

반파장 직경을 갖는 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 설계, 제작 및 성능특성

이대재* · 이원섭¹

부경대학교 해양생산시스템관리학부, 부산광역시 강서구청 향만수산과

Design, fabrication and performance characteristics of a 50kHz tonpilz type transducer with a half-wavelength diameter

Dae-Jae LEE* and Won-Sub LEE¹

*Division of Marine Production System Management,
Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

*¹Dept. of Harbor and Marine Products, Gangseo District Office, Busan Metropolitan,
Busan 618-701, Korea*

In a split beam echo sounder, the transducer design needs to have minimal side lobes because the angular position and level of the side lobes establishes the usable signal level and phase angle limits for determining target strength. In order to suppress effectively the generation of unwanted side lobes in the directivity pattern of split beam transducer, the spacing and size of the transducer elements need to be controlled less than half of a wavelength. With this purpose, a 50 kHz tonpilz type transducer with a half-wavelength diameter in relation to the development of a split beam transducer was designed using the equivalent circuit model, and the underwater performance characteristics were measured and analyzed. From the in-air and in-water impedance responses, the measured value of the electro-acoustic conversion efficiency for the designed transducer was 51.6%. A maximum transmitting voltage response (TVR) value of 172.25dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{V}$ at 1m was achieved at 52.92kHz with a specially designed matching network and the quality factor was 10.3 with the transmitting bandwidth of 5.14kHz. A maximum receiving sensitivity (SRT) of -183.57dB re 1V/ μPa was measured at 51.45kHz and the receiving bandwidth at -3dB was 1.71kHz. These results suggest that the designed tonpilz type transducer can be effectively used in the development of a split beam transducer for a 50kHz fish sizing echo sounder.

Keywords: 50kHz tonpilz type transducer, Half-wavelength diameter, TVR, SRT

*Corresponding author: daejael@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5889, Fax: 82-51-629-5885

서 론

현재, 해중에 분포하는 어족 생물이나 해양생물의 생물학적 채장 조성, 공간적인 군집 밀도 및 유영 행동 특성 등의 정량적인 조사, 분석 및 평가 등을 위해 split beam echo sounder가 널리 사용되고 있다. 이와 같은 split beam echo sounder는 유럽, 북미 및 일본을 비롯한 세계 여러 나라에서 개발, 보급되고 있지만, 우리나라에서는 이들 나라로부터의 수입에 전적으로 의존하고 있는 실정이다. 과거부터, 우리나라를 비롯한 북동 아시아의 여러 나라에서는 전통적으로 28, 50, 75, 200kHz의 어군탐지기가 널리 보급되어 왔던 관계로 어로현장에서는 이들 주파수에 대한 어군탐색, 어군의 분포 및 군습성 등에 관한 많은 어업생산학적 정보가 축적되어 있다(Simmonds et al., 1995). 이 때문에 어업현장에서는 아직도 이들 주파수를 이용하는 어군탐지시스템에 대한 선호도가 매우 높은 실정이다. 그러나, 현재 우리나라의 어로현장, 특히 선망어선이나 중층트롤어선에 보급되고 있는 채장어군탐지기의 대부분은 유럽에서 수입되고 있는 70kHz split beam echo sounder가 주류를 이루고 있다(MacLennan and Simmonds, 1992).

일반적으로 이와 같은 4 분할 빔 음향 변환기를 설계할 때, 가장 중요한 설계 파라미터의 하나는 side lobe의 레벨과 이것의 출현을 어떻게 억제시키는가에 대한 문제이다. 현재 이를 해결하기 위한 가장 현실적이고, 실제적인 방법의 하나는 4 분할 빔 음향 변환기를 구성하는 각 개별적인 음향소자의 크기를 반파장 이하로 최소화 시킴으로써 이들 소자사이의 배열 간격을 반파장 이하가 되도록 조절하고, 각 소자에 공급되는 전기신호의 진폭 가중치를 적절하게 최적화하는 기법이다. 즉, 배열 소자의 크기와 간격을 조절하여 side lobe의 영향을 억제하는 방법이다. 그러나, 어류 채장의 추정 정확도에 너무 주목하여 음향소자의 수를 고정시킨 상태에서 지나치게 side lobe 출현을 억제시키고자 하면, 4 분할

빔 음향 변환기의 수중방사면적이 감소하는 결과가 초래되어 split beam echo sounder의 성능을 결정하는 송신출력, 송파감도, 수파감도, 지향특성, 주파수 대역폭 등과 같은 성능특성이 함께 저하하는 문제가 발생한다(Dziedzic et al., 1995, Zakharia, 1995).

본 연구는 이와 같은 각종 설계상의 모든 문제점과 어로현장의 조업상황 및 어업자의 수요를 동시에 고려하여 50kHz 채장어군탐지기의 국산화를 실현하는데 있어 필요불가결한 4 분할 빔 음향 변환기의 설계, 개발에 사용할 tonpizl형 음향 변환기를 설계, 제작하고, 수중에서의 음향성능특성을 평가, 분석하였다.

재료 및 방법

Tonpizl형 음향 변환기의 설계이론

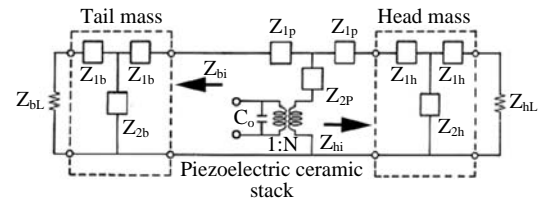


Fig. 1. Equivalent circuit for the longitudinal mode of a 50kHz tonpizl type transducer.

두께 방향으로 진동하는 압전 세라믹의 전면과 후면에 Fig. 1과 같이 금속블록을 접합시키고, 이들을 고강력 볼트로써 체결한 tonpizl형 변환기의 전기입력단자에 전기신호를 인가하면, 이들 구성요소는 서로 일체가 되어 진동을 한다. 이 음향 변환기에 대한 전기 - 기계 - 음향의 복합적인 등가회로는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있고, 그림에서 등가회로의 요소 Z_{1b} , Z_{2b} , Z_{1p} , Z_{2p} , Z_{1h} , Z_{2h} 는 각각 tail mass, 압전소자, head mass의 4 단자 회로망의 직렬 및 병렬소자의 임피던스로서

$$\begin{aligned} Z_{1b} &= jZ_b \tan(k_1 l_1 / 2), & Z_{2b} &= Z_b / [j \sin(k_1 l_1 / 2)] \\ Z_{1p} &= jZ_p \tan(k_e l / 2), & Z_{2p} &= Z_p / [j \sin(k_e l / 2)] \\ Z_{1h} &= jZ_h \tan(k_2 l_2 / 2), & Z_{2h} &= Z_h / [j \sin(k_2 l_2 / 2)] \end{aligned} \quad (1)$$

이다. 여기서, Z_b , Z_p , Z_h 는 각각 tail mass, 압전소자, head mass의 특성임피던스, k_1 , k_e , k_2 는 두께진동에 대한 유효 파장정수, l_1 , l_2 는 두께이다. 또한, C_0 는 제동용량 (clamped capacitance), N 은 음향 변환기의 전기기계변환계수(변성비)이다. Z_{bL} , Z_{hL} 은 tail mass 및 head mass의 부하 임피던스로서, 설계된 음향 변환기의 성능에 대한 공기부하 임피던스의 영향은 매우 작기 때문에 이들의 영향은 무시하였다 (Hughes et al., 1969). 또한, 본 연구의 수치모델에 있어서는 볼트 (prestress bolt), 전극 (silver electrode), 접착층 (bonding layer) 등의 영향은 무시하여 설계 파라미터를 추출하였다.

Fig. 1에서 tonpilz형 음향 변환기의 전기입력 임피던스 Z_i 는

$$Z_i = \frac{Z_m}{N^2 + j\omega C_0 Z_m} \quad (2)$$

이고, 여기서, $\omega = 2\pi f$ 로서 f 는 주파수이고, Z_m 은 음향 변환기의 기계 임피던스로서, tail mass와 head mass의 입력 기계 임피던스를 각각 Z_{bi} , Z_{hi} 라 할 때, Z_m 는

$$Z_m = Z_{2p} + \frac{(Z_{1p} + Z_{hi})(Z_{1p} + Z_{bi})}{2Z_{1p} + Z_{hi} + Z_{bi}} \quad (2)$$

이고, Z_{bi} , Z_{hi} 는

$$Z_{hi} = Z_{1h} + \frac{Z_{2h}(Z_{1h} + Z_{hL})}{Z_{1h} + Z_{2h} + Z_{hL}} \quad (4)$$

$$Z_{bi} = Z_{1b} + \frac{Z_{2b}(Z_{1b} + Z_{bL})}{Z_{1b} + Z_{2b} + Z_{bL}} \quad (5)$$

에 의해 구할 수 있다 (Rosenbaum, 1988; Wilson, 1991; Stansfield, 1991; Shuyu and Tien, 2008).

50kHz tonpilz형 음향 변환기의 제작

본 연구에서는 (2)식을 이용하여 추출된 설계 파라미터를 이용하여 50kHz용 tonpilz 음향 변환기를 설계하였는데, 그 모식도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 향후 설계될 split beam 음향 변환기의 개발에 사용될 음향소자의 방사면의 직경은 사용주파수 50kHz의 반파장, 즉, 15mm 보다 작은 12mm가 되도록 설계, 제작하였다. 이것은 split beam 진동자 assembly를 개발할 때, 최적의 축엽레벨 음향중심, 지향성패턴, 송파 및 수파감도 등을 도출하기 위해 각 tonpilz형 음향 진동소자 사이의 간격을 반파장보다 작은 간격으로 배치해야 하는데, 이 때, 음향소자에 전기신호를 인가하기 위한 전극단자 (copper shim)와 head mass에 삽입될 O-ring의 치수 등을 모두 고려해야만 목적하는 반파장의 배열 간격을 얻을 수 있기 때문에 실제의 방사면 직경을 반파장보다 작게 설계, 제작하였다.

Fig. 2에서 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 개발에 사용한 압전소자는 PZT4 계열의 내경 6.0mm, 외경 11.8mm, 높이 15.6mm의 원통형 압전소자이고, head mass는 재질이 brass로서, 그 직경과 두께는 각각 12mm, 12.8mm, 또한, tail mass는 직경과 두께가 각각 8mm, 3mm인 steel 블록을 prestress nut 겸용으로 사용하였다. Fig. 2에서 설계, 제작한 음향 변환기의 공진주파수는 압전소자와 tail mass 사이에 두께 0.5mm의 steel plate를 삽입함으로써 미세 조정할 수 있도록 설계하였다.

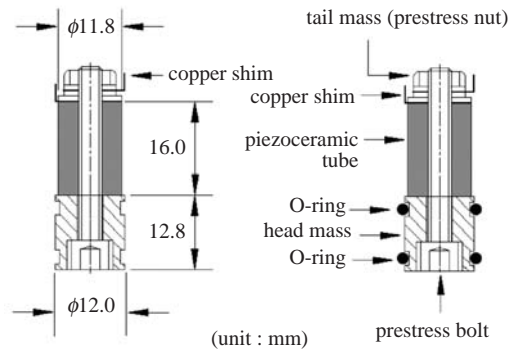


Fig. 2. Structure and schematic diagram of a 50 kHz tonpilz type transducer developed in this study.

정합회로 (matching network) 설계

Fig. 2에서 설계한 tonpiliz 형 음향 변환기를 구동할 때, 전력증폭기와 음향 변환기의 임피던스 정합을 위해 matching network를 자체 설계하여 사용하였는데, 그 정합회로는 Fig. 3과 같다.

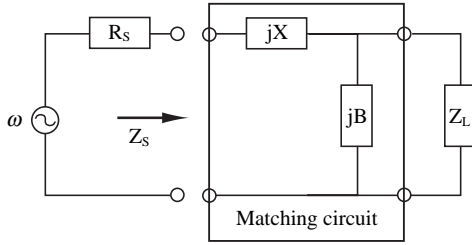


Fig. 3. An example of lowpass L matching network used in this study to achieve the maximum power transfer from the signal source to the load. The inputs to the design procedure are the load (Z_L) and source impedances (R_s). The outputs are the reactances X and B .

Fig. 3에서 matching network의 입력 terminal에서 입력 임피던스 Z_s 는 $Z_s = R_s + jX_s$ 이지만, 그 입력 단자에 전력증폭기가 접속되는 경우, reactance 성분 X_s 는 $X_s = 0$ 이고, 순수저항 (resistance) 성분 R_s 만이 존재하므로, $Z_s = R_s$ 이 된다. 이 때, 음향 변환기의 임피던스, resistance, reactance 성분을 각각 Z_L, R_L, X_L 라 할 때, Z_L 은

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (6)$$

이고, 이 때, 입력 임피던스 Z_s 는

$$Z_s = jX + \left(jB + \frac{1}{Z_L} \right)^{-1} \quad (7)$$

이 된다. Fig. 3에서 음향 변환기에서 최대의 출력이 송출되기 위해서는 $R_s = R_L$ 이 되도록 하기 위한 matching network이 필요하고, 만일, $R_L > R_s$ 의 조건을 만족하는 경우, Fig. 3의 lumped element matching network에 대한 B 와 X 의 값은

$$B = \frac{X_L + \sqrt{\frac{R_L}{Z_s}} \cdot \sqrt{R_L^2 + X_L^2 - Z_s R_L}}{R_L^2 + X_L^2} \quad (8)$$

$$X = \frac{BZ_s R_L - X_L}{1 - BX_L} \quad (9)$$

이고, $B = \omega C, X = \omega L$ 에 의해 matching 소자에 대한 콘덴서의 정전용량 C 와 코일의 자기유도 인덕턴스 L 값을 구할 수 있다 (Tse, 2003).

전기 임피던스 (어드미턴스), 송파 및 수파 전압 감도의 측정

본 연구에서 설계, 개발한 50kHz tonpiliz 형 음향 변환기에 대한 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스 (어드미턴스)는 정밀 LCR meter (Model 7600, QuadTech)를 이용하여 측정하였다. 음향 변환기의 송파감도 (transmitting voltage response, 이하 TVR이라 한다)는 실험수조 ($L \times B \times D, 5 \times 6 \times 5$ m)에서 측정하였는데, 이를 위해 먼저 Fig. 4에서와 같이 PC 상에서 일정한 pulse 폭과 펄스반복주기를 갖는 LFM (linear frequency modulation) 신호, 즉, chirp 신호를 발생시켜 이 신호를 RS232C interface를 거쳐 임의 파형발생기 (Model 33120A, HP)의 memory에 전송하여 저장시켜 놓은 후, 필요에 따라 이 신호를 호출하여 필요에 따른 주파수와 진폭의 미세 조정을 거쳐 이용하였다. 본 연구에서 이용한 up-chirp 신호 $S(t)$ 는

$$S(t) = A \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sin(2\pi f_s t + \pi \alpha t^2) \quad (10)$$

로서 정의되는 LFM 펄스신호인데, 여기서, A 는 chirp 펄스신호의 진폭, f_s 는 chirp 펄스신호의 개시주파수 (start frequency)로서, $f_s = f_0 - \frac{\Delta f}{2}$ (f_0 : 중심주파수, Δf : chirp 신호의 주파수 대역폭)이다. 또한, α 는 chirp 펄스신호의 sweep rate로서, chirp 펄스의 폭을 T 라 할 때, $\alpha = \frac{\Delta f}{T}$ 이다. 또한 $0 \leq t \leq T$ 이면, $\operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = 1$ 이고, $t \leq 0$ or $t \geq T$ 이면, $\operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = 0$ 인 함수이다.

본 실험에서는 임의 파형발생기에 저장되어 있는 기본 up-chirp 펄스를 호출하여 펄스폭 $T = 1.25\text{ms}$, $f_s = 25\text{kHz}$, $\Delta f = 40\text{kHz}$, 즉, 전압 1V, 주파수 25 - 65 kHz 범위의 chirp 신호를 생성시켜 전력증폭기 (Model 2713, B&K)를 통해 증폭한 후, 이 신호를 matching network을 경유하여 음향 방사면이 수조의 저면을 향해서 설치된 음향 변환기에 인가하였다. 음향 변환기에서 방사된 송신 펄스 신호는 수중청음기 (Model 8105, B&K 및 C304, Cetacean research technology)을 통해 수신하였고, 이 신호를 charge amplifier (Model 2635, B&K) 및 measuring amplifier (Model 2610, B&K)를 경유하여 digital storage oscilloscope (Model 475, Gould) 및 FFT analyzer (Model 3525, AND)에 입력하였다. 실험은 송신 및 수신신호를 관찰하면서 FFT analyzer를 통해 송신 및 수신 신호에 대한 시간응답신호와 주파수 스펙트럼을 각각 측정, 수록하고, 이들 주파수 스펙트럼을 비교, 분석하여 송파전압감도를 구하였다 (Harris et al, 2004).

한편, 수파감도 (receiving sensitivity, 이하 SRT라 한다.)는 송파감도와 동일한 방법으로 측정하였는데, 먼저, chirp 펄스신호를 이용하여 넓은 주파수 범위에 대한 수파감도를 구하기 위해

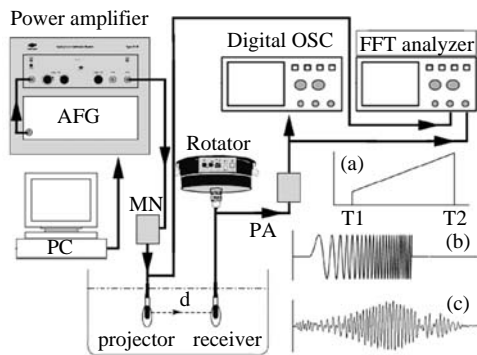


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental setup for measuring the underwater performance characteristics of a developed 50kHz tonpilz type transducer. (a): diagram of time and frequency, (b): transmitted chirp pulse, (c): received chirp response, (d): distance between projector and receiver.

서는 광대역의 송파기 (projector)가 필요하다. 따라서, 이를 위해 본 연구에서는 30kHz에서 60kHz의 주파수 범위에서 평판한 송신 주파수 특성을 갖는 광대역 송수파기 (Model R209, Airmar)를 사용하였다. 실험은 송파감도를 측정할 때, 생성시킨 신호와 동일한 chirp 펄스신호를 임의파형발생기로부터 송출하고, 그 직접파 음향 신호를 각각 본 연구에서 개발한 음향 변환기와 수중청음기를 통해 수신하여 이들 신호를 digital storage oscilloscope를 통해 관찰하면서 동시에 FFT analyzer에 입력한 후, 이들 송신 및 수신 신호에 대한 시간응답신호와 주파수 스펙트럼을 각각 측정, 수록하고, 이들 주파수 스펙트럼을 비교, 분석하여 수파전압감도를 구하였다.

결과 및 고찰

압전소자의 임피던스 특성

Fig. 2의 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 설계, 개발에 사용한 압전소자 (PZT4, 외경 11.8mm,

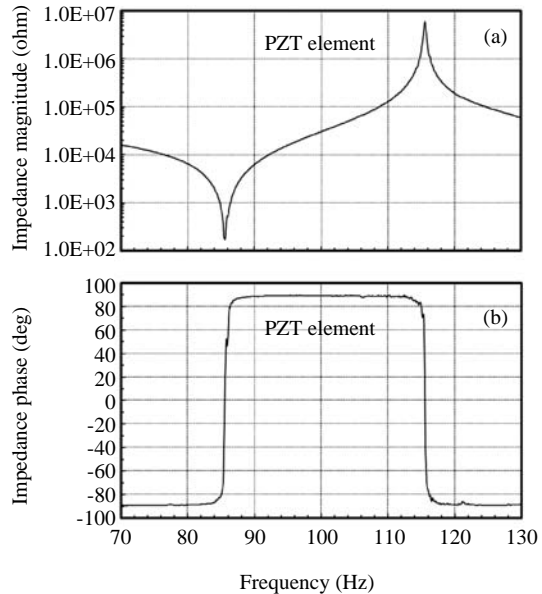


Fig. 5. Measured electrical impedance magnitude (a) and phase (b) characteristics for the PZT4 ceramic tube used in designing the a 50kHz tonpilz type transducer.

내경 6.0mm, 높이 15.6mm)의 공기중에 대한 전기적인 임피던스의 측정 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 (a)는 임피던스의 진폭특성이고, (b)는 임피던스의 위상특성이다.

일반적으로 split beam 음향 변환기를 설계, 개발할 때, 지향성의 도출 및 sidelobe 레벨의 억제를 용이하게 구현하기 위해서는 음향소자 사이의 평면배열 간격을 반파장(15mm) 이하로 유지할 필요가 있는데, 이를 위해 본 연구에서는 압전소자의 외경을 11.8mm로 설정하여 음향 변환기를 개발하였다. Fig. 5에서 압전소자에 대한 공기중에 있어서의 공진특성을 살펴보면, 공진 및 반공진 주파수의 측정치는 각각 85.6 kHz, 115.6 kHz이었고, 이들 공진 및 반공진 주파수에 대한 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 $174.0k\Omega$, 16.6° 와 $5.87M\Omega$, -37.6° 이었다.

Tonpiliz형 음향변환기의 임피던스특성

한편, Fig. 5의 진동특성을 갖는 PZT4 계열의

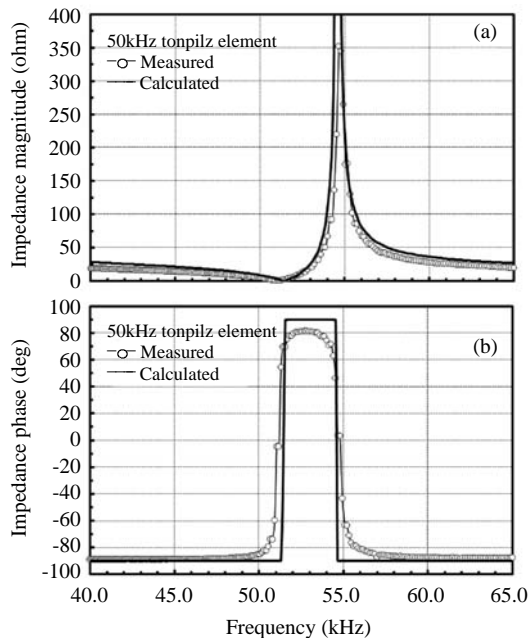


Fig. 6. Comparison of calculated and measured electrical impedance magnitude (a) and phase angle (b) characteristics for a 50kHz tonpiliz type transducer in air.

압전소자를 이용하여 Fig. 2와 같은 구조의 50kHz tonpiliz형 음향 변환기를 설계, 개발하는데 필요한 head mass, tail mass 등의 형상, 치수 및 재질 등에 대한 최적의 설계 파라미터를 추출하기 위해 전기-기계-음향의 복합적인 등가 회로 모델을 개발하여 반복적인 수치시뮬레이션을 행하였다. 이 시뮬레이션으로부터 추출된 설계 파라미터를 토대로 제작, 개발한 음향 변환기에 대한 공기중에 있어서의 전기적인 임피던스의 측정 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 (a)는 임피던스의 진폭특성이고, (b)는 임피던스의 위상특성이며, 그림에서 \circ 은 측정치이고, 실선은 수치모델에 의한 계산치이다.

본 연구에서 설계, 개발한 50kHz tonpiliz형 음향 변환기의 공기중에 대한 음향진동특성을 살펴볼 때, 공진 및 반공진 주파수의 측정치는 각각 51.05 kHz, 54.66 kHz이었고, 이들 공진 및 반공진 주파수에 대한 임피던스의 진폭 및 위상각의 측정치 각각 662Ω , -4.67° 와 $352.6k\Omega$, 3.73° 이었다. 한편, 공진 및 반공진 주파수의 계산치는 각각 51.43 kHz, 54.66 kHz이었고, 이들 공진 및 반공진 주파수에 대한 임피던스의 진폭 및 위상각의 계산치는 각각 17Ω , -37.56° 와 $1484.62k\Omega$, -69.41° 로서 그 계산치와 큰 차이를 나타내었다. 그러나, 공진과 반공진 주파수의 측정치와 계산치는 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 즉, 공진주파수의 차이는 0.38kHz이었고, 반공진주파수는 서로 일치하였다.

음향효율

본 연구에서 개발한 50kHz tonpiliz형 음향 변환기를 Scotchcast 2130 rubber (3M)로서 몰딩 및 수밀처리한 후, 공기중 및 수중에 있어서 음향 변환기에 대한 자유전기임피던스를 측정된 결과를 상호 중첩시켜 나타낸 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 수밀처리된 50kHz tonpiliz형 음향 변환기의 공기중 및 수중에 대한 공진 주파수의 측정치는 각각 50.80 kHz, 50.56 kHz이었고, 반

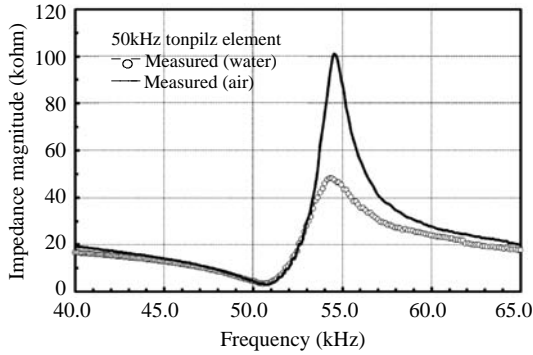


Fig. 7. Comparison of measured electrical impedance magnitude curves for a 50kHz tonpizl type transducer in air (solid line) and in water (circle).

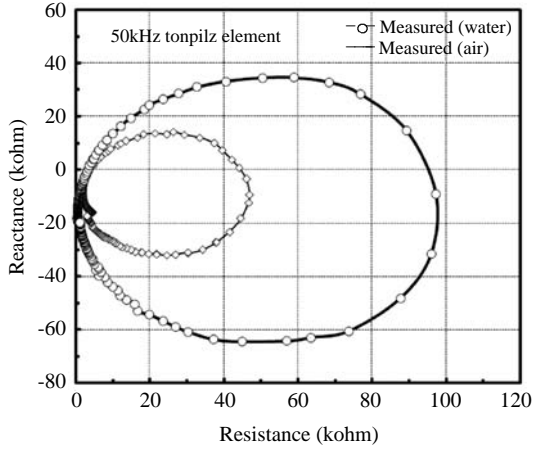


Fig. 8. Comparison of impedance loops for a 50kHz tonpizl type transducer in air (circle) and in water (diamond).

공진 주파수의 측정치는 각각 54.53 kHz, 54.26 kHz 이었다.

한편, Fig. 7의 공기중 및 수중에서 측정된 공진 주파수 부근에 대한 자유전기 임피던스의 resistance 성분과 reactance 성분의 주파수 궤적을 상호 중첩시켜 나타낸 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 중축은 reactance 성분 (Ω)이고, 횡축은 resistance 성분 (Ω)이다. 그림에서 큰 원은 공기중에 대한 자유 임피던스의 vector diagram이고, 작은 원은 수중에 대한 자유 임피던스의 vector diagram이다. Fig. 8의 임피던스 circle에서

공기중에 대한 직렬공진주파수 (f_s)는 $f_s = 54.40$ kHz이었고, 상한 주파수 f_1 과 f_2 는 각각 $f_1 = 53.74$ kHz, $f_2 = 55.06$ kHz로서 공기중에 대한 기계적인 품질계수 Q 는 $Q = f_s / (f_2 - f_1) = 41.2$ 이었다. 또한, Fig. 5에서 수중에 대한 직렬공진주파수 (f_s)는 $f_s = 54.13$ kHz이었고, 상한주파수 f_1 과 f_2 는 각각 $f_1 = 52.83$ kHz, $f_2 = 55.74$ kHz로서 수중에 대한 기계적인 품질계수 Q 는 $Q = f_s / (f_2 - f_1) = 18.6$ 이었다. 또한, 이들 임피던스의 주파수 궤적을 이용하여 단일 tonpizl 형 음향 변환기의 전기음향변환효율 η 는

$$\eta = \frac{D_w}{R_m} \left(1 - \frac{D_w}{D_a} \right) \quad (11)$$

에 의해 구하였는데, 여기서, R_m 은 수중의 자유 임피던스 loop에 대한 resistance의 최대치, D_w 은 수중에 대한 동임피던스 (motional impedance) circle의 직경, D_a 는 공기중에 대한 동임피던스 circle의 직경이다. 식 (11)에 의해 구한 단일 tonpizl 형 음향 변환기의 전기음향변환효율은 51.4%이었다.

Tonpizl 형 음향 변환기의 임피던스 정합

본 연구에서 개발한 50kHz tonpizl 형 음향 변환기의 송신출력을 증대시키기 위해 Fig. 4에서와 같이 LC (coil-condenser) 소자에 의한 lumped element matching network을 설계, 제작하여 음향 변환기에 접속하였는데, 이 정합 tonpizl 음향 변환기의 음향진동특성은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 (a)는 어드미턴스의 conductance (μs) 특성이고, (b)는 어드미턴스의 susceptance (μs) 특성이다. Fig. 9의 (a)와 (b)에서 \circ 은 정합회로가 없는 경우, 또한, 실선은 정합회로를 내장한 경우에 대한 conductance와 susceptance의 특성을 각각 나타낸 것이다.

본 연구에서 개발된 음향 변환기에 부착된 Fig. 4의 정합회로에 대한 B 와 X 값은 각각 $B = \omega C = 2292.64 \times 10^6$ 와 $X = \omega L = 423.79$ 이고, 이들

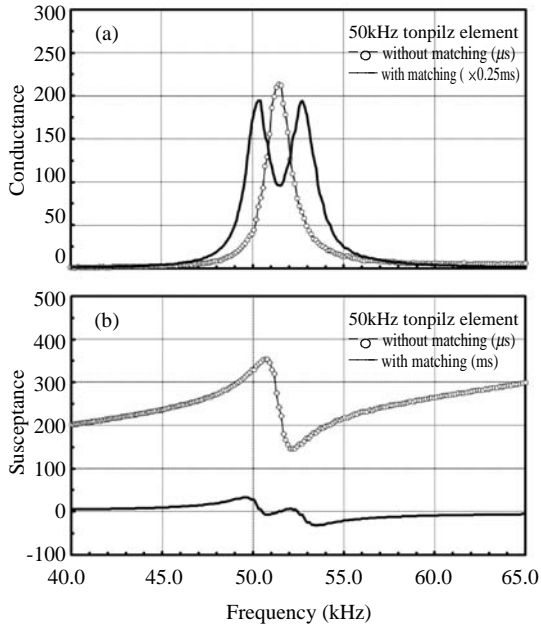


Fig. 9. Comparison of conductance (a) and susceptance (b) curves versus the frequency for a 50kHz tonpilz type transducer without (circle) and with matching network (solid line).

matching 소자 값에 대한 콘덴서의 정전용량 C 값과 코일의 자기유도 인덕턴스 L 값은 각각, $C=7.297\text{nF}$, $L=1.349\text{mH}$ 이었는데, 이 정합회로는 전력증폭기의 출력 임피던스를 50Ω 으로 가정하여 산출하였다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 정합회로를 내장시킨 경우와 정합회로가 없는 경우를 비교해 볼 때, 정합회로가 내장되어 있는 경우에 있어서는 conductance에 두 개의 peak mode가 나타나 보다 정합회로가 없는 경우보다 상당히 넓은 주파수 범위에 걸쳐 음향 신호가 방출되고 있는데, 이들 두 peak 사이의 중심 주파수 51.427kHz 는 정합회로가 없는 경우에 대한 공진주파수 50.187kHz 와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서 제 1 peak의 주파수, conductance, susceptance는 각각 50.31kHz , $48.50\mu\text{s}$, $6.15\mu\text{s}$ 이었고, 제 2 peak의 주파수, conductance, susceptance는 각각 52.70kHz , $48.46\mu\text{s}$, $-6.90\mu\text{s}$ 로서 이들 두 peak 사이의 주파

수 간격은 2.39kHz 이었다.

Tonpilz 음향 변환기의 송파감도

본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz 형 음향 변환기의 송파감도를 정량적으로 측정하기 위해 음향 변환기에 공급되는 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼과 음향 변환기에서 송출되는 신호를 수중청음기를 이용하여 수신한 수파파형의 주파수 스펙트럼은 Fig. 10과 같다. Fig. 10의 (A)는 임의파형 발생기를 경유하여 전력증폭기에서 증폭된 펄스폭 1.25ms , 개시 주파수 25kHz , 주파수 대역폭 40kHz 의 chirp 펄스신호가 matching network을 거쳐 음향 변환기에 인가될 때, 이 송신 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼 ($E_T(f)$)이고, (B)는 음향 변환기에 송출되는 chirp 펄스 신호를 음측상 거리 R의 위치에서 수중청음기를 통해 수신한 직접파 음향신호의 주파수 스펙트럼 ($E_R(f)$)이다. 이들 주파수 스펙트럼을 이용하여 송파전압감도 TVR ($\text{dB re } 1\mu\text{Pa}/1\text{V at } 1\text{m}$)은

$$\text{TVR}(f) = 20 \log \left(\frac{E_R(f)}{E_T(f)} \right) - M_R(f) + 20 \log(R) \quad (12)$$

에 의해 산출하였는데 (Hughes, 1998), 그 결과는 Fig. 11과 같다. 여기서, $M_R(f)$ 는 수중청음기의 수파감도 ($\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$)이고, f 는 주파수이다.

Fig. 10에서 중측은 주파수 스펙트럼의 상대 레벨 (dB)이고, 횡축은 주파수 (kHz)이다. Fig. 10의 (a)에서 음향 변환기에 인가된 chirp 신호의 스펙트럼은 $25 - 65\text{kHz}$ 의 주파수 범위에서 매우 평탄한 응답특성을 나타내고 있지만, 그 중에서 $50 - 60\text{kHz}$ 의 범위에서는 완만한 변동을 나타내고 있는데, 이것은 설계된 음향 변환기가 갖는 고유의 진동특성에 의해 전기 에너지가 음향 에너지로 변환되는 과정에서 초래되는 신호의 변동이다. 따라서, 개발된 음향 변환기에서는 이 스펙트럼 레벨이 변동하는 주파수 구간에서 강한 공진특성이 나타나게 되는데, 그 결과는 Fig. 10의 (b)와 같다. Fig. 10의 (a) 스펙트럼 성분은

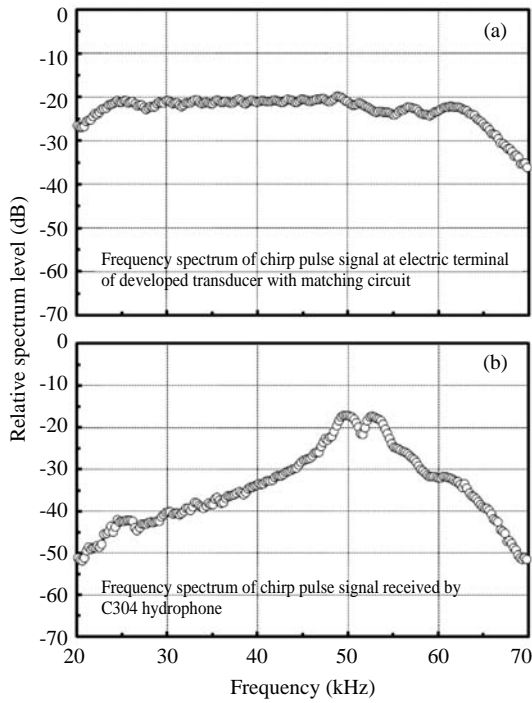


Fig. 10. Measured frequency spectrums of input chirp signal at matching network terminal (a), transmitting chirp signal received by hydrophone (b) for a developed 50kHz tonpilz type transducer.

갖는 송신 chirp 펄스신호를 수중청음기를 통해 수신하여 구한 송파 스펙트럼을 볼 때, 두 개의 송신 peak mode, 즉, 제 1 및 제 2의 송신 peak 가 각각 49.74 kHz 와 52.68 kHz 에 나타나고 있고, 그 사이의 51.70kHz 에서 스펙트럼 레벨이 순간적으로 drop 되는 구간이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 수신 스펙트럼의 특성은 Fig. 9 의 정합회로가 접속된 음향 변환기의 conductance 의 주파수 의존성에서 알 수 있는 바와 같이 제 1 및 제 2의 peak 가 각각 50.31kHz, 52.70kHz 에 나타나고 있고, 그 peak 사이의 51.43kHz 에서 conductance 가 순간적으로 drop 되는 현상과 매우 잘 일치하고 있다.

한편, Fig. 10 (a) 의 송신 스펙트럼 $E_T(f)$ 와 Fig. 10 (b) 의 수신 스펙트럼 $E_R(f)$ 을 이용하여 송파 전압감도 TVR (dB re 1 μ Pa/1V at 1m) 를 산출한

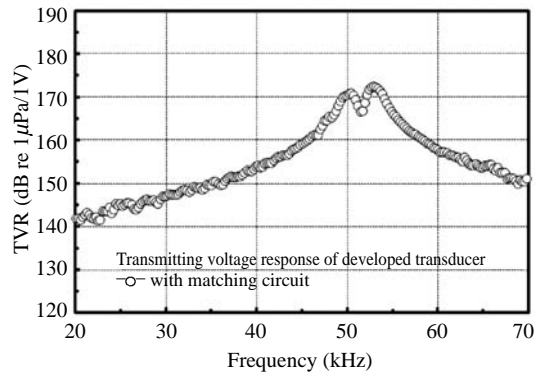


Fig. 11. Measured transmitting voltage response (TVR) for a developed 50kHz tonpilz type transducer.

결과는 Fig. 11 과 같다. Fig. 11 에서 종축은 송파 전압감도 (dB) 이고, 횡축은 주파수 (kHz) 이다. Fig. 11 의 송파전압감도의 주파수 의존성을 살펴볼 때, Fig. 10 (b) 의 제 1 및 제 2 의 송신 peak 특성과 유사한 경향을 나타내고 있는데, 가장 높은 송파전압감도는 52.92kHz 에서 172.25dB 이었고, Fig. 11 의 제 1 peak 부근인 50.17kHz 에서는 170.88dB 로서 그 다음으로 강한 응답을 나타내었고, 또한 이들 두 peak 사이의 51.45kHz 에서는 송파감도가 순간적인 drop 을 나타내어 166.66dB 이었다. 따라서, 두 송파전압감도의 peak 를 포함하는 -3dB 의 대역폭 ($f_1 = 49.25$ kHz, $f_2 = 54.39$ kHz) 은 $\Delta f = 5.14$ kHz 로서 본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz 형 음향 변환기의 송신 공진예리도 (quality factor) Q 는 $Q \approx 10.3$ 이었다.

Tonpilz 음향 변환기의 수파감도

50kHz tonpilz 형 음향 변환기의 수파감도를 정량적으로 측정하기 위해 기준 송파기 (R209, Airmar) 에 chirp 펄스신호를 인가하고, 이 수중음향신호를 본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz 형 음향 변환기와 수중청음기를 이용하여 각각 수신한 직접파 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 결과는 Fig. 12 와 같다. Fig. 12 의 (a) 는 임의파형 발생기를 경유하여 전력증폭기에서 증폭된 펄스폭 1.25ms, 개시 주파수 25kHz, 주파수 대역폭 40kHz

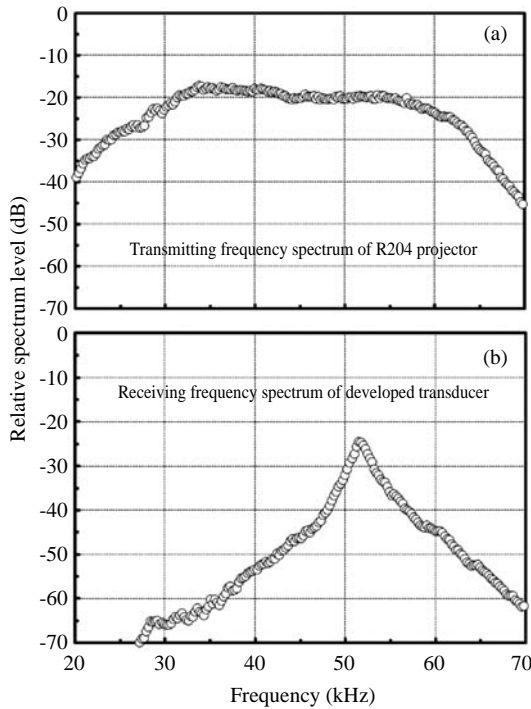


Fig. 12. Measured frequency spectrums of chirp signal transmitted from broadband transducer (a), chirp signal received by the developed transducer (b) for a developed 50kHz tonpilz type transducer.

의 chirp 펄스신호가 R209 기준 송파기를 통해 송출될 때, 이 수중음향신호를 음축상 약 1m의 거리에서 수중청음기를 이용하여 수신한 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼 ($H_R(f)$)이고, (b)는 본 연구에서 개발한 음향 변환기를 이용하여 동일 위치에서 측정 한 수신한 chirp 펄스신호의 주파수 스펙트럼 ($H_T(f)$)이다. 이들 주파수 스펙트럼을 이용하여 수파전압감도 SRT (dB re 1V/ μ Pa)는

$$SRT(f) = M_R(f) + 20 \log \left(\frac{H_T(f)}{H_R(f)} \right) \quad (13)$$

에 의해 산출하였는데 (Hughes, 1998), 여기서, $M_R(f)$ 는 표준 수중 청음기의 수파감도 (dB re 1V/ μ Pa)이고, f 는 주파수이다.

Fig. 12에서 종축은 주파수 스펙트럼의 상대 레벨 (dB)이고, 횡축은 주파수 (kHz)이다. Fig. 12

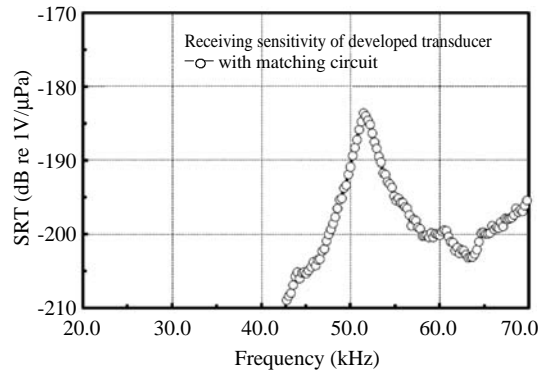


Fig. 13. Measured receiving sensitivity (SRT) for a developed 50kHz tonpilz type transducer.

(a)에서 기준 송파기로부터 송출되는 chirp 펄스 신호의 주파수 스펙트럼은 30 - 60 kHz의 주파수 범위에서 비교적 평탄한 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, 개발된 음향 변환기를 통해 수신한 chirp 펄스 신호의 주파수 스펙트럼은 Fig. 12 (b)와 같다. Fig. 12 (b)에서 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 수신모드에 대한 공진 특성은 51.45kHz에서 가장 우수한 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 12 (a)의 수중청음기에 의한 수신 스펙트럼 $H_R(f)$ 와 Fig. 12 (b)의 개발 음향 변환기에 의한 수신 스펙트럼 $H_T(f)$ 을 이용하여 수파전압 감도 SRT (dB re 1V/ μ Pa)를 산출한 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 종축은 수파감도 (dB)이고, 횡축은 주파수 (kHz)이다. Fig. 13의 수파전압감도의 주파수 의존성을 살펴볼 때, Fig. 12 (b)의 수신 peak 특성과 유사한 경향을 나타내고 있는데, 가장 높은 수파전압감도는 51.45kHz에서 -183.57dB이었다. 또한, 수파전압감도의 -3dB의 대역폭 ($f_1 = 50.72$ kHz, $f_2 = 52.43$ kHz)은 $\Delta f = 1.71$ kHz로서 본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 수신 공진예리도 (quality factor) Q 는 $Q \approx 30.09$ 이었다.

결론

본 연구에서는 split beam echo sounder에서 사

용하기 위한 4 분할빔 음향 변환기를 설계할 때, 가장 중요한 설계 파라미터의 하나인 side lobe의 출현과 그 레벨을 효과적으로 억제시킬 목적으로 4 분할빔 음향 변환기를 구성하는 각 개별적인 음향소자의 크기를 최소화시키기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 반파장의 직경을 갖는 50kHz의 tonpilz형 음향 변환기를 설계, 제작하고, 수중에서의 음향성능특성을 평가, 분석하였다. 본 연구에서 설계한 50kHz의 tonpilz형 음향 변환기의 공기중 및 수중에서의 전기 임피던스 특성으로부터 전기음향 변환 효율을 계산한 결과, 그 효율은 51.4%이었다. 또한, 수중에 있어서 정합회로의 입력단에서 측정된 chirp 펄스의 송신 스펙트럼과 수중청음기에 의해 수신한 수신 스펙트럼을 토대로 송파전압감도 TVR (dB re 1 μ Pa/1V at 1m)를 산출한 결과, 가장 큰 TVR 값은 52.92kHz에서 172.25dB 이었고, 송파전압감도의 -3dB의 대역폭 ($f_1=49.25$ kHz, $f_2=54.39$ kHz)은 $\Delta f=5.14$ kHz로서 본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz형 음향 변환기의 송신 공진예리도 (quality factor)는 10.3이었다. 한편, 광대역 음향 변환기를 사용하여 20 - 70kHz의 chirp 펄스 신호를 송파하고, 이 송신 펄스 신호를 수중청음기와 본 연구에서 개발한 50kHz tonpilz형 음향 변환기로 수신한 각각의 수신 스펙트럼으로부터 산출한 수파전압감도 SRT (dB re 1V/ μ Pa)를 산출한 결과, 가장 큰 SRT 값은 51.45kHz에서 -183.57dB 이었고, 수파전압감도의 -3dB의 대역폭 ($f_1=50.72$ kHz, $f_2=52.43$ kHz)은 $\Delta f=1.71$ kHz로서 수신 공진예리도는 30.09이었다.

사 사

이 논문은 2009년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 2009 - 0071881).

참고문헌

Dziedzic, A., C. Chorier, J.P. Dubois and D. Vray. 1995.

- Broadband target strength functions of 3 species freshwater free-swimming fish, ICES Int. Symp. on Fish. & Plank. Acoustics, Aberdeen, Scotland, 1 - 9.
- Harris, G.R., P.M. Gammell, P.A. Lewin and E.G. Radulescu. 2004. Interlaboratory evaluation of hydrophone sensitivity calibration from 0.1 to 2MHz via time delay spectrometry. Ultrasonics, 42, 349 - 353.
- Hughes, W.J. 1998. Transducer, underwater acoustic. Encyclopedia of applied physics, 22, 67 - 84.
- Hughes, W.J. and M.J. Zipparo. 1969. Computer modeling of ultrasonic piezoelectric transducers. Technical report No. TR 96 - 007, Applied Research Lab., The Pennsylvania State Univ., pp. 116.
- MacLennan, D.N. and E.J. Simmonds. 1992. Fisheries Acoustics, Chapman & Hall, London, pp. 13 - 20.
- Rosenbaum, J.F. 1988. Bulk Acoustic Wave. Artech House, Boston, pp. 371 - 410.
- Shuyu, L. and H. Tian. 2008. Study on the sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in thickness vibration. Smart Mater. Struct., 17, 1 - 9.
- Simmonds, E.J., F. Armstrong and P.J. Copland. 1995. Species identification using wideband backscatter with neural network and discriminant analysis. ICES Int. Symp. on Fish. and Plank. Acoustics, Aberdeen, Scotland, 1 - 14.
- Stansfield D. 1991. Underwater Electroacoustic Transducers. Bath Univ. Press, Claverton Down, pp. 196 - 266.
- Tse, M. 2003. Impedance matching. Technical note for high - frequency circuit design elective, pp. 53.
- Wilson, O.B. 1991. Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers. Peninsula Publishing, California, pp. 11 - 108.
- Zakharia, M.E., F. Magand, F. Hetroit and N. Diner. 1995. Wide band sounder for fish species identification at sea. ICES Int. Symp. on Fish. and Plank. Acoustics, Aberdeen, Scotland, 1 - 9.

2010년 3월 8일 접수

2010년 4월 5일 1차 수정

2010년 4월 8일 수리