

유효매질이론을 이용한 복합 점탄성 재료의 음향성능 해석

Analysis of Acoustic Performance of Composite Visco-elastic Materials Using Effective Medium Theory

김재호†·서영수*

Kim Jae Ho, Seo Young Soo

1. 서 론

잠수함 및 수상함은 수중 또는 수상의 해양환경에서 운용되는 특수한 무기체계로서 현대의 복합 전장 환경에서 음향 스텔스 성능에 대한 요구조건은 더욱 더 증대되고 있다. 특히 잠수함의 경우 음향 스텔스를 위한 선체 표면 코팅재 설계 및 개발 등에 선진 강대국은 상당한 투자와 노력을 기울이고 있는 실정이다. 수중에 적용되는 음향재료는 고무 또는 폴리우레탄 등의 점탄성 재료가 주로 이용되며, 다양한 형태의 첨가제(발포제 또는 미세기공 등)를 적용하여 온도 및 수압의 해양환경에서 최적의 음향성능이 구현되도록 설계/제작되어진다.

본 연구에서는 균일한 분포의 첨가제를 갖는 복합 음향 재료에 대하여 음향산란 특성을 고려한 유효매질이론을 적용한 음향특성 모델링 기법을 수록하고 있으며, 본 연구에서 제시되는 복합 점탄성 재료의 음향성능 해석기법은 잠수함을 비롯한 해군 함정 음향 스텔스 재료의 설계/개발에 유용하게 활용될 것이다.

2. 산란효과를 고려한 유효매질이론

첨가제(inclusion)를 갖는 복합 점탄성 재료 내부의 파동 전파에 대한 문제는 첨가제의 정확한 위치를 알 수 없고 또한 모재(substrate)와 첨가제의 경계면에서 무한 차수의 응력과 변위의 연속조건을 만족해야 하므로, 일반적으로 해석적인 기법으로는 접근이 곤란하다. 그러나 이러한 복합 매질은 내부 음향산란 효과를 반영한 적절한 유효 파라미터의 선정을 통하여 균질 매질로 대체하는 유효매질이론을 적용하면 해석 및 모델링이 용이하게 된다. 먼저 단일 구형 첨가제의 산란모델을 살펴본 후 다중 산란체의 음향 산란 모델링 기법을 고찰한다.

† 교신저자; 국방과학연구소
E-mail : youngtahn@add.re.kr
Tel : (055) 540-6339, Fax : (055) 542-3737

* 국방과학연구소

2.1 단일 산란체의 산란모델

그림 1에 구형 산란체의 형상을 나타내었다. 내부에 유체를 갖는 구형 탄성셀이 무한영역의 점탄성 매질에 놓여있고 평면파가 입사한다고 가정한다. 모재를 포함하여 고려되는 모든 탄성체는 등방성으로 가정된다. 따라서 모든 재료는 Lamé 파라미터(λ, μ)와 밀도(ρ)로 특성이 표현된다. 아래 첨자 1은 모재, 2는 첨가제의 내부 코어 그리고 x 는 첨가제의 셀을 나타낸다. 음향장내의 변위 벡터 u 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u = \nabla \phi + \nabla \times \Psi \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 길이방향 운동(즉, 압축 운동)을 나타내는 스칼라 포텐셜, $\Psi = \nabla \times (r\chi e_r)$ 는 운동의 전단 성분을 나타내는 벡터 포텐셜을 각각 나타낸다. 입사 평면벡터의 스칼라 포텐셜은 레일리 전개에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_{inc} = \phi_0 e^{-i\omega t} \sum \mathbf{i}^n (2n+1) j_n(k_{d1}r) P_n(\cos\theta) \quad (2)$$

모재에서 산란 음장을 표현하는 스칼라 포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_{sc} = \phi_0 e^{-i\omega t} \sum \mathbf{i}^n (2n+1) A_n h_n(k_{d1}r) P_n(\cos\theta) \quad (3)$$

$$\chi_{sc} = \phi_0 e^{-i\omega t} \sum \mathbf{i}^n (2n+1) B_n h_n(k_{s1}r) P_n(\cos\theta) \quad (4)$$

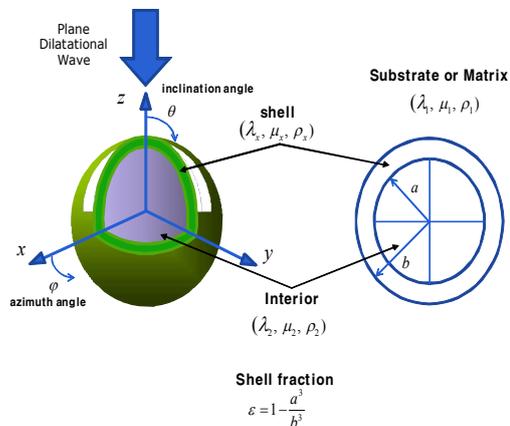


그림 1. 구형 첨가제 형상

식 (3)에서 쉘분량 ε 이 작은 경우 저주파수 대역에서 모노 폴 공진을 고려하지 않는 저차 산란 계수는 다음과 같다.

$$A_0 = \left(\frac{y_{d1}^3}{3i} \right) \frac{\alpha_1}{\beta_1}, \quad y_{d1} = k_{d1} b = (\omega / c_{d1}) b \quad (5)$$

$$A_1 = \left(\frac{y_{d1}^3}{9i} \right) \left[1 - \frac{\rho_x}{\rho_1} \varepsilon - \frac{\rho_2}{\rho_1} (1 - \varepsilon) \right] \quad (6)$$

$$A_2 = \left(\frac{2y_{d1}^3}{9i} \right) \frac{\varepsilon \alpha_{x,2} \left(\frac{\mu_x}{\mu_1} - 1 \right) + (1 - \varepsilon) \alpha_{x,x} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}{\varepsilon \alpha_{x,2} \alpha_{1,x} + (1 - \varepsilon) \alpha_{x,x} \alpha_{1,2}} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = K_2 - K_1 + \varepsilon \left(K_1 + \frac{4}{3} \mu_x \right) (K_x - K_2) / \left(K_x + \frac{4}{3} \mu_x \right) \quad (8)$$

$$\beta_1 = K_2 + \frac{4}{3} \mu_1 + \frac{4}{3} \varepsilon (\mu_x - \mu_1) (K_x - K_2) / \left(K_x + \frac{4}{3} \mu_x \right) \quad (9)$$

$$\alpha_{m,n} = \frac{4}{3} \left(\frac{9K_m}{8\mu_m} + 1 \right) + \frac{\mu_m}{\mu_m} \left(\frac{K_m}{\mu_m} + 2 \right) \quad (10)$$

2.2 다중 산란체의 단일 산란모델

유효매질이론을 통한 다중 산란체의 산란모델에 대한 개념도를 그림 2에 나타내었다. 유효 반경 R 내부에 위치하는 다중 산란체에 의한 산란장의 합은 하나의 유효 균질 산란체에 의한 산란장과 원거리 조건에서 동일하다고 간주하는 것이 다중 산란체의 단일 산란모델이며 변위벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{u}^*(\mathbf{r}, r_0) = N \mathbf{u}_{sc}(\mathbf{r}, r_0) \quad (11)$$

길이방향 변위 포텐셜 ϕ 에 대하여 식 (11)을 적용하면 유효 체적탄성계수, 전단계수 및 밀도(K^* , μ^* , ρ^*)는 다음과 같다.

$$\frac{K^* - K_1}{K^* + \frac{4}{3} \mu_1} = \phi \frac{\alpha_1}{\beta_1}, \quad \rho^* = \rho_1 (1 - \phi) + \phi [\rho_2 (1 - \varepsilon) + \rho_x \varepsilon] \quad (12)$$

$$\quad (13)$$

$$\frac{6\mu_1 \left(\frac{\mu^*}{\mu_1} - 1 \right)}{6\frac{\mu^*}{\mu_1} (K_1 + 2\mu_1) + (9K_1 + 8\mu_1)} = \frac{\varepsilon \alpha_{x,2} \left(\frac{\mu_x}{\mu_1} - 1 \right) + (1 - \varepsilon) \alpha_{x,x} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)}{\varepsilon \alpha_{x,2} \alpha_{1,x} + (1 - \varepsilon) \alpha_{x,x} \alpha_{1,2}} \quad (14)$$

여기서, ϕ 는 산란체의 체적율(volume concentration)이다.

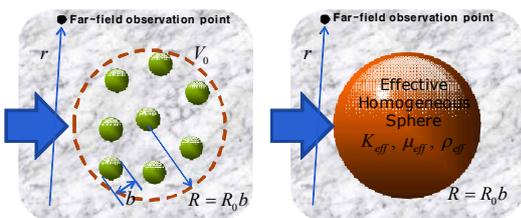


그림 2. 다중산란체의 유효매질이론 개념도

2.3 수치 예제

음향산란효과를 고려한 유효매질이론을 적용하여 복합 점탄성 재료를 균질의 유효매질로 간주하고 균질 매질로 구성된 다층구조에 대한 음향성능 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 작성된 수치계산 코드 검증을 위하여 두께 10mm의 폴리우레탄에 유리강화 미세기공 (microsphere) 형태의 발포제(Expancel®)를 17% 함유한 복합음향재료의 수중 투과특성을 문헌에 발표된 실험 및 수치결과와 비교하였다(그림 3). 그림 4는 발포제의 체적율에 따른 수중 투과특성변화를 나타내었다.

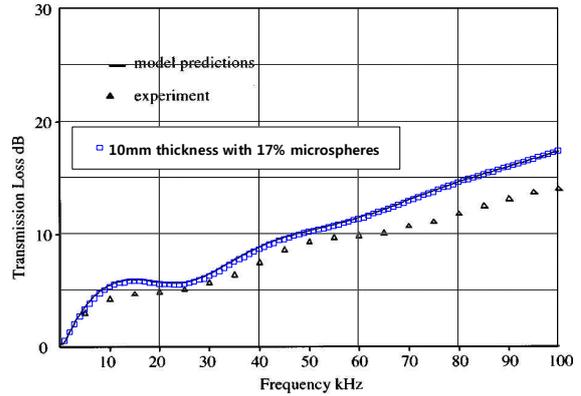


그림 3. 10mm, 17% 발포제 함유 복합음향재료 수중투과특성 (문헌비교)

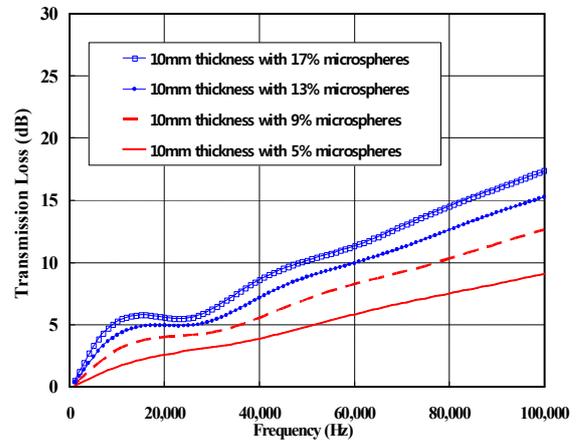


그림 4. 발포제 체적율에 따른 복합음향재료 수중투과특성

3. 결 론

본 연구에서는 균일한 크기의 구형 첨가제를 갖는 복합 점탄성 재료의 수중 음향성능 해석을 위하여 첨가제의 음향 산란효과를 고려한 유효매질이론에 대하여 살펴보았으며 향후 수중음향재료의 설계/개발과정에 효과적으로 활용될 것으로 판단된다.