

정합층을 이용한 광대역 압전 진동체 설계

Design of Broad Band Piezoelectric Transducer Using Matching Layers

조 치 영* · 서 희 선**

Cheeyoung Joh and Heeseon Seo

(1996년 6월 28일 접수 ; 1996년 8월 5일 심사완료)

ABSTRACT

In this paper, a design method of matching layers is presented for the sandwich type broad band underwater acoustic vibrators. The characteristic impedances of matching layers are determined to be matched to the characteristic impedance of head mass material. For the dynamic characteristic analysis of the sandwich type transducers, one dimensional FEM technique is also introduced. A test vibrator with the quarter wave matching layers has been designed to verify the proposed method. And the wide band characteristics of the input impedance and transmitting voltage response (TVR) are investigated.

1. 서 론

수중에서 음파를 이용하여 목표물을 탐지, 추적, 식별하기 위한 수중 음향 트랜스듀서의 진동체로는 일반적으로 압전 세라믹을 가운데 두고 양쪽에 전면추(head mass) 및 후면추(tail mass)가 결합된 샌드위치형 진동체가 널리 사용된다⁽¹⁾. 진동체는 길이 방향 진동 모드로 펄스 형태의 음파를 방사하고 목표물로부터 되돌아 오는 반사음을 수신한다. 그런데 일반적으로 트랜스듀서의 성능은 송신하는 펄스의 폭에 좌우되는데, 펄스의 폭이 좁을수록 탐지 성능은 향상된다. 이를 위해서는 넓은 밴드폭(band width), 즉 낮은 품질 계수(quality factor)와 동시에 높은 효율을 가지는 진동체의 설계가 요구된다.

그 동안 광대역 트랜스듀서 설계에 관한 많은 연구가 수행되어 왔는데 크게 두가지 방법이 적용되고 있다. 하나는 트랜스듀서의 후면 방사면에 적당한 재질을 백킹(backing)하는 방법인데, 이 경우는 넓은 밴드폭은 얻을 수 있지만 상당한 감도의 저하를 감수해야 한다⁽²⁾. 이와는 반대로 트랜스듀서 전면 방

사면에 4분의 1 파장을 가지는 여러 개의 정합층(quarter-wavelength matching layer)를 설계하는 방법이 있는데, 백킹 방법에 비해 효과적인 것으로 알려져 있다^(3, 4). 정합층 설계에 관한 연구에서는 정합층의 등가 입력 하중 임피던스(equivalent input impedance)를 트랜스듀서 재질(대부분의 경우 압전 세라믹만으로 된 단일 진동체)의 특성 임피던스(characteristic impedance)와 일치하도록 정합층의 특성 임피던스를 설계하였다.

본 연구에서는 샌드위치형 수중 음향 진동체에 대해 광대역 주파수 특성을 구현하기 위한 정합층의 설계 방법을 제시하였다. 정합층의 등가 입력 임피던스를 전면추 재질의 특성 임피던스에 정합하는 방법을 선택하였다. 그리고 샌드위치형 압전 세라믹 진동체의 동특성을 해석하기 위해 1차원 유한요소 해석기법을 개발하였다. 시험용 진동체를 선정하여 길이 방향 진동 모드의 공진 주파수에 해당하는 파장의 4분의 1 두께를 갖는 정합층의 특성 임피던스를 설계하고, 입력 임피던스 및 수중에서의 송신 전압 감도(TVR)의 광대역 특성을 살펴 보았다.

2. 정합층 설계

Fig. 1은 샌드위치형 수중 음향 진동체의 일반 형

*정회원, 국방과학연구소

**국방과학연구소

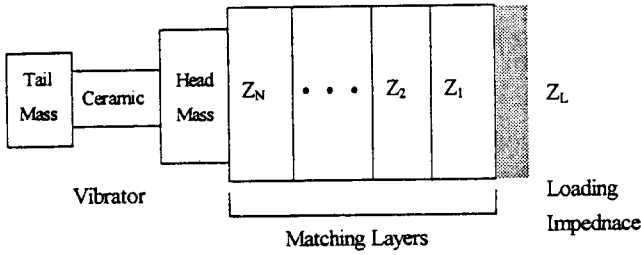


Fig. 1 Configuration of acoustic transducer with matching layers

상을 그린 것으로 전면추와 후면추 사이에 길이 방향으로 분극 처리된 압전 세라믹이 적층되어 있으며 전면추면에는 광대역 설계를 위한 N개의 정합층이 적층되어 있다.

기존의 광대역 설계를 위한 정합층 설계 방법은 정합층에서의 등가 임피던스를 압전 세라믹 진동체의 특성 임피던스에 일치되는 정합층 재질을 선택하는 것이다⁽²⁻⁴⁾. 그런데 샌드위치형 진동체의 경우는 압전 세라믹 만의 단일 진동체가 아니고 전/후면추가 결합된 복합 진동체이다. 그리고 각 부분의 재질과 두께는 방사 매질인 물과의 임피던스 정합보다는 고출력 및 운용 주파수 사양을 기준으로 설계되어 있다. 본 연구에서는 정합층의 등가임피던스를 전면추 재질의 특성 임피던스에 정합하는 방법을 선택하였다.

여기서 N개의 정합층이 적층된 경우 정합층의 등가 입력 임피던스를 \tilde{Z}_N 라고 할 때 세라믹과 전면추의 접합면에서 전면추 쪽으로 바라본 입력 임피던스는 다음 식으로 표현된다.

$$Z(x) = \frac{Z_h (\tilde{Z}_N \cos \theta + jZ_h \sin \theta)}{(Z_h \cos \theta + j\tilde{Z}_N \sin \theta)} \quad (1)$$

$$Z_h = \rho_h c_h A_h, \quad \theta = \frac{\omega}{c} (L_h - x)$$

여기서 x 는 길이 방향으로 좌표이며, ρ_h, c_h, L_h, A_h 는 각각 전면추 재질의 밀도, 음속, 길이, 단면적을 나타낸다. 그런데 식 (1)에서 $\tilde{Z}_N \neq Z_h$ 이면 임의의 조화 가진력이 가해질 경우 정재파(standing wave)가 발생함을 알 수 있다. 한편 1개의 정합층을 사용할 경우 전면추 면과 정합층과의 경계면에서 방사면 쪽으로 바라본 정합층의 등가 입력 임피던스 \tilde{Z}_1 는 식 (1)과 유사하게 다음 식으로 표현된다.

$$\tilde{Z}_1 = \frac{Z_1 (Z_L \cos \theta_1 + jZ_1 \sin \theta_1)}{(Z_1 \cos \theta_1 + jZ_L \sin \theta_1)} \quad (2)$$

$$Z_1 = \rho_1 c_1 A_1, \quad \theta_1 = \frac{\omega t_1}{c_1}$$

여기서 ρ_1, c_1, t_1, A_1 는 정합층 재질의 밀도, 음속, 두께, 단면적을 나타내며, Z_L 은 매질의 방사 임피던스를 나타낸다. 만약 각각의 밀도가 ρ_i , 음속이 c_i , 두께가 t_i , 단면적이 A_i 인 N개의 정합층이 적층된 경우는 식 (2)를 반복적으로 적용하면 등가 입력 임피던스는 다음 식으로 표현된다.

$$\tilde{Z}_k = \frac{Z_k (\tilde{Z}_{k-1} \cos \theta_k + jZ_k \sin \theta_k)}{(Z_k \cos \theta_k + j\tilde{Z}_{k-1} \sin \theta_k)}$$

$$Z_k = \rho_k c_k A_k, \quad \theta_k = \frac{\omega t_k}{c_k}; \quad k=2, 3, 4, \dots, N \quad (3)$$

그런데 식 (2), (3)에 있는 등가 입력 임피던스는 정합층의 물성치와 두께, 단면적 뿐만 아니라 주파수의 함수이므로 모든 주파수 영역에서의 정합은 실현이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 진동체의 길이 방향 진동모드의 공진 주파수(f_0)에서 정합을 고려하였다. 여기서 정합층의 두께를 다음과 같이 공진 주파수에 해당하는 파장의 4분의 1의 정수배로 결정하자.

$$t_i = \frac{(2m+1)\lambda_i}{4}; \quad \lambda_i = \frac{c_i}{f_0}$$

$$i=1, 2, 3, \dots, N, \quad m=0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

그러면 식 (3)의 등가 입력 임피던스는 정합층의 개수가 홀수 또는 짝수에 따라 다음과 같이 간단히 된다.

(a) N이 홀수일 때 ($N=2m-1; m=1, 2, 3, 4, \dots$)

$$\tilde{Z}_{2m-1} = \frac{(Z_1 Z_3 \dots Z_{2m-1})^2}{(Z_2 Z_4 \dots Z_{2m-2})^2 Z_L}; \quad Z_0 = 1 \quad (5a)$$

(b) N이 짝수일 때 ($N=2m; m=1, 2, 3, 4, \dots$)

$$\tilde{Z}_{2m} = \frac{(Z_2 Z_4 \dots Z_{2m})^2 Z_L}{(Z_1 Z_3 \dots Z_{2m-1})^2} \quad (5b)$$

예를 들어 1, 2, 3층의 경우에 대한 등가 임피던스는 다음과 같다.

$$\tilde{Z}_1 = \frac{Z_1^2}{Z_L}, \quad \tilde{Z}_2 = \frac{Z_2^2 Z_L}{Z_1^2}, \quad \tilde{Z}_3 = \frac{Z_1^2 Z_3^2}{Z_2^2 Z_L} \quad (6)$$

따라서 전면추에서의 방사 전력을 최대한 매질로 전달하기 위한 정합층의 특성 임피던스는 다음 식으로 결정된다.

$$\tilde{Z}_N = Z_h \quad (7)$$

만약 1개의 정합층을 적용할 경우, 특성 임피던스는 식 (6)과 식 (7)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$Z_1 = Z_h^{1/2} Z_L^{1/2} \quad (8)$$

그러나 2층 이상의 정합층에 대해서는 식 (7)에 대한 유일해가 존재하지 않으므로 본 연구에서는 각 층의 특성 임피던스를 다음과 같이 서로 인접하는 정합층의 특성 임피던스의 비가 일정하게 유지되도록 설계하였다.

$$\frac{Z_N}{Z_h} = \frac{Z_{N-1}}{Z_N} = \dots = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_L}{Z_1} = r \quad (9)$$

여기서 비례 상수 r 은 식 (7)과 식 (9)에서 구할 수 있다. 결국 각 층의 특성 임피던스는 다음 식으로 결정된다.

$$Z_N = rZ_h, \quad Z_1 = \frac{Z_L}{r}, \quad Z_k = \frac{Z_{k-1}}{r}; \quad k=2, 3, \dots, N-1 \quad (10)$$

예를 들어 2층 및 3층 정합층을 설계할 경우 각각의 특성 임피던스는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \text{2층인 경우: } & Z_1 = Z_h^{1/4} Z_h^{3/4}, \quad Z_2 = Z_h^{3/4} Z_L^{1/4} \\ \text{3층인 경우: } & Z_1 = Z_h^{1/4} Z_h^{3/4}, \quad Z_2 = Z_h^{1/2} Z_L^{1/2}, \\ & Z_3 = Z_h^{3/4} Z_L^{1/4} \end{aligned} \quad (11)$$

3. 진동체의 동특성 해석

진동체의 단면 방향의 치수가 관심 영역내의 주파수에 대한 파장보다 짧으면, 길이 방향의 진동은 임의 단면에서의 속도 분포가 균일한 평면파로 가정하고 전체 시스템을 Fig. 2와 같이 유한 요소 모델로 나누고 각 요소에 대한 1차원 동특성을 해석할 수 있다. 먼저 전/후면추와 정합층 등의 일반적인 탄성체 요소의 길이 방향으로의 평면파에 대한 힘-속도 관계식은 다음과 같이 표현된다⁽⁵⁾.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_i^- \\ F_i^+ \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_i^I & -z_i^{II} \\ -z_i^{II} & z_i^I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i^- \\ U_i^+ \end{Bmatrix} \\ z_i^I &= \frac{\rho_i c_i A_i}{j \tan \theta_i}, \quad z_i^{II} = \frac{\rho_i c_i A_i}{j \sin \theta_i}; \quad \theta_i = \omega t_i / c_i \end{aligned} \quad (12)$$

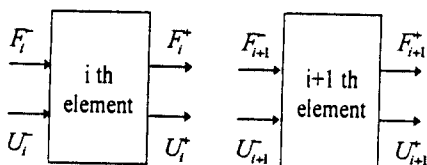


Fig. 2 One dimensional finite element model of the sandwich type transducer

여기서 F_i^+ , F_i^- (U_i^+ , U_i^-)는 i 번째 요소의 양단에서의 힘(속도)를 나타내며, ρ_i 는 밀도, c_i 는 음속, t_i 는 두께, A_i 는 단면적을 나타낸다. 그리고 압전 세라믹 요소에 대해서는 다음의 힘(전압)-속도(전류) 관계식이 성립한다⁽⁵⁾.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_i^- \\ F_i^+ \\ V_i \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} z_i^I & -z_i^{II} & z_i^{III} \\ -z_i^{II} & z_i^I & -z_i^{III} \\ z_i^{III} & -z_i^{III} & z_i^{IV} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i^- \\ U_i^+ \\ I_i \end{Bmatrix} \\ z_i^I &= \frac{\rho_i c_i A_i}{j \tan \theta_i}, \quad z_i^{II} = \frac{\rho_i c_i A_i}{j \sin \theta_i}, \quad z_i^{III} = \frac{g_{33}}{j \omega s_{33}^D}, \\ z_i^{IV} &= \frac{1}{j \omega C_o} \\ C_o &= \frac{A_i (1 - k_{33}^2)}{\beta_{33}^T t_i}, \quad \theta_i = \frac{\omega t_i}{c_i} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 F_i^+ , F_i^- (U_i^+ , U_i^-)는 i 번째 세라믹 요소 양단에서의 힘(속도)를 나타내며, ρ_i 는 밀도, c_i 는 음속, t_i 는 길이, A_i 은 단면적을 나타내며, s_{33}^D , g_{33} , β_{33}^T , k_{33} 는 각각 등가 세라믹의 분극 방향(길이 방향)으로의 탄성 계수, 압전 계수, 유전률, 결합 계수이며, $V(I)$ 는 양단에 가해진 전압(전류)을 나타낸다. 따라서 각 유한 요소의 접합면에서의 힘과 속도에 관한 경계 조건을 $U_i^+ = U_{i+1}^- = U_{i+1}$, $F_i^+ + F_{i+1}^- = F_{i+1}$ 와 같이 나타내면, 식 (12), (13)로 부터 전체 시스템의 임피던스 행렬식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \{F\}_{p+1} \\ \{V\}_q \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} [Z_{FU}]_{(p+1) \times (p+1)} & [Z_{FI}]_{(p+1) \times (q)} \\ [Z_{VU}]_{(q) \times (p+1)} & [Z_{VI}]_{(q) \times (q)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\}_{p+1} \\ \{I\}_q \end{Bmatrix} \\ \{F\} &= \{F_1, F_2, \dots, F_{p+1}\}^T, \\ \{U\} &= \{U_1, U_2, \dots, U_{p+1}\}^T \\ \{V\} &= \{V_1, V_2, \dots, V_q\}^T, \quad \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_q\}^T \\ [Z_{FU}] &= \begin{bmatrix} z_1^I & -z_1^{II} & 0 & \vdots & 0 \\ -z_1^{II} & z_1^I + z_2^I & -z_2^{II} & \vdots & 0 \\ 0 & -z_2^{II} & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -z_{p+1}^{II} \\ 0 & 0 & 0 & -z_{p+1}^{II} & z_{p+1}^I \end{bmatrix} \\ [Z_{FI}] &= \begin{bmatrix} z_1^{III} & \vdots & 0 \\ -z_1^{III} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & z_q^{III} \\ 0 & \vdots & -z_q^{III} \end{bmatrix} \\ [Z_{VU}] &= \begin{bmatrix} z_1^{III} & -z_1^{III} & \vdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & z_q^{III} & -z_q^{III} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$$[Z_{VI}] = \begin{bmatrix} z_1^{IV} & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & z_q^{IV} \end{bmatrix}$$

여기서 p 는 유한요소 모델의 전체요소 갯수이며, q 는 세라믹 요소의 갯수이다. 한편 진동체에 단위 전압을 인가할 때 방사면에서의 속도 U_{p+1} 은 식 (14)에 방사임피던스 Z_L 에 대한 경계조건 $F_{p+1} = -Z_L U_{p+1}$ 과 하중 조건 $F_1 = F_2 = \dots = F_p = 0$ 을 적용하면 구할 수 있다. 따라서 정합층 방사면에서의 방사 출력 W 은 다음과 같이 구해진다.

$$W = \frac{1}{2} |U_{p+1}^2| Z_L \quad (15)$$

그리고 압전 진동체의 수중에서의 송신 특성은 다음과 같이 송신 전압 감도 TVR(Transmitting Voltage Response)에 의해 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$TVR = 170.77 + 10 \log_{10} W + DI \text{ (dB // } \mu\text{Pa/V @ m)} \quad (16)$$

여기서 DI 는 지향지수(directionality index)로서 진동체를 무한 배플(baffle)을 가진 원판이 피스톤 운동한다고 가정하면 지향 지수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$DI = 10 \log \left\{ \frac{(ka)^2}{I - \frac{J_1(2ka)}{ka}} \right\} \quad (17)$$

여기서 a 는 방사면의 유효 반경이고 $k(=\omega/c)$ 는 파수(wave number)이며, $J_1(x)$ 는 제 1종 1차 Bessel 함수이다.

4. 예제 설계

본 연구에서 제안된 기법을 적용하기 위하여 Table 1에 있는 사양을 가진 샌드위치형 진동체에 대해 1, 2, 3층의 정합층을 식 (8), (10)을 이용하여 계산하면 특성 임피던스는 아래와 같으며 단위는 Mega Rayl이다.

- 1층인 경우 : $Z_1 = 4.58 \text{ (Mrayl)}$
- 2층인 경우 : $Z_2 = 8.01, Z_1 = 2.62 \text{ (Mrayl)}$
- 3층인 경우 : $Z_3 = 8.01, Z_2 = 4.58, Z_1 = 2.62 \text{ (Mrayl)}$

Fig. 3은 위에서 설계된 각각의 정합층에 대해 식 (3)을 이용하여 계산된 등가 입력 임피던스를 Z_h 로 정규화하여 그린 것이다. 공진 주파수에서는 등가

Table 1 Specification of test transducer

구분	재질/매질	특성임피던스 (Mrayl)	음속 (m/s)	길이
후면추	Steel	39.4	5050	$0.315L_{total}$
세라믹	PZT4	30.8	4108	$0.4L_{total}$
전면추	Aluminum	13.9	5150	$0.285L_{total}$

L_{total} = 진동체의 전체 길이

입력 임피던스의 실수 값은 Z_h , 허수 값은 0이 되어 임피던스의 정합이 이루어졌지만 그 외의 주파수에서는 임피던스 정합이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그리고 다수의 정합층을 사용할수록 단일 정합층 적용시 보다 밴드폭이 넓어짐을 알 수 있다. Fig. 4는 2층 정합층을 적용하였을 때 $\bar{Z}_N(f) = Z_h$ 을 만족하는 정합층 재질을 선택하는데 있어서, 식 (9)에서 처럼 인접하는 정합층의 특성 임피던스의 비가 일정하게 설계한 경우와 임의 값으로 선택한 2가지 경우에 대하여 등가 입력 임피던스를 비교하여 그린 것이다. 공진 주파수에서는 임피던스의 정합이 이루어

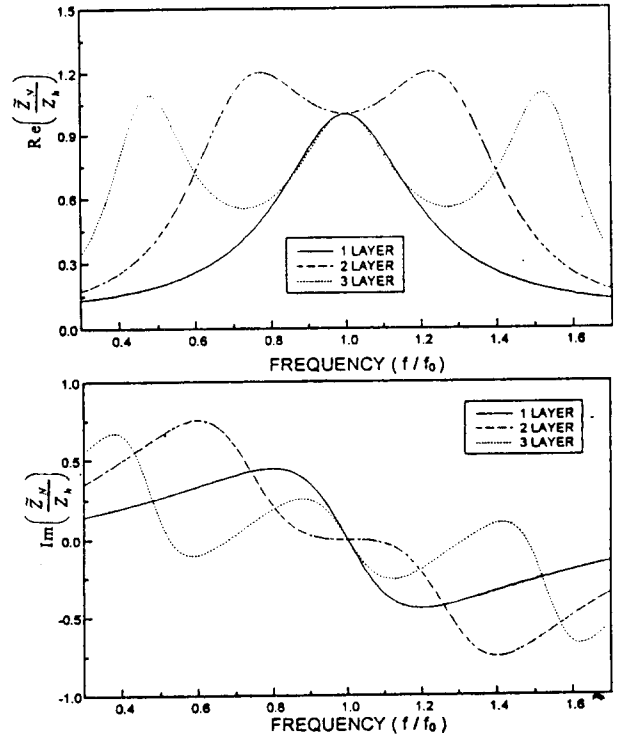


Fig. 3 Equivalent input impedance for 1, 2, 3 matching layers. 1 layer; $Z_1 = 4.58$, 2 layers; $Z_1 = 2.62, Z_2 = 8.01$, 3 layers; $Z_1 = 2.62, Z_2 = 4.58, Z_3 = 8.01$ (Mrayl)

졌지만 인접층 간에 서로 비례하지 않는 임피던스의 값으로 설계한 경우 Z_1/Z_2 이 클수록 공진 주파수 이외의 주파수 영역에서 임피던스의 부정합의 크기가 증가함을 알 수 있다.

한편 위에서 계산된 정합층의 특성 임피던스를 갖는 상용 재료를 구하거나 또는 제작하기 힘든 경우는 특성 임피던스가 유사한 재질을 선택할 필요가 있다. Fig. 5는 2층 정합층에 대해 상용 재질인 Lucite($Z_1=3.2$ Mrayl)와 Magnesium($Z_2=8.33$ Mrayl)을 적용하였을 때 등가 입력 임피던스를 보였다. 이 경우 이론적으로 설계된 특성 임피던스를 갖는 정합층을 사용한 때에 비하여 공진 주파수에서의 완전한 정합도 이루어지지 않을 뿐 아니라 공진 주파수 이외의 주파수 영역에서도 임피던스의 부정합의 크기가 증가하여 임피던스 정합 측면에서 손실이 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 예제 진동체에 대해 1/4파장의 두께로 설계된 1, 2, 3층의 정합층을 부착한 경우의 TVR을 그린 것으로, 정합층을 적용하지 않은 경우와 정합층을 적용한 경우를 비교하여 보면 공진 주파수에서

송신 전압 감도 특성은 나빠지지만 대역폭은 상당히 넓어져 광대역 특성을 갖는 트랜스듀서의 구현이 가능함을 알 수 있다. Fig. 7은 2층 정합층 사용시 인접층 간의 임피던스비에 따른 TVR의 영향을 그린 것으로 인접층 간에 서로 비례하지 않는 임피던스의 값으로 설계한 경우 Z_1/Z_2 이 클수록 공진 주파수 이외의 주파수 영역에서 TVR의 광대역 특성이 나빠짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8은 2층 정합층에 대해 상용 재질인 Lucite($Z_1=3.2$ Mrayl)와 Magnesium($Z_2=8.33$ Mrayl)을 적용하였을 때 TVR을 그린 것이다. 이 경우 이론적으로 설계된 특성 임피던스를 갖는 정합층을 사용한 때에 비하여 공진 주파수에서 뿐만 아니라 공진 주파수 이외의 주파수 영역에서도 TVR의 광대역 특성이 나빠짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 샌드위치형 수중 음향 진동체에 대해 광대역 주파수 특성을 구현하기 위한 정합층의

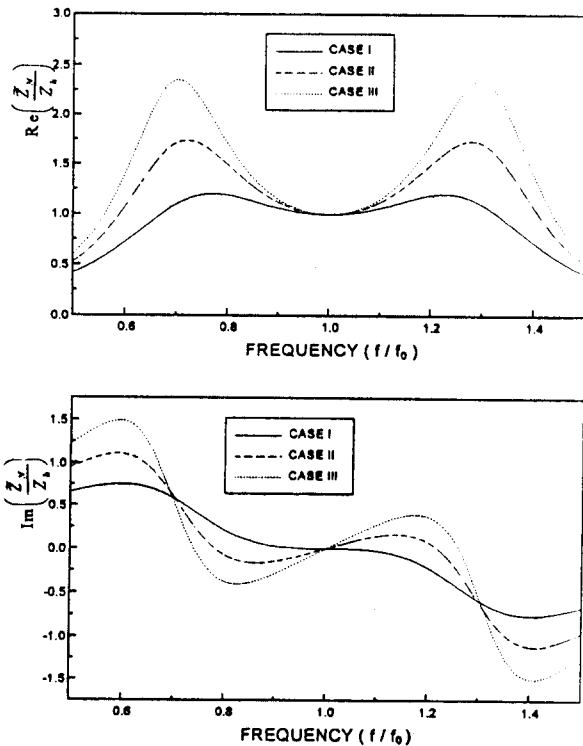


Fig. 4 Equivalent input impedance for the ratio of characteristic impedances between adjacent layers. CASE I; ($Z_1=2.62$, $Z_2=8.01$), CASE II; ($Z_1=3.3$, $Z_2=10.08$), CASE III; ($Z_1=3.9$, $Z_2=11.92$) (Mrayl)

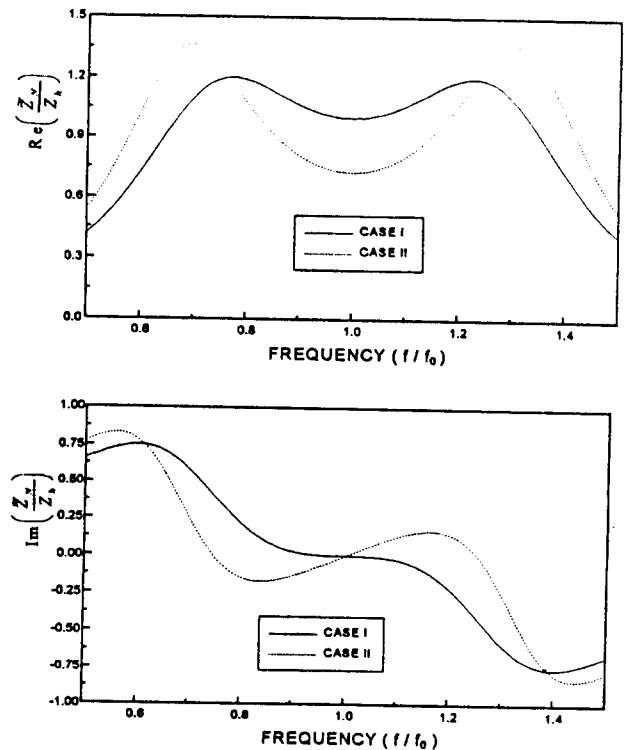


Fig. 5 Equivalent input impedance using the commercial materials. CASE I; designed materials. ($Z_1=2.62$, $Z_2=8.01$), CASE II; commercial materials. ($Z_1=3.2$, $Z_2=8.33$) (Mrayl)

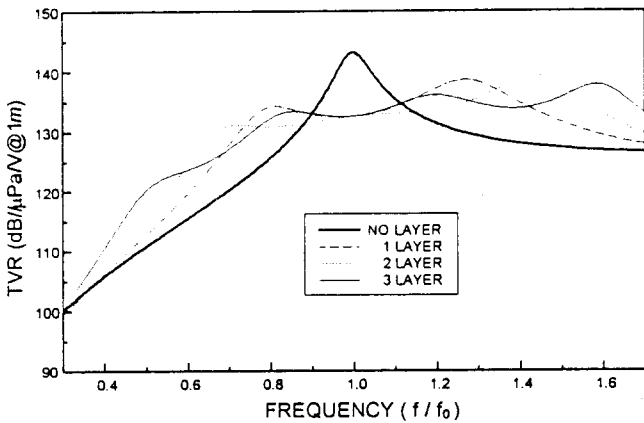


Fig. 6 Transmitting voltage response for 1, 2, 3 matching layers. 1 layer; $Z_1=4.58$, 2 layers; $Z_1=2.62$, $Z_2=8.01$, 3 layers; $Z_1=2.62$, $Z_2=4.58$, $Z_3=8.01$ (Mrayl)

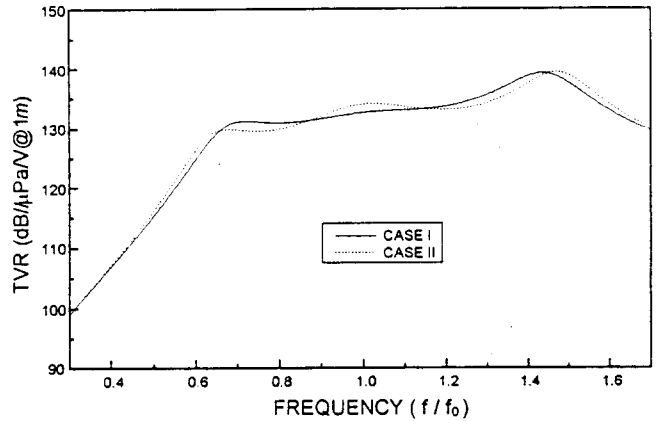


Fig. 8 Transmitting voltage response for using commercial materials. CASE I; designed materials. ($Z_1=2.62$, $Z_2=8.01$), CASE II; commercial materials. ($Z_1=3.2$, $Z_2=8.33$) (Mrayl)

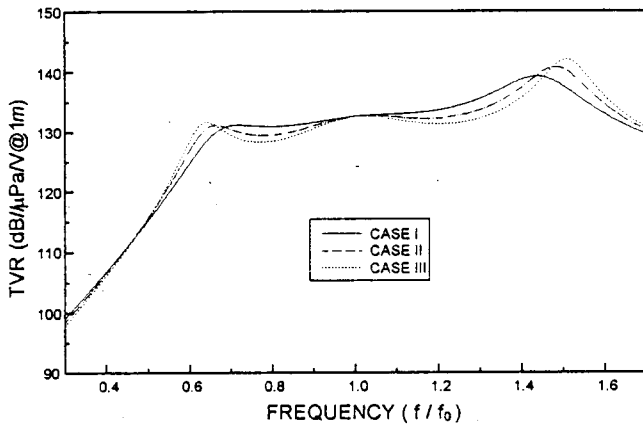


Fig. 7 Transmitting voltage response for the ratio of characteristic impedances between adjacent layers. CASE I; ($Z_1=2.62$, $Z_2=8.01$), CASE II; ($Z_1=3.3$, $Z_2=10.08$), CASE III; ($Z_1=3.9$, $Z_2=11.92$) (Mrayl)

설계 방법과 동특성을 해석하기 위한 1차원 유한요소 해석기법을 제시하였다. 진동체의 길이방향 진동 모드의 공진 주파수에 해당하는 파장의 4분의 1 두께를 갖는 정합층의 특성 임피던스를 인접하는 정합층의 특성 임피던스의 비가 일정하도록 설계하였다. 인접하는 정합층의 특성 임피던스의 비가 일정하지 않은 경우, 등가 입력 임피던스는 부정합의 크기가 증가하였고 송신 전압 감도의 광대역 특성이 나빠짐을 알 수 있었다. 또한 상용 재료를 정합층으로 구성할 경우 등가 입력 임피던스 및 송신 전압 감도에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서는 방사 임

피던스와 모든 재료의 손실을 무시하여 모두 실수값으로 가정하고 정합층을 설계하였다. 그러나 재료의 손실을 고려하여 복소 임피던스를 갖는 정합층 설계에 관한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) 조치영, 김인수, 윤형규, 1995, "수중 음향 트랜스듀서용 샌드위치형 압전 진동체의 설계," 한국소음진동공학회지, 제 5 권 제 4 호, pp. 577~583.
- (2) G. Kossoff, 1966, "The Effects of Backing and Matching on the Performance of Piezoelectric Ceramic Transducers," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-13, No. 1, pp. 20~30.
- (3) C. S. Desilets, J. D. Fraser and G. S. Kino, 1978, "The Design of Efficient Broad-Band Piezoelectric Transducer," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-25, No. 3, pp. 115~125.
- (4) J. H. Goll, 1979, "The Design of Broad-Band Fluid-Loaded Ultrasonic Transducer," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-26, No. 6, pp. 385~393.
- (5) W. P. Mason, 1964, Physical Acoustics. Principles and Methods, Volume. I. Academic Press.
- (6) L. E. Kinsler, 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons.