) Baird, A. B., Kerr, F. H. and Townend, D. J., 1999, Wave Propagation in a Viscoelastic Medium Containing Fluid-filled Microspheres, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 105, No. 3, pp. 1527~1538.

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

(6) Seo, Y. S., Kang, M. W., Shin K. K. and Jeon, J. J., 2011, Acoustic Performance Study of FRP Acoustic Window, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 890~896.

(7) Shin, K. K., Seo, Y. S., Kang, M. W. and Jeon, J. J., 2013, The Influence of Design Factors of Sonar Acoustic Window on Transfer Function of Self Noise Due to Turbulent Boundary Layer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 56~64.

(8) Seo, Y. S., Ham, I. B. and Jeon, J. J., 2013, A Study on the Acoustic Performance Design Technique of Underwater Acoustic Material, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 920~927.

(9) Kerr, F. H. and Baird, A. M., 2002, Acoustic Modelling of Signature Reduction Materials for Underwater Applications, IUTAM Symposium on Diffraction and Scattering in Fluid Mechanics and Elasticity, pp. 123~132.

(10) Seo, Y. H., Kim, S. R., Lee, S. M., Byun, Y.

H. and Seo, Y. S., 2014, Development of Underwater Acoustic Performance Measurement System Using Pulse Tubes, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 399~406.



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 Busan National University, Korea in 1999, 2001 and 2005, respectively. His research interests are in the reduction of noise in the ship.



Woo-Jin Jung is received his B.S. and M.S. degrees from Korea Aerospace University in 1985 and 1987 respectively, a Ph.D. degree from Pusan National University. He is currently a principal researcher at the Agency for Defense Development, Korea. His research interests are underwater acoustic stealth technologies.