

수중음향센서의 소음차단을 위한 다층구조 설계 최적화에 대한 연구

Study on Design Optimization of a Planar Multi-layer Structure for Noise Reduction of Underwater Acoustic Sensors

김강천, 김성희*, 김준곤, 길현권†, 홍석윤*, 송지훈**, 권현웅*, 서영수***, 전재진***

(G.-C. Kim, S.-H. Kim*, J.-K. Kim, H.-G. Kil,
S.-Y. Hong*, J.-H. Song**, H.-W. Gwon*, Y.-S. Seo***, and J.-J. Jeon***)

수원대학교 기계공학과, *서울대학교 조선해양공학과, **전남대학교 조선해양공학과, ***국방과학연구소
(접수일자: 2013년 5월 6일; 수정일자: 2013년 6월 11일; 채택일자: 2013년 6월 20일)

초 록: 본 논문은 수중함에 부착되는 소나(sonar)에서 소음차단을 위하여 일반적으로 사용되는 다층구조의 설계 최적화를 수행하였다. 설계 목표로서는 자함 자체 기계가진 진동으로 인하여 음향센서에 유기되는 음압이 낮도록, 그리고 외부 표적 함정으로부터 방사되어오는 음에 기인한 소나의 수신 음압이 운용주파수 대역에서 높고 고른 음압을 갖도록 하는 두 가지 상반된 설계 목표를 고려하였다. 설계 변수로서는 다층구조 각층의 재료 물성치 선택에 따른 이산 변수와 각층의 두께 변수인 연속변수를 함께 고려하여, 각 변수의 최적화 과정에 따른 영향도를 분석하였고, 최적화 방법으로서 진화알고리즘을 적용하였다. 또한 최적화 과정으로서 두 가지 목표를 각각 고려하는 경우와 동시에 두 가지 복합적인 목표를 고려하는 경우에 대한 설계 최적화를 수행하여, 각 경우에 대한 설계 목표치의 최대화 정도를 분석하였다.

핵심용어: 소나, 다층구조, 소음차단, 설계 최적화, 진화알고리즘

ABSTRACT: In this paper, the optimization has been performed to design a multi-layer structure that is used as a structure for noise reduction of acoustic sonar sensors in underwater vehicles. Two design goals are considered to reduce self-noise from own machineries and to enhance acoustic signals detected from outside. Both distinct and continuous design parameters have been used such as selection of material properties of each layer and thickness of each layer, respectively. The sensitivity of design parameters has been analyzed and the evolutionary algorithm has been implemented for design optimization. For design optimization process, each of the design goals and the two combined design goals have been considered to analyze the achievement of those design goals.

Keywords: Sonar, Multi-layer, Noise reduction, Design optimization, Evolutionary algorithm

PACS numbers: 43.40.Jx

1. 서 론

수중함의 선측에 부착되는 소나는 적함에서 발생하는 추진기, 발전기 등의 소음인 저주파수 대역의 신호를 탐지하는 수동 센서이다. 해당 소나는 선체에 부착이 되므로 자함의 기계류 가진 진동 소음으

로 인하여 센서에 유기되는 압력이 운용주파수 대역에서 낮도록 소음차단구조를 설계하여야 한다. 또한 소나의 수신 성능, 즉 표적 함정의 기계류의 진동으로 인하여 방사되는 음파를 탐지하기 위한 성능을 높이기 위해서는, 소나의 수신 음압이 운용주파수 대역에서 높고 고른 음압을 갖도록 해당 구조를 설계하여야 한다.

소나 설계를 위한 해석 모델로서는 무한 평판으로 이루어진 다층 배열 구조가 주로 사용되어져 왔으

†Corresponding author: Hyun-Gwon Kil (hgkil@suwon.ac.kr)
Department of Mechanical Engineering, San 2-2 Wau-ri,
Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do 445-743 University
of Suwon, Republic of Korea
(Tel: 82-31-220-2298, Fax: 82-31-220-2494)

며,^[1] 이러한 연구를 통하여 다층 구조물에서 기계 가진 진동의 영향과 외부 음파에 의한 음향가진의 영향을 해석하여 왔다. 그러나 이러한 다층구조를 이용하여 소나를 실질적으로 설계하기 위해서는, 자체 기계가진 진동 영향의 저감과 음파 탐지 성능 향상의 두 가지 상반된 복합적인 설계 목표를 동시에 달성하기 위한 최적화 설계 방법의 적용이 요구되어진다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되어지는 소나의 다층구조의 설계 최적화를 수행하였다. 설계 변수로서는 다층구조 각층의 재료 물성치 선택에 따른 이산 변수와 각 층의 두께 변수인 연속변수를 함께 고려하여, 각 변수의 최적화 과정에 따른 민감도를 분석하였고, 최적화 방법으로는 진화알고리즘^[7,8]을 적용하였다. 또한 최적화 과정으로서는 두 가지 설계 목표를 각각 고려하는 경우와 동시에 두 가지 복합적인 설계 목표를 고려하는 경우에 대한 설계 최적화를 수행하여, 각 경우에 대한 설계 목표치의 최대화 정도를 분석하였다.

II. 다층 구조의 동적 해석

2.1 다층 구조 모델

본 연구 대상 소나는 수중함의 선측에 길이 방향으로 부착되는 배열 소나이므로, Fig. 1과 같이 무한 평판 형태의 층들로 이루어지는 구조로 모델링할 수 있다.^[1] 기본적인 다층 배열로서는 강철로 이루어진 수상함 선체에 부착되는 3가지 배열로서 흡음층(layer 1), 차음층(layer 2), 제진층(layer 3)을 고려할 수

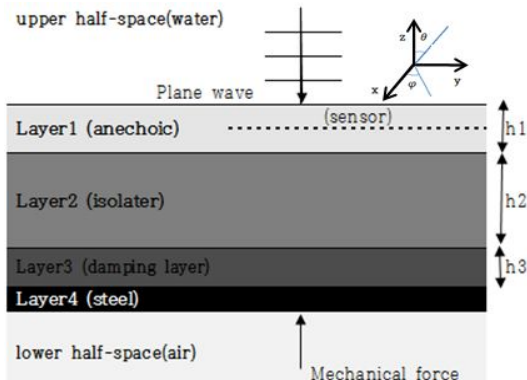


Fig. 1. Multi-layer (consideration of mechanical and acoustic excitation).

있다. 이 경우 선체는 수중함 내부의 공기에 접하게 되며, 소나의 바깥 면인 흡음층의 외측 표면은 물과 접하게 된다. 그리고 가진력은 선체 안쪽으로부터 수직 방향으로 작용하는 점가진력과 다층구조 위 무한유체영역으로부터 수직으로 입사하는 평면파에 의한 가진을 고려한다.

2.2 동적 해석

Fig. 1과 같은 다층 구조에 대한 동적 해석에 대해서는 Skelton의 해석 방법^[1]을 적용할 수 있다. 다층 구조는 무한다층평판으로 가정하며, 다층 구조 위 아래 반무한 영역은 유체층으로 구성된다. 이러한 다층 구조에서 각 층의 상부와 하부의 경계면에서 동강렬 행렬과 변위 및 힘의 관계식을 구할 수 있는데, 이 경우 각 층의 상부와 하부 경계면에서 직교좌표계 세 방향에 대해 변위와 응력 또는 변위와 압력의 연속 조건을 이용하게 된다. 이 경우 주어진 각주파수 ω 에서 해당 물리량 $f(x, y, z)$ (압력, 변위 및 응력)에 대한 Fourier 변환 스펙트럼 $F(\alpha, \beta, z)$ 로 식(1)과 같이 고려한다.

$$f(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} F(\alpha, \beta, z) e^{i\alpha x + i\beta y} d\alpha d\beta. \quad (1)$$

유체층 모델

다층구조와 위쪽으로 접해 있는 무한유체 영역(Fig. 2), 즉 $z \geq h$ 영역에서 파동방정식의 스펙트럼 압력 p 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$p(\alpha, \beta, z) = A_1 \exp(i\gamma z) + A_2 \exp(-i\gamma z). \quad (2)$$

여기서, $\gamma = \sqrt{(k^2 - \alpha^2 - \beta^2)}$ 이고, $k = \omega/c$ 는 파수

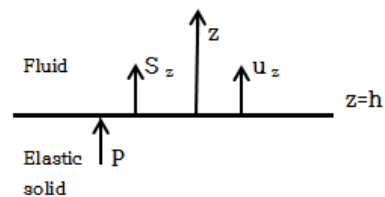


Fig. 2. Semi-infinite fluid layer model.

그리고 c 는 음속이다. 스펙트럼 압력 $p(\alpha, \beta, z)$ 와 경계의 수직 변위 $u_z(\alpha, \beta, z)$ 는 다음의 관계가 있다.

$$\frac{\partial p(\alpha, \beta, z)}{\partial z} = \rho \omega^2 u_z(\alpha, \beta, z), \quad (3)$$

경계면 $z = h$ 와 $z = 0$ 에서의 압력과 수직 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} p(\alpha, \beta, h) \\ p(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp(i\gamma h) & \exp(-i\gamma h) \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \left(\frac{i\gamma}{\rho \omega^2} \right) \begin{pmatrix} \exp(i\gamma h) & -\exp(-i\gamma h) \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

식(4)과 (5)에서 미지수 A_1, A_2 를 소거하면 동강성 행렬방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서

$$[D(\alpha, \beta)] = \begin{pmatrix} \exp(i\gamma h) & \exp(-i\gamma h) \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \times \left(\frac{\rho \omega^2}{i\gamma} \right) \begin{pmatrix} \exp(i\gamma h) & -\exp(-i\gamma h) \\ 1 & -1 \end{pmatrix}^{-1}.$$

이때, 스펙트럼 표면 응력 S_z 는 각 경계면에서 $S_z(\alpha, \beta, h) = -p(\alpha, \beta, h)$ 와 $S_z(\alpha, \beta, 0) = p(\alpha, \beta, 0)$ 로 고려된다.

탄성층 모델

등방성 탄성층의 동적 특성 또한 동강성 행렬로 나타낼 수 있으며, 이를 구하기 위하여 Fig. 3과 같은 기본적인 탄성층 모델을 고려한다. 탄성층의 변위 벡터 \mathbf{u} 와 압력벡터 \mathbf{P} 는 종파와 횡파에 의한 기여도의 합성으로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.^[1]

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

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

여기서 F, G 그리고 H 는 스칼라 포텐셜이다. 위의 조건을 만족하는 탄성체에서의 선형 변위 방정식은 다음과 같이 표현된다.^[1]

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

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

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

여기서 $k_l = \omega/c_l, k_s = \omega/c_s$ 은 각각 종파와 횡파의 속도 c_l 과 c_s 로 표현되는 해당파의 파수를 나타낸다. 이 경우 위 방정식들의 Fourier 변환을 고려한 스펙트럼 해는 다음과 같은 형태를 갖는다.

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

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

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

여기서 γ_l, γ_s 는 종파와 전단파와 관련된 z 방향 파수 성분으로 다음과 같이 표현된다.

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

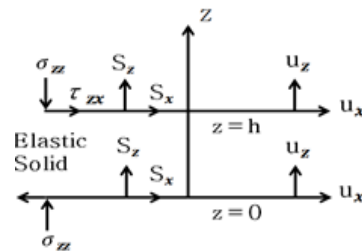


Fig. 3. Isotropic elastic layer model.

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

변위벡터 식(7)은 다음과 같은 식(17)-(19)로 표현된다. 그리고

$$u_x(\alpha, \beta, z) = i\alpha F(\alpha, \beta, z) + i\beta G(\alpha, \beta, z) - i\alpha \frac{\partial H(\alpha, \beta, z)}{\partial z}, \quad (17)$$

$$u_y(\alpha, \beta, z) = i\beta F(\alpha, \beta, z) - i\alpha G(\alpha, \beta, z) - i\beta \frac{\partial H(\alpha, \beta, z)}{\partial z}, \quad (18)$$

$$u_z(\alpha, \beta, z) = \frac{\partial F(\alpha, \beta, z)}{\partial z} - \alpha^2 H(\alpha, \beta, z) - \beta^2 H(\alpha, \beta, z). \quad (19)$$

위 식은 식(12)-(14)에 의해 다음과 같이 스펙트럼 변위식으로 표현된다.

$$u_x(\alpha, \beta, z) = i\alpha A_1 \exp(i\gamma_l z) + i\alpha A_2 \exp(-i\gamma_l z) + i\beta A_3 \exp(i\gamma_s z) + i\beta A_4 \exp(-i\gamma_s z) + \alpha \gamma_s A_5 \exp(i\gamma_s z) - \alpha \gamma_s A_6 \exp(-i\gamma_s z), \quad (20)$$

$$u_y(\alpha, \beta, z) = i\beta A_1 \exp(i\gamma_l z) + i\beta A_2 \exp(-i\gamma_l z) - i\alpha A_3 \exp(i\gamma_s z) - i\alpha A_4 \exp(-i\gamma_s z) + \beta \gamma_s A_5 \exp(i\gamma_s z) - \beta \gamma_s A_6 \exp(-i\gamma_s z), \quad (21)$$

$$u_z(\alpha, \beta, z) = i\gamma_l A_1 \exp(i\gamma_l z) - i\gamma_l A_2 \exp(-i\gamma_l z) - \alpha^2 A_5 \exp(i\gamma_s z) - \alpha^2 A_6 \exp(-i\gamma_s z) - \beta^2 A_5 \exp(i\gamma_s z) - \beta^2 A_6 \exp(-i\gamma_s z). \quad (22)$$

그리고 다음과 같이 표현되는 응력-변위 관계식에

$$\tau_{zx}(x, y, z) = \mu \left(\frac{\partial u_z(x, y, z)}{\partial x} + \frac{\partial u_x(x, y, z)}{\partial z} \right), \quad (23)$$

$$\tau_{zy}(x, y, z) = \mu \left(\frac{\partial u_z(x, y, z)}{\partial y} + \frac{\partial u_y(x, y, z)}{\partial z} \right), \quad (24)$$

$$\sigma_{zz}(x, y, z) = \lambda \nabla \cdot \mathbf{u}(x, y, z) + 2\mu \frac{\partial u_z(x, y, z)}{\partial z}. \quad (25)$$

위와 같은 방법으로 식(12)-(14)를 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_{zx}(\alpha, \beta, z) = & -2\mu\alpha\gamma_l A_1 \exp(i\gamma_l z) \\ & + 2\mu\alpha\gamma_l A_2 \exp(-i\gamma_l z) \\ & - \mu\beta\gamma_s A_3 \exp(i\gamma_s z) + \mu\beta\gamma_s A_4 \exp(-i\gamma_s z) \\ & + i\mu\alpha(k_s^2 - \alpha^2 - \beta^2) A_5 \exp(i\gamma_s z) \\ & + i\mu\alpha(k_s^2 - \alpha^2 - \beta^2) A_6 \exp(-i\gamma_s z), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \tau_{zy}(\alpha, \beta, z) = & -2\mu\beta\gamma_l A_1 \exp(i\gamma_l z) \\ & + 2\mu\beta\gamma_l A_2 \exp(-i\gamma_l z) \\ & + \mu\alpha\gamma_s A_3 \exp(i\gamma_s z) - \mu\alpha\gamma_s A_4 \exp(-i\gamma_s z) \\ & + i\mu\beta(k_s^2 - \alpha^2 - \beta^2) A_5 \exp(i\gamma_s z) \\ & + i\mu\beta(k_s^2 - \alpha^2 - \beta^2) A_6 \exp(-i\gamma_s z), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}(\alpha, \beta, z) = & -(\lambda k_l^2 + 2\mu\gamma_l^2) A_1 \exp(i\gamma_l z) \\ & - (\lambda k_l^2 + 2\mu\gamma_l^2) A_2 \exp(-i\gamma_l z) \\ & - 2i\mu\gamma_s(\alpha^2 + \beta^2) A_5 \exp(i\gamma_s z) \\ & + 2i\mu\gamma_s(\alpha^2 + \beta^2) A_6 \exp(-i\gamma_s z). \end{aligned} \quad (28)$$

변위에 대한 식(20)-(22)과 응력에 대한 식(26)-(28)에서 공통된 미지수 $A_1 \sim A_6$ 을 소거하여 Fig. 3의 모델의 윗면과 아랫면에 대하여 적용하면, 다음과 같은 강성행렬, 변위 행렬 그리고 가진 행렬로 구성되는 관계식을 구할 수 있다.

$$[D(\alpha, \beta)] \begin{pmatrix} u_x(\alpha, \beta, h) \\ u_y(\alpha, \beta, h) \\ u_z(\alpha, \beta, h) \\ u_x(\alpha, \beta, 0) \\ u_y(\alpha, \beta, 0) \\ u_z(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_{zx}(\alpha, \beta, h) \\ \tau_{zy}(\alpha, \beta, h) \\ \sigma_{zz}(\alpha, \beta, h) \\ -\tau_{zx}(\alpha, \beta, 0) \\ -\tau_{zy}(\alpha, \beta, 0) \\ -\sigma_{zz}(\alpha, \beta, 0) \end{pmatrix}. \quad (29)$$

다층구조 종합모델

Fig. 1과 같이 아래쪽 영역은 공기에 접하며, 위쪽 영역에서 물과 접하는 $M(=4)$ 개로 이루어진 다층 구조 모델의 경우, 각 층에서 유도된 식(29)를 조합하면 다음과 같은 동적 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$[K(\alpha, \beta)] \{u(\alpha, \beta)\} = \{S(\alpha, \beta)\}. \quad (30)$$

여기서 $[K]$ 는 $3(M+1) \times 3(M+1)$ 강성행렬, $\{u\}$ 는

$(M+1)$ 경계면에서의 변위로 표현되는 $3(M+1)$ 크기의 변위 벡터 그리고 $\{S\}$ 는 $3(M+1)$ 크기의 스펙트럼 가진력 벡터이다. 다층구조에 기계적 가진 혹은 외부 음향가진이 가해지는 경우 스펙트럼 가진력 벡터가 결정되게 되며, 식(30)로부터 스펙트럼 변위 벡터를 구할 수 있으며, 음향센서위치에 작용하는 응력 혹은 압력을 식(28)에 의하여 구할 수 있다.

기계가진

수중함 내부의 공기층과 접하는 다층구조의 아랫면의 특정 지점 $(x = x_0, y = y_0)$ 에 수직방향 점가진력 $F_z \delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ 이 가해지는 경우, 가진력 벡터는 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$\{S(\alpha, \beta)\}^T = \{0, 0, \dots, F_z e^{-i(\alpha x_0 + \beta y_0)}\}. \quad (31)$$

그러므로 식(31)의 가진력 벡터를 동적 지배방정식 식(30)에 대입함으로써, 변위 해 $\{u\}$ 를 구할 수 있다. 그러므로 음향 센서가 위치하는 $(z = z_0)$ 지점에서 센서에 작용하는 압력은 식(28)의 수직 응력으로 구할 수 있다.

음향가진

Fig. 1과 같이 평면파가 외부에서 다층 구조로 크기 A , 각도 (θ_i, ϕ_i) 로 입사하는 경우, 다층구조의 위와 아래 무한 유체영역에서 음압은 다음과 같이 표현된다.

$$p_i(x, y, z) = p_i(x, y, z) + p_r(x, y, z) + p_{tc}(x, y, z), \quad (32)$$

$$p_b(x, y, z) = p_{bc}(x, y, z). \quad (33)$$

여기서

$$p_i(x, y, z) = A \exp(-i\alpha_i x - i\beta_i y - i\gamma_i z), \quad (34)$$

$$p_r(x, y, z) = A \exp(-i\alpha_i x - i\beta_i y + i\gamma_i z), \quad (35)$$

$$p_{tc}(x, y, z) = (R-1)A \exp(-i\alpha_i x - i\beta_i y + i\gamma_i z), \quad (36)$$

$$p_{bc}(x, y, z) = TA \exp(-i\alpha_i x - i\beta_i y - i\gamma_b(z + h_i)). \quad (37)$$

각각은 입사파, 반사파 그리고 다층 모델의 운동에 의하여 위와 아래 무한 음향공간에 발생하는 음압, R 과 T 는 각각 반사계수와 투과계수를 나타낸다. 여기서 좌표계를 고려하여 다층 모델의 맨 위 경계층의 수직 좌표 값을 $z = h_i$, 아래경계층을 $z = 0$ 라고 고려한다. 그리고 해당하는 파수들은 다음과 같다.

$$\alpha_i = k_i \sin\theta_i \cos\phi_i, \quad (38)$$

$$\beta_i = k_i \sin\theta_i \sin\phi_i, \quad (39)$$

$$\gamma_i = k_i \cos\theta_i, \quad (40)$$

$$\gamma_i = +\sqrt{(k_i^2 - \alpha_i^2 - \beta_i^2)} = k_i \cos\theta_i, \quad (41)$$

$$\gamma_b = +\sqrt{(k_b^2 - \alpha_i^2 - \beta_i^2)} = \sqrt{(k_b^2 - k_i^2 \sin^2\theta_i)}. \quad (42)$$

여기서 $k_i = \omega/c_i$, $k_b = \omega/c_b$ 는 위쪽 반무한 유체층과 아래 반무한 유체층에서의 파수를 나타낸다. 가진력은 입사파와 반사파의 영향으로 다층구조 맨 위 경계면에 작용되며, 식(30)의 가진력 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\{S(\alpha, \beta)\} = \{0, 0, -2A, \dots, 0, 0\}^T. \quad (43)$$

III. 다층 구조의 설계 최적화

3.1 다층 구조 모델의 설계 문제 정립

설계 목표

수중함의 소나에 사용되는 다층구조 설계를 위해서는 다음 두 가지 사항을 고려하여야 한다. 첫째, 자

합 자체의 기계가진 진동이 소나의 음향 센서로 유기되지 않도록 소음차단구조를 통해 운용주파수 대역에서 낮은 음압을 갖도록 설계되어야 한다. 둘째, 표적함정의 기계류 진동으로 인하여 방사되는 음파를 탐지하기 위한 성능을 높이기 위해서는, 외부 음파의 음향가진에 의한 소나의 수신 음압이 운용주파수 대역에서 높고 고른 음압을 갖도록 설계되어야 한다. 이러한 사항들을 고려한다면 센서 위치에서 내부 기계가진 진동에 의한 음압은 최소화 시키고, 외부 음파의 음향가진에 의한 음압은 최대화 시켜야 되는, 상반된 두 가지 설계 목표를 고려하여야 한다.

설계 변수

다층 구조 모델로서는 다층구조의 각 특성에 따라 Fig. 1과 같이 흡음층(layer 1), 차음층(layer 2), 제진층(layer 3), 선체로 구성된 4가지 층을 기본으로 구성할 수 있다. 이러한 다층 구조에서 위의 두 가지 복합적인 설계 목표를 달성을 위한 설계 최적화 과정의 설계 변수로서는 선체를 제외한 3가지 층에 대한 2~3가지 재료 선택(Table 1)과 관련된 물성치 변수, 즉 이산 변수와 각 층의 두께 변수, 즉 연속변수로 총 6가지의 변수를 고려하였다. 그리고 각 층의 두께 변수에 대해서는, 선체를 제외한 다층 구조 전체 두께는 0.245 m 로 고정 시키고 그리고 각 층의 두께 변화 폭은 초기 두께의 1/2배에서 2배까지로 고려하였다.

설계 문제 정식화

소나의 소음 차단 구조를 설계하기 위해서는, 음향센서 위치에서 내부 기계가진 진동에 의한 음압의 최소화과 외부 음파의 음향가진에 의한 음압의 최대화란 두 가지 설계 목표를 고려하여야 한다. 그러므

로 두 가지 설계 목표를 동시에 고려한 최적화에 앞서서 각각의 설계목표를 고려하는 경우 설계 목표치의 최적화 정도를 파악할 필요가 있다. 이러한 점을 고려하여 다음과 같은 세 가지 최적화 설계 문제들을 고려한다. 이들은 음향센서 위치에서 음압을 고려할 때, 내부 기계가진 진동에 의한 음압의 최소화 설계문제 (I), 외부 음향가진에 의한 음압의 최대화 설계문제 (II) 그리고 두 가지 목표를 동시에 고려하는 최적화 설계문제 (III)이다.

설계 목적 함수로서는 두 가지를 고려하게 되는데, 다층 구조에서 음향센서가 배치되는 지점(물과 접한 표면에서 0.02 m 떨어진 지점)에서 주파수 대역에 대한 음압레벨의 평균값으로, 내부 기계가진 진동에 의한 음압레벨평균값 W_1 과 외부 음향가진에 의한 음압레벨 평균값 W_2 으로 다음과 같이 표현된다.

$$W_1 = \sum_{j=1}^N PL_{1j} / N, \quad (44)$$

$$W_2 = \sum_{j=1}^N PL_{2j} / N. \quad (45)$$

여기서 PL_{1i} 과 PL_{2i} 는 N 개의 주파수 간격 Δf 으로 나뉘는 i 번째 주파수에서의 해당 음압레벨 값을 나타낸다. 여기서 목적함수로서 주파수 대역 압력의 제곱 평균값 대신에 음향레벨(dB)의 평균값을 고려한 이유는 다음과 같다. 기계가진으로 인한 음압은 저주파수와 고주파수에서 음압 값의 차이가 30 dB 이상 나타나게 되므로, 압력 제곱 평균값을 고려하면, 저주파의 영향만 포함되게 되기 때문에, 가능한 주파수 대역 전 범위에 대한 영향을 포함하기 위하여 음향레벨(dB)의 평균값을 고려하였다. 이러한 주파수 대역에 따른 음향레벨(dB) 평균값을 취함은 주파수에 걸쳐 균등한 weighting을 고려한 경우에 해당하며, 해당 수증합의 기계가진 진동과 외부 음향가진의 주파수 특성 경향을 알고 있는 경우는, 이를 고려하여 주파수별 적절한 weighting을 취할 수 있다. 그리고 평균값을 고려하는 주파수 대역의 범위를 결정하기 위하여 다음 사항을 고려하였다. 다층구조인

Table 1. Material properties of each layer.

Layer No.	Material type	Density (kg/m^3)	Young's modulus (Pa)	Poisson ratio	Loss factor	Sound speed (m/s)	Initial thickness (m)
1	1	1600	6.4×10^7	0.48	0.54	1.6	0.085
	2	1500	3.9×10^7	0.48	0.520	1	
	3	1100	2.0×10^8	0.48	0.200	5.1	
2	1	400	5.0×10^8	0.20	0.100	12.8	0.140
	2	800	2.6×10^6	0.46	0.100	0.1	
3	1	1100	2.0×10^8	0.40	0.200	50.6	0.020
	2	800	2.6×10^7	0.46	0.470	0.7	

경우 무한다층평판으로 가정하므로, 두께에 기인한 공진현상이 저주파수 영역에서 주로 나타나고, 이로 인하여 해당 주파수 대역에서의 음압 변동이 심하게 나타나게 된다. 저주파수 대역에서의 이러한 영향을 줄이기 위하여 1600 ~ 5000 Hz 주파수 대역으로 택하였다.

본 연구에서 사용되는 최적화 설계 문제는 다음과 같이 3가지 설계 문제로 정식화된다. 첫 번째 설계문제 (I)은 내부 기계가진 진동에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화 설계문제로 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } x_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \\ & \text{Minimize } W_1 \\ & \text{subject to } h_1 + h_2 + h_3 = 0.245 \text{ m} \\ & 0.5h_{oj} \leq h_j \leq 2h_{oj} (j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (46)$$

두 번째 설계문제 (II)는 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최대화 설계문제로 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } x_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \\ & \text{Maximize } W_2 \\ & \text{subject to } h_1 + h_2 + h_3 = 0.245 \text{ m} \\ & 0.5h_{oj} \leq h_j \leq 2h_{oj} (j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (47)$$

세 번째 설계문제 (III)은 두 가지 설계 목표를 동시에 고려하는 최적화 설계문제로 다음과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } x_i \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \\ & \text{Minimize } W_1 \text{ and Maximize } W_2 \\ & \text{subject to } h_1 + h_2 + h_3 = 0.245 \text{ m} \\ & 0.5h_{oj} \leq h_j \leq 2h_{oj} (j = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (48)$$

여기서 x_i 는 설계변수를 의미하여, 각 층의 재료 물성치 종류인 3개의 이산 변수와 각 층의 두께인 3개의 연속변수에 해당한다. 그리고 h_1, h_2, h_3 는 각 층의 두께를 나타내며, h_{oj} 는 j 번째 층의 초기 두께 값을 의미한다.

3.2 설계 최적화

해석 절차

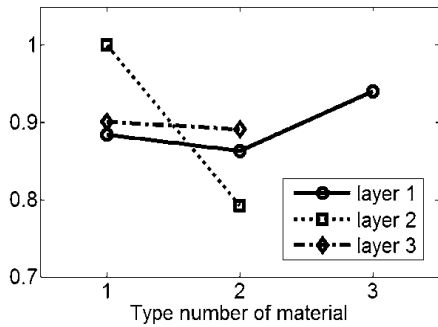
소나의 다층구조에서 주어진 주파수에서 각 층의 재료 물성치와 두께가 주어지는 경우, 음향센서 위치에서 내부 기계가진에 의한 음압과 외부 음향가진에 의한 음압을 계산하기 위한 해석프로그램은 II장의 해석 내용을 MATLAB^[9]을 사용하여 작성하였다. 또한 세 가지 최적화 설계문제의 해를 구하기 위한 최적화 알고리즘을 적용하기 위해서는 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO^[10]를 활용함으로써, 해석 프로그램과 연동화를 이루어 최적화를 수행하였다.

설계변수의 영향 분석

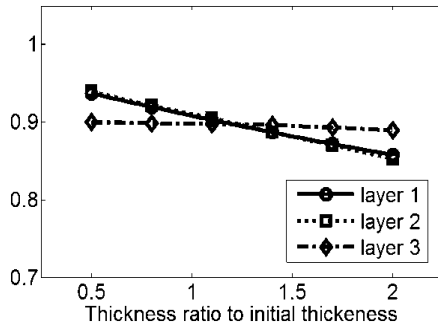
설계변수인 이산변수와 연속변수가 설계 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 PIANO^[9]에서 제공되는 실험계획법을 적용하였다. 실험계획법으로서는 각 변수들이 취할 수 있는 경우수인 수준수를 모두 고려하여 조합을 만드는 완전요인 배치법 (full factorial design) 기법으로 서로 다른 수준 수에 활용할 수 있는 방법인 Mixed Level Factorial^[10] 방법을 사용하였다.

다층 구조 설계 문제에 있어서 이산변수로는 3개의 층이 각각 3, 2, 2가지의 물성치를 지니게 되어 3수준 1개와 2수준 2개를 고려하게 된다. 또한 각 층의 두께는 초기 값으로부터 상한 값과 하한값에서 임의로 변화하는 연속변수가 되므로 각 층의 두께 변수에 대하여 6수준을 고려하였다. 모든 수준을 고려한 경우의 수 조합은 $3^1 2^2 6^3$ 이 되어 2592가지의 조합이 만들어 지게 되며, 각 경우에 대하여 해석을 수행한 후 해당 설계변수의 목적함수 결과 값에 끼치는 상대적 영향도를 나타내는 평균분석 ANOM(Analysis of Means) plot^[10,11]을 통하여 설계변수들의 영향을 분석하였다.

Fig. 4, 5, 6은 설계 목표에 따른 세 가지 최적화 설계 문제에 있어서 각 변수의 영향도를 나타내는 ANOM plot을 보여준다. ANOM plot에서 해당 그래프의 기울기 혹은 변화의 정도가 클수록 영향이 큰 설계 인자임을 나타낸다. 설계 문제 (I), 즉 내부 기계가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화 문제인

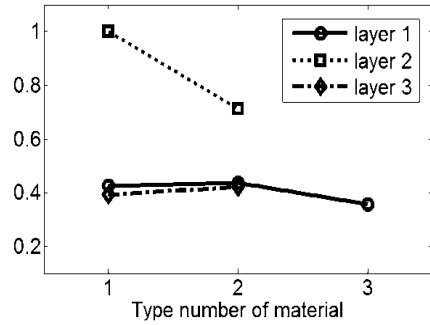


(a)

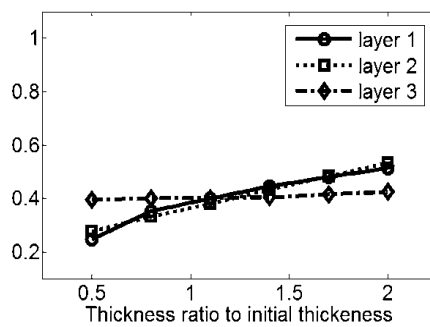


(b)

Fig. 4. ANOM plot showing sensitivity of design parameters((a): material property of each layer, (b): thickness of each layer) in Design Problem (I).

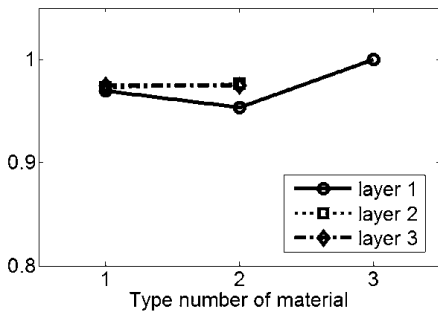


(a)

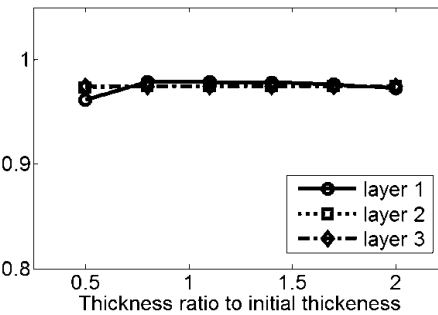


(b)

Fig. 6. ANOM plot showing sensitivity of design parameters((a): material property of each layer, (b): thickness of each layer) in Design Problem (III).



(a)



(b)

Fig. 5. ANOM plot showing sensitivity of design parameters((a): material property of each layer, (b): thickness of each layer) in Design Problem (II).

경우(Fig. 4), layer 2인 차음층의 물성치 변수와 layer 1인 흡음층과 차음층의 두께 변수가 결과에 민감하게 영향을 끼침을 알 수 있다. 설계 문제 (II), 즉 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최대화 문제의 경우(Fig. 5), layer 1인 흡음층의 물성치 및 두께 변화가 상대적으로 영향이 조금 크을 알 수 있다. 두 가지 설계 목표를 모두 고려하는 설계문제 (III)의 경우(Fig. 6), 변수들의 상대적인 영향별 순위는 설계 문제 (I)의 경우와 유사하게 나타나며, 차음층의 물성치 변수와 흡음층과 차음층의 두께 변수가 결과에 민감하게 영향을 끼침을 알 수 있다.

최적화 알고리즘

본 연구에서는 다층 구조의 설계 최적화를 위하여 PIANO[9]에서 제공하는 진화알고리즘(Evolutionary Algorithm; EA^[7,8])기법을 활용하였다. 진화알고리즘은 전역 최적화 기법으로서 생물의 진화 과정을 묘사한 유전자들을 가지고 있어서 선택(selection) 및 재조합(recombination), 돌연변이(mutation)등의 과정을

거쳐 전역 해를 탐색하게 된다. 그러므로 다른 최적화 기법에 비하여 전역해를 찾아갈 확률이 높으며, 목적함수 값을 바탕으로 하여 확률적인 방법으로 탐색을 하기 때문에 이산 변수와 연속 변수의 설계 변수를 다룰 수 있다. 하지만 다른 알고리즘에 비하여 목적 함수의 호출, 즉 해석 횟수가 많으므로 해석 모델에 따라 최적설계에 상대적으로 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다.^[8] 그러나 본 연구에서는 해석 시간이 짧은 MATLAB^[9]으로 작성된 해석 모델을 사용하므로, 진화 알고리즘의 단점을 보완할 수 있다. 주어진 설계 변수 값을 이용한 해석 모델의 1회 해석 시간은 약 3초 정도가 소요된다.

IV. 최적화 결과

소나의 소음 차단 구조에 대한 최적화 설계를 위하여, 내부 기계가진 진동에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화 문제(설계문제(I)), 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최대화 문제(설계문제(II)) 그리고 두 가지 목표를 동시에 꾀하는 최적화 문제(설계 문제(III))에 대한 최적화를 수행하여 각각의 설계목표를 고려하는 경우 설계 목표치의 최적화 정도를 분석하였다.

세 가지 설계 문제에 대한 최적화 과정의 결과로서 각 설계문제에 대하여 다층구조의 재료와 각 층의 두께가 결정되며, 결과는 Table 2와 같다. 설계 변수 영향도가 가장 큰(Fig. 4, 5, 6) layer 2인 처음층에 대한 재료 물성치의 경우, 세 가지 설계 문제에 있어서 모두 재료 2번의 물성치가 사용되었다. 재료의 물성치 중에서 해당 재료의 밀도와 음속의 곱으로 표현되는 임피던스를 비교하여 보면, 처음층 재료 2번

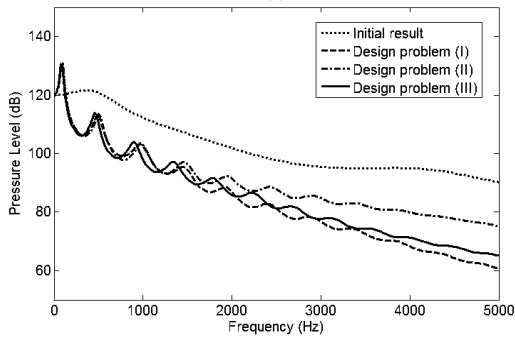
의 임피던스(80 Pas/m)가 처음층 재료 1번의 임피던스(5,120 Pas/m)에 비하여 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이러한 처음층의 작은 임피던스 값은 설계문제(I)에서 채택된 layer 3인 제진층 재료 1번의 임피던스(55,660 Pas/m) 값과 비교될 수 있다. 이러한 결과는 내부 기계가진 진동에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화와 관련된 설계문제(I)과 설계문제(III)에서 처음층과 제진층의 임피던스 차이를 크게 함으로써, 제진층으로부터 전달되는 고체음이 처음층 경계로부터 보다 많이 반사되게 하여 음향센서로 전달되는 고체음을 보다 적게 하려는 경향으로 사료된다. layer 1인 흡음층의 경우 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최대화 설계문제(II)에서 재료 3번 물성치가 사용되고 있다. 흡음층 재료 3번의 임피던스(5,610 Pas/m)는 흡음층 재료 1번의 임피던스(2,560 Pas/m)와 흡음층 재료 2번의 임피던스(1,500 Pas/m)에 비하여 보다 큰 임피던스 값을 갖는다. 그러므로 흡음재 재료 3의 임피던스가 외부 물의 임피던스(1.54×10^6 Pas/m)보다 조금이라도 가까운 값을 갖게 되어, 외부 음파가 물과 흡음층 경계로부터 반사되는 현상이 보다 감소하게 되므로, 보다 많은 양의 음파가 흡음층으로 투과되어 음향센서에 이르게 된다고 파악된다.

Fig. 7은 설계 변수들에 대한 최적화 결과인 Table 2의 데이터를 이용하여 선체 내부 기계가진과 외부 음파의 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압을 계산한 결과를 보여준다. 이 경우 점가진력과 외부 음파의 크기로는 단위 크기를 고려하였다. Fig. 7(a)는 내부 기계 가진에 의한 음향센서 위치에서 주파수에 따른 음압 분포를, 그리고 Fig. 7(b)는 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 주파수에 따른 음압 분포를 보여준다.

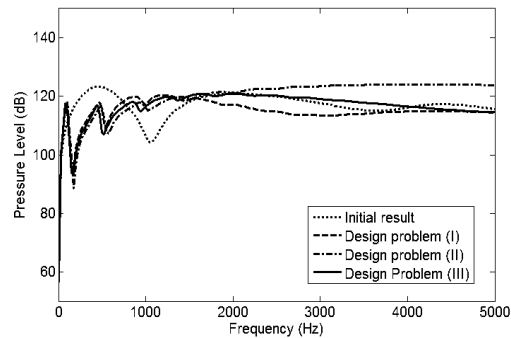
기계가진에 의한 음압 결과의 경우 [Fig. 7(a)], 최적화 설계문제 (I), 즉 기계 가진에 의한 음향센서 위치에서 음압 최소화만을 고려한 결과가 가장 낮은 음압 분포를 나타내고, 설계문제 (III) 과 설계문제 (II)의 결과 그리고 초기 변수 값 적용 결과 순으로 낮은 음압 분포를 나타냄을 알 수 있다. 음압 레벨 평균 값 W_1 의 경우도 설계문제(I), 설계문제(III), 설계문제(II), 초기 변수 값 적용 결과 순으로 74.3 dB, 76.7 dB,

Table 2. Optimization results of parameters.

	Material Type No.			Layer Thickness (m)		
	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 1	Layer 2	Layer 3
Initial Values	1	1	1	0.085	0.140	0.020
Design Problem I	2	2	1	0.103	0.127	0.016
Design Problem II	3	2	2	0.101	0.124	0.021
Design Problem III	1	2	1	0.081	0.137	0.027



(a)



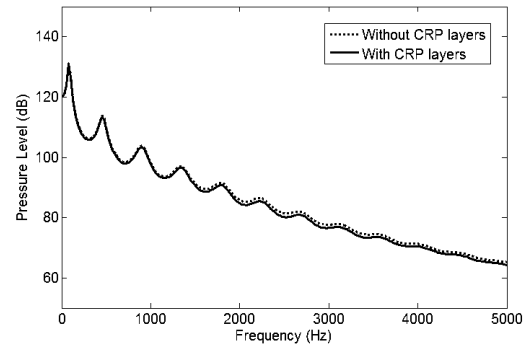
(b)

Fig. 7. Sound pressure distribution at location of acoustic sensors, considering (a) mechanical excitation, (b) acoustic excitation (..... initial result, results of ---- Design problem (I), -.-.- Design problem (II), — Design problem (III)).

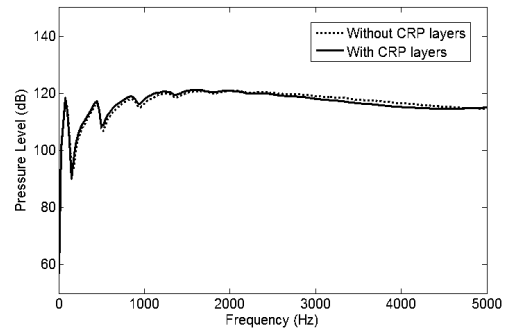
83.3 dB, 96.4 dB를 나타낸다.

음향가진에 의한 음압 결과의 경우 [Fig. 7(b)], 설계문제 (II), 즉 외부 음향가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화만을 고려한 결과가 가장 높은 음압 분포를 나타내고, 약 1600 Hz 이상 주파수 영역에서 비교적 균일한 음압 분포를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 설계문제 (III), 초기 변수 값 적용 결과, 설계문제 (II)의 결과 순으로 낮은 음압 분포를 나타냄을 알 수 있다. 음압 레벨 평균값 W_2 의 경우도 설계문제(II), 설계문제(III), 초기 값 변수 적용 결과, 설계문제(I) 결과 순으로 123.2 dB, 118.1 dB, 117.8 dB, 115.0 dB를 나타낸다.

Fig. 7(a)와 (b)에서 보는 것과 같이 설계문제 (III), 즉 음향센서 위치에서 내부 기계가진에 의한 음압 최소화과 외부 음향가진에 의한 음압 최대화 두 가지 모두 고려한 경우, 각각을 고려한 최적화 값 사이에서 결과를 제공한다. 그리고 설계문제 (III)의 결과는 오



(a)



(b)

Fig. 8. Sound pressure distribution at location of acoustic sensors for case of inserting CRP on top and below isolator layer, considering (a) mechanical excitation, (b) acoustic excitation (results of without CRP layer, — with CRP layer).

히려 내부 기계가진에 의한 음향센서 위치에서의 음압 최소화만을 고려한 설계문제 (I)의 결과에 보다 근접한 결과를 보여줌을 알 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 설계문제 (III)의 최적화과정은 선체 자체진동에 의한 영향 최소화과 음파탐지 성능 최대화의 두 가지 목표를 모두 만족시킬 수는 없다 하더라도, 두 가지의 상반된 설계 목표치를 고려한 실제적인 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 8은 설계문제 (III), 즉 음향센서 위치에서 내부 기계가진에 의한 음압 최소화와 외부 음향가진에 의한 음압 최대화를 모두 고려한 경우의 결과로 얻은 다층구조 배열에 대하여, 차음층 위아래에 구조 보강용으로 CRP(carbonated reinforced plastics)층을 첨가시키는 경우 음압 분포 영향을 보여준다. 이러한 CRP 첨가 영향은 전 주파수 영역에서 음압이 최대 2 dB 정도 낮아지는 변화를 나타내므로, 다층구조의 음향 성능에 거의 영향을 주지 않는 것으로 보여진다.

V. 결 론

본 논문에서는 소나의 소음차단을 위하여 일반적으로 사용되는 다층구조에 대해서, 내부 기계 진동 영향의 저감과 외부 음파 탐지 성능 향상의 두 가지 서로 상반적이고 복합적인 설계 목표를 달성하기 위하여 설계 최적화를 수행하였다. 설계 변수로서는 다층구조 각층의 재료 물성치 선택에 따른 이산 변수와 각 층의 두께 변수인 연속변수를 함께 고려하여, 각 변수의 최적화 과정에 따른 영향도를 분석하였고, 최적화 방법으로는 진화알고리즘을 적용하였다. 또한 최적화 과정으로서는 두 가지 목표를 각각 고려하는 경우와 동시에 복합적인 목표를 고려하는 경우에 대한 설계 최적화를 수행하여, 각 경우에 대한 설계 목표치의 최대화 정도를 분석하였다. 본 연구의 최적화 과정은 소나의 다층 구조 초기 설계 단계에서 내부 기계 진동 저감과 외부 음향 탐지 성능 향상의 두 가지 서로 상반적이고 복합적인 설계 목표를 달성하기 위한 설계 방법으로 사용 가능하리라 사료된다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소 지원으로 수행되었으며, PIDO 툴인 PIANO 소프트웨어는 (주)피도텍에서 제공되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. E. A. Skelton and J. H. James, *Theoretical Acoustics of Underwater Structures* (Imperial College Press, 1977).
2. S. H. Ko and C. H. Sherman, "Flexural Wave Baffling," *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 566-570 (1979).
3. M. A. Gonzalez, "Analysis of a Composite Compliant Baffle", *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1509-1513 (1978).
4. S. H. Ko, S. W. Pyo, and W. J. Seong, *Structure-Borne and Flow Noise Reductions* (Seoul National University Press 2001).
5. Y.-S. Seo, M.-W. Kang, K.-K. Shin, and J.-J. Jeon, "Acoustic Performance Study of FRP Acoustic Window" (in Korean), *Trans. KSNV*, **21**, 890-896 (2011).
6. S.-H. Kim, S.-Y. Hong, J.-H. Song, H.-G. Kil, J.-J. Jeon, and Y.-S. Seo 2, "Acoustical Characteristic Predictions of a Multi-layer System of a Submerged Vehicle Hull Mounted Sonar Simplified to an Infinite Planar Model," *Inter. J. Nav. Archit. Oc. Engng.* **96-111** (2012).
7. T. Black, *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* (Oxford, Uni. Press, 1996).
8. M. J. Jeong, B. H. Dennis, and S. Yoshimura, "Multidimensional clustering interpretation and its application to optimization of coolant passage of a turbine blade," *J. Mech. Design, Trans. ASME*, **127**, 215-221 (2005).
9. *User's Guide* (The MathWorks Inc., 2012).
10. *PIAnO (Process Integration, Automation and Optimization) user's Manual, Ver. 3.5* (PIDOTECH, INC. 2013).
11. P. R. Nelson, P. S. Wludyka, and K. A. F. Copeland, *Analysis of Means: A Graphical Method for Comparing Means, rates and Propotions* (SIAM Press, Phillidalphia, PA, 2005).

저자 약력

▶ 김 강 천(G.-C. Kim)



2011년 2월: 수원대 기계공학과 학사
2011년 3월 ~ 현재: 수원대 기계공학과 석사과정

▶ 김 성 희(S.-H. Kim)



2005년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사
2007년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사
2007년 3월 ~ 현재: 서울대 조선해양공학과 박사과정

▶ 김 준 곤(J.-K. Kim)



2012년 2월: 수원대 기계공학과 학사
2012년 3월 ~ 현재: 수원대 기계공학과 석사과정

▶ 서 영 수(Y.-S. Seo)



1999년 2월: 부산대 공대 기계과 학사
2001년 2월: 부산대 기계과 석사
2005년 8월: 부산대 기계과 박사
2006년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원

▶ 길 현 권(H.-G. Kil)



1980년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사
1985년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사
1987년 8월: 삼성중공업 해양기본설계부
1989년 5월: Georgia Tech 기계공학과 석사
1995년 5월: Georgia Tech 기계공학과 박사
1996년 2월: Georgia Tech Post Doc.
1996년 3월 ~ 현재: 수원대 기계공학과 교수

▶ 전 재 진(J.-J. Jeon)



1982년 2월: 연세대 공대 기계과 학사
1984년 2월: KAIST 기계과 석사
1987년 8월: KAIST 기계과 박사
1987년 11월 ~ 현재: 국방과학연구소 수석 연구원

▶ 홍 석 윤(S.-Y. Hong)



1982년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사
1992년 12월: 펜실바니아주립대학교 음향학과 박사
1997년 2월: 고등기술연구원 자동차기술 연구실 책임연구원
1997년 3월 ~ 현재: 서울대 조선해양공학과 교수

▶ 송 지 훈(J.-H. Song)



2001년 2월: 충남대 선박해양공학과 학사
2003년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사
2007년 8월: 서울대 조선해양공학과 박사
2009년 9월 ~ 현재: 전남대 해양기술학부 교수

▶ 권 현 웅(H.-W. Gwon)



2002년 2월: 서울대 조선해양공학과 학사
2004년 2월: 서울대 조선해양공학과 석사
2009년 8월: 서울대 조선해양공학과 박사
2011년 3월 ~ 현재: 서울대 해양시스템공학연구소 선임연구원