

魚種 識別을 위한 廣帶域 超音波 變換器의 設計 - II *

- 單一音響整合層을 이용한 二重共振型 超音波 變換器의 設計 -

李 吳 在

釜慶大學校

(1998년 2월 13일 접수)

The Design of Broadband Ultrasonic Transducers for Fish Species Identification

- Dual Resonance Design of a Ultrasonic Transducer using a Single Acoustic Matching Layer -

Dae - Jae LEE

Pukyong National University

(Received February 13, 1998)

Abstract

A doubly resonant ultrasonic transducer has been designed as an attempt to increase the bandwidth of underwater transducers. The dual resonance conditions were accomplished by attaching a single acoustic matching layer on the front face of a Tonpilz transducer consisted of an aluminum head, a piezoelectric ring, a brass tail and a prestress bolt.

A modified Mason's model was used for the performance analysis and the design of transducers, and the constructed transducers were tested experimentally and numerically by changing the impedances and thicknesses of the head, tail and matching layers in the water tank.

Two distinct resonance peaks in the transmitting voltage response(TVR) of a developed transducer were observed at 34.3 and 40.4 kHz, respectively, with the difference frequency of 6.1 kHz and the center frequency of 37.2 kHz. The values of TVR at these frequencies were 136.5 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{V}$ at 34.3 kHz and 136.8 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{V}$ at 40.4 kHz, respectively.

Reasonable agreement between the experimental results and the numerical results was achieved.

From this result, it is expected that the generation of the distinct resonances at any two desired frequencies can be achieved through the proper choice of the matching layer to provide the impedance transformation between the transducer and the medium.

* 이 논문은 1996년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제 연구비지원(과제번호 : 961 - 0609 - 082 - 2)에 의한 연구결과임.

序 論

지금까지 대부분의 어선에서 사용하여 온 魚群 探知機의 送·受波器는 물과 접촉하는 音響 放射面(acoustic window)이 주로 PVC, polyurethane, chloroprene, polycarbonate와 같은 合成樹脂나 合成고무 등으로서 만들어진 것이 많다. 종래의 경우, 이들 音響 放射面은 단순히 壓電素子(piezoelectric element)를 보호하는 데 주목하여 설계되어 왔으나, 최근에는 送·受波器의 壓電素子와 해수와의 음향학적인 임피던스(impedance)를 서로 整合시키기 위한 역할에 초점을 맞추어 설계되고 있는 추세이다. 특히, 壓電素子와 물 사이에 존재하는 音響 window가 音響 transformer로서의 기능을 충분히 발휘하지 못하는 경우에는 送·受波器의 周波數 帶域幅이 좁아지고, 또한 電氣音響變換效率이 떨어져 送·受信 感도가 급격히 저하하는 현상이 발생한다.

현재 세계적으로 널리 보급되고 있는 魚群探知機의 사용주파수는 28~200 kHz로서, 이들 魚群探知機에서 사용하는 送·受波器의 대부분은 一周波用이지만, 특수하게 基本波와 第3 高調波 振動을 이용하는 二周波 兼用的 것이 있다. 여기서, 이들 二周波에 대한 送·受信 感도가 서로 같은 경우에는 高·低周波에 대한 어군 echo 신호의 차이를 검출하고, 이들 정보를 분석하면 탐지 어군을 식별하는 것이 가능하다^{1)~5)}. 그러나, 실제의 경우, 이들 二周波에 대한 전기적인 임피던스와 送·受信 感도가 서로 다르기 때문에 高·低周波에 대한 반사신호의 비교가 어려운 실정이다. 또한, 이들 基本波와 第3 高調波 振動에 대한 주파수 간격이 너무 크면, 한 개의 송·수신 시스템으로서 이들 二周波 振動子를 동시에 驅動할 수 없는 문제가 발생한다.

따라서, 본 연구에서는 魚群探知機의 送·受波器와 媒質과의 음향학적 임피던스를 서로 整合시키기 위한 整合層을 설계하고, 이것을 音響 window로서 이용한 二重共振型 超音波 變換器의 설계를 시도하였다. 이를 위해 먼저 38 kHz용의 Tonpiliz型 超音波 變換器를 설계한 후, 세라믹系와 합성수지系의 音響材料에 의한 整合層을 이 變

換器의 head mass 前面에 접착시킨 複合構造 超音波 變換器를 제작하고, 이 變換器의 二重共振 振動特性에 대하여 분석, 고찰하였다.

材料 및 方法

1. 超音波 變換器의 設計理論^{6)~10)}

壓電 세라믹의 前面과 後面에 Fig. 1과 같이 金屬 블록을 접합시키고, 이들을 高強力 볼트에 의해 체결한 후 前面 振動 블록(head block)의 放射

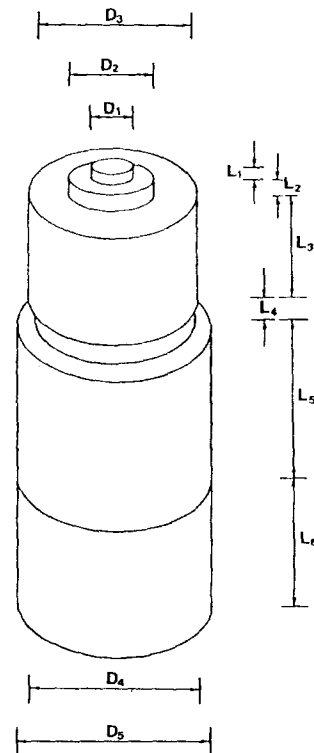


Fig. 1. Schematic diagram of a Tonpiliz transducer with a single matching layer.

面에 한 개의 音響 整合層을 부착시켜 제작한 複合構造 Tonpiliz型 變換器의 電氣入力端子에 電氣信號를 인가하면, 이들 구성요소는 서로 一體가 되어 진동을 한다. 이 音響 變換器에 대한 電氣-機械-音響의 複合적인 等價回路는 Fig. 2과 같이

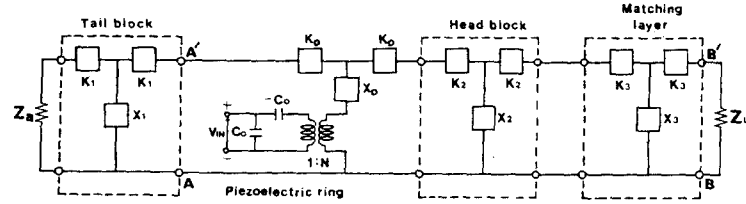


Fig. 2. A modified Mason's model of a Tonpilz transducer with a single matching layer. The left hand end, in contact with air is short circuited($Z_a \approx 0$). The other extremity is loaded by the radiation impedance(Z_L) of the water.

나타낼 수 있는 데, 그림에서 等價回路의 要素 $K_0 \sim K_3$ 및 $X_0 \sim X_3$ 는 각각

$$K_0 = Z_c \tanh(\theta_c / 2), \quad X_0 = \frac{Z_c}{\sinh(\theta_c)}$$

$$K_1 = Z_b \tanh(\theta_b / 2), \quad X_1 = \frac{Z_b}{\sinh(\theta_b)}$$

$$K_2 = Z_f \tanh(\theta_f / 2), \quad X_2 = \frac{Z_f}{\sinh(\theta_f)}$$

$$K_3 = Z_{ma} \tanh(\theta_{ma} / 2), \quad X_3 = \frac{Z_{ma}}{\sinh(\theta_{ma})}$$

에 의해 나타낼 수 있다. 이들 식에서 添字 c, b, f, ma 는 각각 Fig. 2의 等價回路에 대한 壓電素子, 背面振動 블록(tail block), 前面振動 블록, 整合層 등을 나타내는 略號이다. 等價回路의 要素 $K_0 \sim K_3$ 및 $X_0 \sim X_3$ 에서 Z 는 이들 壓電素子, 前·後面의 振動 블록, 音響 整合層 등에 대한 固有音響임피던스이고, θ 는 $\theta = k \cdot l$ 에 의해 표시되는 函數이다. 이 식에서 k 는 $k = (\alpha + j\beta)$ 로서 정의되는 傳播函數(propagation function)인 데, 여기서 α 는 減衰定數(attenuation constant, neper/m), β 는 位相定數(phase constant, radian/m)이다. 또한 β 는 $\beta = \frac{\omega}{v}$ 로서 정의되는 波數(wave number)인데, 여기서, ω 는 角周波數($\omega = 2\pi f$, f 는 周波數), v 는 複合構造 音響 變換器의 構成要素에 대한 位相速度이다

Fig. 2의 等價回路에서 壓電素子의 양단에 전압 V_{in} 가 인가되고, 그 때 전류 I 가 흐른다고 할 때, 背面振動 블록에서의 음향 에너지의 감쇠가 크고,

前面 振動 블록의 면적이 충분히 크다고 하면, 이 등가회로 모델에 의해 壓電素子의 전기단자에서 본 전기적인 입력 임피던스는 기계적인 단자에 있어서의 각종 물리량과 서로 연관시켜 생각할 수 있다.

먼저 AA' 境界面에서 背面振動 블록을 향해 본 固有音響入力 임피던스(specific acoustic input impedance) Z_i 는

$$Z_i = Z_b \frac{Z_a \cosh(\theta_b) + Z_b \sinh(\theta_b)}{Z_b \cosh(\theta_b) + Z_a \sinh(\theta_b)}$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, θ_b 는 背面 振動블록에 대한 傳播函數 $\theta_b = (\alpha_b + j\beta_b) \cdot l_b$ 이고, α_b, β_b, l_b 는 각각 背面 振動 블록에 대한 減衰定數, 位相定數 및 길이이다.

대개의 音響 變換器에서는 背面 振動 블록의 後面에 콜크(cork) 층을 두어서 공기와 접하도록 하는데, 이 때 공기의 固有音響 임피던스(Z_a)는 背面 振動 블록의 그것에 비해 매우 작기 때문에 音響 變換器의 전체에 대한 振動特性을 생각할 때, 공기의 영향은 무시할 수 있다($Z_a \approx 0$). 이 경우, Z_i 는 一端이 자유인 傳送線路의 二端子 임피던스가 되어 $Z_i = Z_b \tanh(\theta_b)$ 로서 나타낼 수 있다.

또한, 본 연구의 수치모델에 있어서는 볼트(prestress bolt), 電極(silver electrode), 接着層(bonding layer)의 영향은 무시하였다.

Fig. 2의 等價回路에서 1 : N의 電氣機械變成比를 나타내는 transformer 右側に 대한 壓電素子의 T形 等價回路와 背面振動 블록의 T形 等價回路를 결합한 回路部分에 대한 F行列의 四端子定數 A, B, C, D 는

$$A_t = \frac{\frac{1}{\tanh(\theta_c)} + R_p}{\frac{1}{\tanh(\theta_c/2)} + R_p}, B_c = \frac{Z_c \left(\frac{R_p}{\tanh(\theta_c)} + 1 \right)}{\frac{1}{\tanh(\theta_c/2)} + R_p}$$

$$C_c = \frac{\frac{1}{Z_c}}{\frac{1}{\tanh(\theta_c/2)} + R_p}, D_c = \frac{2 \tanh(\theta_c/2) + R_p}{\frac{1}{\tanh(\theta_c/2)} + R_p}$$

이 되고, 여기서, $R_p = \frac{Z_L}{Z_c}$ 이다.

Fig. 2에서 前面振動 블록, 整合層 등의 傳送線 路는 각각 T形 等價回路의 從續接續에 의해 표시 되고, 이들 四端子 回路에 대한 F 行列의 四端子 定數를 A_i, B_i, C_i, D_i 라 하면, 이들 전체에 대한 傳 送行列의 四端子 定數 A_m, B_m, C_m, D_m 는

$$\begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^2 \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \theta_i & Z_i \sinh \theta_i \\ \sinh \theta_i / Z_i & \cosh \theta_i \end{bmatrix}, i = 1, 2$$

이고, 여기서, i 는 前面振動 블록과 整合層을 나타 내는 첨자이다.

壓電素子の 電氣入力端子에서부터 音響出力端子 BB'까지의 F 行列의 四端子 定數 A_t, B_t, C_t, D_t 는

$$\begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/N & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & jN^2 \\ \omega C_d & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_r & 0 \\ 0 & 1/A_r \end{bmatrix}$$

이 되고, 여기서, A_r 는 물과 접촉하는 整合層의 有 效放射 斷面積이다.

따라서, 音響 變換器의 수중에 있어서의 入力 admittance Y_{in} 는

$$Y_{in} = \frac{C_t X_L + D_t}{A_t Z_L + B_t}$$

이 되고, 공기중에 있어서의 입력 admittance Y_a 는 $Y_a = \frac{D_t}{B_t}$ 이 된다.

한편, 音響 變換器의 自由電氣 임피던스 $Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}}$

에 의해 구할 수 있다.

일반적으로 물에 대한 音響放射 임피던스 Z_L 은

$$Z_L = R_L + jX_L$$

$$= \frac{\rho C}{S} \left[\left(1 - \frac{2J_1(x)}{x}\right) + j \frac{2S_1(x)}{x} \right]$$

이고, 여기서, R_L, X_L 은 音響放射 resistance 및 reactance이고, ρ, C 는 물의 密度 및 水中音速, $x = ka$ (k : 波數, a : 超音波 變換器의 有效放射面 半徑), $J_1(x)$ 는 第一種 一次 Bessel 函數, $S_1(x)$ 는 Struve 函數이다.

超音波 變換器에서 송과되는 音響放射出力 P_a 는 音響放射面의 體積速度를 U_a 라할 때,

$$P_a = R_L |U_a|^2$$

이고, 變換器에 인가한 入力電壓 V 와 體積速度와 의 사이에는

$$V = (A_t Z_L + B_t) U_a$$

이 성립하기 때문에, 音響放射出力은

$$P_a = \frac{R_L V^2}{|A_t Z_L + B_t|^2}$$

이고, 變換器에서 d 만큼 떨어진 지점에서의 送波 音壓레벨 SL_d (sound pressure level, dB re 1 $\mu Pa/V$)는 送波指向性利得을 DI_T 라 할 때,

$$SL_d = 10 \log_{10} \left(\frac{R_L}{|A_t Z_L + B_t|^2} \right) + 20 \log_{10} (V) + DI_T + 170.6 - 20 \log_{10} (d)$$

이 된다.

따라서, 音響變換器에 1 V의 전압을 인가했을 때, 變換器의 放射面에서 1 m 떨어진 지점에서의 送波音壓레벨, 즉 送波電壓感度 TVR (transmitting voltage response, dB re 1 $\mu Pa/V$ at 1 m)은

$$TVR = 10 \log_{10} \left(\frac{R_L}{|A_t Z_L + B_t|^2} \right) + DI_T + 170.6$$

에 의해 구할 수 있다.

2. 超音波 變換器의 設計

본 연구에서는 한 개의 超音波 變換器로서 서로 인접한 두 개의 어떤 주파수에서의 공진진동을 동시에 발생시키는 多重共振型 超音波 變換器의 설계를 위해 먼저 目標로서 설정한 基本共振周波數를 얻기 위한 Tonpitz형 超音波 振動子를 설계하고, 이 振動子의 放射面에 音響 整合層을 제작하여 접착시켰다.

1) 壓電 세라믹의 선정

音響 整合層을 접착시킬 振動子의 基本振動周波數는 현재 세계적으로 널리 보급되고 있는 魚群 探知機의 使用周波數를 고려하여 38 kHz로서 정하였다. 이 基本振動은 壓電素子의 前面과 後面에 각각 금속 블록을 導電性 接着材로서 부착시키고, 이들을 직경 5 mm의 스텐레스 볼트로서 상호 締結하여 제작한 Fig. 1의 非對稱 Tonpitz형 超音波 振動子를 이용하여 발생시켰다. Fig. 1에서 振動子의 出力이 과도하게 壓電素子에 집중될 때, 그것의 파손을 방지하기 위해 壓電素子와 head mass 및 tail mass와의 斷面積의 比는 가능한 한 작게 하였다. 또한, 이 振動子의 설계에 사용한 壓電素子는 덴마크 Ferroperm사의 Pz 26으로서, 이 壓電素子의 두께 (L_4), 내경 및 외경(D_3)은 각각 5 mm, 8 mm, 25 mm이고, 전극은 壓電素子의 상하면에 위치하며, 分極方向은 두께 방향이었다.

2) Head mass의 설계

Tonpitz형 초음파 변환기의 경우에 있어서는 그것을 구성하는 壓電素子와 금속 블록과 같은 재질 자체의 固有音響 임피던스가 매우 높기 때문에 음향 에너지를 해중에 효율 좋게 송신하기 위해서는 해수와의 임피던스 정합이 필요하다. 이를 위해 head mass의 형상을 taper型으로 설계하여 해수에 대한 음향 방사면의 접촉면적을 증대시키는 방법도 생각할 수 있으나, 본 연구에서는 超音波 變換器의 複數配列에 의한 사용 등을 고려하여, 또한 기계적인 Q를 낮추면서 音響放射效率을 높이기 위해 음향 임피던스가 비교적 작은 알루미늄을 원통형으로 가공하여 head mass로서 사용하였는데, 그 직경 (D_5) 및 길이 (L_5)는 각각 35 mm, 25

mm이었다..

3) Tail mass의 설계

壓電素子의 裏面に 접착되는 tail mass는 壓電素子와의 境界面에서 초음파 신호가 반사되는 현상을 최대한 억제하기 위해 초음파 신호의 감쇠가 비교적 큰 黃銅(brass)을 後面材로서 사용하였는데, 그 두께 (L_6), 내경 및 외경(D_4)은 각각 15 mm, 8 mm, 29 mm이었다.

3. 音響整合層의 設計

본 연구에서는 二周波 兼用으로서 사용 가능하면서도 이들 주파수에 대한 수중에서의 전기적인 임피던스가 서로 같고, 또한 二周波間의 周波數間隔을 좁혀 넓은 주파수 범위에서 사용이 가능한 複合構造 超音波 變換器의 설계에 적합한 音響 整合層을 製作하였다.

單一音響整合層을 사용하는 경우에 있어서는 초음파 신호의 전송 효율을 높이기 위해 整合層의 두께를 사용주파수의 파장 λ 의 $\lambda/4$ 前後의 범위에서 정하는 것이 보통이고, 이 때, 정합층의 固有音響 impedance Z_m 은

$$Z_m = \sqrt{Z_c \cdot Z_l}$$

에 의해 주어지는 데¹⁾, 여기서, Z_c 는 壓電素子의 固有音響 impedance이고, Z_l 는 媒質, 즉 해수의 固有音響 impedance이다.

본 연구에서는 다양한 종류의 음향 재료를 사용하여 整合層의 설계를 시도하였는데, 설계의 초기단계에서는 이 관계식을 고려하여 整合層을 제작하였으나, 최종적인 설계 단계에서는 一次元 等價回路모델에 의한 수치해석을 통해 整合層의 정밀한 형상, 직경, 두께 등의 설계 파라미터를 도출하였다. 이 수치해석의 결과를 토대로 본 연구에서는 시중에서 구입이 용이한 Al_2O_3 의 粉末(純正化學)과 epoxy 樹脂(에폰스화학)를 適定比率로 혼합시켜 생성한 직경 (D_6) 및 두께 (L_6)가 각각 35 mm, 17.8 mm이고, 固有音響 임피던스가 $3.48 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 複合材料棒을 제작, 가공하여 音響 整合層으로서 사용하였다.

4. 電氣 임피던스 및 送波電壓感度의 測定

본 연구에서 시험 제작한 각종의 초음파 변환기에 대해서는 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스를 정밀 LCR meter(QuadTech 7600)를 이용하여 측정하고, 그 결과를 프린터(DXY-1300, Roland)를 통해 출력하였다. 수중에 대한 초음파 변환器的 전기 임피던스를 측정할 때에는 변환器的 最前端 音響 放射層의 浸水 깊이에 따라 音響負荷抵抗(acoustic load resistance)이 변화하고, 이것에 비례하여 音響出力電力(acoustic output power)의 변동이 초래되기 때문에 여기서는 0.3 cm 전후의 浸水 깊이를 유지하면서 각종의 실험을 행하였다.

한편, 초음파 변환器的 送波電壓感度(transmitting voltage response)는 實驗水槽(L×B×D, 190×130×105 cm)에서 측정하였는데, 이를 위해 먼저 任意波形發生器(HP33120A)에서 20~60 kHz의 측정주파수 범위에 대한 정현파 신호를 발생시키고, 이 신호를 gating system (B&K 4440)에 입력하였다. 여기서 일정한 펄스 폭과 펄스 反復週期를 갖는 送信 펄스 信號를 발생시켜 電力增幅器(B&K 2713)를 통해 증폭시켜 音響 放射面이 水槽의 底面을 향해 설치된 초음파 변환器에 인가하였다. 초음파 변환器에서 發射된 送信 펄스 信號는 hydrophone(B&K 8105)을 통해 수신하였으며, 이 신호를 charge amplifier (B&K 2635) 및 measuring amplifier (B&K 2610)를 통해 digital storage oscilloscope(Gould 475)에 입력시키고, 受信 信號의 電壓을 측정하여 送波電壓感度를 구하였다.

結果 및 考察

1. 試作 Tonpilz型 超音波 變換器의 周波數 特性

1) 空氣中에서의 周波數 特性

Tonpilz형 초음파 振動子의 설계에 이용한 壓電素子(piezoelectric ring)의 振動特性을 高찰하기 위하여 이 素子의 空氣中에서의 두께 振動 모드에 대한 전기적인 임피던스를 측정 하였는데, 그 結

果는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 (A)는 임피던스의 振幅特性이고, (B)는 임피던스의 位相特性이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치이다.

Fig. 3에서 壓電素子의 두께방향에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 382.1 kHz, 403.5 kHz이었고, 임피던스의 位相角은 共振과 反共振 사이의 주파수 구간에 있어 80°~85° 범위에서 비교적 평탄하게 변화하는 특성을 나타내었다. 또한, 이들 임피던스의 振幅과 位相의 측정치는 계산치와 거의 일치하는 경향을 나타내었고, 390 kHz 근방에 나타나는 微小振動은 非線形 振動에 기인하는 것이라 판단된다.

本 研究에서 목적하는 二重共振型 超音波 變換器의 설계에 앞서 基本共振振動을 발생 시키기 위해 설계한 Tonpilz型 超音波 變換器의 空氣中에서의 전기적인 임피던스는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 (A)와 (B)는 각각 임피던스의 振幅 및 位相特性의

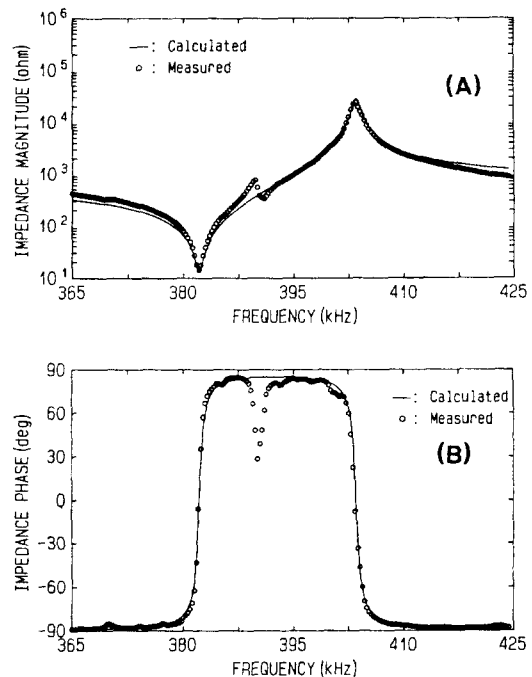


Fig. 3. Measured and calculated impedance of a Pz26 piezoceramic ring used in constructing a experimental Tonpilz transducer. (A) impedance magnitude, (B) impedance phase.

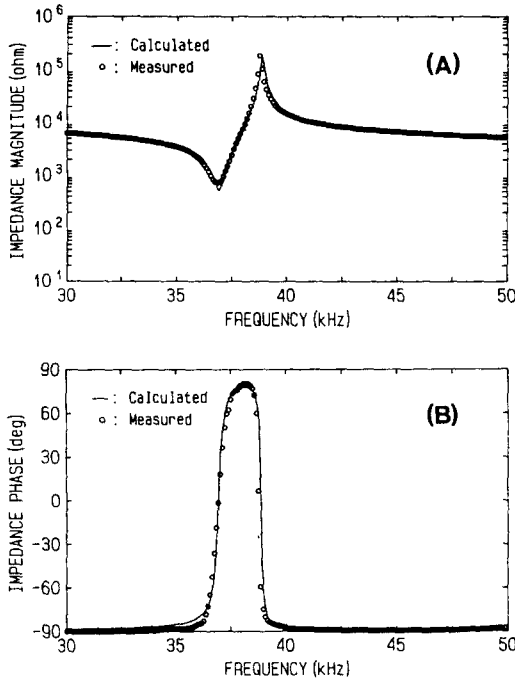


Fig. 4. Measured and calculated impedance of the experimentally constructed Tonpilz transducer in air. (A) impedance magnitude, (B) impedance phase.

로서, 그림에서 ○은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 Tonpilz型 超音波 變換器의 基本共振周波數는 36.8 kHz이었고, 또한 反共振 周波數는 38.8 kHz로서, 共振과 反共振 사이의 周波數差는 2 kHz이었다. 共振과 反共振 周波數 사이의 구간에서 임피던스의 最大 位相角은 약 80°였고, 또한 이들 임피던스의 振幅과 位相의 측정치는 계산치와 잘 일치하는 경향을 나타내었다. 이들의 共振 周波數는 壓電素子の 前後에 接觸되어 있는 head mass와 tail mass의 固有音響 임피던스, 길이, 直徑 및 形狀 등에 따라 變動할 뿐만 아니라, 이들을 締結하고 있는 prestress 볼트의 壓縮力에 의해서도 變化한다. 따라서, 본 연구에서는 二重共振 모드에 대한 共振周波數의 목표치를 각각 35 kHz와 40 kHz로서 設定하고, 基本共振周波數는 이들의 中間周波數인 37.5 kHz로서 訂하여 head

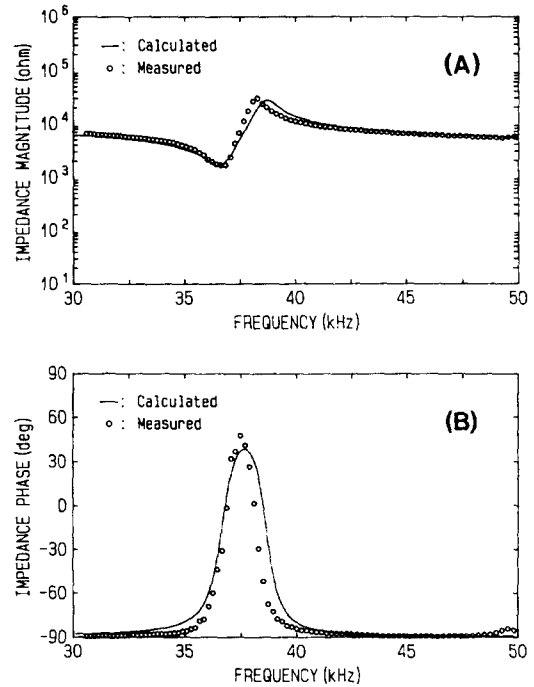


Fig. 5. Measured and calculated impedance of the experimentally constructed Tonpilz transducer in water. (A) impedance magnitude, (B) impedance phase.

mass와 tail mass의 길이, 直徑 등의 설계 파라미터를 수치모델에 의해 推定하여 사용하였으나, 실제의 Tonpilz型 超音波 變換器의 基本共振周波數는 설계치보다 0.7 kHz 낮았다.

2) 水中에서의 周波數 特性

基本共振振動的의 發生裝置로서 설계한 Tonpilz型 超音波 變換器의 수중에 대한 전기적인 임피던스는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 (A)와 (B)는 각각 임피던스의 振幅 및 位相特性이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 수중에 대한 Tonpilz型 超音波 變換器의 基本共振周波數는 36.2 kHz이었고, 또한 反共振 周波數는 38.0 kHz로서, 共振과 反共振 사이의 周波數差는 1.8 kHz이었다.

共振과 反共振 周波數에서의 임피던스의 振幅

은 각각 $1.7 K\Omega$, $29.9 K\Omega$ 이었고, 位相角은 각각 -1.4° , -29.5° 로서 最大의 位相角은 共振과 反共振의 중간주파수인 $37.1 kHz$ 에서 48° 였다. 또한 이들 임피던스의 振幅과 位相의 측정치는 계산치와 약간의 차이를 나타내었는데, 특히 임피던스의 反共振周波數의 측정치가 계산치보다 $0.3 kHz$ 낮았고, 이 현상 때문에 측정치의 위상곡선 폭이 수치 모델에 의해 것보다 좁아지는 경향을 나타내었다.

한편, 超音波 變換器의 電氣端子에서 측정한 共振周波數 부근에 있어서의 自由電氣 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분에 대한 周波數 軌跡은 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 縱軸은 reactance ($K\Omega$)이고, 橫軸은 resistance ($K\Omega$)이며, 그림에서 큰 원은 無負荷時, 즉 공기중에 대한 自由 임피던스의 vector diagram이고, 작은 원은 負荷時, 즉, 수중에 대한 自由 임피던스의 vector diagram이다. 이들 임피던스의 周波數 軌跡을 이용하여 Tonpilz型 變換器의 電氣音響變換效率 η 를

$$\eta = \frac{D_w}{R_m} \left(1 - \frac{D_w}{D_a} \right)$$

에 의해 구하였는데¹²⁾, 여기서, R_m 은 수중의 자유 임피던스 loop에 대한 resistance의 最大値, D_w 은 수중에 대한 動임피던스(motional impedance)

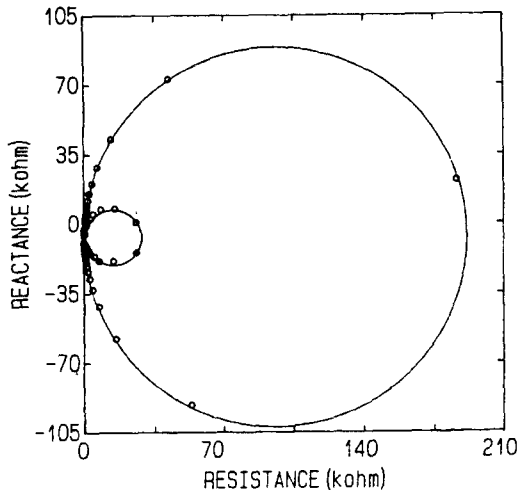


Fig. 6. Comparison of impedance circles for the experimentally constructed Tonpilz transducer in air (large circle) and in water (small circle).

circle의 직경, D_a 는 공기중에 대한 動임피던스 circle의 직경이다. 이 식에 의해 구한 Tonpilz型 超音波 變換器의 電氣音響變換效率는 85.2%이었다.

일반적으로 이와같이 설계된 Tonpilz형 超音波 變換器는 PVC, rubber, chloroprene과 같은 합성 재료에 의해 몰딩되어 魚群探知機用 送·受波器로서 사용된다. 여기서는 본 연구에서 설계한 Tonpilz형 超音波 變換器의 수중에 대한 音響放射特性을 조사하기 위해 送波電壓感度を 측정하였는데, 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 縱軸은 送波電壓感度($dB re 1 \mu Pa/V at 1 m$)이고, 橫軸은 周波數이며, 그림에서 \circ 은 측정치이고, 點線은 수치 모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 試作한 Tonpilz型 超音波 變換器의 送波電壓感度は 基本共振周波數 $36.2 kHz$ 에서 $141.4 dB$ 이었고, $-3 dB$ 점에 대한 周波數 帶域幅은 $1.1 kHz$ 이었다. 이 값들은 실제 超音波 變換器를 몰딩하여 사용하는 경우, 配列에 사용한 超音波 變換器의 數, 音響 window의 材質 등에 따라 다소 변동할 것이다. 또한, 送波電壓感度の 측정치는 계산치와 약간의 차이를 나타내고 있는데, 특히 基本共振周波數 보다 높은 周波數 領域에서는 측정치가 계산치보다 작았고, 낮은 周波數 領域에서는 그 반대의 현상을 나타내었다.

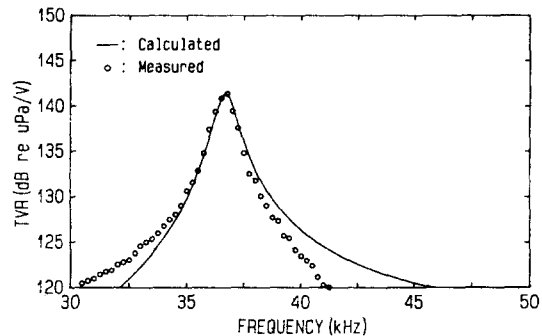


Fig. 7. Measured and calculated transmitting voltage responses for the experimentally constructed Tonpilz transducer.

2. 二重共振型 超音波 變換器의 周波數 特性

수중에서의 전기적인 임피던스가 서로 유사하고, 二周波間의 周波數 差가 작아 廣帶域 및 二周波 兼用 送·受波器로서 활용 가능한 複合構造 超音波 變換器를 설계하였는데, 여기서는 Al_2O_3 와 epoxy 樹脂로서 생성시킨 音響 整合層을 音響 transformer로서 이용하였다. 이 變換器의 수중에 대한 전기적인 임피던스는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 (A)와 (B)는 각각 自由電氣 임피던스의 振幅 및 位相特性이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

Fig. 8의 複合構造 超音波 變換器의 수중에서의 共振特性을 보면, 二重의 共振振動 모드가 서로 인접하는 周波數에서 동시에 나타나고 있는데, 第一 共振 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 34.2 kHz , 35.1 kHz 이었고, 第二 共振 모드

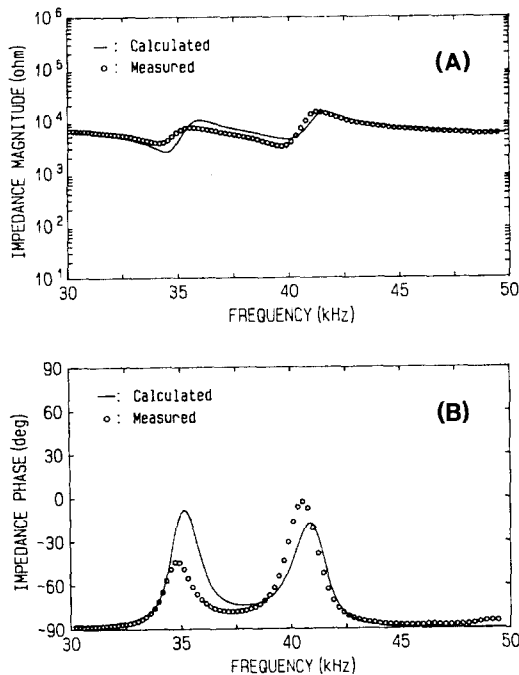


Fig. 8. Measured and calculated impedance of the transducer with a 17.8 mm matching layer (Al_2O_3 /epoxy composite) in water. (A) impedance magnitude, (B) impedance phase.

에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 39.7 kHz , 41.2 kHz 이었다. 또한, 第一 및 第二 共振 周波數에 대한 임피던스는 각각 $3.7\text{ K}\Omega$ 과 $3.3\text{ K}\Omega$ 으로서 거의 유사한 값을 나타내었고, 自由 임피던스 振幅의 측정치는 兩 共振點 부근에서 계산치와 약간의 차이를 나타내었다. Fig. 8의 (B)에서 第一 및 第二 共振點 부근에서의 位相特性을 보면, 測定 位相角은 兩 共振 모드에서 각각의 共振點과 反共振點의 中間 周波數인 34.7 kHz 와 40.5 kHz 에서 -44.3° , -2.6° 로서 最大值를 나타내었고, 이들 측정치는 모두 兩 共振點에서 계산치와 차이를 나타내었다.

複合構造 超音波 變換器의 電氣端子에서 측정 한 共振周波數 附近의 自由電氣 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분을 周波數 軌跡으로서 나타낸 결과는 Fig. 9와 같고, 그림에서 縱軸은 reactance ($K\Omega$)이고, 橫軸은 resistance ($K\Omega$)이다. Fig. 9의 impedance circle에는 두 개의 周波數 軌跡이 함께 나타나고 있는데, 이들 중에서 큰 circle은 34.2 kHz 의 第一 共振點 부근에 대한 自由 임피던스의 周波數 軌跡이고, 작은 circle은 39.7 kHz 의 第二 共振點 부근에 대한 自由 임피던스의 周波數 軌跡이다.

基本共振振動을 발생시키기 위해 試作한 Tonpilz형 振動子에 Al_2O_3 와 epoxy 樹脂로서 생

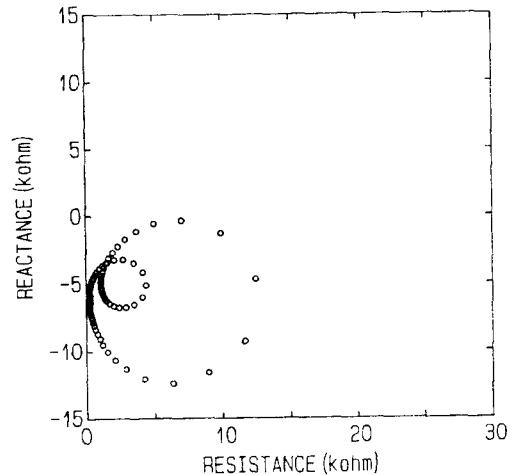


Fig. 9. Impedance diagram for the transducer of Fig. 8 in water.

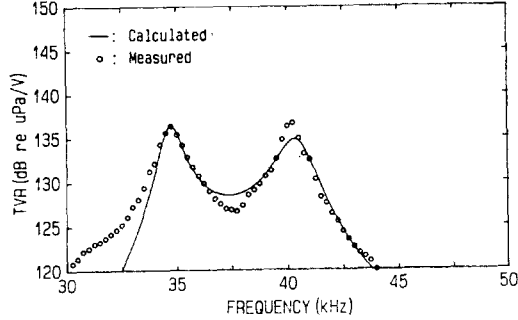


Fig. 10. Measured and calculated transmitting voltage responses for the transducer with a 17.8 mm matching layer (Al_2O_3 /epoxy composite).

성시킨 音響 整合層을 音響 transformer로서 접착시킨 複合構造 超音波 變換器의 수중에 대한 音響放射特性을 조사하기 위해 送波電壓感度を 측정하였는데, 그 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 縱軸은 送波電壓感度($dB re 1 \mu Pa/V at 1 m$)이고, 橫軸은 周波數이며, 그림에서 \circ 은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

본 연구에서 設計, 製作한 複合構造 超音波 變換器의 送波電壓感度は 第一 共振周波數 부근인 $34.3 kHz$ 에서 $136.5 dB$ 이었고, 第二 共振周波數 부근인 $40.4 kHz$ 에서 $136.8 dB$ 이었는데, 第一 및 第二 共振周波數에 있어서의 $-3 dB$ 점에 대한 周波數 帶域幅은 각각 $1.2 kHz$, $1.1 kHz$ 이었다. 또한, 第一 및 第二 共振點의 中間에 해당되는 $37.2 kHz$ 에 있어서의 送波電壓感度は $126.8 dB$ 로서 第一 및 第二 共振點에 대한 送波感度 보다 약 $10 dB$ 낮았다.

이상의 결과를 고찰해 볼 때, 본 연구에서 設計, 製作한 複合構造 超音波 變換器는 單純 構造의 Tonpilz型 超音波 變換器와 비교하여, 비록 送波電壓感도에 있어서는 $4.9 dB$ 의 損失이 초래되었지만, 그 대신 送波電壓感도가 거의 같은 두 개의 共振周波數를 동시에 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 이들 第一 및 第二의 共振點에 대한 周波

數 間隔은 약 $6.1 kHz$ 정도로서, 이들 주파수 구간에 대한 送波電壓感度の 最大 變動幅이 약 $10 dB$ 에 불과하기 때문에 그 周波數 帶域을 효과적으로 이용하면 魚種識別을 위한 音響散亂信號의 수집이 가능하다고 판단된다.

要 約

魚種識別을 위한 수중음향학적 情報를 수집하는 데 이용하기 위한 超音波 變換器를 설계하기 위한 시도의 하나로써, 본 연구에서는 우선 수중에서의 전기적인 自由 임피던스가 서로 같고, 二周波間의 周波數 差異를 最小化시켜 二周波 兼用 및 廣帶域 送·受波器로서 활용이 가능한 複合構造 超音波 變換器를 설계, 제작하였는데, 이 變換器의 二重共振 振動特性에 대하여 분석, 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 基本共振振動을 발생시키기 위해 설계한 Tonpilz型 超音波 變換器의 送波電壓感度は 基本共振周波數 $36.2 kHz$ 에서 $141.4 dB re 1 \mu Pa/V$ 이었고, $-3 dB$ 점에 대한 周波數 帶域幅은 $1.1 kHz$ 이었으며, 이 變換器의 수중에 대한 電氣音響變換效率는 85.2% 였다.

2. 複合構造 超音波 變換器의 수중에서의 第一 共振點에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 $34.2 kHz$, $35.1 kHz$ 이었고, 第二 共振點에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 $39.7 kHz$, $41.2 kHz$ 이었다. 또한, 第一 및 第二 共振周波數에 대한 임피던스는 각각 $3.7 K\Omega$ 과 $3.3 K\Omega$ 으로서 거의 유사한 값을 나타내었고, 自由 임피던스 振幅과 位相의 측정치는 兩 共振點 부근에서 계산치와 약간의 차이를 나타내었다.

3. 複合構造 超音波 變換器의 送波電壓感度は 第一 共振周波數인 $34.3 kHz$ 에서 $136.5 dB re 1 \mu Pa/V$ 이었고, 第二 共振周波數인 $40.4 kHz$ 에서 $136.8 dB re 1 \mu Pa/V$ 이었다. 또한, 第一 및 第二 共振周波數에 대한 $-3 dB$ 점에서의 周波數 帶域幅은 각각 $1.2 kHz$, $1.1 kHz$ 이었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 설계, 개발한 複合構造 超音波 變換器는 單純 構造의 Tonpilz型

變換器와 비교하여 비록 送波電壓感度に 있어서 는 4.9 dB의 損失이 불가피하지만, 그 대신 送波感度が 같은 두 개의 共振周波數를 동시에 이용할 수 있고, 또한 이들 第一 및 第二의 共振點에 대한 周波數 間隔이 좁으면서도 送波感度の 變動幅이 비교적 작아 魚種의 識別情報를 수집하는 데 效果적으로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

參考文獻

- 1) Zakharia M.E.(1987) : A prototype of wide - band sonar for fisheries in lakes and rivers. Int. Symp. Fish. Acoustics, 12p
- 2) Rose G.A. and W.C. Leggett(1988) : Hydroacoustic signal classification of fish schools by species. Can. J. Fish. Aqua. Sci., 45, 579 - 604.
- 3) Simmonds E.J. and F. Armstrong(1989) : A wide - band echosounder : measurements on cod, saithe, herring and mackerel from 27 - 54 KHz. Rapp P - v. Reun Cons Perm. int. Explor. Mer, 189, 183 - 191.
- 4) Lee K.T. and H.J. Lu(1995) : A study on characteristics of fish shoals in coastal waters of northeast Taiwan by using echo - signal image processing system. ICES Int. Symp. on Fish. and Plank. Acoustics. No. 165, 16p.
- 5) Simmonds E.J., F. Armstrong and P.J. Copland(1995) : Species identification using wide - band backscatter with neural network and discriminant analysis. ICES Int. Symp. on Fish. and Plank. Acoustics. No. 85, 14p.
- 6) Wilson O.B.(1991) : Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, Peninsula Publishing, California, 11 - 108.
- 7) Inoue T., T. Nada, T. Tsuchiya, T. Nakanishi, T. Miyama and M. Konno(1993) : Tonpiliz piezoelectric transducers with acoustic matching plates for underwater color image transmission, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont. 40, 121 - 129.
- 8) U.S. NUSC(1972) : TAC program, User' s Manual, General Electric Comp. 161p
- 9) Crombrugge M. and W. Thompson(1985) : Optimization of the transmitting characteristics of a Tonpiliz - type transducer by proper choice of impedance matching layers, J. Acoust. Soc. Am. 77(2), 747 - 752.
- 10) Desilet, C.S., J.D Fraser and G.S. Kino(1978) : The design of efficient braod - band piezoelectric transducers. IEEE Trans. SU - 25, 115 - 125.
- 11) Kossoff, G.(1966) : The Effect of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers. IEEE Trans. SU - 13, 20 - 30.
- 12) Camp, L.(1970) : Underwater Acoustics, Wiley - Interscience, New York, 89 - 108.