

어체 크기의 자동 식별을 위한 split beam 음향 변환기의 개발

이대재 · 신형일

부경대학교
(2001년 8월 1일 접수)

Development of a split beam transducer for measuring fish size distribution

Dae-Jae LEE and Hyeong-Il SHIN

Pukyong National University
(Received August 1, 2001)

Abstract

A split beam ultrasonic transducer operating at a frequency of 70 kHz to use in the fish sizing echo sounder was developed and the acoustic radiation characteristics were experimentally analyzed.

The amplitude shading method utilizing the properties of the Chebyshev polynomials was used to obtain side lobe levels below -20 dB and to optimize the relationship between main beam width and side lobe level of the transducer, and the amplitude shading coefficient to each of the elements was achieved by changing the amplitude contribution of elements with 4 weighting transformers embodied in the planar array transducer assembly.

The planar array split beam transducer assembly was composed of 36 piezoelectric ceramics (NEPEC N-21, Tokin) of rod type of 10 mm in diameter and 18.7 mm in length of 70 kHz arranged in the rectangular configuration, and the 4 electrical inputs were supplied to the beamformer.

A series of impedance measurements were conducted to check the uniformity of the individual quadrants, and also in the configurations of reception and transmission.

The developed split beam transducer was also excited by pulse signals around the resonant frequency, and the transmitting and receiving characteristics were measured in the water tank and analyzed, respectively.

The results obtained are summarized as follows :

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-1-22300-001)지원으로 수행되었음.

1. Average resonant and antiresonant frequencies of electrical impedance for four quadrants of the split beam transducer in water were 69.8 kHz and 83.0 kHz, respectively. Average electrical impedance for each individual transducer quadrant was 49.2Ω at resonant frequency and 704.7Ω at antiresonant frequency.
2. The resonance peak in the transmitting voltage response(TVR) for four quadrants of the split beam transducer was observed all at 70.0 kHz and the value of TVR was all about 165.5 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{V}$ at 1 m at 70.0 kHz with bandwidth of 10.0 kHz between -3 dB down points.

The resonance peak in the receiving sensitivity(SRT) for four combined quadrants (quad LU+LL, quad RU+RL, quad LU+RU, quad LL+RL) of the split beam transducer was observed all at 75.0 kHz and the value of SRT was all about -177.7 dB re 1 V/ μPa at 75.0 kHz with bandwidth of 10.0 kHz between -3 dB down points.

The sum beam transmitting voltage response and receiving sensitivity was 175.0 dB re 1 $\mu\text{Pa}/\text{V}$ at 1 m at 71.0 kHz with bandwidth of 14.0 kHz and -177.5 dB re 1 V/ μPa at 1 m at 75.0 kHz with bandwidth of 10.0 kHz, respectively

3. The sum beam of split beam transducer was approximately circular with a half beam angle of 9.0° at -3 dB points all in both axis of the horizontal plane and the vertical plane. The first measured side lobe levels for the sum beam of split beam transducer were -19.7 dB at 22° and -19.4 dB at -26° in the horizontal plane, respectively and -20.1 dB at 22° and -22.0 dB at -26° in the vertical plane, respectively.
4. The developed split beam transducer was tested to estimate the angular position of the target in the beam through split beam phase measurements, and the beam pattern loss for target strength corrections was measured and analyzed.

서 론

종래의 어군탐지기는 주로 해중에 분포하는 어업 생물의 소재 위치, 어군의 상대적인 크기 및 군집 밀도, 어군의 행동 습성 등을 탐지하기 위한 어업계측장비로서 널리 사용되어 왔다.

현재에는 어탐 기술이 비약적으로 발전함에 따라 대상 어업 생물의 개체수, 어류의 체장, 어업 자원량을 현장에서 직접 정량적으로 평가할 수 있는 계측 기법이 세계 여러 나라에서 개발되어 보급되고 있다.

특히, 최근 세계 각국에서는 TAC(Total Allowable Catch) 제도의 도입 및 효율적인 시행과 관련하여 어업자가 할당받은 어획량을 소진하는 과정에서 목적하는 체장보다 작은 소형의 어체가 어획되는 경우, 이들 어체를 바다에 그대로 폐기할 우려가 있다. 따라서, 이를 방지하기 위해

어업자가 어류의 체장을 현장에서 직접 평가할 수 있는 소위 체장어군탐지기(fish sizing echo sounder)의 개발에 대한 필요성이 대두되었다.

이와 같은 필요성을 인식하여 노르웨이(Simrad), 미국(HTI 및 Biosonics), 일본(Furuno)과 같은 세계 여러 나라에서는 이미 체장어군탐지기가 개발되어 보급되고 있지만, 가격이 비싸 우리나라에서는 아직 보급이 미흡한 실정이다. 그러나, 향후 TAC 제도의 체계적인 시행과 어업 자원의 효율적인 관리를 위해서는 저가형 체장어군탐지기의 개발이 필요하다. 우리나라에서는 이 시스템의 핵심 기술이 되는 송·수파기의 설계 기술^{1)~5)}이 아직 확립되지 않아 이에 대한 연구·개발이 절실히 요구된다.

일반적으로 어체의 체장 추정을 위한 split beam 음향 변환기를 설계할 때, 가장 먼저 고려해야 할 사항은 음향방사 지향성의 빔 폭(beam

width)과 부엽 준위(side lobe level)를 최소화시키는 문제이다^{8)~10)}. 이들 두 개의 문제는 서로 연관되어 있기 때문에 어느 한 쪽의 특성을 강화시키면 다른 쪽의 특성이 약화되는데, Dolph는 이 문제를 Chebyshev 다항식을 이용하여 빔 폭과 부엽 준위를 최적화하는 방법¹⁴⁾, 즉 Dolph-Chebyshev 배열 기법을 제안하였다.

본 연구에서는 체장어군탐지기의 송·수파기로서 사용하기 위한 split beam 음향 변환기를 Dolph-Chebyshev 배열 기법을 이용하여 실험적으로 설계·제작하고, 이 split beam 음향 변환기의 음향진동특성에 대해 분석·고찰하였다.

재료 및 방법

1. Split beam 음향 변환기의 설계 이론

1) Dolph-Chebyshev의 가중치 설계기법^{10),13)}
split beam 어군탐지기의 경우, 송신시에는 모든 평면배열 진동 소자를 구동하여 빔을 생성시키고, 수신시에는 네 개로 분할된 진동자 블록을 독립적으로 이용하여 반사 신호를 수신하므로 빔의 조향(beam steering)은 설계에 고려하지 않았다.

또한, 어류의 체장을 추정할 때, 부엽 준위가 높을수록 추정치의 정도가 저하하기 때문에 각 배열 소자에 인가할 진폭 가중치(amplitude shading)를 최적 설계하여 부엽 준위를 억제시키는 문제에 초점을 두고 연구를 수행하였다.

이를 위해 본 연구에서는 Dolph-Chebyshev 배열 기법을 이용하여 평면배열 split beam 음향 변환기의 빔 폭과 부엽 준위를 최적화하는 수치 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과를 토대로 송·수파기를 설계, 제작하였다.

수치 시뮬레이션에서 평면배열 소자의 진폭 가중치는 허용 부엽 준위와 변환 소자의 수를 토대로 먼저 선형 배열 내 각각의 변환 소자에 인가할 진폭 가중치를 구한 후, 이 가중치를 격자 형태로 곱하여 구하였다.

먼저, Fig. 1과 같이 XY 평면상에 직교 배열된 진동자 블록 가운데 d 간격으로 직선 배열된 $2N$ 및 $2N+1$ 개의 소자를 생각할 때, k 번째 소자의 진폭 가중치가 $A_k(k=1\sim N)$ 인 경우, 음향방사

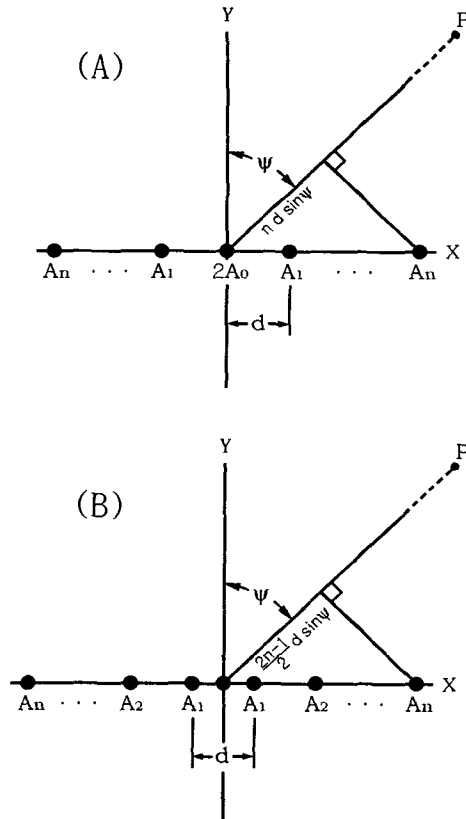


Fig.1. Nonuniform amplitude arrays of odd(A) and even number(B) of PZT elements.

패턴의 ψ 방향에 대한 정규화된 음압 P_{2N} 및 P_{2N+1} 은 각각

$$P_{2N} = \sum_{k=1}^N A_k \cos[(2k-1)u] = \sum_{k=1}^N A_k T_{2k-1}(x) \quad (1)$$

$$P_{2N+1} = \sum_{k=0}^N A_k \cos[2ku] = \sum_{k=0}^N A_k T_{2k}(x) \quad (2)$$

가 되고, 여기서, $u = \pi d \sin \psi / \lambda$ (λ : 방사 음파의 파장)이며, $T_k(x)$ 는 k 차의 Chebyshev 다항식으로서

$$T_k(x) = \cos ku, \quad x = \cos u \quad (3)$$

$$T_{k+1}(x) = 2x T_k(x) - T_{k-1}(x) \quad (n \geq 1) \quad (4)$$

가 된다.

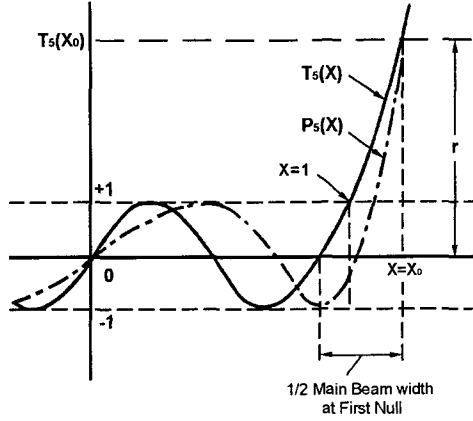


Fig. 2. Optimum pattern variation for a six element array⁹⁾.

Dolph-Chebyshev 다항식 $T_k(x)$ 의 값은 Fig. 2와 같이 $|x| < 1$ 구간에서는 ± 1 범위내에서 진동하고, $|x| < 1$ 영역에서는 $\pm \infty$ 에 수렴하기 때문에 방사 패턴에 대한 부엽은 $|x| < 1$ 범위에서 $x=1$ 에 가장 근접하면서 $|T_p(x_1)| = 1$ 의 조건을 만족하는 x_1 에 나타나도록 하고, 주엽은 $|x| > 1$ 영역의 어떤 점 x_0 에서 나타나도록 설계하는 데, 이때 P 는 “배열 진동자의 수 - 1”이다.

만일, 목적하는 음향 변환기의 방사패턴에 대한 부엽 준위를 γ 이라 하면,

$$\frac{\text{주엽높이}(|T_p(x_0)|)}{\text{부엽높이}(|T_p(x_1)|)} = r > 1 \quad (5)$$

의 조건, 즉, $|T_p(x_0)| = r$ 을 만족하는 x_0 는

$$x_0 = \frac{1}{2} \left[(r + \sqrt{r^2 - 1})^{1/P} + \left(\frac{1}{r + \sqrt{r^2 - 1}} \right)^{1/P} \right] \quad (6)$$

에 의해 구할 수 있다.

따라서, (6)식에 의해 구한 x_0 를 이용하여

$$P_{2N+1} = T_{2N}(x_0 x) \quad (7)$$

$$P_{2N} = T_{2N-1}(x_0 x) \quad (8)$$

의 다항식을 전개하고, x 에 관한 각각의 계수를 비교하면 목적하는 부엽 준위에 대한 최적의 진폭 가중치 A_k 를 구할 수 있다.

2) 평면배열 음향 변환기의 가중치 설계⁸⁾

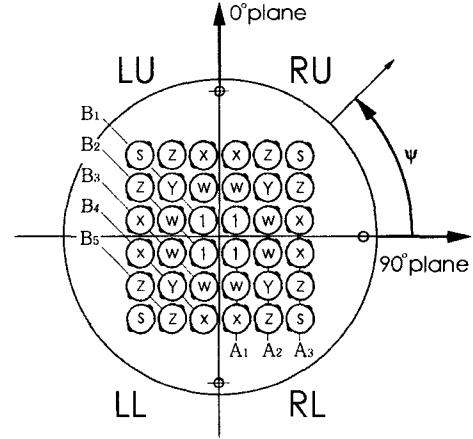


Fig. 3. Notation for the amplitude weighting distribution in the array geometry of 6x6 PZT elements and coordinate system.

Fig. 3은 본 연구에서 split beam 음향 변환기의 설계에 도입한 평면배열의 형상인데, 초음파 진동소자의 배열은 6x6 배열이다. 보통 음향 변환기의 축엽레벨을 억제하기 위해 Fig. 3의 네 모서리에 위치하는 소자를 각각 한 개씩을 제거한 총 32개의 진동소자로서 평면배열을 구성하는 방법이 널리 이용되고 있다. 그러나, 본 연구에서는 수신시에 대한 선수미 및 정형 진동자 블록에 대한 각각의 음향학적 중심 사이의 간격을 적절하게 유지시켜야만 음축에 대한 물표의 위치각을 정확하게 검출할 수 있다.

따라서, 먼저 6x6 배열의 네 모서리에 위치하는 소자를 각각 한 개씩을 제거한 총 32개의 진동소자에 대한 진폭 가중치를 산출한 후, 그 다음 각각의 진동자 블록 중심 부근에 음향학적 위치하도록 네 모서리의 진동 소자에 대한 진폭 가중치를 추가적으로 부가시키는 방법을 이용하였다.

우선, 네 개의 진동자 블록으로 분할된 음향 변환기의 각각의 블록을 구성하는 소자에 부여할 1, W, X, Y, Z의 서로 다른 가중치를 산출하였는데, 음향 변환기의 2차원 평면배열에 대한 진폭 가중치는 $\psi = 0^\circ$ 및 $\psi = 45^\circ$ 방향에 대한 선배열 가중치를 확장 적용하여 산출하였다. 즉, $\psi = 0^\circ$ 방향에 대한 가중치는 각각

$$(W+Z), (W+Y+Z), (1+W+X),$$

$$(1+W+X), (W+Y+Z), (W+Z)$$

인 6 개의 소자가 간격 d 로 배열된 1 차원 배열로 근사되고, $\psi = 45^\circ$ 에 대한 가중치는 각각

$$(2Z), (2X+Y), (2W+2X), (1+2W+Z), (2+2Y),$$

$$(1+2W+2Z), (2W+2X), (2X+Y), (2Z)$$

인 9 개의 소자가 $d/\sqrt{2}$ 의 간격으로서 배열된 1 차원 배열로 근사된다.

또한, Dolph-Chebyshev 다중 기법에 의해 구한 $\psi = 0^\circ$ 및 $\psi = 45^\circ$ 방향의 선배열 방사패턴에 있어서의 부엽 준위 γ 에 대한 진폭 가중치를

$$\psi = 0^\circ : a_2, a_1, 1, 1, a_1, a_2$$

$$\psi = 45^\circ : b_4, b_3, b_2, b_1, 1, b_1, b_2, b_3, b_4$$

이라 할 때, 이들 1 차원화된 평면배열 가중치와 선배열 가중치와의 사이에는

$$C = A^{-1} \cdot B$$

$$C = \begin{bmatrix} W \\ X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1-a_1 & -a_1 & 1 & 1 \\ -a_2 & 1-a_2 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & -2b_1 & 2 \\ 2 & 2 & -2b_2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 2b_1-1 \\ 2b_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

가 성립한다.

본 연구에서는 첫 번째 부엽의 목표 레벨 L_s 를 $L_s = 20 \log \gamma = -22.5 \text{ dB}$ (γ : 전압비)로 설정하여 음향 변환기를 설계하였다.

따라서, 이 부엽 준위를 이용하여 $\psi = 0^\circ$ 방향에 대한 6 개의 선배열 진동자의 진폭 가중치는 주엽이 나타나는 점 x_0 가 $|T_b(x_0)| = \gamma$ 에 의해 $x_0 = 1.2233$ 이 되므로, (8)식에 의해 $a_1 = 0.7509, a_2 = 0.4527$ 이 된다.

한편, $\psi = 45^\circ$ 방향에 대한 9 개의 선배열 진동자의 진폭 가중치는 $|T_b(x_0)| = \gamma$ 에 의해 $x_0 = 1.0853$ 이고, (7)식에서 $b_1 = 0.9433, b_2 = 0.7876, b_3 = 0.5717, b_4 = 0.4730$ 이 된다. split beam 변환기의 평면 배열의 각 진동 소자에 인가해야 할 상대적인 진폭 가중치는 이 값을 (9)식에 대입하여 구하였다.

그러나, 이 가중치를 그대로 이용하는 경우, 송신 모드에 있어서는 전기 에너지가 음향 변환기 중심축 방향에만 집중되어 부엽 레벨은 억제되나 송파출력이 저하되는 문제가 발생하고, 또한, 수신 모드에 있어서는 네 개의 분할된 진동자 블록의 수파면 중심 근처에 음향학적 중심이 위치하지 않는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 먼저 Dolph-Chebyshev 배열기법의 진폭 가중치에 의한 지향성 패턴을 그대로 유지하면서 진폭 가중치의 부여에 기인하는 출력 손실 및 음향 중심의 이탈을 최소화시키기 위한 최적의 진폭 가중치를 도출하였다^{6~7)}.

특히, 이 진폭 가중치는 평면배열의 네 모서리에 대한 소자의 가중치를 고려하지 않은 초기 설계치이다. 여기서는 수신 모드에 대한 음향학적 중심의 변화에 가장 큰 영향을 미치는 네 모서리의 가중치를 적절하게 부여하는 것에 의해 최종적으로는 split beam 변환기의 제 1 부엽의 레벨을 -20.0 dB 로서 유지하도록 설계하였다.

2. Transformer에 의한 가중회로 설계

본 연구에서 시험 제작한 평면배열 split beam 음향 변환기의 진폭 가중치에 상당하는 전압은 transformer를 이용하여 각 진동 소자에 인가하였다.

음향 변환기의 송파출력(source level), 구동 주파수, 크기 및 음향변환효율이 주어지면 소요 구동전력이 결정되고, 변환기의 전기 입력단에 대한 입력 임피던스 Z_i 를 설계 목적에 부합되도록 선정하면 전기 입력 전압 V_1 을 구할 수 있다.

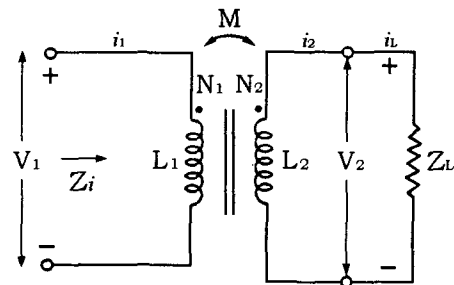


Fig. 4. Equivalent circuit of the ideal weighting transformer.

따라서, Fig. 4와 같이 ideal transformer가 음향 변환기에 접속되어 있는 경우를 가정하여 Dolph-Chebyshev 가중 기법에 의해 구한 진폭가중치를 토대로 transformer의 양측에 대한 전력비를 산출하여 최적의 권선비 n 은

$$n = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \frac{M}{L_1} = \sqrt{\frac{Z_L}{Z_i}} \quad (10)$$

에 의해 구하여 가중 회로를 설계하였다. 여기서, M 은 상호 인덕턴스, $L_1, L_2, V_1, V_2, N_1, N_2$ 는 각 1 차 및 2 차측 코일의 자기 인덕턴스, 전압 권선수이고, Z_L 은 부하 임피던스이다.

3. 음향 변환기의 제작

본 연구에서 제작, 개발한 split beam 음향 변환기는 6×6 의 평면배열 진동자이고, 그 작동 주파수는 70 kHz 이다. 이 변환기에 사용한 진동 소자는 직경 10 mm , 높이 18.7 mm , 공진주파수가 70 kHz 인 원주형의 압전소자(NEPEC NPM N-21, TOKIN)이다.

이 압전소자는 현재 소너 송수파기의 설계에 널리 사용되는 기계적인 품질계수(mechanical quality factor)가 75, 전기기계결합계수(K_3 0.38, 비유전율($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$)이 1800인 광대역의 감도의 압전 세라믹이다.

이 평면배열 음향 변환기의 음향 방사면은 폴리우레탄(flexane 94 liquid)을 접착·성형하여 성하였고, 실험수조에서 수밀 시험을 거친 후 모든 특성을 분석하였다.

4. 음향진동특성 측정

본 연구에서 시험 제작한 평면배열 음향 변환기는 공기중 및 수중에 있어서의 전기적인 임피던스를 정밀 LCR meter(QuadTech, 7600)를 이용하여 측정하고, 그 결과를 플롯터(Roland, DXY-1300)에 출력하였다.

평면배열 음향 변환기의 송파전압감도(transmitting voltage response, TVR), 수파감도(receiving sensitivity, SRT), 지향 특성, 송수신 응답특성은 Fig. 5의 실험장치를 이용하여 콘

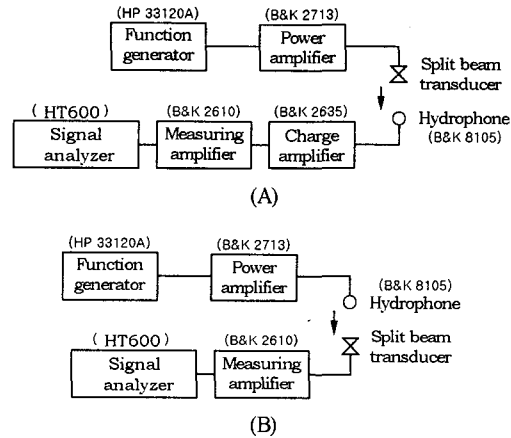


Fig. 5. Block diagrams for measuring the transmitting voltage response(A) and receiving sensitivity(B) of the split beam transducer.

크리트 실험수조($L5 \times B6 \times D5 \text{ m}$)에서 측정하였고, Fig. 5의 (A)와 (B)는 각각 송파전압감도 및 수파감도의 측정에 사용한 장치의 계통도이다.

Fig. 5의 (A)에서 임의파형발생기(HP, 33120A)를 사용하여 발생시킨 $60 \sim 90 \text{ kHz}$ 의 송신펄스신호는 전력증폭기(B&K, 2713)와 피측정 음향 변환기를 통해 수중에 방사되었고, 그 방사된 음향 신호는 hydrophone (B&K, 8105)을 사용하여 수파하였다. 이 때, 송파전압감도는 hydrophone으로 수신한 신호를 charge amplifier(B&K, 2635)와 measuring amplifier (B&K, 2610)를 거쳐 증폭한 후, 파형해석장치(HT-600, HI-Tech)를 사용하여 측정된 전압과 hydrophone의 수파감도로부터 산출하였다.

한편, 피측정 음향 변환기의 수파감도는 송파전압감도의 측정과 반대로 hydrophone을 통하여 송신하고 피측정 음향 변환기로 수신하여 구하였다. 지향 특성은 피측정 음향 변환기를 회전시키면서 송파전압감도를 측정할 때와 같은 방식으로 측정하여 구하였다.

또한, split beam transducer의 4 개의 독립적인 진동자 블록에 대한 균질성(uniformity)을 고찰하기 위해 음축으로부터 $\pm 20^\circ$ 방향에 위치한 hydrophone에서 방사되는 송파펄스신호를

각 진동자 블록을 통해 수신하고, 그 수신신호를 분석, 검토하였다.

5. 위치각 검출과 지향성 보정

Fig. 6과 같이 어류가 split beam transducer의 음속축(beam axis)에 대하여 각도 θ_L 만큼 벗어난 방향에 위치하고 있을 때, 선수미 방향(alongship, 0° plane)에 대한 어류의 방향각 θ_1 은 선수미 방향 분할 진동자군에 각각 수신되는 echo 신호의 전기적인 위상차를 $\Delta\theta_e$, 수중음속을 C , 송파펄스신호의 주파수 f 에 대한 수중파장을 $\lambda C = \lambda f$, $\omega = 2\pi f$, 분할 진동자군 사이의 음향학적인 중심거리를 d 라 하면,

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta\theta_e \cdot C}{\omega \cdot d} \right)$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, 만일 $\left(\frac{\Delta\theta_e \cdot C}{\omega \cdot d} \right)$ 의 값이 미소하다면

$$\theta_1 \approx \frac{\Delta\theta_e \cdot C}{\omega \cdot d} = \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \right) \cdot \Delta\theta_e$$

이 된다.

또한, 정횡방향(athwartship, 90° plane)에 대한 분할 진동자군에 각각 수신되는 echo 신호

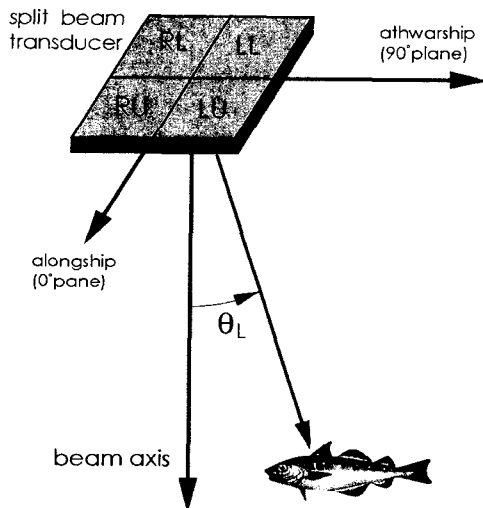


Fig. 6. Configuration of a split beam transducer divided into four quadrants LU~RL.

따라서, 이렇게 측정된 선수미 및 정횡 방향에 대한 어류의 방향각을 각각 θ_1, θ_2 라 하면, 음속축에 대한 어류의 합성적인 방향각, 즉, 위치각 θ_L 는

$$\theta_L = \sin^{-1} [\sqrt{(\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2)}]$$

에 의해 구할 수 있다.

split beam transducer의 음속축에 대한 어류의 위치각 θ_L 이 검출되면, 어류의 반사 강도(target strength, TS)는

$$TS = EL - (SL + VR + SG) - B_\theta$$

에 의해 구할 수 있다. 여기서, EL 은 어탐시스템의 $40 \log(R)$ TVG 증폭기에서 출력되는 echo level, SL 은 송파기의 송파감도, VR 은 수파기의 수파감도, SG 는 어탐시스템의 수신이득, B_θ 는 어류의 위치각에 대한 지향성 보정치로서, $B_\theta = 10 \log[b^2(\theta)]$ 이며, $b(\theta)$ 는 split beam transducer의 평균 지향성 함수이다.

따라서, split beam transducer의 음속축에 대한 어류의 위치각 θ_L 를 검출하고, 그 위치각에 대한 지향성 이득을 보정하면, 어류의 반사강도 TS를 구할 수 있다.

여기서는 본 연구에서 설계, 개발한 split beam transducer에 의한 위상 검출 실험과 이 진동자에 대한 지향성 보정함수를 유도하고, 이들의 결과를 사용하여 물표의 위치각에 대한 지향성 보정치를 구하였다.

결과 및 고찰

1. 음향방사특성

본 연구에서 설계, 제작한 평면배열 split beam 음향 변환기의 공기중에 대한 전기적인 임피던스의 측정 결과는 Fig. 7~Fig. 9와 같다.

Fig. 7은 Fig. 3에서 36 개의 진동 소자로서 구성된 평면배열 음향 변환기의 4 개의 분할된 진동자 블록 LL, LU, RU, RL에 대한 공기중에서의 전기적인 임피던스로서 좌측은 임피던스 진폭(ohm)이고, 우측은 임피던스 위상(deg.)이다.

Fig. 7에서 LL, LU, RU, RL 진동자 블록의 기중에 대한 공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위

상각은 각각 70.19 kHz, 70.19 kHz, 70.34 kHz, 70.19 kHz와 51.26Ω, 50.57Ω, 48.63Ω, 52.87Ω 및 -14.72°, -14.49°, -14.38°, -17.05° 이었다.

또한, 반공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 85.53 kHz, 85.01 kHz, 85.18 kHz, 85.88 kHz 와 768.9Ω, 794.29Ω, 790.11Ω, 5861.23Ω과 -27.37°, -24.55°, -25.65°, -25.41° 이었다.

Fig. 8은 split beam 음향 변환기의 LL+LU, RL+RU, LU+RU, LL+RL 진동자 블록에 대한 공기중에서의 전기적인 임피던스로서 좌측은 임피던스 진폭(ohm)이고, 우측은 임피던스 위상(deg.)이다.

Fig. 8에서 LL+LU, RL+RU, LU+RU, LL+RL 진동자 블록의 공기중에 대한 공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 70.62 kHz, 71.34 kHz, 71.34 kHz, 71.20 kHz와 28.73Ω, 27.87Ω, 27.41Ω, 28.41Ω 및 -30.42°, -16.53°, -15.41°, -15.16° 이었다. 또한, 반공진주파수, 임피던스의진폭 및 위상각은 각각 84.84 kHz, 85.53 kHz, 85.01 kHz, 86.23 kHz와 389.59Ω, 420.04Ω, 399.23Ω, 423.27Ω과 -23.19°,

-30.01°, -30.88°, -35.34° 이었다.

Fig. 9는 split beam 음향 변환기의 전체 블록 (RU+RL+LU+LL)에 대한 공기중에서의 전기적 인입임피던스로서, 상부는 임피던스 진폭(ohm)이고, 하부는 임피던스 위상의 측정치(deg.)이다.

Fig. 9에서 평면배열 음향 변환기의 공기중에 대한 공진 특성을 살펴볼 때, 공진 및 반공진 주파수의 측정치는 각각 71.93 kHz, 85.18 kHz이었고, 임피던스의 진폭 및 위상각은 공진과 반공진 주파수에서 각각 15.38Ω, 203.52Ω 및 -21.18°, -30.19° 이었다. 또한 공진과 반공진 주파수의 폭은 13.28 kHz이었다.

Fig. 7~Fig. 8에서 각 진동자 블록에 대한 공기중에 있어서의 공진 특성을 살펴볼 때, 모든 블록에 대한 공진 및 반공진 주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 거의 일치하였다.

한편, split beam 음향 변환기의 수중에 대한 전기적인 임피던스의 측정 결과는 Fig. 10~Fig. 12와 같다.

Fig. 10은 split beam 음향 변환기의 4 개의 진동자 블록 LL, LU, RU, RL에 대한 수중에서의

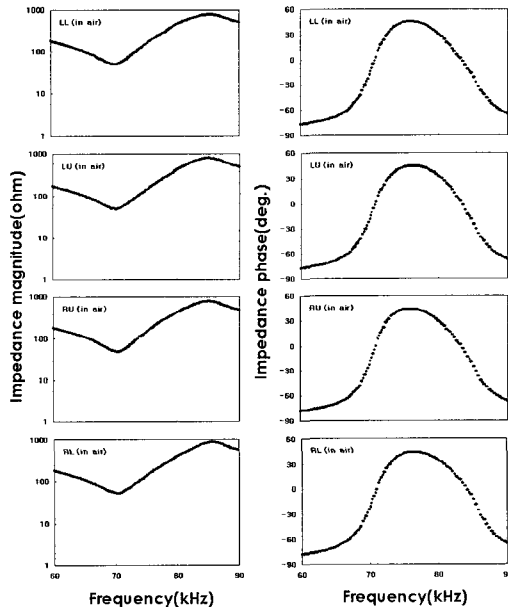


Fig. 7. Comparison of measured impedance magnitude(left) and phase(right) for four individual quadrants of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in air.

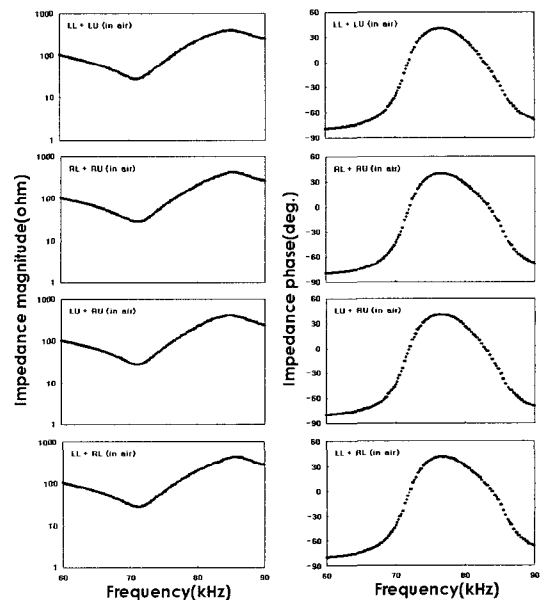


Fig. 8. Comparison of measured impedance magnitude(left) and phase(right) for four receiving channels of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in air.

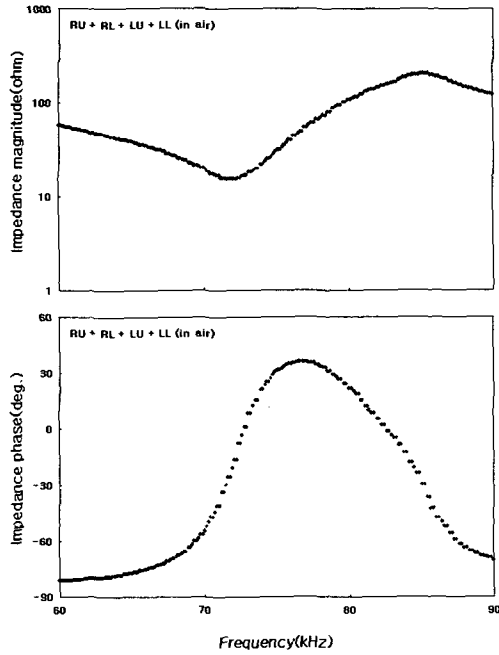


Fig. 9. Measured impedance magnitude (upper) and phase(lower) for all four quadrants (sum beam mode) of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in air.

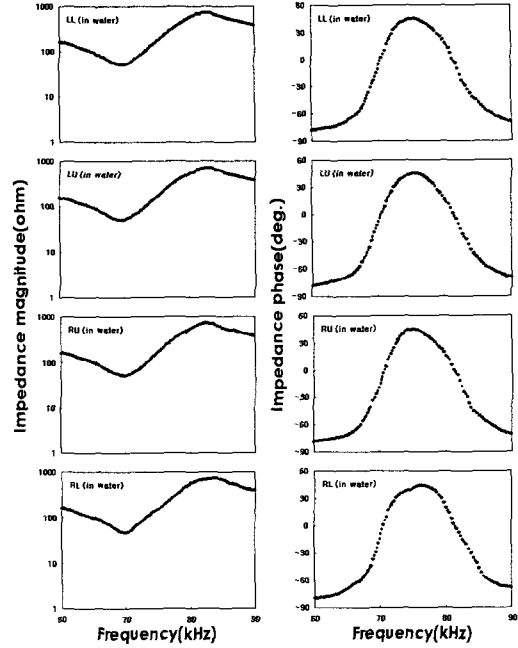


Fig. 10. Comparison of measured impedance magnitude(left) and phase(right) for four individual quadrants of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in water.

전기적인 임피던스로서 좌측은 임피던스 진폭(ohm)이고, 우측은 임피던스 위상(deg.)이다.

Fig. 10에서 LL, LU, RU, RL 진동자 블록의 수중에 대한 공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 69.91 kHz, 69.48 kHz, 69.91 kHz, 69.91 kHz와 50.02Ω, 49.49Ω, 50.70Ω, 46.63Ω 및 -15.32°, -20.52°, -19.05°, -19.10° 이었다. 또한, 반공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 82.45 kHz, 82.96 kHz, 82.79 kHz, 83.98 kHz와 704.82Ω, 687.02Ω, 709.12Ω, 717.81Ω 과 -17.13°, -24.75°, -23.79°, -30.32° 이었다.

Fig. 11은 split beam 음향 변환기의 LL+LU, RL+RU, LU+RU, LL+RL 진동자 블록에 대한 수중에서의 전기적인 임피던스로서 좌측은 임피던스 진폭(ohm)이고, 우측은 임피던스 위상(deg.)이다.

Fig. 11에서 LL+LU, RL+RU, LU+RU, LL+RL 진동자 블록의 공기중에 대한 공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 70.48 kHz,

70.91 kHz, 71.35 kHz, 70.77 kHz와 28.13Ω, 27.04Ω, 27.64Ω, 26.96Ω 및 -21.96°, -17.21°, -16.11°, -18.57° 이었다. 또한, 반공진주파수, 임피던스의 진폭 및 위상각은 각각 82.28 kHz, 82.29 kHz, 82.12 kHz, 83.81 kHz와 354.43Ω, 349.26Ω, 367.84Ω, 359.02Ω 과 -21.77°, -30.33°, -19.21°, -33.25° 이었다.

Fig. 12는 split beam 음향 변환기의 전체의 블록(RU+RL+LU+LL)에 대한 수중에서의 전기적인 임피던스로서, 상부는 임피던스 진폭(ohm)이고, 하부는 임피던스 위상의 측정치(deg.)이다.

Fig. 12에서 평면배열 음향 변환기의 수중에 대한 공진 특성을 살펴볼 때, 공진 및 반공진 주파수의 측정치는 각각 71.35 kHz, 82.12 kHz이었고, 임피던스의 진폭 및 위상각은 공진과 반공진 주파수에서 15.21Ω, 173.86Ω 및 -23.92°, -19.45° 이었다. 또한, 공진과 반공진 주파수의 폭은 10.77 kHz이었다.

Fig. 10~Fig. 11에서 모든 진동자 블록에 대한 공진 및 반공진 주파수, 임피던스의 진폭 및 위상

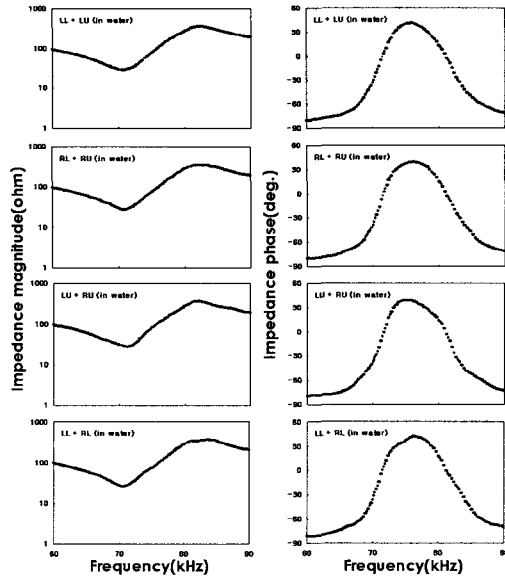


Fig. 11. Comparison of measured impedance magnitude(left) and phase(right) for four receiving channels of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in water.

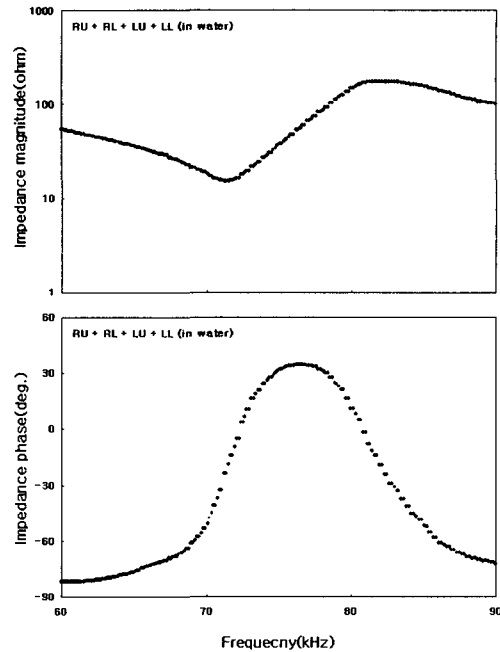


Fig. 12. Measured impedance magnitude(upper) and phase(lower) for all four quadrants (sum beam mode) of the split beam transducer with 6×6 PZT elements in water.

각은 거의 일치하였고, 이 결과로부터 각 진동자 블록의 수중에서의 음향진동특성에는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

split beam 어군탐지기의 경우, 송신은 4 분할된 평면배열 음향 변환기의 모든 진동자 블록을 사용하여 음향을 방사하고, 수신은 4 분할 진동자의 각각의 블록을 독립적으로 사용하여 행하기 때문에 각각의 진동자 블록의 음향특성이 서로 같아야 하는데, 본 연구에서 개발한 split beam 음향 변환기는 이 특성을 만족하고 있다고 판단된다.

2. 송파전압감도 및 수파감도

split beam 음향 변환기의 4 개의 진동자 블록 LL, LU, RU, RL에 대한 송파전압감도를 측정한 결과는 Fig. 13과 같다

Fig. 13에서 종축은 송파전압감도($dB \text{ re } 1 \mu Pa/V \text{ at } 1 m$)이고 횡축은 측정 주파수(kHz)이다.

Fig. 13에서 4 개의 분할된 LL, LU, RU, RL 진동자 블록의 각각에 대한 최대의 송파전압감도는 모두 70.0 kHz 에서 나타났고, 그 값은 각각의 진

동자 블록에 대하여 165.43 dB , 165.90 dB , 16 dB , 165.22 dB 로서 거의 같았다.

또한, 송파전압감도에 대한 -3 dB 점의 주파수 대역폭은 4 개의 진동자 블록 각각에 있어 모두 10.0 kHz 로서 일치하였다.

한편, split beam 음향 변환기의 4 개의 조합된 동자 블록 LU+LL, RU+RL, LU+RU, LL+RL 수파전압감도를 측정한 결과는 Fig. 14와 같다.

Fig. 14에서 종축은 수파전압감도($dB \text{ re } 1 V/\mu Pa$)이고, 횡축은 측정 주파수(kHz)이다.

Fig. 14에서 4 개의 조합된 LU+LL, RU+RL, LU+RU, LL+RL 진동자 블록의 각각에 대한 최대의 수파전압감도는 모두 75.0 kHz 에서 나타났고, 그 값은 각각의 진동자 블록에 대하여 -177.29 dB , -178.29 dB , -177.07 dB , -178.02 dB 로서 거의 유사하였다. 또한, 수파전압감도에 대한 -3 dB 점의 주파수 대역폭은 4 개의 진동자 블록 각각에 있어 모두 10.0 kHz 로서 같았다.

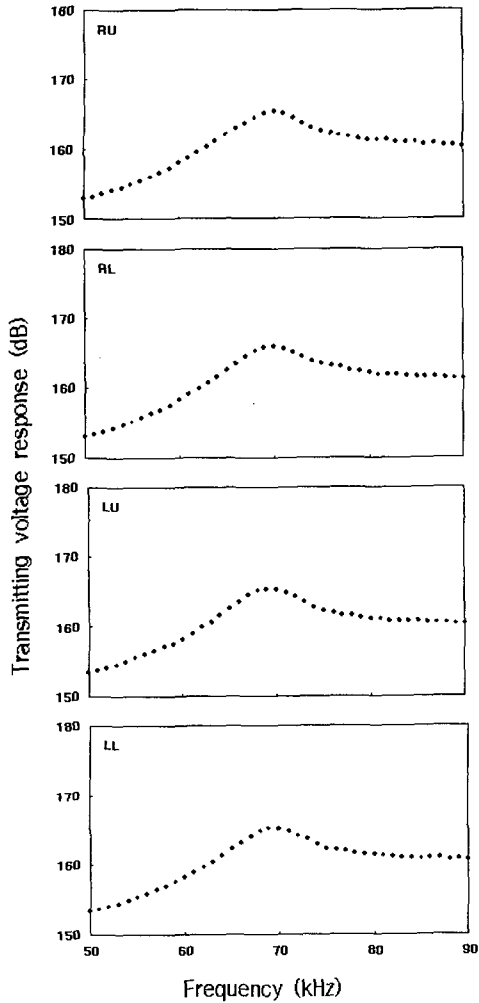


Fig. 13. Comparison of measured transmitting voltage response for four individual quadrants of the split beam transducer.

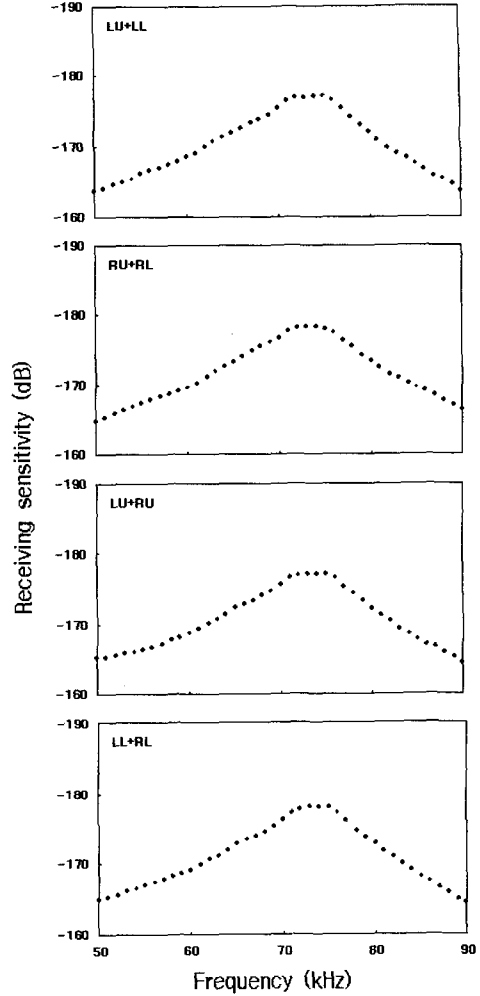


Fig. 14. Comparison of measured receiving sensitivity for four channels of the split beam transducer.

본 연구에서 설계, 개발한 평면배열 split beam 음향 변환기의 수중에 대한 음향 방사 특성을 조사하기 위해 모든 진동자 블록(LL+LU+RU+RL)에 대한 송파전압감도 및 수파전압감도를 측정된 결과는 Fig. 15와 같다

평면배열 split beam 음향 변환기의 최대 송파전압감도는 공진주파수 부근인 71.0 kHz에서 174.98 dB이었고, -3 dB점에 대한 송파 감도의 주파수 대역폭은 14.0 kHz이었다. 또한, 음향 변환기의 최대 수파감도는 75.0 kHz에서 -177.47dB이었고, -3 dB점에 대한 수파감도의 주파수 대역폭은

10.0 kHz이었다.

3. 지향특성

본 연구에서 개발한 평면배열 split beam 음향 변환기의 수중에 대한 입체적인 지향특성 및 等指向性 레벨선도의 수치계산결과는 Fig. 16과 같고, 또한, 수평(정횡방향, athwartship) 및 수직(선수방향, alongship) 방향에 대한 송파지향특성의 측정 결과는 Fig. 17과 같다.

그림 16에서 수치계산에 의해 구한 -3 dB점의 수평 및 수직방향에 대한 빔폭은 모두 15.2°이었

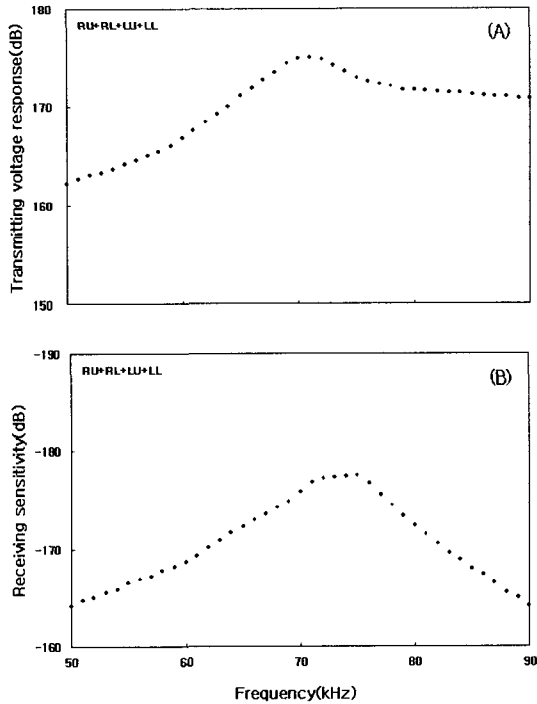


Fig. 15. Measured transmitting volatge response(A) and receiving sensitivity(B) for all four quadrants(sum beam mode) of the split beam transducer.

고, 수평 및 수직 방향에 있어 제 1, 제 2, 제 3측엽 레벨은 각각 -20.0 dB , -23.1 dB , -26.9 dB 이었다. 또한, 等指向性 레벨은 거의 원형에 가까운 형태를 나타내었다.

Fig. 17에서 종축과 횡축은 상대음압레벨(dB)이다. Fig. 17에서 평면배열 음향 변환기의 -3 dB 점에 대한 수평방향의 지향각은 18.0° 이었고 제 1의 부엽 준위는 22° 및 -26° 부근에서 각각 -19.7 dB , -19.4 dB 로서, split beam 음향변환기의 지향각 측정치는 계산치보다 2.8° 컷고, 제 1의 부엽 준위는 $0.3\text{ dB}\sim 0.6\text{ dB}$ 컷다. 또한, 수직방향의 지향각은 17.8° 이었고 제 1의 부엽 준위는 22° 및 -26° 부근에서 각각 -20.1 dB , -22.0 dB 로서, split beam 음향변환기의 지향각 측정치는 계산치보다 2.6° 컷고, 제 1의 부엽 준위는 $0.1\text{ dB}\sim 2.0\text{ dB}$ 작았다.

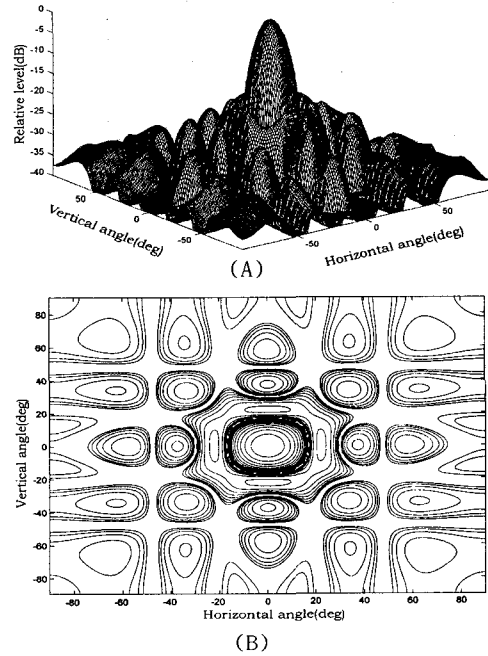


Fig. 16. Simulated sum beam pattern(A) and contour map(B) for four quadrants for the split beam transducer with 6×6 PZT elements.

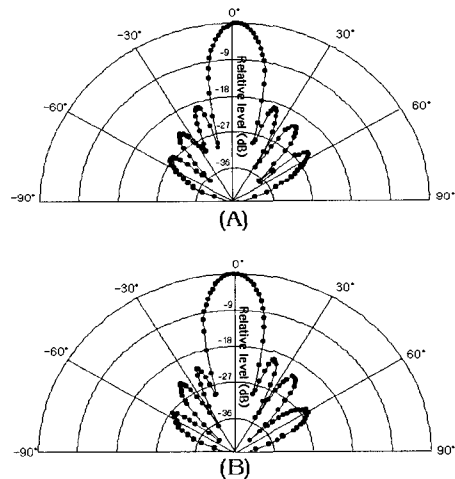


Fig. 17. Measured sum beam patterns in the horizontal plane(A) and in the vertical plane(B) of four quadrants for the split beam transducer with 6×6 PZT elements.

4. 송신 및 수신응답특성

본 연구에서 설계·개발한 split beam 음향 변환기의 송신시간응답특성은 Fig. 18과 같다.

Fig. 18은 공진점 부근의 58.0~86.0 kHz의 주파수 범위에 대하여 펄스폭 0.5 ms의 송신펄스신호를 임의과형발생기로부터 발생시켜 전력증폭기를 통해 피측정 split beam 음향 변환기에 인가하고, 음향변환기에서 방사되는 음향신호를 수중청음기를 통해 수록한 송신응답과형이다.

Fig. 18에서 종축은 송신펄스신호의 진폭(V)이고 횡축은 시간(ms)이다. Fig. 18에서 주파수가 58.0 kHz, 62.0 kHz, 66.0 kHz, 70.0 kHz, 74.0 kHz, 78.0 kHz, 82.0 kHz, 86.0 kHz일 때, 음향신호의 진폭은 0.12 V, 0.17 V, 0.33 V, 0.62 V, 0.52 V, 0.32 V, 0.30 V, 0.32 V 로서 송신 공진주파수인 70.0 kHz에서의 전압이 가장 높았고, 그 음향신호과형은 전기입력펄스과형과 거의 유사한 응답 특성을 나타내었다.

한편, 수중청음기를 통해 송파한 펄스신호를 본 연구에서 설계, 개발한 split beam 음향 변환기를 사용하여 수파한 수신응답과형은 Fig. 19와 같다.

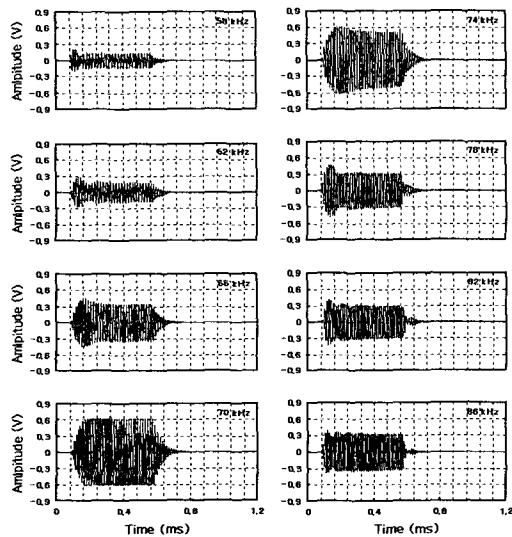


Fig. 18. Acoustic output signals transmitted for the eight selected frequencies around the resonance frequency of the split beam transducer.

Fig. 19에서 주파수가 58.0 kHz, 62.0 kHz, 66.0 kHz, 70.0 kHz, 74.0 kHz, 78.0 kHz, 82.0 kHz, 86.0 kHz일 때, 수신신호의 진폭은 0.16 V, 0.36 V, 0.54 V, 0.99 V, 1.40 V, 0.77 V, 0.36 V, 0.22 V로서 수신 공진주파수 부근인 74.0 kHz에서의 전압이 가장 높았고, 그 수신신호과형은 송신펄스과형과 거의 유사한 응답 특성을 나타내었다.

한편, 수중청음기를 통해 송파한 70 kHz의 펄스신호를 105 cm 떨어진 거리의 음축상에서 서로 마주보는 상태에서 split beam 음향 변환기의 LL, LU, RL, RU 진동자 블록을 통해 각각 수파한 수신응답과형은 Fig. 20과 같다.

Fig. 20에서 LL, LU, RL, RU 진동자 블록을 통해 각각 수파한 수신펄스신호의 진폭은 0.95 V, 1.01 V, 1.03 V, 1.04 V로서 각 진동자 블록에 대한 수신전압은 거의 유사하였고, 또한, 그 수신신호과형도 거의 거의 유사한 응답 특성을 나타내어 네 개의 진동자 블록의 시간응답특성에 차이가 없음을 알수 있었다.

split beam 음향변환기의 LL, LU, RL, RU 진동자 블록의 수파면에 대한 음향학적 중심을 고찰하기 위해 split beam 음향변환기의 음축으로

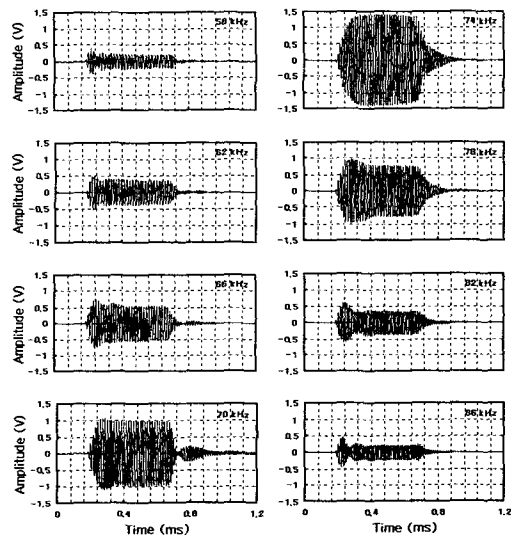


Fig. 19. Electrical output signals received for the selected eight frequencies around the resonance frequency of the split beam transducer.

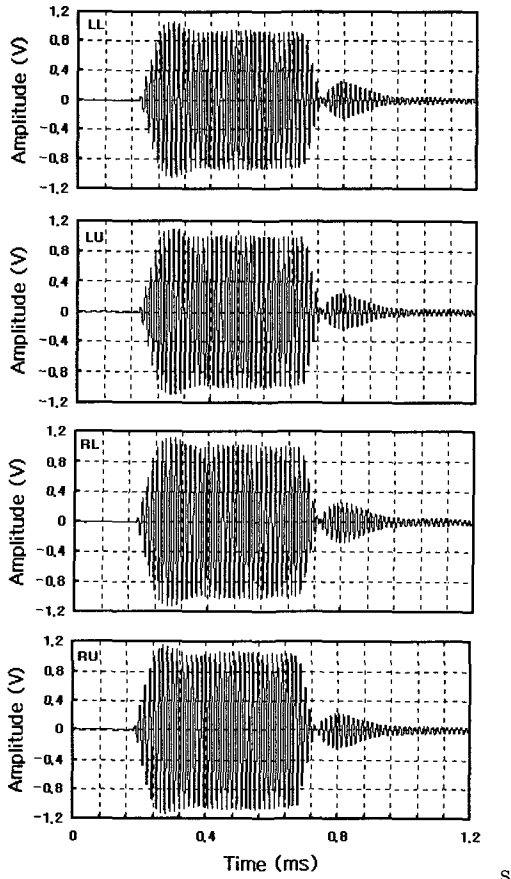


Fig. 20. Electrical signals received by four individual quadrants as a transmitting hydrophone located on the beam axis.

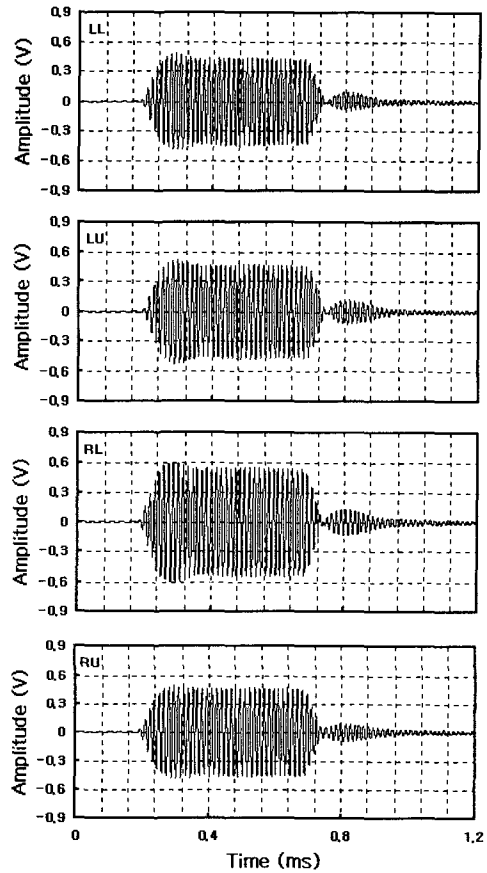


Fig. 21. Electrical signals received by four individual quadrants of the split beam transducer as a transmitting hydrophone located in the direction of -20° from the beam axis.

부터 $\pm 20^\circ$ 의 방향에 위치한 수중청음기에서 발사되는 70 kHz 의 펄스신호를 음향 변환기의 LL, LU, RL, RU 진동자 블록을 통해 각각 수파한 수신응답파형은 Fig. 21 및 Fig. 22와 같다.

Fig. 21은 음축의 우측 $+20^\circ$ 방향에서 발사된 펄스신호를 수파한 경우이고, Fig. 22는 음축의 좌측 -20° 방향에서 발사된 펄스신호를 수파한 경우이다. 이 때, 음향변환기는 좌측상부에는 LU 블록, 좌측하부에는 RU 블록, 우측상부에는 LL 블록, 우측하부에는 RL 블록이 위치하고 있는 상태이다.

Fig. 21에서 음축 우측 $+20^\circ$ 방향에서 송신되는 신호는 LL과 RL 블록에 먼저 수신되고, LU와 RU 블록에 늦게 수신되는 특성을 나타내며, 또한,

Fig. 22에서 음축 좌측 -20° 방향에서 송신되는 신호는 LU와 RU 블록에 먼저 수신되고, LL와 RL 블록에 늦게 수신되는 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 이들의 수신 시간차를 구하면 역으로 음파의 도래 방향을 추정할 수 있어 어류가 위치하는 방향(위치각)에 대한 지향성을 보정할 수 있게 된다.

5. 위치각 검출 및 지향성 보정

split beam 음향 변환기를 사용하여 어류의 반사강도를 측정할 때, 그 추정정도를 평가하기 위한 기초 연구로서, 먼저 실험수조에서 물표의

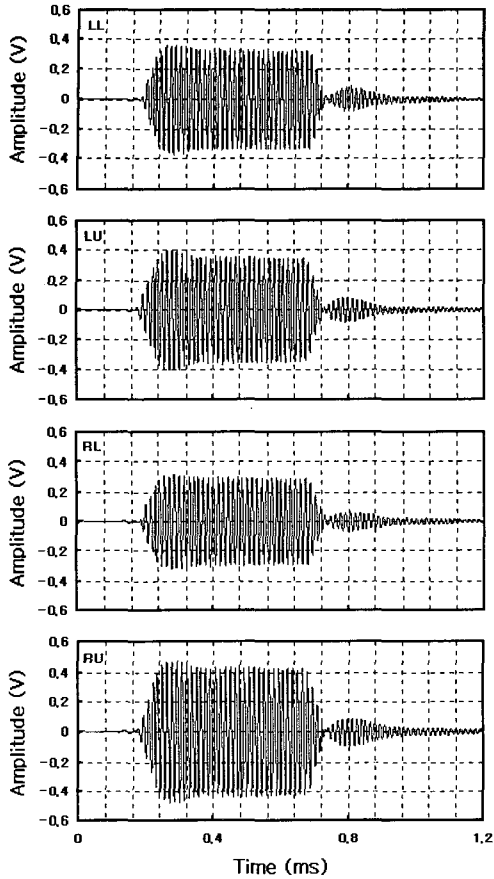


Fig. 22. Electrical signals received by four individual quadrants of the split beam transducer as a transmitting hydrophone located in the direction of -20° from the beam axis.

echo 신호를 측정 한 후, split beam 진동자의 선수미 방향 및 정횡 방향 진동자 블록에 대한 echo 신호를 분석하여 물표의 위상각을 검출한 일례는 Fig. 23과 같다.

Fig. 23의 (A)는 split beam transducer의 RU+LU+RL+LL 블록에 수신되는 합성 echo 신호를 $40 \log(r)$ TVG 증폭기를 통과시켜 증폭한 후, 포락선을 검파한 수중 물표의 echo 파형이다.

Fig. 23(B)는 실험수조에서 측정 한 물표 echo 신호의 $4.67 \sim 5.67 \text{ ms}$ 구간에 대한 zero crossing 신호를 대상으로 선수미 방향(0° plane)에 대한 RU+LU 블록과 RL+LL 블록에 수신되는 두 개의 echo 신호를 비교하여 위상차를

검출한 결과이고, Fig. 23(C)는 정횡 방향(90° plane)에 대한 RU+RL 블록과 LU+LL 블록에 수신되는 두 개의 echo 신호를 비교하여 위상차를 검출한 결과이다.

또한, Fig. 23의 (D)~(G)는 각각 split beam 진동자의 LU+LL 블록, RU+RL 블록, RU+LU 블록, RL+LL 블록에 수신되는 echo 신호를 zero crossing 검출회로에 입력시켜 얻은 zero crossing 펄스신호이다.

Fig. 23의 (B)와 (C)의 선수미와 정횡 방향의 진동자 블록에 수신되는 물표 echo 신호의 수신 시간차로부터 검출한 위상차를 이용하여 물표의 방향각을 산출할 때, 선수미 방향에 대해서는 5.08° , 정횡방향에 대해서는 3.17° 이었고, 음속측에 대한 물표의 합성적인 방향각, 즉, 위치각 θ_L 은 $\theta_L = 60^\circ$ 이었다.

한편, 본 연구에서 설계한 split beam transducer의 선수미 방향과 정횡 방향에 대한 지향성 보정패턴은 Fig. 24와 같다.

Fig. 24에서 (A)와 (B)는 각각 선수미 방향 및 정횡 방향에 대한 $\pm 15^\circ$ 범위에 대한 지향성 패턴이고, 이들 패턴으로부터 최소자승법에 의해 평균적인 지향성 곡선의 실험식을 어류의 방향각 (X)의 함수로서 구한 결과,

0° plane:

$$Y_V = -0.0002X^4 - 0.0002X^3 - 0.047X^2 - 0.0119X - 0.1167$$

90° plane :

$$Y_H = -0.0003X^4 + 0.0009X^3 - 0.0463X^2 + 0.0607X - 0.2736$$

이었다.

따라서, Fig. 23 및 Fig. 24에서 구한 물표의 선수미 및 정횡방향의 방향각과 평균적인 지향성 곡선식을 사용하면 음속에서 벗어난 물표의 방향각에 대한 지향성 보정치 ($b_\theta = -\sqrt{Y_V^2 + Y_H^2}$)를 구하면 -1.64 dB 이 된다.

현재, 세계적으로 보급되고 있는 split beam 방식 제장 어군탐지기는 앞서 구한 음속측에 대한 어류의 방향각을 검출하고, 그 방향각에 대한 지향성 이득을 보정하여 어류의 반사강도를 구하는 장치임을 주목할 때, 본 연구에서 개발한 split beam transducer 및 신호처리방법은 이 분야의 발전에 크게 기여할 것으로 판단된다.

어체 크기의 자동 식별을 위한 split beam 음향 변환기의 개발

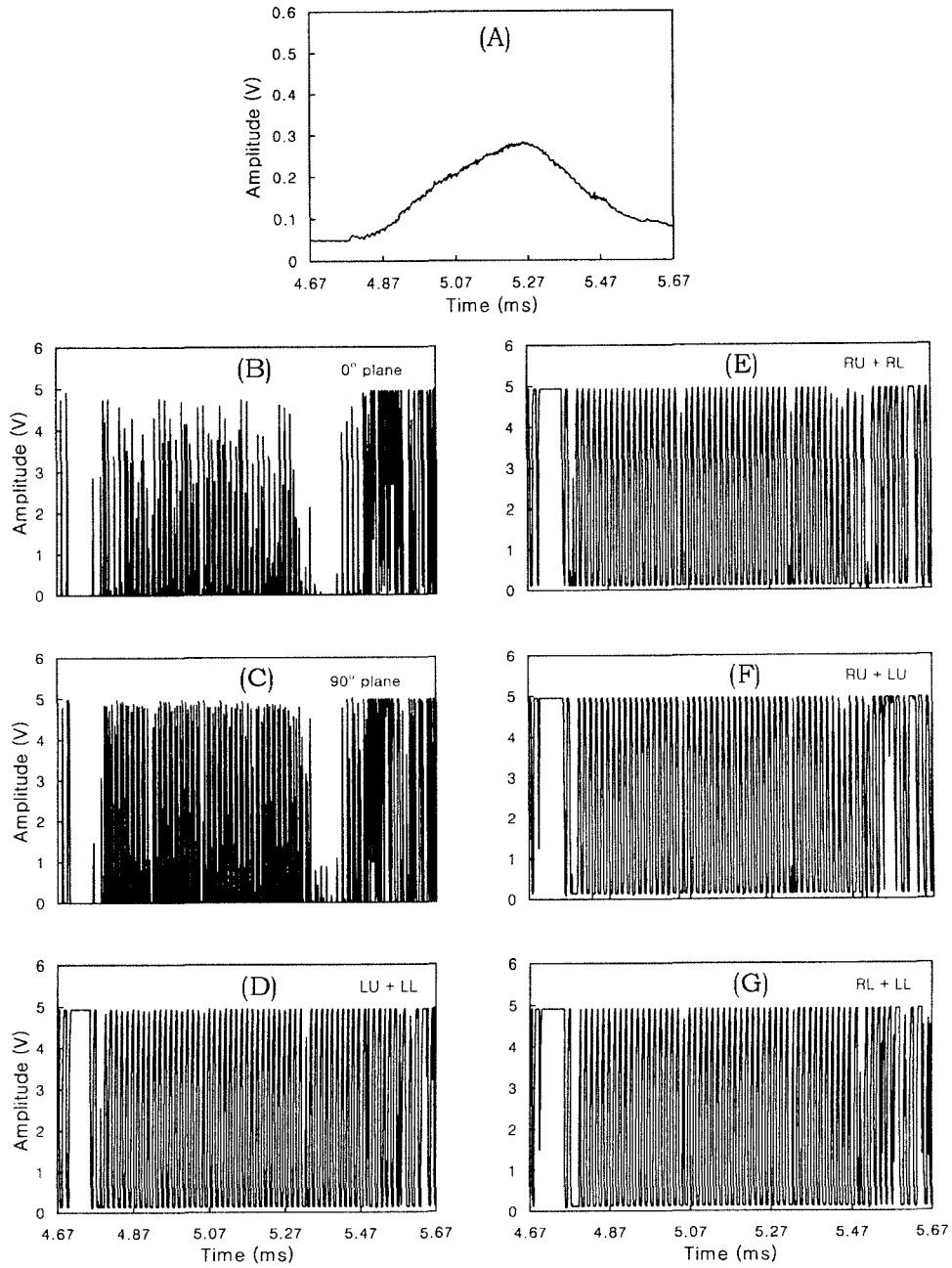


Fig. 23. (A) Echo envelope of sum beam, (B) Phase difference between RU+LU and RL+LL transducer quadrants in the 0° plane as a function of time, (C) Phase difference between RU+RL and LU+LL transducer quadrants in the 90° plane as a function of time, (D) ~ (G) Zero crossing signals derived from echo signals received by the LU+LL, RU+RL, RU+LU, RL+LL combined quadrants of the split beam transducer, respectively.

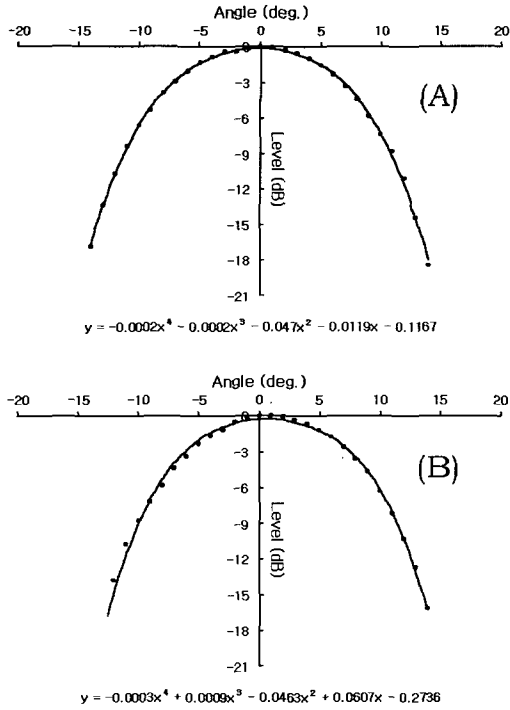


Fig. 24. Measured directivity patterns over the restricted range of -15° to $+15^{\circ}$ in the horizontal plane(A) and the vertical plane(B) of the 70 kHz split beam transducer developed in this study.

요 약

체장어군탐지기(fish sizing echo sounder)의 송·수파기로써 사용하기 위한 split beam 음향 변환기를 개발하기 위한 시도로서, Dolph-Chebyshev배열 기법을 이용하여 36 개의 압전 진동소자에 진폭 가중치를 부여한 평면배열 음향 변환기를 설계·제작하고, 이 변환기의 수중음향방사특성에 대해 분석·고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. split beam 음향 변환기의 4 개의 독립적인 진동자 블록에 대한 수중에서의 평균적인 공진 및 반공진 주파수는 각각 69.8 kHz, 83.0 kHz이었고, 이들 공진과 반공진 주파수에서의 임피던스는 49.2Ω, 704.7Ω이었다. 음향변환기의 4 개의 모든 진동자 블록

(sum beam)에 대한 수중에서의 공진 및 반공진 주파수는 각각 71.4 kHz, 82.1 kHz이었고, 이들 공진과 반공진 주파수에서의 임피던스는 15.2Ω, 173.9Ω이었다.

2. split beam 음향 변환기의 4 개의 독립적인 진동자 블록에 대한 최대 송파전압감도(TVR)는 공통적으로 70.0 kHz에서 165.5 dB이었고, -3 dB 점에 대한 송신 주파수 대역폭은 10.0 kHz이었다. 또한, split beam 음향 변환기의 4 개의 조합된 진동자 블록에 대한 최대 수파감도(SRT)는 공통적으로 75.0 kHz에서 -177.5 dB이었고, -3 dB 점에 대한 수신 주파수 대역폭은 10.0 kHz이었다.

3. split beam 음향 변환기의 모든 진동자 블록에 대한 송신 지향성패턴은 원형이었고, -3 dB점에 대한 수평 및 수직방향에 대한 반각각(half beam angle)은 공통적으로 9.0° 이었다. 또한, 수평방향에 대한 제 1차 부엽 준위는 22° 및 -26° 에서 각각 -19.7 dB, -19.4 dB이었고, 수직방향에 대한 제 1차 부엽 준위는 22° 및 -26°에서 각각 -20.1 dB, -22.0 dB로서 설계 목표치 -20 dB과 매우 유사한 값을 나타내었다.

4. split beam 음향 변환기의 송파응답파형과 수파응답파형은 각각 송신 및 수신 공진주파수 부근인 70.0 kHz와 75.0 kHz에서 전기 입력펄스파형과 가장 유사한 특성을 나타내었다.

5. 본 연구에서 설계, 개발한 split beam 음향 변환기의 성능을 분석하기 위해 반사강도 보정을 위한 지향성손실과 물표의 위치각을 추정하기 위한 실험을 행한 결과, 실험적으로 추정한 위치각은 실제적인 위치각과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

- 1) 이대재(1998): 어종 식별을 위한 광대역 초음 변환기의 설계-II. -단일음향정합층을 이용한 이중 공진형 초음파 변환기의 설계, 한국 어업기술학회지 34(1), 74-84.
- 2) 이대재(1998): 어종 식별을 위한 광대역 초음 변환기의 설계-III. -이중음향정합층을 이용한 초음

어체 크기의 자동 식별을 위한 split beam 음향 변환기의 개발

- 파 변환기의 대역폭 확장-, 한국어업기술학회지 34(1), 85-95.
- 3) 정봉규 · 이대재(1999): Taper형 초음파 진동자의 역폭 개선에 관한 연구, 한국어업기술학회지 35(3) 312-322.
- 4) 이대재 · 신형일(1999): Split beam 어군탐지기에 의한 어류의 유영행동 조사연구, 한국어업기술학회지 35(3), 301-311.
- 5) Macleannan, D. N. and Simmonds, E. J. (1992) : Fisheries Acoustics. Chapman & Hall, 57 - 58.
- 6) Foote, K.G.(1990): Designing an improved transducer array geometry, J. Cons. int. Explor. Mer, 46, 129-132.
- 7) 김용수(2000): MATLAB 입문과 활용, 높이와 깊이, 513-516.
- 8) 윤형규 · 김군칠 · 이정민(1993): 평면배열된 트랜스듀서의 빔형성을 위한 가중회로 설계 연구, ATRC-513-93084, 1-36.
- 9) Davis, N., Thurston, E.G. and Mueser, R.E.(1952) : The design of optimum directional acoustic arrays, J. Acoust. Soc. Am., Vol 24(1), 50-56.
- 10) Balanis, C.A.(1982): Antenna Theory -Analysis and Design-, John Wiley & Sons, Inc., New York, 294-324.
- 11) Urlick, R.J.(1983): Principles of underwater sound, McGraw - Hill Book Company, 62-68.
- 12) Albers, V.M.(1978): Underwater acoustics HandBook -II. The Pennsylvania State University Press, 180-205.
- 13) Wilson, G.L.(1975) : Computer optimization of transducer array patterns, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 59(1), 195-203.
- 14) Dolph, C.L.(1946): A current distribut broadside arrays which optimizes the relat between beam width and side-lobe level, Pr the I.R.E. Vol 34, 335-348.