

## 魚種 識別을 위한 廣帶域 超音波 變換器의 設計 - Ⅲ \*

- 二重音響整合層을 이용한 超音波 變換器의 帶域幅 擴張 -

李 昊 在

釜慶大學校

(1998년 2월 13일 접수)

## The Design of Broadband Ultrasonic Transducers for Fish Species Identification

- Bandwidth Enhancement of a Ultrasonic Transducer using Double Acoustic Matching Layers -

Dae - Jae LEE

Pukyong National University

(Received February 13, 1998)

### Abstract

The broadband ultrasonic transducers have been designed to use in obtaining the broadband echo signals from fish schools in relation to the identification of fish species.

The broadening of bandwidth was achieved by attaching double acoustic matching layers on the front face of a Tonpitz transducer consisted of an aluminum head, a piezoelectric ring, a brass tail and a prestress bolt. A modified Mason's model was used to optimize the design parameters and to evaluate the performance characteristics, such as the transmitting voltage response(TVR) of transducers. The constructed transducers were tested experimentally and numerically by changing the parameters such as impedances and thicknesses of the head, tail and matching layers, in the water tank. Also, the developed transducer was excited by a chirp signal and the received chirp waveforms were analyzed.

According to the measured TVR results, the available 3 dB bandwidth of the transducer with double matching layers of an  $Al_2O_3$ /epoxy composite of 7 mm thick and a polyurethane window of 18 mm thick was 7.3 kHz with a center frequency of 38.8 kHz, and the maximum and the minimum values of the TVR in this frequency region were 135.7 dB and 132.7 dB re  $1 \mu Pa/V$  at 1 m, respectively. Also, the available 3 dB bandwidth of the transducer with double matching layers of an  $Al_2O_3$ /epoxy composite of 11 mm thick and a polyurethane window of 15 mm thick was 6.2 kHz with a center frequency of 38.6 kHz, and the maximum TVR value in the frequency region was 136.3 dB re  $1 \mu Pa/V$  at 1 m.

Reasonable agreement between the experimental results and the numerical results for the

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

TVR of the developed transducers was achieved. The frequency dependant characteristics of experimentally observed chirp signals closely matched to the measured TVR results

These results suggest that there is potential for increasing the bandwidth by varying other parameters in the transducer design and the material of the acoustic matching layers.

### 序 論

최근 초음파를 이용하는 魚群探知分野나 非破壞檢査分野 등에서는 대상 물표의 탐지능력을 향상시키기 위하여 초음파信號의 펄스幅을 가능하면 짧게 하려는 경향이 있는데, 이를 위해서는 送受信系の 帶域幅 擴張, 특히 초음파 振動子の 廣帶域化가 무엇보다도 선행되어야 한다. 더우기, 水中 데이터 通信, 水中情報의 傳送, 魚種의 識別, 海底의 底質 및 堆積層의 識別 등을 위한 연구분야에 있어서는 高出力, 高效率 및 廣帶域 特性을 갖는 水中音響變換器의 사용이 절실히 요구되고 있기 때문에 최근 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)~12)</sup>.

현재 水中情報의 수집에 사용되는 초음파 變換器의 周波數 帶域幅을 증대시키기 위한 방법의 하나로서 impedance matching법이 이용되고 있는데, 이 技法은 變換器의 入力端에 전기적인 整合回路를 삽입하는 방법<sup>7)</sup>과 變換器의 音響放射面에 기계적인 音響 整合層을 부착시키는 방법<sup>2)~3)</sup> 등이 주로 이용되고 있다. 특히, 이 중에서 後者의 技法에 대한 기계적인 音響 整合層은 초음파 變換器와 그것의 放射面에 접해 있는 해수 사이의 音響 impedance를 서로 整合시킴과 동시에 음향 필터로서의 역할을 수행하게 된다. 이 때, 音響 整合層은 물과 더불어 초음파 變換器에 대한 共振周波數의 下向移動(down shifting)과 音響放射에 대한 制振效果(damping effect) 등을 유발시키는데, 이들 요인의 복합적인 상호 작용에 의해 넓은 주파수 범위에 걸쳐 음향 에너지가 방사되는 이른바, 廣帶域 周波數特性이 나타나게 된다. 본 연구에서는 이와같은 기계적인 音響 整合層을 효과적으로 이용하여 魚群探知機用 送·受波器의 周波數 帶域幅을 확장시키기 위한 연구를 시도하였는데, 여기서는 우선 低周波用 Tonpiliz型 초음파 變換器

를 설계한 후,  $Al_2O_3$ 와 epoxy를 서로 혼합하여 생성한 整合層과 폴리우레탄 樹脂에 의한 整合層을 각각 Tonpiliz型 變換器의 音響 放射面에 접착시킨 複合構造 초음파 變換器를 제작하고, 이 變換器의 音響振動特性, 특히 廣帶域 周波數特性에 주목하여 분석을 행하였다.

### 材料 및 方法

#### 1. 초음파 變換器의 設計理論<sup>2)~4), 14)</sup>

Fig. 1과 같이 外徑  $D_3$ , 두께  $L_4$ 인 壓電素子의 前面과 後面에 각각 直徑  $D_5$ , 두께  $L_5$ 인 알루미늄 블록과 直徑  $D_4$ , 두께  $L_3$ 인 黃銅 블록을 부착하고, 이들을 볼트로서 체결한 후, 前面 振動 블록(head

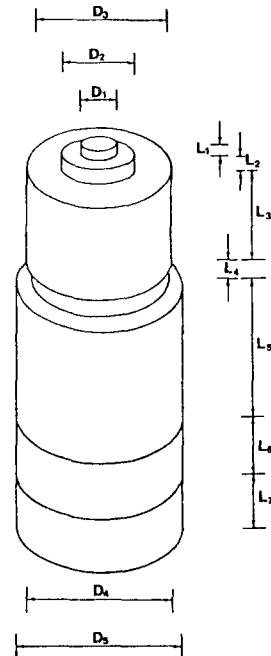


Fig. 1 Schematic diagram of a Tonpiliz transducer with double matching layers.

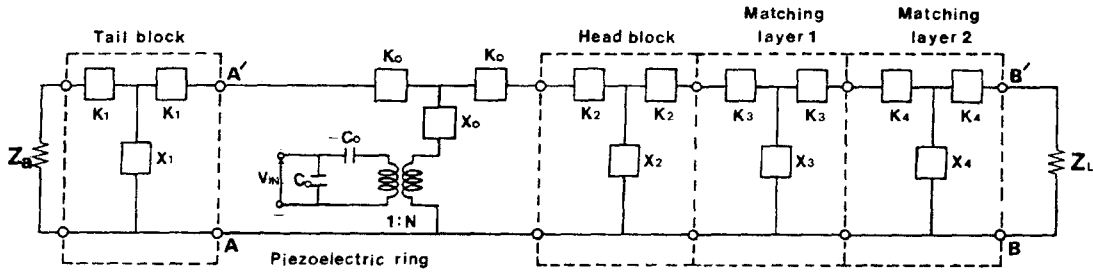


Fig. 2 A modified Mason's model of a Tonpitz transducer with double matching layers. The left hand end, in contact with air is short circuited ( $Z_a=0$ ). The other extremity is loaded by the radiation impedance ( $Z_L$ ) of water.

block)의 放射面에 두께가 각각  $L_6, L_7$ 인 二重의 音響 整合層을 積착한 複合構造 Tonpitz型 變換器의 入力端子에 電氣信號를 인가하면, 이들 구성요소는 서로 一體가 되어 진동을 한다. 이 超音波 變換器에 대한 電氣-機械-音響의 복합적인 等價回路는 Fig. 2과 같고, 等價回路의 要素  $K_0 \sim K_4$  및  $X_0 \sim X_4$ 는 각각

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

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

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

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

$$K_4 = Z_{mb} \tanh(\theta_{mb} / 2), \quad X_4 = \frac{Z_{mb}}{\sinh(\theta_{mb})}$$

에 의해 정의된다. 이들 식에서, 添字  $c, b, f, ma, mb$  는 각각 Fig. 2의 等價回路에 대한 壓電素子, 背面 振動 블록(tail mass), 前面 振動 블록, 第一 整合層 및 第二 整合層 등을 나타내는 略號이다. 等價回路의 要素  $K_0 \sim K_4$  및  $X_0 \sim X_4$  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,  $\theta$  는  $\theta = k \cdot l$ 에 의해 표시되는 函數이다. 이 식에서  $k$  는 傳播函數로서  $k = (\alpha + j\beta)$ 인 데,  $\alpha$  는 減衰定數(attenuation constant, neper/m),  $\beta$  는 位相定數(phase constant, radian/m)이고,  $\beta = \frac{\omega}{v}$  이다. 여기서,  $\omega$  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. 2에서 前面 振動 블록, 第一 整合層, 第二 整合層 등의 傳送線路는 각각 T形 等價回路의 從續接續이므로 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

$$\begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^3 \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \theta_i & Z_i \sinh \theta_i \\ \sinh \theta_i / Z_i & \cosh \theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3$$

에 의해 주어진다. 여기서,  $i$  는 前面 振動 블록, 第一 整合層, 第二 整合層을 나타내는 첨자이다.

Fig. 2의 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  $A_i, B_i, C_i, D_i$  는

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/N & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & jN^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_r & 0 \\ 0 & 1/A_r \end{bmatrix}$$

이 되고, 여기서,  $A_r$  는 물과 접촉하는 第二 整合層의 有效放射 斷面積이다. 본 연구에서 설계한 複合構造 超音波 變換器의 수중에 있어서의 入力 admittance  $Y_{in}$ 는 이들 四端子 定數를 이용하여

$$Y_{in} = \frac{C_i Z_L + D_i}{A_i Z_L + B_i}$$

으로 표시할 수 있는데, 여기서,  $Z_L$  은 물에 대한 음향 방사 임피던스이다.

따라서, 초음파 변환기의 수중에 대한 자유 전기 임피던스  $Z_{in}$  는  $Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}}$  에 의해 구할 수 있다.

한편, 초음파 변환기에 1 V 의 전압을 인가 했을 때, 변환기의 방사면에서 1 m 떨어진 위치에서의 송파 음압 레벨, 즉 송파 전압 감도 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 있는데, 여기서,  $R_L$  은 물의 음향 방사 저항,  $DI_T$  는 변환기의 송파 지향성 이득이다. 또한, 본 연구에서 설계, 제작한 초음파 변환기의 음향 지향성 함수  $D(\theta)$ 는

$$D(\theta) = \left| \frac{2J_1(z)}{z} \right|$$

에 의해 구하였는데, 여기서,  $J_1(z)$  는 第一種 一次 Bessel 函數이고,  $z$  는  $z = ka \sin(\theta)$ 로서,  $k$  는 파수,  $a$  는 초음파 변환기의 유효 방사면 반경이고,  $\theta$ 는 지향각이다.

## 2. 초음파 변환기 및 음향 통합층의 설계

본 연구에서는 前報<sup>14)</sup>에서와 동일한 방법으로 Tonpilz型 초음파 변환기를 설계, 제작하고, 이 변환기의 前面에 二重의 음향 통합층을 부착시켜 廣帶域 周波數特性을 실현하고자 하였다. 이 때, 초음파 변환기는 전기적인 入力信號가 印加되는 시간 동안에만 振動을 해야 하나, 共振周波數 부근에서의 尖銳度  $Q$ 가 큰 경우에는 電氣信號의 입력이 종료된 후에도 상당 시간동안 減衰振動을 지속하기 때문에 이 점에 주목하여 long leading과 long trailing 현상이 나타나지 않도록 하였다.

일반적으로 二重음향 통합층을 사용하는 경우에 있어서 第一과 第二 整合層의 固有音響 Impedance  $Z_1, Z_2$  는 각각

$$Z_1 = \sqrt{Z_c^4 \cdot Z_l^3}, \quad Z_2 = \sqrt{Z_c \cdot Z_l^6}$$

의 관계를 만족하도록 정하는 경우가 많은데<sup>12)</sup>, 여

기서,  $Z_c$  는 초음파 변환기의 固有音響 impedance이고,  $Z_l$  는 媒質의 固有音響 impedance이다.

第一과 第二 整合層의 설계에는 시중에서 손쉽게 구입할 수 있는 다양한 종류의 음향 材料를 사용하였는데, 第一 整合層으로서는 에폭시系 樹脂와  $Al_2O_3$ 의 粉末을 혼합하여 생성한 複合材料를 이용하였고, 第二 整合層으로서는 폴리우레탄系의 樹脂를 이용하여 整合層을 제작하였다. 이 연구의 초기 단계에는  $Z_1, Z_2$ 에 대한 관계식을 이용하여 여러 종류의 整合層을 試驗 製作하고, 이들의 音響 impedance를 조사, 분석하였으나, 최종적인 설계 단계에서는 이론모델의 수치해석을 통해 각각의 整合層에 대한 精밀한 형상, 直徑, 두께 등의 설계 파라미터를 유도하여 이용하였다.

## 3. 송파 전압 감도 및 chirp 信號의 應答特性 測定

본 연구에서 시험 제작한 각종의 음향 변환기에 대해서는 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스를 정밀 LCR meter(Quad-Tech 7600)를 이용하여 측정하고, 그 결과를 프뎀터(DXY-1300, Roland)를 통해 출력하였다. 수중에 대한 초음파 변환기의 전기 임피던스를 측정할 때에는 변환기의 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 변환기의 送信感度(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 pulse 폭과 펄스 반복주기를 갖는 送信 펄스 信號를 발생시켜 電力增幅器(B&K 2713)를 통해 증폭하여 音響放射面이 水槽의 底面을 향해서 설치된 초음파 변환기에 인가하였다. 초음파 변환기에서 발사된 送信 펄스 信號는 hydrophone(B&K 8105)을 통해 수신하였으

며, 이 신호를 charge amplifier (B&K 2635) 및 measuring amplifier (B&K 2610)를 통해 digital storage oscilloscope(Gould 475)에 입력시키고, 수신 신호의 전압을 측정하여 送信電壓感度を 구하였다.

또한, 超音波 變換器에 펄스 信號를 인가하고, 이 信號가 실제 당시 目標值로서 設定한 주파수 범위에서 어느 정도의 感度로서 전송되고 있는지를 검토하기 위해 放射音場에 대한 송신펄스신호의 時間應答特性을

$$S(t)=A \sin (2\pi f_s t+\pi a t^2)$$

로서 정의되는 chirp ( linear frequency modulated pulse ) 信號<sup>19)</sup>를 이용하여 조사하였다. 여기서, A 는 chirp 펄스信號의 振幅,  $f_s$ 는 chirp 펄스信號의 開始周波數(start frequency)로서,  $f_s=f_0 - \frac{\Delta f}{2}$  ( $f_0$ : 中心周波數,  $\Delta f$ : chirp 信號의 周波數 帶域幅)이다. 또한,  $a$  는 chirp 펄스信號의 sweep rate로서, chirp 펄스의 幅을  $T$ 라 할 때,  $a=\frac{\Delta f}{T}$ 이다.

송신펄스신호의 應答特性을 측정하기 위한 실험은 먼저 microcomputer (D4661B, HP)상에서  $f_0=40 \text{ kHz}$ ,  $\Delta f=40 \text{ kHz}$ ,  $T=4 \text{ ms}$ 에 대한 chirp 信號를 발생시켜 이것을 RS-232C interface를 통해 任意波形發生器(HP33120A)의 memory에 전송하고, 여기서 chirp 信號의 振幅(A)을 調整한 후에 電力增幅器를 통해 超音波 變

換器에 인가하였는데, 그 送信 chirp 信號波形 및 周波數 스펙트럼은 Fig. 3의 (A) 및 (B)와 같다. 超音波 變換器에서 發射된 送信 chirp 信號는 hydrophone을 통해 수신하고, 이 受信 信號를 charge amplifier 및 measuring amplifier를 통해 digital storage oscilloscope에 입력하고, 그 信號를 GPIB interface를 통해 microcomputer에 전송하여 분석하였다.

## 結果 및 考察

### 1. 超音波 變換器의 周波數特性

어종 식별을 위한 수중음향학적 정보를 수집하는데 활용하기 위해 본 연구에서 설계, 제작한 超音波 變換器의 수중에서의 音響振動特性을 조사한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 (A)와 (B)는 각각 自由電氣 임피던스의 振幅 및 位相特性을 나타낸 것이며, 그림에서  $\circ$ 은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치이다. 여기서는 head mass와 tail mass의 두께가 각각 22.0 mm, 15.0 mm인 Tonpilz型 超音波 變換器의 音響 放射面에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 와 epoxy 樹脂를 서로 혼합하여 생성한 직경 35.0 mm, 두께 7.0 mm의 複合材料層을 接觸하였는데, 整合層의 固有音響 임피던스는  $3.48 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  이었다. Fig. 4는 이렇게 제작된 變換器의 複合材料層 前面에 또 다시 폴리우레탄 樹脂로서 생성한 직경 35.0 mm, 두께 18.0 mm의 整合

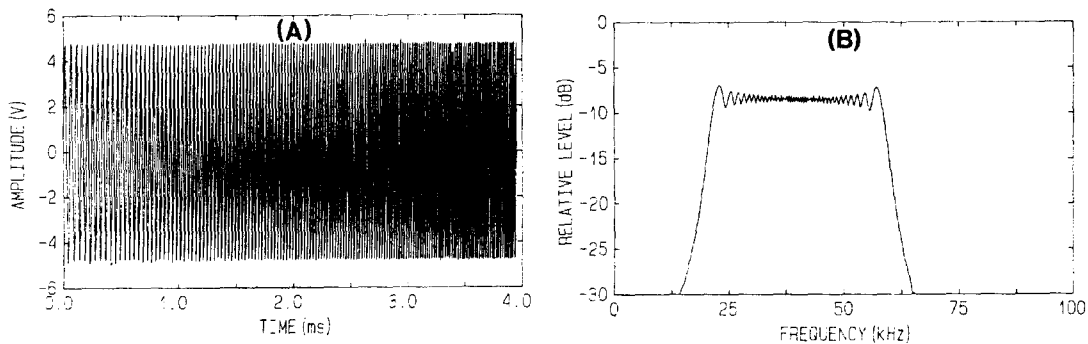


Fig. 3 (A) The linear frequency modulated chirp signal applied to the transducer.  
(B) Spectrum of the linear frequency modulated chirp signal.

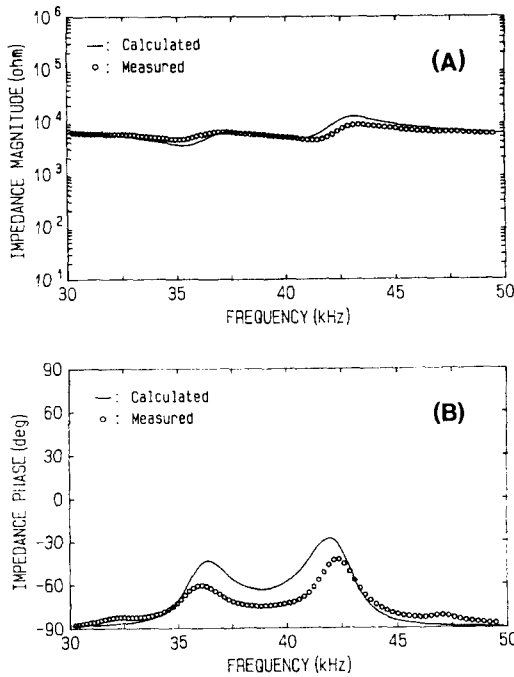


Fig. 4 Measured and calculated impedance of the transducer with double matching layers of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/epoxy composite of 7 mm thick and a polyurethane window of 18 mm thick in water. (A) impedance magnitude, (B) impedance phase.

층을接着시켜 만든 二重의 整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器에 대한 音響振動特性을 나타낸 것이다. 여기서 Tonpilz型 超音波 變換器의 放射面에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 epoxy 樹脂의 複合材料層을 接着할 때에는 Araldite (Ciba Geigy社)를 이용하였으나, 물과 接觸하는 폴리우레탄系 樹脂層은 직접 複合材料層에 積層하여 생성시켰다.

Fig. 4에서 二重整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器의 수중에서의 共振特性을 볼 때, 30~50 kHz 주파수 구간에 있어서 두 개의 共振振動 모드가 서로 인접하는 주파수에서 동시에 나타나고 있는데, 第一共振 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 35.1 kHz, 37.1 kHz이었고, 第二共振 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 41.2 kHz, 43.3 kHz이었다. 또한, 第一 및 第二共振周

波數에 대한 임피던스는 각각 4.6 KΩ과 4.5 KΩ으로서 거의 유사한 값을 나타내었고, 自由 임피던스 振幅의 측정치는 兩共振點 부근에서 계산치와 약간의 차이를 나타내었다. Fig. 4의 (B)에서 第一 및 第二共振點 부근에서의 位相特性을 보면, 位相角의 측정치는 兩共振 모드에서 각각의 共振點과 反共振點의 中間 周波數인 36.1 kHz와 42.4 kHz에서 -60.4°, -42.3°로서 가장 컸고, 이들 측정치는 모두 兩共振點에서 계산치와 큰 차이를 나타내었다.

또한, 이 複合構造 超音波 變換器의 電氣端子에서 측정된 共振周波數 부근에 있어서의 自由電氣 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분에 대한 周波數 軌跡은 Fig. 5과 같고, 그림에서 縱軸은 reactance (KΩ)이고, 橫軸은 resistance (KΩ)이다. Fig. 5의 impedance diagram에서 두 개의 周波數 軌跡이 동시에 나타나고 있는데, 이 중에서 큰 circle은 41.2 kHz의 第一共振點 부근에 대한 自由 임피던스의 周波數 軌跡이고, 작은 circle은 35.1 kHz의 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 설계한 Tonpilz型 超音波 變換器에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 epoxy 樹脂로서 생성시킨 複合材料層과 폴리우레탄 樹脂로서 생성한 整合層을 二重으로 直列 接着시킨 複合構造 超音波 變換器의 수중에 대한 送波電壓感度

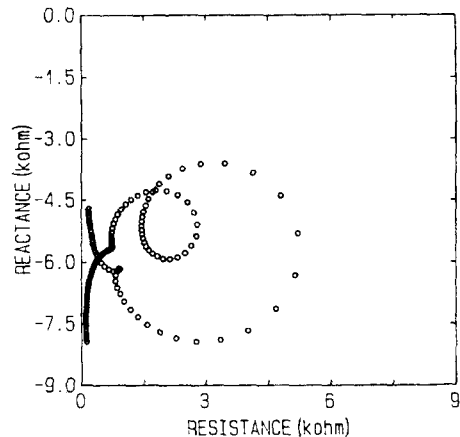


Fig. 5 Impedance diagram for the transducer of Fig. 4 in water.

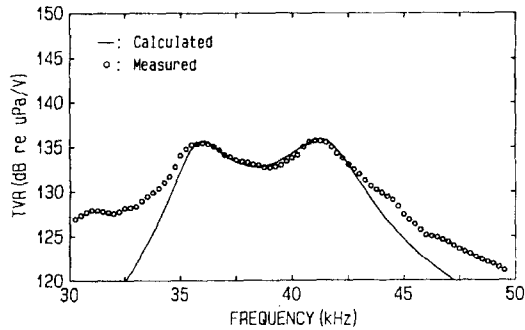


Fig. 6 Measured and calculated transmitting voltage responses for the transducer of Fig. 4.

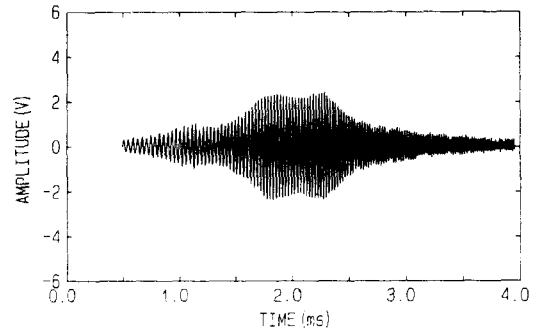


Fig. 7 Experimentally observed waveform in water when the chirp signal was applied to the transducer of Fig. 4.

는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 縱軸은 送波電壓感度 ( $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa/V at } 1 \text{ m}$ ) 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 二重整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器의 送波電壓感度は 第一共振點 부근인  $35.5 \text{ kHz}$ 에서  $135.5 \text{ dB}$ 이었고, 第二共振點 부근인  $41.2 \text{ kHz}$ 에서는  $135.7 \text{ dB}$ 이었다. 또한, 이들 共振點 사이의 周波數 區間에 대한 送波電壓感度の 변동은 매우 완만하였고,  $39.4 \text{ kHz}$ 에서 가장 낮은 感度を 나타내어 그 값은  $132.7 \text{ dB}$ 이었다. 이 二重 整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器의  $-3 \text{ dB}$ 점에 대한 周波數 帶域幅은  $7.3 \text{ kHz}$ 이었으며, 送信 펄스 信號의 전송에 사용할 수 있는 주파수 범위는  $35.0 \sim 42.3 \text{ kHz}$ 이었다. 또한, 送波電壓感度の 측정치는 이들 주파수 범위를 벗어남에 따라 계산치와 큰 차이를 나타내었다.

한편, 二重 整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器에 送波펄스信號를 인가한 경우, 이 送信信號가 Fig. 6의 周波數 帶域을 통과할 때의 時間應答特性을 분석, 검토하였다. 즉,  $20 \sim 60 \text{ kHz}$ 의 주파수 범위에 대하여 직선상으로 변화하는 周波數 變調를 행한 chirp 펄스 信號(펄스 幅  $4 \text{ ms}$ , 中心周波數  $40 \text{ kHz}$ )를 超音波 變換器에 인가했을 때, 水中放射音場에 있어서의 送信 펄스 信號의 時間應答特性은 Fig. 7과 같다. 그림에서 縱軸은 送波펄스信號의 相對振幅이고, 橫軸은 시간이다.

Fig. 7의 受信 chirp 波形과 Fig. 3의 送信 chirp 波形을 비교할 때, 이들 chirp 信號속에 포함되어 있는 周波數 成分의 分布樣相은 서로 같으나, 受信 chirp 波形의 경우에 있어서는 Fig. 6의  $-3 \text{ dB}$  點의 帶域幅에 대한 周波數 成分이 매우 탁월하게 나타나고, 그 이외의 周波數 成分은 현저하게 減衰되어 있음을 알 수 있다. 즉,  $1.85 \text{ ms}$  근방에 나타나 時間應答는 第一共振點 부근의 주파수 성분에 기인한 것이고,  $2.28 \text{ ms}$  근방에 나타나는 時間應答는 第二共振點 부근의 주파수 성분에 기인한 것이다. 이들  $1.85 \sim 2.28 \text{ ms}$  시간 구간에 대한 時間應答特性을 볼 때, 受信 chirp 波形이 매우 완만하게 변화하고 있는데, 이 현상은 Fig. 6의 周波數에 따른 送信電壓感度の 변동특성과 거의 유사한 양상을 나타내었다. 따라서, Fig. 6의  $-3 \text{ dB}$  點의 周波數 帶域 範圍에 대한 chirp 信號를 효과적으로 이용하면 보다 다양한 어종의 식별정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 二重의 音響 整合層을 直列接着시킨 複合構造 超音波 變換器의  $38.8 \text{ kHz}$ 에 대한 수중에 있어서의 送信指向特性을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 縱軸과 橫軸은 相對音壓레벨( $\text{dB}$ )이고, 放射線상의 點線은 指向角이며, 그림에서  $\circ$  은 측정치이고, 實線은 계산치를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 超音波 變換器의  $-6 \text{ dB}$  點에 대한 半減角은 약  $49^\circ$  이었고, 指向角이 증가함에 따라 실제 측정된 指向性 패턴은 이론적인 指向性 패턴과 큰 차이를 나타내었다.

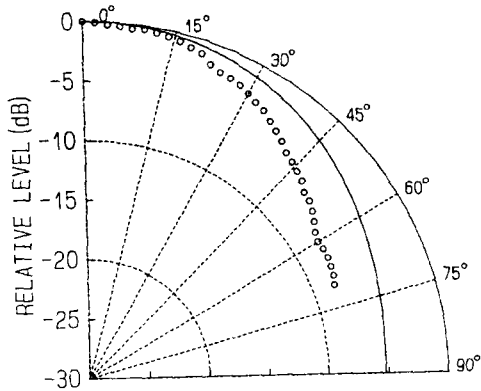


Fig. 8 Measured and calculated beam patterns at 38.8 kHz

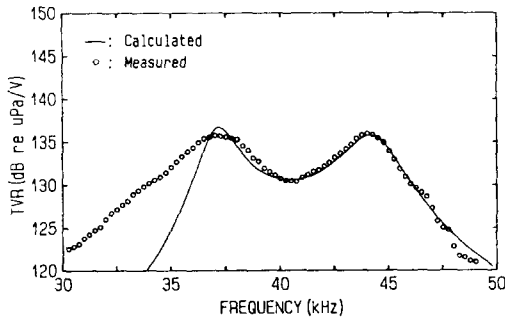


Fig. 9 Measured and calculated transmitting voltage responses for the transducer with double matching layers of an  $Al_2O_3$ /epoxy composite of 10 mm thick and a polyurethane window of 14.5 mm thick.

Fig. 9는 head mass와 tail mass의 두께가 각각 20.0 mm, 15.0 mm인 Tonpilz型 超音波 變換器의 音響 放射面에  $Al_2O_3$ 와 epoxy 樹脂를 서로 혼합하여 생성한 두께 10.0 mm의 複合材料層과 폴리우레탄 樹脂로서 제작한 두께 14.5 mm의 整合層을 直列接着시킨 複合構造 超音波 變換器의 수중에서의 送波電壓感도를 나타낸 것이다. 그림에서 縱軸은 送波電壓感도( $dB$  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.

Fig. 9의 送波電壓感도의 周波數 依存性を 살펴 볼 때, 30~50 kHz의 주파수 구간에서 두 개의 共振振動 모드가 동시에 나타나고 있는데, 第一 및 第二 共振 모드에 대한 周波數는 각각 37.1 kHz, 43.9 kHz이었다. 이 超音波 變換器의 送波電壓感도는 第一 共振點에서 135.7 dB이었고, 第二 共振點에서는 135.9 dB이었다. 이들 共振點 사이의 주파수 구간에 있어서 送波電壓感도는 비교적 큰 변동을 나타내었는데, 그 값은 40.7 kHz에서 가장 낮아 130.5 dB이었다. 이 二重整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器의 -6 dB점에 대한 周波數 帶域幅은 12.1 kHz이었으며, 이 帶域幅에 대한 주파수 범위는 34.0~46.1 kHz이었다. 送波電壓感도의 측정치는 低周波數 領域에서 계산치와 큰 차이를 나타내었다.

한편, 20~60 kHz 범위의 주파수 성분을 갖는 chirp 펄스信號를 이 超音波 變換器에 인가하는 경우, 送信 chirp 信號가 Fig. 9의 周波數 帶域을 통과할 때의 時間應答波形은 Fig. 10과 같다. 그림에서 縱軸은 送波 펄스 信號의 相對振幅이고, 橫軸은 시간이다.

Fig. 10의 受信 chirp 波形에서 2.0 ms 근방에 나타나 應答波形은 37.1 kHz의 第一 共振點 부근의 주파수 성분에 기인한 것이고, 2.7 ms 근방에 나타나는 應答波形은 43.9 kHz의 第二 共振點 부근의 주파수 성분에 기인한 것이다. 이들 2.0 ~ 2.7 ms 시간 구간에 대한 時間應答特性을 볼 때,

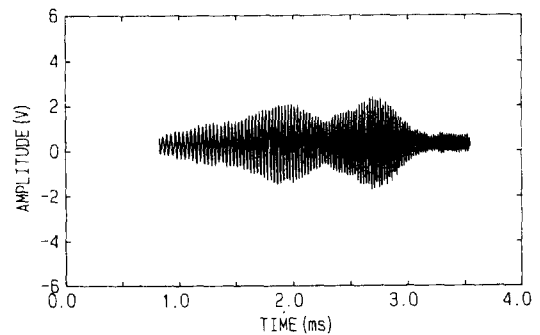
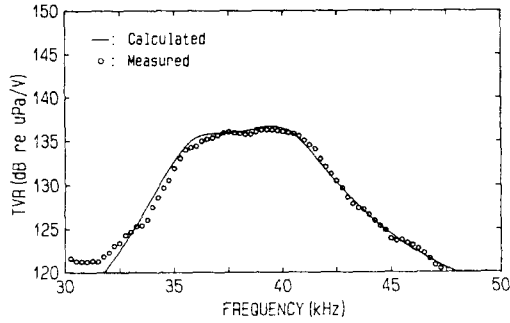


Fig. 10 Experimentally observed waveform in water when the chirp signal was applied to the transducer of Fig. 9.





**Fig. 11 Measured and calculated transmitting voltage responses for the transducer with double matching layers of an  $Al_2O_3$ /epoxy composite of 11 mm thick and a polyurethane window of 15 mm thick.**

2.3 ms 부근에서 受信 chirp 波形이 비교적 급격한 변화를 나타내었고, 이 현상은 Fig. 9의 送信電壓感度の 변동특성과 거의 유사하였다.

Fig. 11은 head mass와 tail mass의 두께가 각각 23.0 mm, 15.0 mm인 Tonpilz型 transducer의 音響 放射面에  $Al_2O_3$ 와 epoxy 樹脂를 혼합하여 제작한 두께 11.0 mm의 複合材料層과 폴리우레탄 樹脂로서 제작한 두께 15.0 mm의 整合層을 상호 直列接着시킨 複合構造 超音波 變換器의 수중에서의 送波電壓感度を 나타낸 것이다. 그림에서 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 ○은 측정치이고, 點線은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

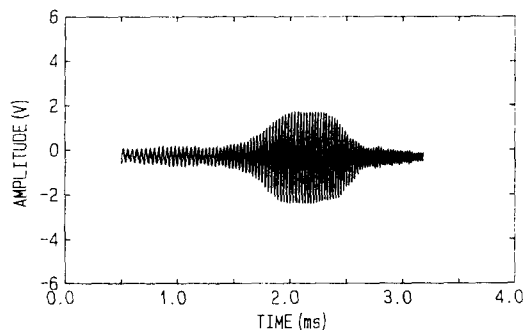
Fig. 11에서 送波電壓感度は 광대역의 주파수 범위에서 걸쳐 매우 완만하게 변화하는 특성을 나타내었는데, 最大의 送波電壓感度は 39.5 kHz의 周波數에서 나타났고, 그 값은 136.3 dB이었다. 이 複合構造 超音波 變換器의 -3 dB점에 대한 周波數 帶域幅은 6.2 kHz였고, 이 帶域幅에 대한 下限 및 上限 周波數 範圍는 35.5~41.7 kHz이었다. 또한, 送波電壓感度の 측정치는 조사대상 주파수 구간에 있어 계산치와 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

한편, 20~60 kHz 범위의 周波數 成分을 갖는

chirp 펄스 信號를 이 超音波 變換器에 인가하고, 送信 chirp 信號가 Fig. 11의 周波數 帶域을 통과할 때의 時間應答波形을 구한 결과는 Fig. 12와 같다. 그림에서 縱軸은 送波 펄스 信號의 相對振幅이고, 橫軸은 시간이다.

Fig. 12의 受信 chirp 波形을 토대로 이 超音波 變換器의 chirp 信號의 時間應答特性을 살펴보면, 1.5 ms에서부터 출현하기 시작하는 信號에 대한 應答振幅은 주파수의 증가와 더불어 서서히 증대되어 1.9 ms 부터는 Fig. 11의 送信電壓感度の 변동특성과 거의 유사하게 매우 완만한 변화양상을 나타내다가 다시 2.4 ms 이후부터는 급격한 응답 진폭의 감쇠현상이 나타나고 있다. 즉, chirp 信號의 時間應答特性은 Fig. 11의 送信電壓感度の 周波數 依存性和 같은 樣相을 나타내었다.

이상의 결과로 부터 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 비교할 때, 비록 送波電壓感도에 있어서는 약 5 dB 정도의 音響出力損失이 초래되지만, 그 대신 周波數 帶域幅을 약 5 배 정도 확대시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 이 넓은 周波數 帶域을 효과적으로 활용하면 魚種識別을 위한 音響散亂信號를 정량적으로 수집 및 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.



**Fig. 12 Experimentally observed waveform in water when the chirp signal was applied to the transducer of Fig. 11.**

要 約

어종의 식별을 위한 수중음향학적 정보를 수집하는 데 사용하기 위한 광대역 초음파 변환기를 개발할 목적으로 低周波用 Tonpiliz型 超音波 變換器를 설계, 제작하고, 이 變換器의 音響 放射面에  $Al_2O_3$ 와 epoxy 樹脂를 서로 혼합하여 생성한 複合材料層과 폴리우레탄 樹脂로서 제작한 音響 整合層을 각각 直列 接着시킨 複合構造 超音波 變換器의 廣帶域 周波數 特性에 대하여 분석, 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) Tonpiliz型 transducer (head mass : 알루미늄 / 두께 22.0 mm , tail mass : 黃銅 / 두께 15.0 mm )의 音響 放射面에 두께 7.0 mm 의  $Al_2O_3$ 와 epoxy 樹脂로서 생성한 複合材料層과 두께 18.0 mm의 폴리우레탄 樹脂로서 제작한 整合層을 直列接着한 複合構造 超音波 變換器의 -3 dB점에 대한 下限 및 上限 周波數 範圍는 35.0~42.3 kHz ( $\Delta f=7.3$  kHz)이었고, 이 주파수 구간에 있어서의 送波電壓感度の 最大值는 135.7 dB re 1  $\mu Pa/V$  이었다.

2) Tonpiliz型 transducer (head mass : 알루미늄 / 두께 23.0 mm , tail mass : 黃銅 / 두께 15.0 mm )의 音響 放射面에 두께 11.0 mm의  $Al_2O_3$ 와 epoxy 樹脂로서 제작한 複合材料層과 두께 15.0 mm의 폴리우레탄 樹脂로서 제작한 整合層을 直列接着한 複合構造 超音波 變換器의 -3 dB점에 대한 下限 및 上限 周波數 範圍는 35.5~41.7 kHz ( $\Delta f=6.2$  kHz)이었고, 이 주파수 구간에 있어서의 送波電壓感度の 最大值는 136.3 dB re 1  $\mu Pa/V$  이었다.

3) 본 연구에서 試作한 複合構造 超音波 變換器에 chirp 信號(펄스 幅 4 ms, 中心周波數 40 kHz, 帶域幅 40 kHz)를 인가하고, 水中放射音場에 있어서의 時間應答特性을 조사한 結果, 그 應答特性은 送信電壓感度の 周波數特性和 매우 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 設計, 製作한 二重整合層을 갖는 複合構造 超音波 變換器는 單純構造의 Tonpiliz型 超音波 變換器와 비교하여 비록

送波電壓感도에 있어서는 약 5 dB 정도의 音響出力의 損失이 불가피하지만, 그 대신 周波數 帶域幅을 약 5 배 정도 확대시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 이 넓은 周波數 帶域을 효과적으로 활용하면 魚種識別을 위한 音響散亂信號를 정량적으로 수집 및 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.

參考文獻

- 1) Coates R.F.W.(1991) : The design of transducers and arrays for underwater data transmission, IEEE J. Oceanic Eng. 16, 123 - 135.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Wilson O.B.(1991) : Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, Peninsula Publishing, California, 11 - 108.
- 5) Schock S.G., L.R. Leblanc and S. Panda(1994) : Spatial and temporal pulse design considerations for a marine sediment classification sonar, IEEE J. Oceanic Eng. 19, 406 - 415.
- 6) Coates R.(1994) : Underwater acoustic communication, Sea Tech. 35(7), 41 - 47.
- 7) Coates R.E. and R.F. Mathams(1988) : Design of matching networks for acoustic transducers, Ultrason. 26, 59 - 64.
- 8) Zakharia M.E.(1987) : A prototype of wide - band sonar for fisheries in lakes and rivers. Int. Symp. Fish. Acoustics, 12p
- 9) 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.
- 10) MacLennan D.N. and E.J. Simmonds(1992):

- Fisheries Acoustics, Chapman & Hall, London, 13 - 20.
- 11) 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.
  - 12) Desilet, C.S., J.D Fraser and G.S. Kino(1978) : The design of efficient broad - band piezoelectric transducers. IEEE Trans. SU - 25, 115 - 125.
  - 13) Wilhjelm, J.E. and P.C. Pedersen(1993) : Target velocity estimation with FM and PW echo ranging doppler systems - Part 1 : Signal analysis. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont. 40, 366 - 372.
  - 14) 李 貝在(1998) : 魚種 識別을 위한 廣帶域 超音波 變換器의 設計 -Ⅱ, 單一整合層을 이용한 二重共振型 超音波 變換器의 設計, 韓國漁業技術學會誌 34(1), 74 - 84.