

Taper형 초음파 진동자의 대역폭 개선에 관한 연구

정 봉 규 · 이 대 재

부경대학교

(1999년 6월 1일 접수)

A Study on Bandwidth Enhancement of a Ultrasonic Transducer with a Taper

Bong-Kyu JEONG and Dae-Jae LEE

Pukyong National University

(Received June 1, 1999)

Abstract

A ultrasonic transducer with a single acoustic matching layer has been designed as an attempt to increase the bandwidth of underwater transducer. The wideband resonance condition was accomplished by attaching a single matching layer on the front face of a ceramic resonator composed of a piezoelectric bar, a taper part and a head part.

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 impedance and thickness of the matching layer in the water tank.

The obtained results are summarized as follows :

1. Measured resonant and antiresonant frequencies of the piezoelectric transducer with no matching layer in air were 24.7 kHz and 25.6 kHz, respectively.

2. Two resonant frequencies of the piezoelectric transducer with a single matching layer were 21.7 kHz and 26.9 kHz, respectively, in air and 21.4 kHz and 22.7 kHz, respectively, with a water load.

3. Two distinct resonance peaks in the transmitting voltage response(TVR) of the developed transducer were observed at 22.0 kHz and 25.8 kHz, respectively, with center frequency of 24.0 kHz. The values of TVR at these frequencies were 130.1 dB re 1 $\mu\text{Pa/V}$ at 22.0 kHz and 128.5 dB re 1 $\mu\text{Pa/V}$ at 25.8 kHz, respectively.

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

序 論

대부분의 어선에서 사용하고 있는 어군탐지기
용 송·수파기의 폭향 window는 주로 PVC,

Polyurethane, Chloroprene, Polycarbonate 등과
같은 합성수지나 합성고무로서 제작되고 있다. 과
거에는 壓電素子(piezoelectric element)를 보호하
기 위한 목적하에서 음향 방사면을 설제하는 경향

이 있었으나, 최근에 들어서는 壓電素子와 해수와의 음향학적인 임피던스를 서로 整合(matching)시키기 위한 역할에 초점을 맞추어 설계되고 있는 추세이다¹⁾⁻⁶⁾.

만일, 음향 window가 음향학적 整合層으로서의 기능을 충분히 발휘하지 못하는 경우에는 송·수파기의 주파수 대역폭이 좁아지고, 또한 電氣音響變換效率이 떨어져 송신 및 수신감도가 급격히 저하하는 현상이 발생한다.

현재, 선망 어선이나 중층 트롤 어선에서 사용하고 있는 저주파, 고출력의 소너에서는 송·수파기의 소형화 및 주파수의 대역폭을 확장시키기 위해 taper형 압전 세라믹스가 사용되고 있다. 이 압전 진동자는 sandwich형 볼트 체결 진동자에 비해 작은 크기로서 낮은 共振周波數를 얻을 수 있고, 또한 구조가 간단하기 때문에 앞으로 어군탐지기의 송·수파기를 설계하는 데 널리 이용될 것이다.

본 연구에서는 기계적인 음향 整合層을 이용하여 어군탐지기용 송·수파기의 주파수 대역폭을 확장시키기 위한 연구의 일환으로, 우선 taper형 초음파 진동자의 방사면에 기계적인 整合層을 부착하고, 그것의 음향 진동 특성에 대한 이론적 및 실험적 해석을 행한 결과에 대하여 분석, 검토하였다.

材料 및 方法

1. 압전 세라믹스의 구조 및 음향 整合層의 설계

본 연구에서 설계한 광대역 초음파 진동자는 Fig. 1과 같이 크게 T형 압전 세라믹스와 음향 整合層으로서 구성된다. 압전 세라믹스의 기본진동 mode는 횡진동이고, 그 구조는 전극이 부착되어 있는 압전 구동부(piezoelectric active bar), 전극이 없는 taper part 및 head part로서 구성된다.

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, 整合層의 고유음

향 임피던스 Z_m 은

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

에 의해 주어지는 데⁵⁾, 여기서, Z_c 는 壓電素子의 고유음향 임피던스고, Z_l 는 매질, 즉 물의 고유음향 임피던스이다. 본 연구에서는 다양한 종류의 음향 재료를 사용하여 整合層의 설계를 시도하였는데,

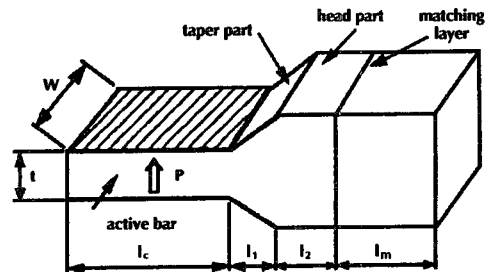


Fig. 1. Taper-type transducer with a single matching layer.

Table 1. Material constants for piezoelectric ceramic.

Material constants	Quantity
Density	$7.73 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Specific dielectric constant	1450
Dielectric loss tangent ($\tan \delta$)	0.003
Elastic compliance constant	$13.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
Electromechanical coupling factor	0.32
Sound velocity	$3.107 \times 10^3 \text{ m/s}$
Specific acoustic impedance	$24.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

Table 2. Transducer dimensions and design values.

Parameters	Quantity
Piezoelectric ceramic resonator	
Length	l_c 39.0 mm
	l_1 6.2 mm
	l_2 10.5 mm
Width	w 20.0 mm
Thickness	t 9.0 mm
Clamped capacitance	C_d 999 pF
Resonant frequency	f_0 24.7 kHz
Quality factor	Q 400
Acoustic matching plate	
Length coefficient	a_λ 0.98
Loss factor	η_m 0.042
Radiation area	A_m $2.0 \times 2.2 \text{ cm}^2$

설계의 초기단계에서는 이 관계식을 고려하여 整合層을 제작하였으나, 최종적인 설계 단계에서는 일차원 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, 4A1253)과 epoxy 수지(에폰스화학, AR-16)를 適定比率로 혼합시켜 생성한 두께가 21 mm이고, 고유음향 임피던스가 $3.48 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 음향 整合層을 제작하여 압전 세라믹스의 head part 전면에 부착시켰다. 본 연구에서 사용한 압전 세라믹스의 재질상수는 Table 1과 같고, 각부의 치수 및 整合層의 규격은 Table 2와 같다.

2. Taper형 광대역 초음파 진동자의 진동특성해석^{(4)~(11)}

Fig. 1의 초음파 진동자에 교류 전압 V 와 전류 I 가 인가되면 진동자 앞면이 진동 속도 U_a 로서 수축·팽창하면서 수중에 힘 F_a 를 가하여 음파를 발생시키는 데, 이 진동자는 Fig. 2와 같이 각각 한 개의 입력과 출력 port를 갖는 회로망(二對回路, two port network)으로서 표시할 수 있다. 이 때, 회로망의 입출력 파라미터는

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ U_a \end{bmatrix}$$

의 四端子回路(four terminal network)에 의해 표시되는 데, 여기서, A, B, C, D 는 진동자의 四端子定數(F 定數)이다.

이 식에서 $V=AF_a+BU_a$, $I=CF_a+DU_a$ 이고, 또한 $F_a=U_a \cdot Z_L$ 의 관계가 성립하므로,

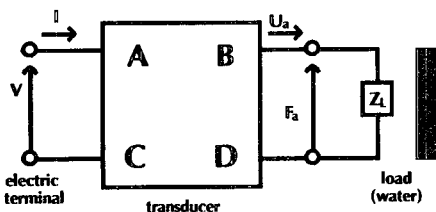


Fig. 2. Transducer representation with a two-port network

$$V=A(U_a \cdot Z_L)+BU_a=(AZ_L+B)U_a$$

$$I=C(U_a \cdot Z_L)+DU_a=(CZ_L+D)U_a$$

이 된다. 따라서, 진동자의 전기단자에서 본 입력 어드미턴스(admittance) Y 와 진동자의 진동속도 U_a 와의 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$Y=\frac{I}{V}=\frac{(CZ_L+D)U_a}{(AZ_L+B)U_a}=\frac{(CZ_L+D)}{(AZ_L+B)},$$

$$U_a=\frac{V}{AZ_L+B}$$

한편, 진동자의 음향방사임피던스(acoustic radiation impedance) Z_L 는 무한 baffle에 취부된 동일 방사 단면적 S 를 갖는 등가 피스톤 원판의 音響放射 임피던스로서 근사되므로

$$\begin{aligned} Z_L &= R_L + jX_L = \frac{\rho C}{S} \left[\left(1 - \frac{2J_1(x)}{x}\right) + j \frac{2S_1(x)}{x} \right] \\ &= \frac{\rho C}{S} (R_1 + jX_1) \end{aligned}$$

이 되고, 여기서, R_L, X_L 은 音響放射 resistance 및

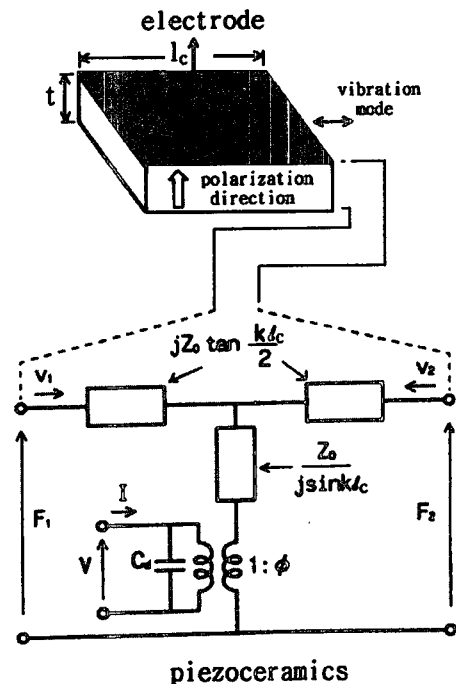


Fig. 3. Equivalent circuit of piezoceramic bar with electrodes.

reactance이고, ρ , C 는 물의 밀도 및 水中音速, 또한 $x=2ka$ (k 는 wave number로서 $k=2\pi/\lambda$, λ : 음파의 파장, a : 진동자의 반경)이며, $J_1(x)$, $S_1(x)$ 는 각각 제 1종 1차 Bessel 함수 및 Struve 함수이다. 한편, Fig. 1의 전극이 부착되어 있는 압전 구동부의 전기-기계적인 등가회로는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 Z_0 는 압전 세라믹스의 특성 임피던스(characteristic impedance)로서 $Z_0=\rho V_b^E w t$ (ρ , w , t , V_b^E : 압전 세라믹스의 밀도, 폭, 전극면의 간격 및 음파의 전파속도), k 는 波數(wave number)로서 $k=\omega/V_b^E$ ($\omega=2\pi f$, f : 주파수)이다. 또한, C_d 는 제동용량(clamped capacitance)으로서 $C_d=\frac{\epsilon_{33}^T(1-k_{31}^2)wl_c}{t}$ 이고, 여기서, ϵ_{33}^T 는 誘電率(dielectric constant), k_{31}^2 는 길이 방향의 진동에 대한 전기기계결합계수(electromechanical coupling coefficient), l_c 는 압전 세라믹스의 길이이다. Φ 는 전기기계변성비(transformation ratio)로서, $\Phi=w\sqrt{\frac{\epsilon_{33}^T}{s_{11}^E}}k_{31}$ 이고, 여기서 s_{11}^E 는 탄성 compliance 상수이다.

한편, taper형 압전 세라믹스의 head part 전면에 Fig. 1과 같이 음향 整合層을 부착시키고, 전기 입력단자에 교류신호를 인가하는 경우, 이들 구성 요소는 서로 일체가 되어 진동을 하는데, 이 진동자의 전기-기계-음향학적 등가회로는 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 4에서 Z_b 는 진동자 후면 매질에 대한 고유음향 임피던스인데, 대개의 어군탐지기용 송·수파기에서는 진동자 후면에 콜크(cork) 층을 설치하여 공기와 접하도록 하고 있다. 그러나, 공기의 고유음향 임피던스 Z_b 는 압전 세라믹스의 그것에 비해 매우 작기 때문에 송·수

파기 전체에 대한 음향진동특성에 있어서 공기의 영향은 무시할 수 있다.

또한, 본 연구의 수치모델에 있어서는 電極(silver electrode), 接着層(bonding layer)의 영향은 무시하였다. Fig. 4에서 四端子回路의 A_p , B_p , C_p , D_p 는 압전 세라믹스의 taper part에 대한 四端子定數로서,

$$A_p = \sqrt{\frac{S_{th}}{S_{op}}} \left\{ \cos(k_1 l_1) + \frac{1}{k_1(l_{10}-l_1)} \sin(k_1 l_1) \right\}$$

$$B_p = j\rho_1 V_1 \sqrt{S_{th}S_{op}} \left[\left\{ 1 + \frac{1}{k_1^2 l_{10}(l_{10}-l_1)} \right\} \sin(k_1 l_1) - \frac{l_1}{k_1 l_{10}(l_{10}-l_1)} \cos(k_1 l_1) \right]$$

$$C_p = j \frac{1}{\rho V_1 \sqrt{S_{th}S_{op}}} \sin(k_1 l_1)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{S_{op}}{S_{th}}} \left\{ \cos(k_1 l_1) - \frac{1}{k_1 l_{10}} \sin(k_1 l_1) \right\}$$

에 의해 표시된다. 여기서, S_{th} , S_{op} 는 각각 taper part의 입구측과 출구측 단면의 면적이다. $k_1=\omega/V_1$ 로서 V_1 은 taper part에서의 음파의 전파속도, $\omega=2\pi f$ (f : 주파수)이고, l_1 는 taper part의 길이이며, l_{10} 은 Fig. 5에서 정의되는 길이이다.

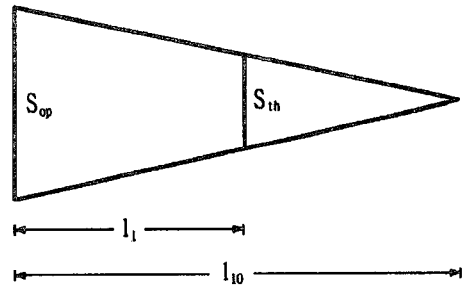


Fig. 5. Taper part representation

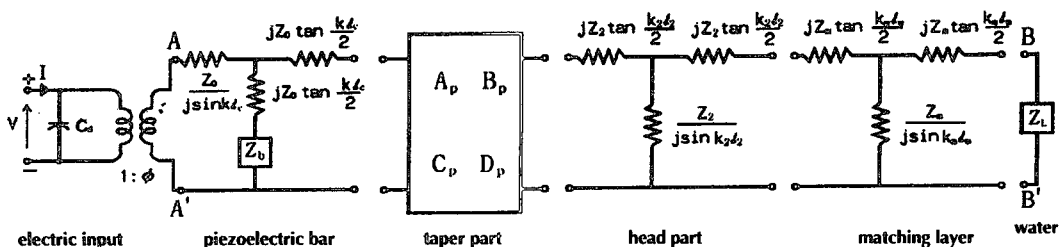


Fig. 4. Equivalent circuit of the taper-type ultra-sonic transducer with a single matching layer.

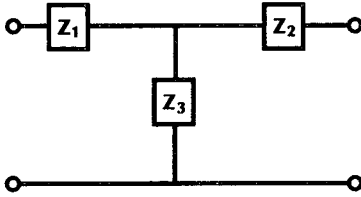


Fig. 6. T-type network.

한편, Fig. 4의 압전 세라믹스의 head part 및 整合層은 Fig. 6와 같은 T字型 回路에 의해 표시되는 데, 이 T자형 회로망의 四端子行列 $[F]$ 는

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 + Z_1/Z_3 & 2Z_1 + Z_2 \\ 1/Z_3 & 1 + Z_2/Z_3 \end{bmatrix}$$

에 의해 표시된다.

Fig. 4의 等價回路에서 $1 : \Phi$ 의 電氣機械變成比로서 표시되는 transformer 우측에 대한 壓電素子の T형 等價回路에 대한 F 行列의 四端子定數 A_c, B_c, C_c, D_c 는

$$\begin{aligned} A_c &= 1 + \frac{Z_1}{Z_3} = 1 + \frac{Z_0/j\sin kl}{jZ_0 \tan(kl/2)} \\ &= 1 - \frac{1}{\tan(kl/2) \cdot \sin kl} = 1 - \frac{1}{2\sin^2(kl/2)} \\ B_c &= 2Z_1 + Z_2 = \frac{2Z_0}{j\sin kl} + jZ_0 \tan(kl/2) \\ &= -jZ_0 \cot(kl/2) \\ C_c &= \frac{1}{Z_3} = \frac{1}{jZ_0 \tan(kl/2)}, \quad D_c = 1 + \frac{Z_2}{Z_3} = 2 \end{aligned}$$

이 된다.

또한, Fig. 4에서 head part, 整合層의 傳送線路는 각각 T형 等價回路의 從續接續에 의해 표시되고, 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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} &= \prod_{i=1}^2 \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & jZ_i \sin \theta_i \\ j \sin \theta_i / Z_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2 \end{aligned}$$

이고, 여기서, i 는 head part와 整合層을 나타내는 첨자이다.

따라서, 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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C_d & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1/\Phi & 0 \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_c & B_c \\ C_c & D_c \end{bmatrix} \cdot \\ &\quad \begin{bmatrix} A_p & B_p \\ C_p & D_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_r & 0 \\ 0 & 1/A_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이 되고, 여기서, A_r 는 물과 접촉하는 整合層의 有效放射 단면적이다.

따라서, 초음파 진동자의 수중에 대한 입력 어드미턴스 Y_{in} 는

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

에 의해 구할 수 있고, 공기에 대한 부하 임피던스는 무시($Z_L \approx 0$)할 수 있기 때문에, 공기 중에 있어서의 입력 어드미턴스 Y_a 는 $Y_a = D_t/B_t$ 이 되며, 또한, 초음파 진동자의 自由電氣 임피던스 $Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}}$ 에 의해 구할 수 있다.

초음파 진동자에서 송파되는 音響放射出力 P_a 는 音響放射面의 體積속도를 U_a 라 할 때,

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

이고, 진동자에 인가된 입력전압 V 와 體積속도의 사이에는

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

이 성립하기 때문에, 音響放射出力은

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

이 된다. 한편, 진동자에서 d 만큼 떨어진 지점에서의 送波音壓레벨 SL_d (sound pressure level, dB re 1 μP_a)는 送波指向性利得을 DI_T 라 할 때,

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

에 의해 구할 수 있다.

따라서, 초음파 진동자에 1 V의 전압을 인가했을 때, 진동자의 방사면에서 1 m 떨어진 지점에서의

送波電壓레벨, 즉 送波電壓感度 TVR (transmitting voltage response, $dB re 1 \mu Pa/V at 1m$)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.

3. 電氣 임피던스 및 送波電壓感度の 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 프루터(DXY-1300, Roland)를 통해 출력하였다. 수중에 대한 초음파 진동자의 전기 임피던스를 측정할 때에는 진동자 전단의 침수 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 변동하기 때문에, 여기서는 3.0 cm 전후의 浸水 깊이를 유지하면서 실험을 행하였다.

한편, 초음파 진동자의 送波電壓感度は 實驗水槽($L \times B \times D$, $190 \times 130 \times 105$ 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 송신 펄스 신호를 발생시켜 電力增幅器(B&K 2713)를 통해 증폭시켜 음향 방사면이 水槽의 底面을 향해 설치된 초음파 진동자에 인가하였다. 초음파 진동자에서 발사된 송신 펄스 신호는 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, 수신 신호의 전압을 측정하여 送波電壓感度を 구하였다.

結果 및 考察

1. Taper형 초음파 진동자의 주파수 특성

1) 공기중에 대한 주파수 특성

(1) 整合層이 없는 진동자의 공기중에 대한 주파수 특성

광대역 초음파 진동자를 설계하는 데 이용한 taper형 압전 세라믹스(piezoelectric ceramics)의 공기중에 대한 전기적인 임피던스의 측정결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 (A)는 임피던스의 진폭 특성($\log_{10}(|Z_{in}|)$)이고, (B)는 임피던스의 위상 특성이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 실선은 수치 모델에 의한 계산치이다.

Fig. 7에서 壓電素子の 共振 및 反共振 周波數는 각각 24.7 kHz, 25.6 kHz이었고, 임피던스의 위상각은 共振과 反共振 사이의 주파수 구간에서 $-40^\circ \sim -17^\circ$ 범위의 값을 나타내었다. 또한, 이들 임피던스의 진폭과 위상의 측정치는 계산치와 거의 일치하는 경향을 나타내었고, 共振과 反共振 사이의 주파수 차는 0.9 kHz이었다.

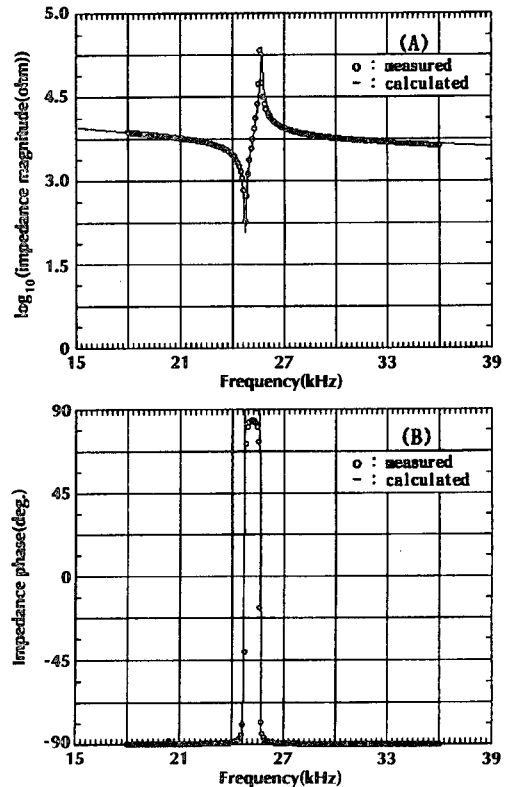


Fig. 7. Measured and calculated impedance of the transducer with no matching layer in air. (A) Impedance (B) Phase

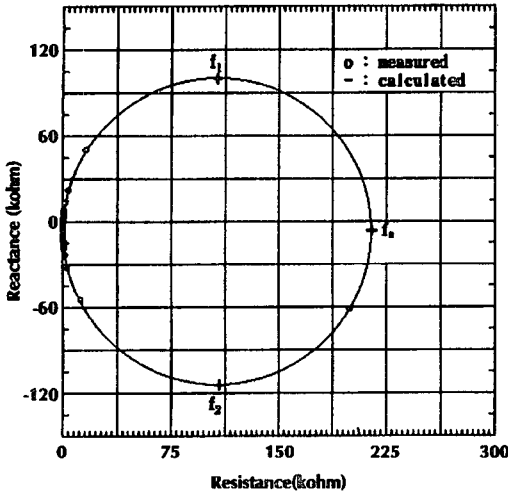


Fig. 8. Impedance circle of transducer with no matching layer in air.

한편, taper형 압전 진동자의 전기 단자에서 측정 한 共振周波數 부근에 대한 자유 전기 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분의 주파수 궤적은 Fig. 8과 같다. 그림에서 종축은 reactance 성분 ($k\Omega$)이고, 횡축은 resistance 성분 ($k\Omega$)이다. Fig. 8의 임피던스 circle에서 직렬공진주파수(f_s)는 $f_s=24.71\text{ kHz}$ 이었고, 象限周波數 f_1, f_2 는 각각 $f_1=24.64\text{ kHz}$, $f_2=24.78\text{ kHz}$ 로서 기계적인 품질계수 Q 는 $Q=\frac{f_s}{f_2-f_1}\approx 176$ 이었다.

(2) 整合層이 있는 진동자의 공기중에 대한 주파수 특성

초음파 진동자의 주파수 대역폭을 증대시키기 위해 taper형 압전 세라믹스의 전면에 음향 整合層을 부착한 복합 진동자의 공기중에 대한 전기적인 임피던스는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 (A)는 임피던스의 진폭특성($\log_{10}|Z_{in}|$)이고, (B)는 임피던스의 위상특성이며, 그림에서 \circ 은 측정치이고, 실선은 수치모델에 의한 계산치이다.

Fig. 9에서 한 개의 整合層을 갖는 taper형 초음파 진동자의 공기중에서 측정 한 공진특성을 살펴볼 때, 두 개의 공진진동특성이 서로 인접하는 주파수에서 동시에 나타나고 있는데, 제1 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 21.65 kHz ,

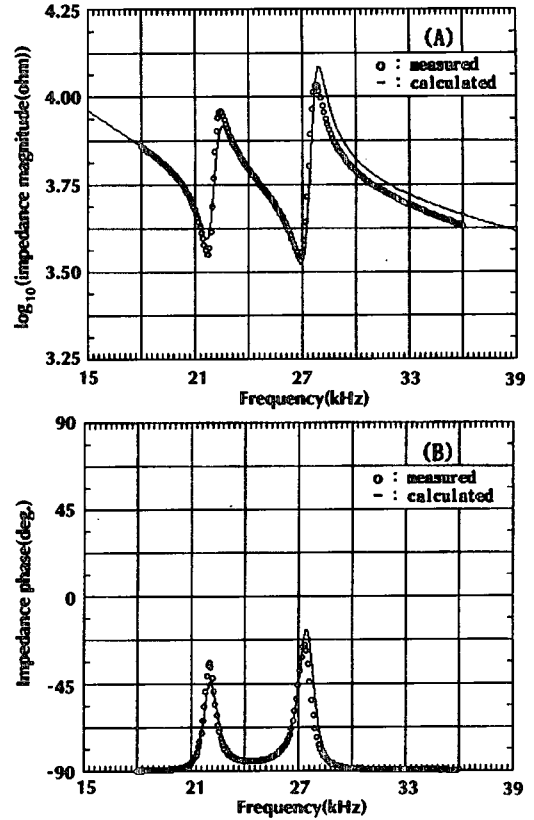


Fig. 9. Measured and calculated impedance of the transducer with a single matching layer in air.

(A) Impedance (B) Phase

22.42 kHz 이었고, 제2 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 26.87 kHz , 27.72 kHz 이었다. 또한, 제1 및 제2 共振 周波數에 대한 임피던스는 각각 $3.54\text{ K}\Omega$, $3.51\text{ K}\Omega$ 으로서 거의 유사한 값을 나타내었다.

그림 9에서 제1 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數의 차이는 0.77 kHz , 제2 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數의 차이는 0.85 kHz 이었고, 제1 및 제2 共振點에 대한 주파수의 차이는 5.22 kHz 이었다.

한편, 임피던스의 위상각은 21.65 kHz 와 22.42 kHz 에서 -34.09° 와 -25.25° 로서 최대치를 나타내었고, 이들의 임피던스의 진폭 및 위상 특성은 측정치는 계산치와 거의 유사한 경향을 나타내

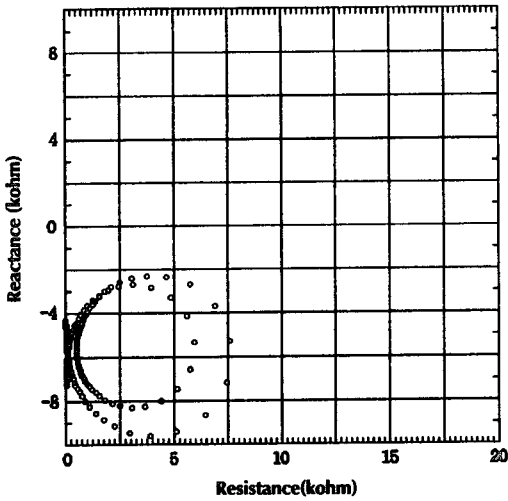


Fig. 10. Impedance circle of transducer with a single matching layer in air.

었다.

그림 10은 整合層을 갖는 taper형 초음파 진동자에 대하여 공기중에서 측정한 共振 周波數 부근에 대한 자유 전기 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분의 주파수 궤적을 나타낸 것이다. 그림에서 중축은 reactance 성분($k\Omega$)이고, 횡축은 resistance 성분($k\Omega$)이다. Fig. 10에서 큰 원은 제1 共振點 부근에 대한 자유 임피던스의 주파수 궤적이고, 작은 원은 제2 共振點 부근에 대한 자유 임피던스의 궤적이다.

2) 수중에서의 주파수 특성

압전 세라믹스의 전면에 음향 整合層을 부착한 복합 진동자의 수중에 대한 전기적인 임피던스는 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 (A)는 임피던스의 진폭특성($\log_{10}(|Z_{in}|)$)이고, (B)는 임피던스의 위상특성이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 실선은 수치 모델에 의한 계산치이다.

Fig. 11의 整合層을 갖는 taper형 초음파 진동자의 수중에 대한 共振特性을 살펴보면, 공기중에서와 같이 두 개의 공진진동특성이 서로 인접하는 주파수에서 동시에 나타나고 있는데, 제1 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數는 각각 21.35 kHz, 22.73 kHz이었고, 제2 공진 모드에 대한 共

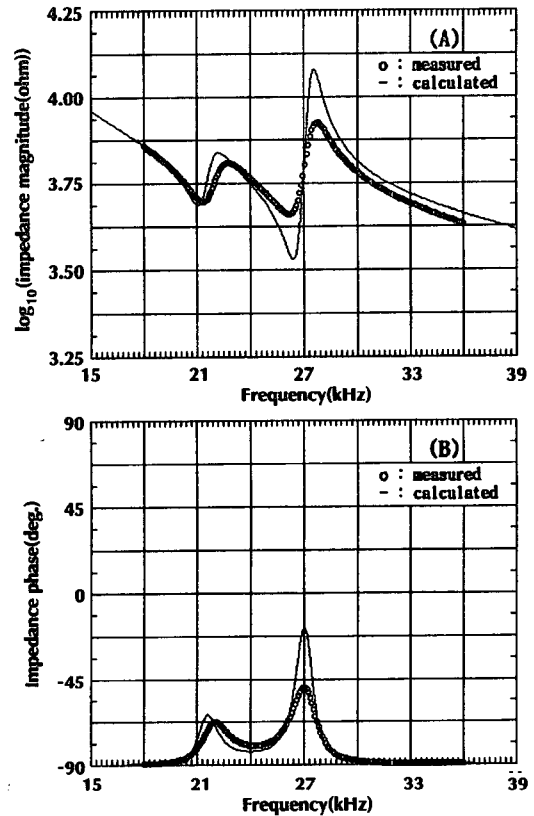


Fig. 11. Measured and calculated impedance of the transducer with a single matching layer in water.
(A) Impedance (B) Phase

振 및 反共振 周波數는 각각 26.13 kHz, 27.72 kHz이었다. 또한, 제1 및 제2 共振 周波數에 대한 임피던스는 각각 4.98 $k\Omega$ 과 4.58 $k\Omega$ 으로서 거의 유사한 값을 나타내었고, 자유 임피던스 진폭의 측정치는 제1 共振點에서는 일치하는 경향을 나타내었으나, 제2 共振點에서는 계산치와 큰 차이를 나타내었다. Fig. 11의 (B)에서 제1 및 제2 共振點 부근에서의 위상특성을 보면, 측정 위상각은 양 공진 모드에서 각각의 共振點과 反共振點의 중간 주파수인 22.03 kHz와 27.05 kHz에서 -67.38° , -49.69° 로서 최대치를 나타내었는데, 이들 측정치중에서 제2 共振點에 대한 측정치가 계산치와 큰 차이를 나타내었다.

그림 11에서 제1 공진 모드에 대한 共振 및 反共

振周波數의 차이는 1.38 kHz , 제2 공진 모드에 대한 共振 및 反共振 周波數의 차이는 1.59 kHz 이었고, 제1 및 제2 共振點에 대한 주파수의 차이는 4.78 kHz 이었다.

본 연구에서 설계한 taper형 초음파 진동자의 電氣端子에서 측정 한 共振 周波數 附近에 대한 自由電氣 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분의 주파수 궤적은 Fig. 12와 같다. 그림에서 종축은 reactance ($k\Omega$)이고, 횡축은 resistance ($k\Omega$)이다. Fig. 12의 임피던스 circle에는 두 개의

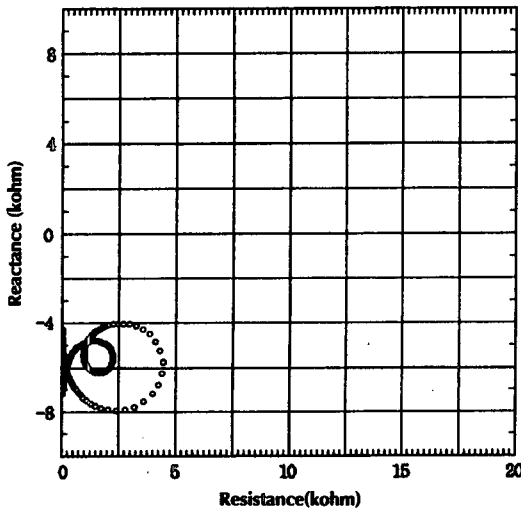


Fig. 12. Impedance circle of transducer with with a single matching layer in water.

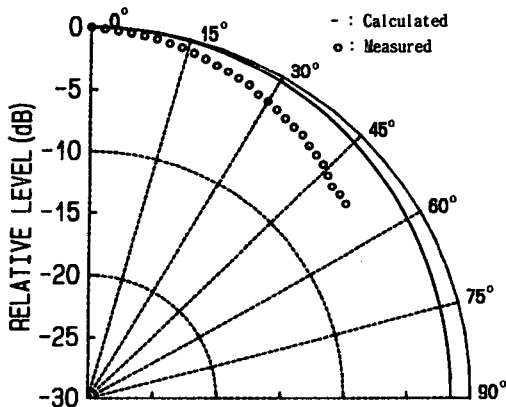


Fig. 13. Beam pattern of a designed transducer

주파수 궤적이 함께 나타나고 있는데, 이들 중에서 큰 circle은 21.35 kHz 의 제1 共振點 부근에 대한 자유 임피던스의 주파수 궤적이고, 작은 circle은 26.13 kHz 의 제2 共振點 부근에 대한 자유 임피던스의 주파수 궤적이다.

Fig. 13은 음향 整合層을 접착시킨 taper형 초음파 진동자의 수중에 대한 送信指向特性을 나타낸 것이다. 그림에서 종축과 횡축은 相對音壓레벨 (dB)이고, 방사선상의 점선은 지향각이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 실선은 계산치를 나타낸 것이다. Fig. 13에서 본 연구에서 제작한 진동자의 -3 dB 점에 대한 半減角은 약 40° 이었고, 지향각이 증가함에 따라 실제 측정된 지향성 패턴은 이론적인 지향성 패턴과 큰 차이를 나타내었다.

2. Taper형 超音波 振動子の 送波電壓 感度

taper형 압전 세라믹스에 Al_2O_3 와 epoxy 수지로서 생성시킨 음향 整合層을 접착시켜 제작한 초음파 진동자의 수중에 대한 音響放射特性을 조사하기 위해 送波電壓感度を 측정하였는데, 그 결과는 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에서 종축은 送波電壓感度($\text{dB re } 1\mu\text{ Pa/V at } 1\text{ m}$)이고, 횡축은 주파수이며, 그림에서 ○은 측정치이고, 실선은 수치모델에 의한 계산치를 나타낸 것이다.

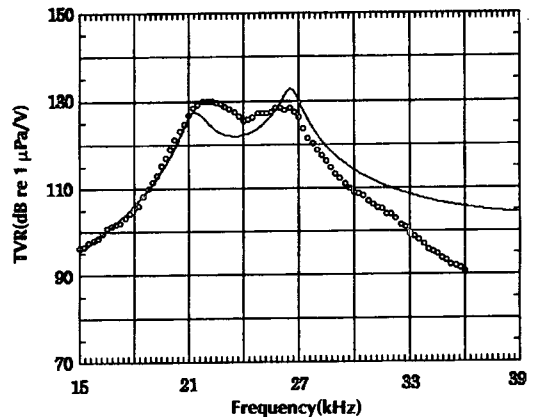


Fig. 14. Transmitting voltage response($\text{dB re } 1\mu\text{ Pa/V}$) for the transducer with a single matching layer.

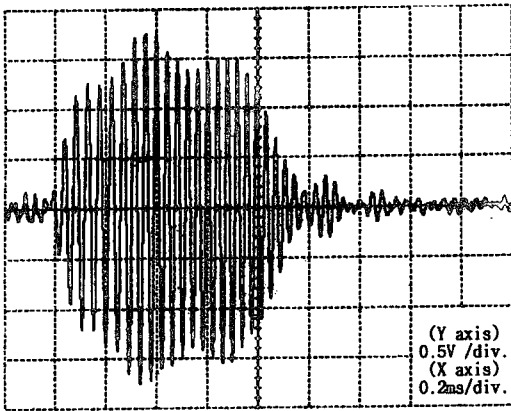


Fig. 15. Measured chirp echo waveform in water.

본 연구에서 설계, 제작한 초음파 진동자의 송파電壓感度の 측정치는 제1共振周波數 부근인 22.0 kHz에서 130.1 dB이었고, 제2共振周波數 부근인 25.8 kHz에서 128.5 dB이었는데, 제1 및 제2共振周波數에 있어서의 -3 dB점에 대한 주파수帶域幅은 각각 2.55 kHz, 3.2 kHz이었다. 이들共振點의 중간 주파수부근인 24.0 kHz에 대한送波電壓感度は 125.4 dB로서 제1共振點에 비해 4.7 dB 낮았고, 제2共振點에 대해서는 3.1 dB 낮았다. 또한, 측정치는 이론치와 약간의 차이를 나타내었다.

한편, 본 연구에서 설계한 초음파 진동자에 20 ~ 60 kHz의 주파수 범위의 chirp 펄스 신호(펄스 폭 4 ms, 중심주파수 40 kHz)를 인가했을 때,水中放射音場에 있어서의 송신 펄스 신호의時間應答特性은 Fig. 15와 같다. 그림에서 종축은 송파펄스신호의 상대진폭이고, 횡축은 시간이다.

Fig. 15의 수신 chirp 파형은 Fig. 14의 주파수에 따른送信電壓感度の 변동특성과 거의 유사한 양상을 나타내었는데, 이 주파수 범위에 대한 chirp 신호를 효과적으로 이용하면 보다 다양한 어업정보를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과를 고찰해 볼 때, 본 연구에서 설계, 제작한 음향整合層을 부착시킨 taper형 초음파 진동자는整合層을 부착시키지 않은 진동자와 비교하여, 비록送波電壓感度に 있어서는 손실이 초래되었지만, 그 대신送波電壓感度が 유사한 두 개의共振周波數를 동시에 이용할 수 있는 장점

이 있다. 또한 이들 제1 및 제2의共振點에 대한 주파수 간격은 약 5.16 kHz 정도로서, 이들 주파수 구간에 대한送波電壓感度の 최대 변동폭이 약 10 dB에 불과하기 때문에 그 주파수 대역을 효과적으로 이용하면 어종식별을 위한音響散亂信號의 수집이 가능하다고 판단된다.

要 約

어군탐지기용 송·수파기의 주파수 대역폭을 확장시키기 위해 taper형 압전 세라믹스의 방사면에 Al_2O_3 -epoxy 음향整合層을 부착시키고, 그것의 음향 진동 특성에 대한 이론적 및 실험적 해석을 행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. taper형 세라믹스의 공기중에 대한共振周波數는 24.7 kHz로서, 그 주파수 대역폭은 0.9 kHz이었고, 전기적인 임피던스의 측정치는 계산치와 잘 일치하였다.

2. 음향整合層을 갖는 taper형 진동자의 공기중에 있어서의 제1 및 제2共振周波數는 각각 21.7 kHz와 26.9 kHz 이었고,反共振周波數는 각각 22.4 kHz와 27.7 kHz로서 약 5 kHz의 간격으로 서로 다른 두 개의 공진 모드가 나타나고 있는데, 이들共振 및 反共振周波數에 대한 임피던스는 약 3.5 k Ω 이었다.

3. 음향整合層을 갖는 taper형 진동자의 수중에 있어서의 제1 공진 모드에 대한共振 및 反共振周波數는 각각 21.4 kHz와 22.7 kHz이었고, 또한 제2 공진 모드에 대한共振 및 反共振周波數는 각각 26.1 kHz와 27.7 kHz로서, 4.7 kHz의 간격으로 서로 다른 두 개의 공진 모드가 나타났는데, 이들 제1 및 제2共振周波數에 대한 임피던스는 각각 5.0 k Ω , 4.6 k Ω 이었다.

4. 본 연구에서 설계한 음향整合層을 갖는 taper형 초음파 진동자의電壓送波感度(Transmitting Voltage Response, TVR)는 제1共振周波數 부근인 22.0 kHz에서 130.1 dB re 1 μ Pa/V 이었고, 제2共振周波數 부근인 25.8 kHz에서 128.5 dB re 1 μ Pa/V이었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 설계, 개발한 음향整合層이 부착된 초음파 진동자는 그것이 부

착되지 않은 진동자와 비교하여 送波電壓感度에 있어서는 손실이 불가피하게 초래되지만, 그 대신 송파감도가 유사한 두 개의 共振周波數를 동시에 이용할 수 있는 장점이 있기 때문에 어종의 식별 정보 등을 수집하는 데 효과적으로 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) 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) Inoue T., T. Nada, T. Tsuchiya, T. Nakanishi, T. Miyama and M. Konno(1993) : Tonpilz piezoelectric transducers with acoustic matching plates for underwater color image transmission, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont. 40, 121-129.
- 5) Kossoff, G.(1966) : The Effect of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers, IEEE Trans. SU-13, 20-30.
- 6) 李兌在(1998) : 어종식별을 위한 광대역초음파 변환기의 설계, -단일음향정합층을 이용한 이중공진형 초음파 변환기의 설계-, 한국어업기술학회지 34(1), 74-84.
- 7) U.S. NUSC(1972) : TAC program, User's Manual, General Electric Comp. 161.
- 8) Wilson O.B.(1991) : Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, Peninsula Publishing, California, 11-108.
- 9) Crombrugge M. and W. Thompson(1985) : Optimization of the transmitting characteristics of a Tonpilz-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 broad-band piezoelectric transducers, IEEE Trans. SU-25, 115-125.
- 11) Camp, L.(1970) : Underwater Acoustics, Wiley-Interscience, New York, 89-108.