

수중 음향 트랜스듀서의 송수신 감도를 고려한 1-3형 압전복합체의 구조 최적화

이재영¹, 표성훈², 노용래^{2,a}

¹ 경북대학교 센서 및 디스플레이공학과

² 경북대학교 기계공학과

Optimization of 1-3 Piezoelectric Composites Considering Transmitting and Receiving Sensitivity of Underwater Acoustic Transducers

Jaeyoung Lee¹, Seonghun Pyo², and Yongrae Roh^{2,a}

¹ Department of Sensor and Display Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-010, Korea

² Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-010, Korea

(Received October 11, 2013; Accepted October 16, 2013)

Abstract: The optimal structure of 1-3 piezocomposites has been determined by controlling polymer properties, ceramic volume fraction, thickness of composite and aspect ratio of the composite to maximize the TVR (transmitting voltage response), RVS (receiving voltage sensitivity) and FBW (fractional bandwidth) of underwater acoustic transducers. Influence of the design variables on the transducer performance was analyzed with equivalent circuits and the finite element method. When the piezocomposite is vibrating in a pure thickness mode, inter-pillar resonant modes are likely to occur between lattice-structured piezoceramic pillars and polymer matrix, which significantly deteriorate the performance of the piezocomposite. In this work, a new method to design the structure of the 1~3 type piezocomposite was proposed to maximize the TVR, RVS and FBW while preventing the occurrence of the inter-pillar modes. Genetic algorithm was used in the optimal design.

Keywords: 1-3 piezocomposite, TVR, RVS, Inter-pillar mode, Optimization

1. 서 론

일반적으로 수중 음향 트랜스듀서의 구동소자로는

PZT계열의 압전세라믹을 널리 사용해왔다. 최근에는 압전세라믹을 이용한 트랜스듀서보다 넓은 대역폭을 확보하고자 압전복합체를 사용하는 연구가 많이 수행되고 있다. 압전복합체는 세라믹에 비해 음향 임피던스가 낮으며 성능 계수가 높아 트랜스듀서의 구동소자로 사용 시 높은 감도와 넓은 대역폭을 확보할 수 있다 [1-3]. 압전복합체는 압전세라믹과 폴리머의 연결 구조에 따라 2-2형, 1-3형 등으로 분류할 수 있는데, 본 논문에서는 그림 1과 같은 1-3형 압전복합체

a. Corresponding author; yryong@knu.ac.kr

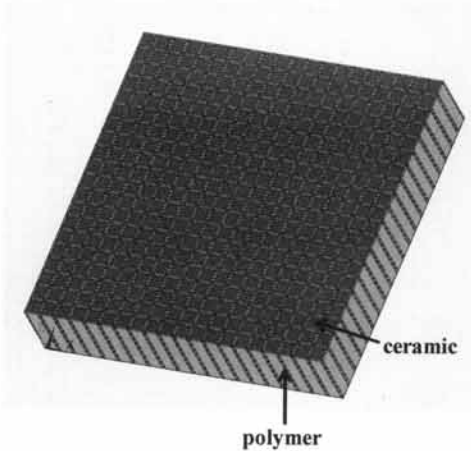


Fig. 1. Schematic structure of 1-3 piezocomposites.

를 이용하여 우수한 성능의 음향 트랜스듀서를 구현하고자 하였다 [4]. 트랜스듀서의 성능 평가용으로 널리 사용되는 지수들 중, 본 논문에서는 대표적인 송신 특성으로 트랜스듀서에 단위 전압을 인가하였을 때의 송신 감도를 나타내는 TVR (transmitting voltage response)과 TVR 스펙트럼에서의 -3 dB 대역폭 FBW (fractional bandwidth)를 분석하였고, 대표적인 수신 특성으로는 외부 압력 인가 시 트랜스듀서에 나타나는 수신 감도 RVS (receiving voltage sensitivity)를 분석하였다.

압전복합체를 사용한 트랜스듀서의 음향 특성에 대한 연구는 여러 연구자들에 의해 수행되어져 왔다 [5-9]. Christine은 세라믹의 부피비나 복합체의 두께가 변하였을 때 송신 특성의 변화를 연구하였으며 [5], Bowen은 압전복합체 판넬을 제작한 후 트랜스듀서에 적용하여 송수신 특성을 측정하였고 [6], Benjamin은 넓은 대역폭과 높은 송수신 특성을 가지는 트랜스듀서에 대한 연구를 수행하였다 [7]. Richard는 압전복합체를 구성하는 압전 삽입재 (pillar)와 폴리머 물성에 따른 트랜스듀서 송신 감도의 변화에 대한 연구를 수행하였고 [8], Harris는 대역폭을 넓히는 연구를 하였다 [9]. 또한 압전복합체의 구조 최적화에 대한 연구는 Gibiansky 등에 의해 수행된 바 있다 [10,11]. 그러나 이들 연구에서는 설계 변수의 범위에 제한을 두지 않았으며, 이론적인 가정들로 인해 비현실적인 재료의 물성이 도출되는 문제점이 있었다. 또한 이들은 압전복합체의 진동 모드, 물성, 연결 형태 등에 대한 연구를 수행하였으나 inter-pillar 공진 모드는 전혀 고려

하지 않았다. Inter-pillar 모드는 1-3형 압전복합체가 두께 모드로 진동 시, 격자형으로 배열된 압전세라믹 삽입재들과 폴리머 모재간의 매질차로 인해 반사되는 횡파 성분에 의해 발생하며 Auld, Pappalardo 등에 의해 연구되어 졌다 [12-15]. Inter-pillar 모드와 압전복합체의 두께 모드가 결합하게 되면 압전세라믹과 폴리머의 두께 방향 변위에 위상차가 발생하게 되고, 따라서 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되는 효율이 감소하게 되어 송수신 특성이 저하하게 된다. 그 결과로 트랜스듀서의 성능이 급격히 저하되므로, 두 모드의 결합을 피하는 것이 매우 중요하다 [16-18]. 하지만 기존의 압전복합체 연구사례에서는 복합체의 압전 특성 개선, 구조 최적화, inter-pillar 모드에 대한 연구가 각각 개별적으로 수행되었고, 이들 전체를 고려한 구조 최적화에 관한 연구는 없었다.

본 연구에서는 inter-pillar 모드에 의한 복합체의 성능 저하를 방지하면서 수중 음향 트랜스듀서의 송수신 감도와 대역폭이 최대화될 수 있는 1-3형 압전복합체의 구조를 설계하였다. 설계 변수로는 압전복합체의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 폴리머의 영률과 세라믹의 부피비, 복합체의 종횡비 그리고 복합체의 두께를 선정하였다 [18]. 각각의 설계 변수가 복합체의 압전 특성과 inter-pillar 모드에 미치는 영향을 분석한 후, 유전자 알고리즘을 사용하여 복합체 구조를 최적화하였다. 최적화를 통해 도출된 구조에 대해서 유한요소 해석을 통해 inter-pillar 모드의 발생유무를 확인함으로써 순수하게 두께 모드로만 구동하는 복합체 구조를 최종 구조로 선정하였다.

2. 실험 방법

2.1 등가회로 구성 및 검증

1-3형 압전복합체를 사용한 수중 음향 트랜스듀서의 대표적인 구조를 그림 2와 같이 설정하였다. 1-3형 압전복합체의 윗면에는 물, 아랫면에는 철이 있는 구조이다. 압전복합체는 구동 소자이며, 물은 방사매질, 철은 강체로서 트랜스듀서를 지지하는 구조이다. 여기에서 임의로 복합체의 두께 (t)를 20 mm, 철의 두께 (t_1)를 10 mm, 소자의 반경 (a)은 복합체가 깨끗한 두께 모드로 구동하기 위하여 두께 대 너비 비가 1:10이 되도록 150 mm로 설정하였다. 실제 사용

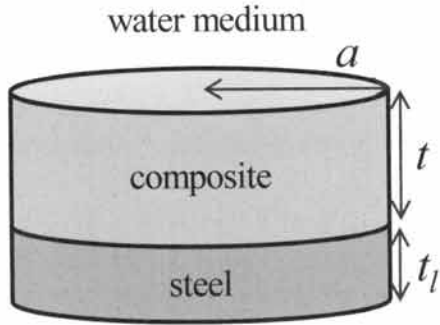


Fig. 2. Schematic structure of the underwater piezocomposite transducer.

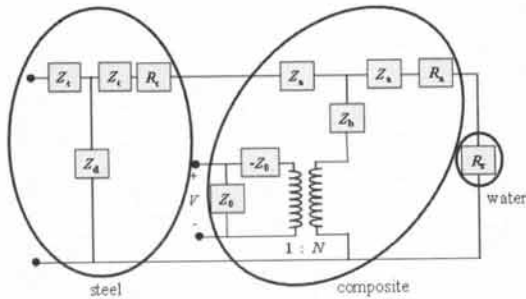


Fig. 3. Equivalent circuit to calculate the TVR.

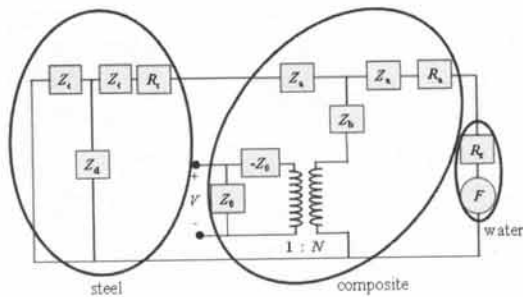


Fig. 4. Equivalent circuit to calculate the RVS.

환경에서 트랜스듀서 전면에 음향 정합층 혹은 윈도우 층이 추가되거나 복합체 뒷면에 후면층이 추가될 경우에도, 본 연구의 해석 및 설계 기법은 동일하게 적용될 수 있다. 그림 2에 보인 트랜스듀서의 성능을 분석하기 위해 이 트랜스듀서의 특성을 T-network로 구성된 Mason 등가 회로를 이용하여 나타내었다. TVR을 계산하기 위한 등가 회로는 그림 3과 같이 구성하였고, RVS를 계산하기 위한 등가 회로는 그림

4와 같이 구성하였다 [19].

그림 3과 그림 4의 등가 회로에 나타난 각 요소들의 값은 식 (1)~(8)과 같다. 압전복합체의 전기적 임피던스인 Z_0 와 기계적 임피던스 성분 Z_a, Z_b , 철의 기계적 임피던스 성분 Z_c, Z_d , 물의 방사 저항 R_r 그리고 외부에서 인가되는 음압 F 를 식 (1)~(8)을 사용하여 각각 계산할 수 있다 [19]. 이 때, ω 는 각주파수, A_0 는 방사 면적, k 는 파수, t 는 복합체의 두께, ρ 는 밀도, v 는 음속, ϵ 는 유전율, h 는 압전 상수, J_1 은 1차 베셀 함수, P_r 은 외부에서 인가되는 음압을 뜻한다.

여기서 아래 첨자 1은 철의 물성을 나타내며, 아래 첨자 w는 물의 물성을 나타낸다. 회로에서 R_a 는 복합체내의 감쇠특성을 R_c 는 철이 가지는 감쇠특성을 각각 표시하기 위해 추가되었다. 압전복합체의 물성은 압전세라믹 삽입재와 폴리머로 이루어진 복합체 전체의 유효물성을 구하여 적용하였으며, 그 값들은 식 (1)~(3)에서 뒀줄을 써서 표현하였다 [20,21].

$$Z_0 = \frac{1}{j\omega(\epsilon_{33}^S A_0/t)} \tag{1}$$

$$Z_a = j\rho v A_0 \tan(kt/2) \tag{2}$$

$$Z_b = -j\rho v A_0 \sin(kt) \tag{3}$$

$$Z_c = j\rho v_l A_0 \tan(kt_l/2) \tag{4}$$

$$Z_d = -j\rho v_l A_0 \sin(kt_l) \tag{5}$$

$$R_r = \rho_w v_w A_0 (1 - 2J_1(2k_w a)/k_w a) \tag{6}$$

$$N = \frac{h_{33}^S A_0}{t} \tag{7}$$

$$F = P_r \times A_0 \tag{8}$$

식 (1)~(3)에 사용된 압전복합체의 유전율, 밀도 그리고 음속은 다음의 과정을 따라서 구하였다. 폴리머의 영률 (Y)과 포아송 비 (v)를 이용하여 등방성 재료인 폴리머의 탄성계수를 식 (9)~(13)으로 구할 수 있다. 이 식들은 1-3형 압전복합체가 두께 모드로만 진동한다는 가정 하에 유도된 것으로 우선 Y를 이용하여 식 (9)~(12)로부터 폴리머의 컴플라이언스

행렬 $[s^P]$ 를 계산한다. 여기서 G는 폴리머의 전단 계수다. 폴리머는 등방성 재료이므로 $s_{11}^P, s_{12}^P, s_{44}^P$ 값만을 이용하여 $[s^P]$ 행렬을 구할 수 있고, 다음으로 식 (13)을 통해 강성 행렬 $[c^P]$ 를 계산할 수 있다 [22].

$$s_{11}^P = \frac{1}{Y} \tag{9}$$

$$G = \frac{Y}{2(1+\nu)} \tag{10}$$

$$s_{12}^P = s_{11}^P - \frac{1}{2G} \tag{11}$$

$$s_{44}^P = 2(s_{11}^P - s_{12}^P) \tag{12}$$

$$[c^P] = [s^P]^{-1} \tag{13}$$

이렇게 계산된 폴리머의 탄성 계수들을 압전세라믹의 물성값들과 결합하면 1-3형 압전복합체 전체의 유효물성을 구할 수 있다. 다음 식 (14)~(20)은 압전복합체의 유효물성을 구하기 위한 식이다 [20].

$$\bar{c}_{33}^D = VF \left[c_{33}^B - \frac{2(1-VF)(c_{13}^E + c_{12}^P)^2}{VF(c_{11}^P + c_{12}^P) + (1-VF)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] + (1-VF)c_{11}^P \tag{14}$$

$$\bar{c}_{33}^S = VF \left[c_{33}^S - \frac{2(1-VF)e_{31}^E}{VF(c_{11}^P + c_{12}^P) + (1-VF)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] + (1-VF)e_{11}^P \tag{15}$$

$$\bar{e}_{33} = VF \left[e_{33} - \frac{2(1-VF)e_{31}^E(c_{13}^E - c_{12}^P)}{VF(c_{11}^P + c_{12}^P) + (1-VF)(c_{11}^E + c_{12}^E)} \right] \tag{16}$$

$$\bar{c}_{33}^D = \bar{c}_{33}^E + (\bar{e}_{33})^2 / \bar{\epsilon}_{33}^S \tag{17}$$

$$\bar{h}_{33} = \frac{\bar{e}_{33}}{\bar{\epsilon}_{33}^S} \tag{18}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\bar{c}_{33}^D}{\bar{\rho}}} \tag{19}$$

$$\bar{\rho} = VF\rho^C + (1-VF)\rho^P \tag{20}$$

압전복합체의 유효물성은 압전세라믹 부피비(VF)에 따라 달라진다. 압전복합체의 유효 탄성 계수는 식 (14)와 (17)로 계산되며, 유전율은 식 (15), 압전 계수는 식 (16)과 (18)로 계산할 수 있다. 그리고 계산한 유효 물성값들을 이용하여 복합체의 음속 \bar{v} 를 식 (19)로, 밀도 $\bar{\rho}$ 를 식 (20)으로 계산할 수 있다. 여기서 위 첨자 C와 P는 각각 압전세라믹과 폴리머의 물성을 나타내고, 위 첨자 D, S, E는 각각 전기적 변위, 기계적 변형률, 전계가 일정할 때의 해당 물성을 나타낸다. 위 첨자 중 P 혹은 $\bar{\rho}$ 가 아닌 물성들은 압전세라믹을 의미한다.

등가 회로에 이용되는 값들을 식 (1)~(20)으로 계산한 다음, 그림 3의 회로에서 R_r 에 걸리는 전류 I_H 를 구하여 송신 감도 TVR을 계산할 수 있다 [23]. TVR은 앞서 식 (1)~(20)으로 계산한 유효물성과 임피던스 값들을 식 (21)~(23)에 대입하여 최종적으로 식 (24)로 계산할 수 있다 [23]. 식 (21)의 U는 구동 소자의 지향성, 식 (22)의 DI는 방향성 지표, 식 (23)의 W는 방사 파워를 의미한다.

$$U = \frac{(k_w a)^2}{1 - J_1(2k_w a)/k_w a} \tag{21}$$

$$DI = 10 \log U \tag{22}$$

$$W = \frac{1}{2} I_H^2 R_r \tag{23}$$

$$TVR = 10 \log W + DI + 171 \tag{24}$$

이렇게 등가 회로를 이용하여 계산한 주파수별 TVR값이 타당한지 확인하기 위해, 동일한 트랜스듀서 구조에 대해 등가 회로로 계산한 결과와 유한요소 해석법으로 계산한 결과를 비교하였다. 압전 복합체를 구성하는 압전 삽입재로는 PZT-5H, 폴리머 모재로는 Dow Corning (Midland, MI)사의 Low Viscous Epoxy를 사용하였으며, 세라믹의 부피비는 50%로 설정하였다. 전체 구조는 그림 2와 동일하게 구성하였으며, 유한요소 해석 모델은 상용 해석 도구인 ANSYS를 사용하여 그림 5와 같이 축대칭 2차원

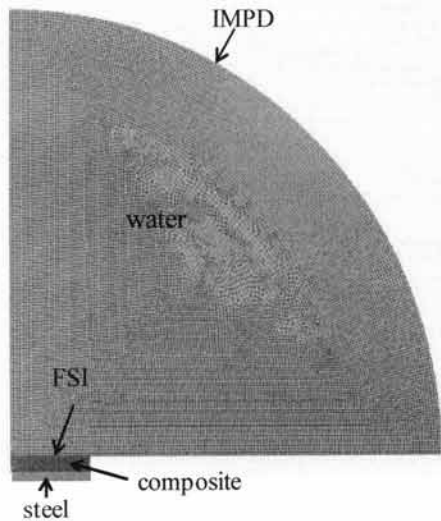


Fig. 5. Finite element model of the piezocomposite transducer.

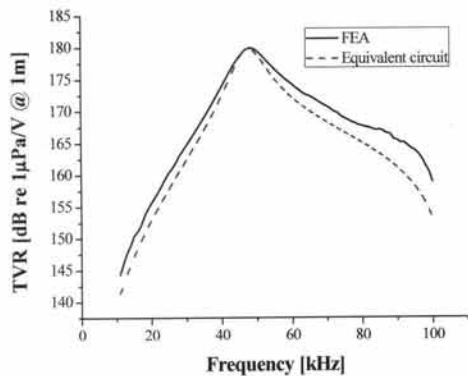


Fig. 6. TVR spectra calculated by the FEA and the transmitting equivalent circuit.

모델로 제작하였다. 복합체에서 방사된 음파가 물로 용이하게 전파할 수 있도록 경계면에 FSI (fluid structure interaction) 경계 조건을 설정하였으며, 물의 외곽엔 무반사 IMPD (impedance boundary flag) 경계 조건을 설정하였다. 또한 물의 너비는 사전에 설정한 방사면적과 해석 주파수 범위에서 far filed 조건이 충족되도록 하여 계산하였다. 모델 내의 복합체에는 식 (9)~(20)을 통해 구한 유효물성을 적용하였다 [20].

유한요소 해석 결과와 등가 회로를 이용한 계산 결과는 그림 6에 비교하여 보였다. 두 결과가 매우 유

사함을 알 수 있다. TVR 스펙트럼에서 최댓값은 일치하나 밴드 폭에서 약간의 차이를 보이는데, 유한요소 해석과 등가 회로에 사용된 물성의 감쇠도 차이로 인한 영향으로 판단된다. 따라서 그림 3의 등가 회로는 1-3형 압전복합체의 송신 특성을 적절히 묘사할 수 있음을 확인하였다. 나아가 동일한 TVR 스펙트럼으로부터 -3 dB 비대역폭 FBW를 계산할 수 있다.

다음으로 RVS는 그림 4의 회로에서 오른쪽 단에 외부 음압이 복합체에 가해질 때 전기단에서 발생하는 전압 V_{out} 을 구하여 계산할 수 있다 [23].

$$I_t = F/Z_t \quad (25)$$

$$I_b = \left(\frac{1}{1/(Z_a + R_c + \frac{Z_c \times Z_d}{Z_c + Z_d} + Z_c) + 1/Z_b} \times I_t \right) / Z_b \quad (26)$$

$$V_{out} = \frac{N^2 Z_0 \times I_b}{N} \quad (27)$$

$$RVS = 20 \log((V_{out}/P) \times 10^{-6}) \quad (28)$$

TVR 계산과 동일하게 식 (1)~(20)로 구한 유효물성을 식 (25)~(27)에 대입하여, 최종적으로 식 (28)을 이용하여 RVS를 계산하였다 [23]. 식 (25)의 I_t 는 회로 전체에 걸리는 전류 값이며 Z_t 는 회로 전체의 임피던스이다. 식 (26)에서 I_b 는 그림 4의 Z_b 에 걸리는 전류 값을 나타낸다. 이렇게 수신용 등가 회로를 이용해 계산한 RVS의 타당성을 검증하기 위해, 이 결과를 앞서 유한요소 해석을 통해 계산한 TVR 결과를 이용한 RVS값과 비교하여 보았다. 식 (29)에서 TVR과 임피던스 (Z)는 앞서 송신용 유한요소 해석으로 계산한 결과이고, f 는 해석 주파수이다 [23].

$$RVS = TVR + 20 \log(Z) - 20 \log(f) - 294 \quad (29)$$

그림 7은 이 두 결과를 비교하여 보여주고 있는데, 두 스펙트럼이 거의 동일한 것으로 나타났으며, 스펙트럼 상의 약간의 차이는 TVR 등가 회로의 검증 모델과 마찬가지로 물성의 감쇠도 차이로 인한 영향으로 판단된다. 따라서 그림 4의 등가 회로는 1-3형 압전복합체의 수신 특성을 잘 묘사할 수 있음을 확인하였다.

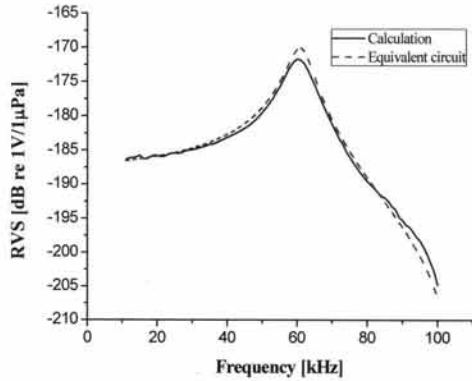


Fig. 7. RVS spectra calculated by equation (29) and the receiving equivalent circuit.

2.2 구조 변수의 영향 분석

일반적으로 inter-pillar 모드는 압전세라믹 삽입재와 폴리머 모재간의 매질 차로 인해 반사되는 회파 성분 에 의해 발생 되고, 구조적으로는 세라믹의 부피비와 폴리머 모재의 영률이 낮거나 압전복합체의 중형비가 높은 경우에 발생한다 [15]. 복합체의 두께 모드 근처에서 발생된 inter-pillar 모드는 두께 모드와 결합하여 복합체의 압전 특성에 악영향을 미치므로 두 모드의 결합은 피하는 것이 좋다. 따라서 본 연구에서는 복합체의 구조 변수로 압전복합체의 중형비 (AR), 세라믹의 부피비 (VF), 폴리머 모재의 영률 (Y)을 선정하여 유한요소 해석으로 각각의 변화에 따른 복합체의 두께 모드 공진 주파수와 inter-pillar 모드 공진 주파수의 변화를 분석하였다. 먼저 압전복합체의 중형비의 변화가 임피던스 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 8은 세라믹 부피비가 50%, 폴리머 모재의 영률이 1.3 GPa인 압전복합체 해석 모델에 중형비를 0.3~0.6까지 0.1 간격으로 변화시켜 해석한 임피던스 스펙트럼이다. 중형비가 0.3, 0.4일 때는 inter-pillar 모드와 두께 모드가 결합하지 않지만, 중형비 0.5, 0.6 일 때에는 결합하는 것을 확인할 수 있다. 중형비가 0.3, 0.4인 경우에는 두께 모드와 inter-pillar 모드의 주파수 간격이 멀어서 임피던스 스펙트럼 상에 나타나지 않지만, 중형비가 증가할수록 inter-pillar 모드가 두께 모드 근처에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 중형비가 증가할수록 inter-pillar 모드의 파장이

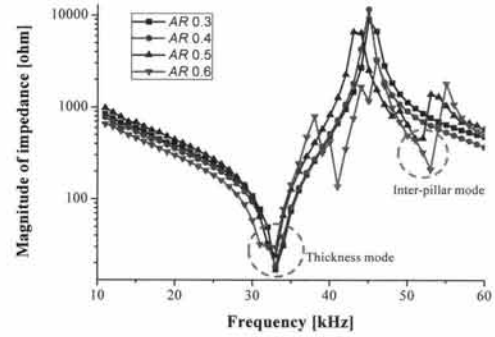


Fig. 8. Impedance variation in relation to the aspect ratio.

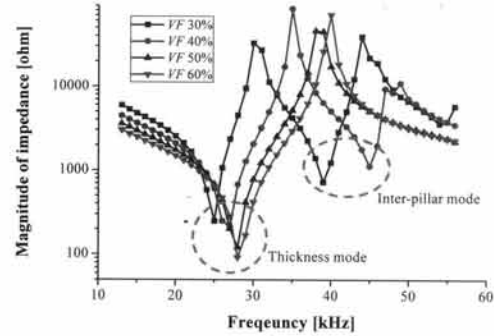


Fig. 9. Impedance variation in relation to the volume fraction of the ceramic.

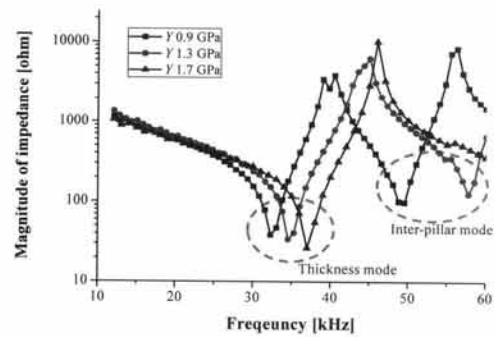


Fig. 10. Impedance variation in relation to the Young's modulus of the polymer.

증가하여 두께 모드와의 주파수 차이가 작아지기 때문이다 [15]. 다음으로 세라믹의 부피비가 임피던스 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 9는 종횡비가 0.4, 폴리머의 영률이 1.3 GPa인 해석 모델에 세라믹의 부피비를 30%에서 60%까지 10% 간격으로 변화시켰을 때 임피던스 해석 결과이다. 부피비가 30%, 40%처럼 작은 경우에는 두께 모드 근처에서 inter-pillar 모드가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 세라믹의 부피비를 점차 늘리면 inter-pillar 모드 공진 주파수와 두께 모드 공진 주파수간의 차이가 커지다가, 부피비가 50% 이상이 되면 두께 모드 주위에서 inter-pillar 모드가 관찰되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 압전복합체의 종횡비의 변화에 따른 결과와 비슷하게 세라믹의 부피비가 증가함에 따라 복합체 내의 세라믹간의 간격이 좁아지기 때문이다. 마지막으로 폴리머 소재의 영률 (Y)의 변화가 임피던스 스펙트럼에 미치는 영향을 알아보았다.

그림 10은 세라믹 부피비가 20%, 종횡비가 0.3인 압전복합체 모델에 폴리머 소재의 영률을 0.9~1.7 GPa까지 0.4 GPa 간격으로 변화시켜 해석한 임피던스 스펙트럼이다. 폴리머의 영률에 따라서 두께 모드 공진 주파수 값들이 변화하는 것을 알 수 있으며, 폴리머 소재의 영률이 0.9 GPa인 경우에 두께 모드의 근처에서 inter-pillar 모드가 발생한 것을 확인할 수 있다. 하지만 영률이 증가함에 따라 inter-pillar 모드의 발생 주파수가 두께 모드로부터 점점 멀어지며, 1.7 GPa인 경우에는 두께 모드 주파수의 2배 이상으로 벌어져서 그 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다. Inter-pillar 모드가 두께 모드 근처에 발생해 두 모드의 결합이 발생하면 공진, 반공진 주파수가 변하게 되고 복잡한 임피던스 스펙트럼의 형상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 두 모드의 결합을 피하기 위해서는 압전복합체의 종횡비가 낮을수록, 압전세라믹의 부피비와 폴리머 소재의 영률이 높을수록 좋다는 것을 알 수 있다.

2.3 1-3형 압전복합체의 구조 최적화

Inter-pillar 공진 모드와 두께 모드가 결합하면 복합체의 압전 특성에 좋지 못한 영향을 끼치며, 이는 음향 트랜스듀서의 성능에도 악영향을 준다. 따라서 inter-pillar 모드가 두께 모드와 결합하지 않으며 목적함수가 최대가 되는 1-3형 압전복합체의 구조 최적화를 수행하였다. 최적화 과정은 그림 11과 같다.

본 논문의 목적은 송수신감도의 최대화를 위한 1-3형 압전복합체의 구조 최적화이므로 송신 성능, 수신 성능, 송수신 성능의 조합을 목적함수로 각각 설정하

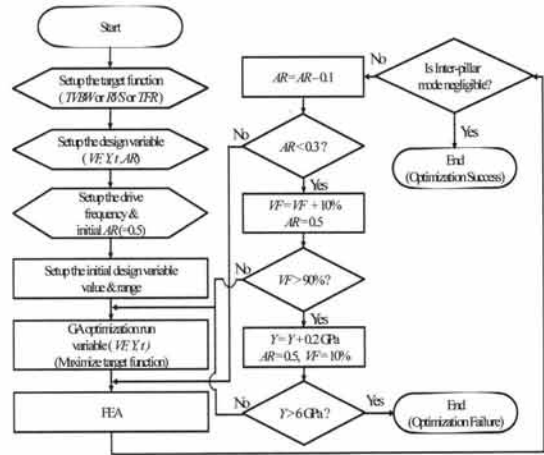


Fig. 11. Piezocomposite structure optimization procedure.

였다.

송신 성능을 최대화하기 위한 설계 변수는 압전 특성에 영향을 미치는 세라믹의 부피비 (VF), 폴리머의 영률 (Y), 압전복합체의 두께 (t) 그리고 압전복합체의 종횡비(AR)로 설정하고, 초기값과 변화 범위를 설정하였다. VF의 변화 범위는 10~90%로 설정하였고, Y는 일반적인 폴리머 재료의 물성 범위인 0.5~6.0 GPa로 설정하였다.

본 연구에서는 TVR이 최대가 되는 주파수를 40 kHz로 설정하였는데, TVR이 최대가 되는 주파수를 정확히 40 kHz로 설정하기 어렵기 때문에 제한조건을 적용하여 39~41 kHz 사이에서 발생하도록 하였다. 두께 모드 공진주파수를 40 kHz로 유지하기 위한 t의 변화 범위는 10~40 mm로 설정하였다. 그리고 AR은 사전 분석을 통해 0.3에서 0.5까지로 변화 범위를 정하였다. 이상 변수 범위들에 대해서 유전자 알고리즘을 이용하여 목적 함수가 제한 조건을 만족하며 최댓값을 가질 때의 설계 변수값들을 도출하였다. 그리고 도출된 설계 변수 값들로 유한요소 해석을 수행해 임피던스 스펙트럼에서 inter-pillar 모드와 두께 모드간의 결합 유무를 판단하였다. 모드간의 결합 유무를 판단하기 위한 주파수 범위는 공진 주파수의 0.8배에서 부터 반공진 주파수의 1.2배로 설정하였다. 이는 이 범위 밖에서 inter-pillar 모드가 발생하더라도 두께 모드의 진동형태 (mode shape)에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 반복된 해석을 통해 확인하여 정한 범위이다. 만약 범위 내에 두께 모드 공진과 반공진을 제외한 다른 모드가 발생하면 inter-pillar 모드

라 판정하고, 그림 11과 같이 설계 변수의 범위를 재 설정하여 최적화 과정을 반복 수행하게 된다. 먼저 inter-pillar 모드가 발생되었다고 판단되면 AR을 초기 값인 0.5에서 0.1씩 감소시켜가며 해석을 한다. AR이 0.3이 되어도 두께 모드 주위에 inter-pillar 모드가 발생하면 AR을 초기값인 0.5로 재설정하고, VF의 최소 범위를 10% 증가시켜 최적화를 수행한다. 즉, VF의 범위가 20~90%, AR이 0.5인 경우를 유전자 알고리즘을 이용하여 분석하게 된다. 이 때 Y와 t의 변화 범위는 변하지 않는다. 이후 동일한 방법으로 AR만 감소시켜 모드 결합이 발생하지 않을 때까지 최적화를 반복한다. 이 반복 과정을 VF의 변수 범위가 80~90%가 될 때까지 수행하여도 모드 결합이 발생한다고 판단되면 VF와 AR을 초기 값으로 되돌리고 Y값을 0.2 GPa씩 증가시킨 상태에서 위의 과정을 반복 수행한다.

다음으로 수신 성능을 최대화하기 위한 목적함수로 RVS를 선정하여 최적화를 수행하였다. 최적화 방법은 앞서 설명한 송신 특성을 최적화하는 것과 유사하다. 그러나 수중 음향 트랜스듀서가 수신용 하이드로폰으로 사용될 때는 두께 모드 이전의 저주파 평탄 대역을 이용한다. 즉, 수신하려는 주파수 대역으로부터 두께 모드 공진 주파수가 멀리 있을수록 공진의 영향이 덜 미치므로 평탄한 대역폭 확보에 유리하다. 따라서 TVBW처럼 FBW를 함께 고려한 새로운 성능지수 식을 정의할 필요가 없으며 식 (28)을 이용해 도출된 RVS 크기가 최대가 되는 값을 찾는다. 그리고 두께 모드 공진을 이용하지 않으므로 t 또한 변수로 사용되지 않는다. 수신 특성에서 inter-pillar 모드의 발생 유무를 판별하기 위한 주파수 범위는 설정한 수신 주파수의 0.8배에서 공진 주파수의 1.2배까지이며 이는 앞서 송신 특성의 판별 범위 선정의 이유와 동일하다. 본 논문에서는 수신 주파수를 20 kHz로 설정하고, 수신 하이드로폰용 복합체의 두께로는 송신 성능 최대화 결과에서 도출된 두께를 사용하며, 설계 변수로는 복합체의 두께를 제외한 VF, Y, AR로 선정하였다. 최적화 방법은 앞서 설명한 목적함수가 송신 성능인 경우와 동일하다.

마지막으로 송수신 성능을 최대화하기 위한 단계에서는 송신 주파수를 40 kHz, 수신 주파수를 20 kHz로 설정하였다. 한 복합체에서 송신과 수신을 동시에 보기 때문에 설계변수는 VF, Y, t, AR이 된다. 최적화는 앞서 설명한 목적 함수들과 동일한 과정으로 진행된다.

3. 결과 및 고찰

먼저, 송신 성능의 최대화를 위한 목적함수 TVBW는 식 (30)과 같이 나타내었다.

$$TVBW = \frac{TVR - TVR_{\min}}{TVR_{\max} - TVR_{\min}} \times \frac{FBW - FBW_{\min}}{FBW_{\max} - FBW_{\min}} \quad (30)$$

여기서 정의한 TVBW는 높은 TVR 레벨과 광대역폭을 동시에 구현하기 위해 본 논문에서 제안한 성능지수이다. 즉, TVR과 FBW가 모두 높은 설계 변수 값을 찾기 위함이다. TVR 레벨과 대역폭은 그림 3과 4의 등가회로를 이용해 구한다. 먼저 두 특성은 서로 다른 변화 범위를 가진 값이기 때문에, 성능 지수에 미치는 영향을 동등하게 반영하기 위해서 각각의 함수를 표준화하였다. 즉, 설정한 모든 설계 변수의 변화 범위 내에서 TVR과 FBW의 최댓값과 최솟값을 구하여 각각 TVR_{\max} 과 TVR_{\min} 그리고 FBW_{\max} 와 FBW_{\min} 으로 나타내었고, 그 차이를 분모에 대입하여 두 가지 함수를 동일한 비로 변환하였다. 다음으로 이 두 가지 비의 값을 곱하여 송신 특성도 높고 대역폭도 넓은 복합체의 구조를 도출하였다.

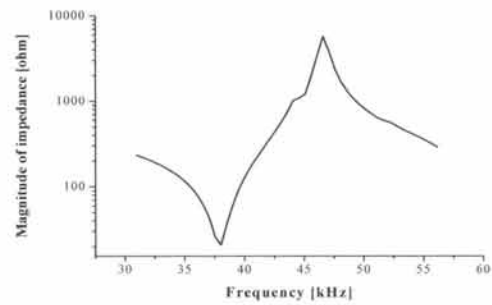


Fig. 12. Impedance spectrum of the optimized transmitting piezocomposite transducer.

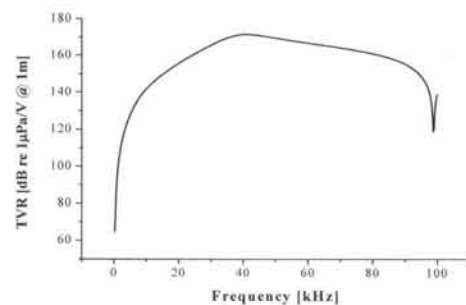


Fig. 13. TVR spectrum of the optimized transmitting piezocomposite transducer.

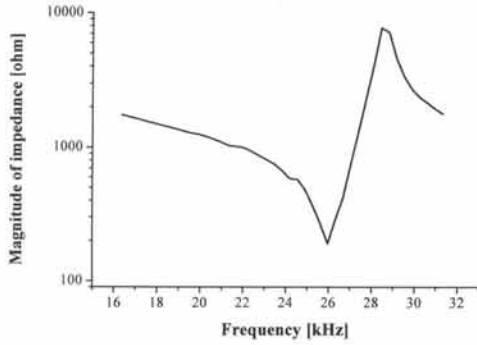


Fig. 14. Impedance spectrum of the optimized receiving piezocomposite transducer.

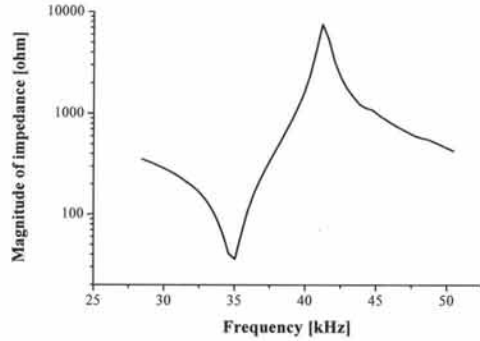


Fig. 16. Impedance spectrum of the optimized transmitting/receiving piezocomposite transducer.

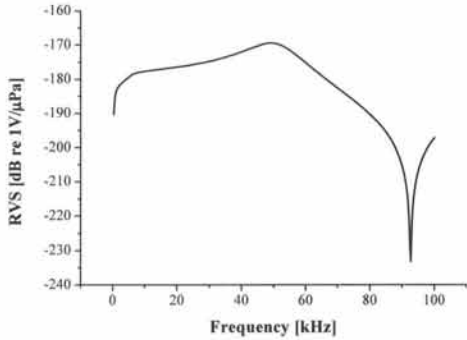


Fig. 15. RVS spectrum of the optimized receiving piezocomposite transducer.

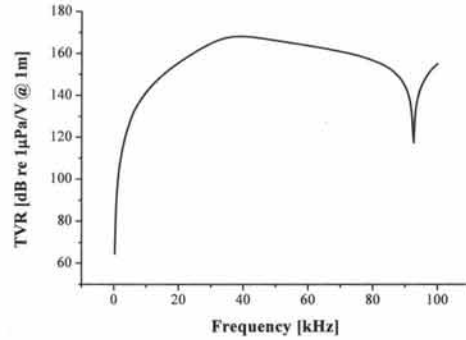


Fig. 17. TVR spectrum of the optimized transmitting/receiving piezocomposite transducer.

이러한 방법으로 송신 특성 목적함수 TVBW를 최적화하였고, 그 결과로 구한 임피던스 스펙트럼은 그림 12에 TVR 스펙트럼은 그림 13에 각각 나타내었다. 최종적으로 도출된 설계 변수 값은 VF가 26.4%, Y는 0.54 GPa, t는 17.6 mm, AR이 0.4이다. 이때의 TVR 최댓값은 171.3 dB, FBW는 49.1%이다. 임피던스 스펙트럼에서 판정 범위 내에서 두께 모드 외에 다른 모드는 발생하지 않으며, TVR 스펙트럼에서 40 kHz에 최댓값이 나타나 제한 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

목적함수 RVS의 최적화 결과로 그림 14의 임피던스 스펙트럼, 그림 15의 RVS 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 최종적으로 도출된 설계 변수 값들은 VF가 10%, Y는 0.5 GPa, AR이 0.5이다. 이때의 RVS 최댓값은 -168.6 dB이다. 임피던스 스펙트럼을 보면 설

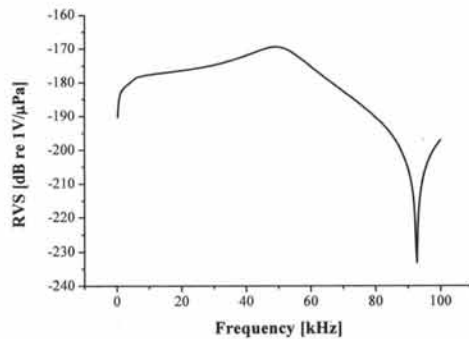


Fig. 18. RVS spectrum of the optimized transmitting/receiving piezocomposite transducer.

정한 판정 범위 내에서 두께 모드 외에 다른 모드는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 송신, 수신 성능을 동시에 고려하기 위한 목적함수 TFR은 다음 식 (31)과 같이 정의하였다.

$$TFR = \frac{TVR - TVR_{\min}}{TVR_{\max} - TVR_{\min}} \times \frac{FBW - FBW_{\min}}{FBW_{\max} - FBW_{\min}} \times \frac{RVS_{\min} - RVS}{RVS_{\min} - RVS_{\max}} \quad (31)$$

TFR은 송신 감도와 수신 감도 그리고 대역폭을 동시에 고려하기 위해 본 논문에서 제안한 성능지수이다. 앞서 설명한 목적함수 TVBW처럼 TFR식에 들어가는 세 가지 특성의 단위가 다르므로 표준화를 하여 동일한 비로 만들었다. 설정한 모든 설계 변수의 변화 범위 내에서 TVR, FBW, RVS의 최댓값과 최솟값을 찾아 각각 TVR_{\max} 와 TVR_{\min} 그리고 FBW_{\max} 와 FBW_{\min} , RVS_{\max} 와 RVS_{\min} 으로 나타내었고, 각각의 차이를 이용해 표준화를 하였다. 이 세 가지 비의 값을 곱하여 송신, 수신 특성이 높고 대역폭 또한 넓은 복합체의 구조를 도출할 수 있다.

최적화 결과로 그림 16은 임피던스 스펙트럼, 그림 17은 TVR 스펙트럼, 그리고 그림 18은 RVS 스펙트럼이다. 최종적으로 도출된 설계 변수 값들은 VF가 20.1%, Y는 0.52 GPa, t는 17.6 mm, AR은 0.4이다. TVR 최댓값은 168.2 dB, FBW는 61.8%, RVS 최댓값은 -169.4 dB이다. 임피던스 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 두께 모드 외에 다른 모드는 발생하지 않는다.

4. 결론

본 연구에서는 수중 트랜스듀서의 송신 감도, 수신 감도, 그리고 송수신 감도를 최대화하기 위한 1-3형 압전복합체의 최적 구조를 도출하였다. 1-3형 압전복합체에 관한 기존의 선행 연구에서는 복합체의 진동 모드, 구조 최적화, inter-pillar 모드 등에 대해 개별적으로 수행되었으나, inter-pillar 모드가 발생하지 않으면서 목적 함수를 최대가 되도록 하는 새로운 구조 설계 방법을 제안하였다. 송신 특성인 TVBW를 목적 함수로 선정하여 inter-pillar 모드와 두께 모드가 결합하지 않으며 TVR과 FBW 모두 높은 1-3형 압전복합체의 최적 구조를 선정하였고, 수신 특성인 RVS와 송신 특성을 동시에 고려한 TFR를 목적 함수로 선정하여 송수신 특성이 모두 우수한 구조 또한 도출하였다. 본 논문에서 개발한 최적 설계기법은 그림 2에 보인 구조뿐만 아니라 1-3 압전복합체를 사용한

다양한 형태의 수중 음향 트랜스듀서에도 공히 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다 (No. UD110027DD, UE120005DD).

REFERENCES

- [1] T. R. Gururaja, W. A. Schulze, L. E. Cross, R. E. Newnham, B. A. Auld, and Y. J. Wang, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, Su-32, 481 (1985).
- [2] R. E. Newnham, *Ferroelect.*, 68, 1 (1986).
- [3] E. K. Akdogan, M. Allahverdi, and A. Safari, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 52, 746 (1986).
- [4] R. E. Newnham, D. P. Skinner, and L. E. Cross, *Mater. Res. Bull.*, 13, 525 (1978).
- [5] A. Christine, H. Hennon, and J. N. Decarpigny, *J. Acoust. Soc. Am.*, 94, 621 (1993).
- [6] L. Bowen, R. Gentilman, D. Fiore, H. Pham, W. Serwatka, C. Near, and B. pzaol, *Ferroelect.*, 187, 109 (1996).
- [7] K. C. Benjamin, *J. Electroceramics*, 8, 145 (2002).
- [8] C. Richard, L. Goufon, D. Guyomar, H. S. Lee, and G. Grange, *Ultrason*, 40, 895 (2002).
- [9] G. R. Harris and P. M. Gammell, *J. Acoust. Soc. Am.*, 115, 2914 (2004).
- [10] L. V. Giviansky and S. Torquato, *Struct. Optim.*, 13, 23 (1997).
- [11] O. Sigmund, S. Torquato and I. A. Aksay, *J. Mater. Res.*, 13, 1038 (1998).
- [12] B. A. Auld and Y. Wang, *IEEE Ultrason. Symp.*, 528 (1984).
- [13] D. Certon, F. Patat, F. Levassort, G. Feuillard, and B. Karlsson, *J. Acoust. Soc. Am.*, 101, 2043 (1997).
- [14] P. Reynolds, J. Hyslop, and G. Hayward, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 2, 1650 (2003).
- [15] F. Craciun, L. Sorba, E. Molinari, and M. Pappalardo, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 36, 50 (1989).
- [16] Y. Wang, Ph. D. *Dissertation*, Stanford University

- (1986).
- [17] D. Robertson, G. Hayward, A. Gachagan, and V. Murray, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 53, 1503 (2006).
- [18] C. N. Della and D. Shu, *Sens. Actuators A Phys.*, 140, 2000 (2007).
- [19] L. L. Beranek, *Acoustics* (Mcgraw-Hill, New York, 1954).
- [20] W. A. Smith and B. A. Auld, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 38, 40 (1991).
- [21] W. A. Smith, *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 40, 41 (1993).
- [22] J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (Oxford University Press, New York, 1985).
- [23] C. H. Sherman and J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, New York, 1985).