

2층 구조 압전 트랜스듀서를 이용한 초음파 트랜스듀서 어레이의 지향 특성 가변

Directivity Characteristics Control of Ultrasonic Transducer Array Using Two-layered Piezoelectric Transducer

김 정 호*, 송 인 진*, 김 무 준**, 하 강 렬**, 김 천 덕***
(Jung-Ho Kim*, In-Jin Song*, Moo-Joon Kim**, Kang-Lyeol Ha**, Chun-Duck Kim***)

*부경대학교 음향진동공학협동과정, **부경대학교 물리학과, ***부경대학교 전기·제어계측공학부
(접수일자: 2003년 8월 11일; 수정일자: 2003년 10월 10일; 채택일자: 2003년 10월 27일)

의료용 초음파 진단 장치나 표적을 탐지하는 소나 등에 사용되는 초음파 트랜스듀서 어레이는 정도 높은 정보를 얻기 위해 목적에 맞는 지향특성이 요구되어진다. 본 연구에서는 사용 목적 따라 지향 특성을 가변할 수 있는 초음파 트랜스듀서 어레이를 제안하였다. 제안한 초음파 트랜스듀서 어레이는 전기적 용량으로 제 2차 모드의 효율을 제어할 수 있는 2층 구조 트랜스듀서를 이용하여 트랜스듀서 어레이의 빔 폭을 제어하였다. 이것을 시험 제작하여 이론 및 실험적으로 해석한 결과 주엽의 -3 dB 빔 폭을 7.6° ~ 16.2°의 범위에서 제어 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 2층 구조 압전 진동자, 트랜스듀서 어레이, 지향특성, 빔 폭, 진폭 가중치, 효율 제어
투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.1)

It will be very convenient if the directivity characteristics of ultrasonic transducer array are controllable by the purpose of use in the fields of sonar system or ultrasonic diagnostic system. In this paper, a control method of the directivity characteristics was suggested. The transducer array was consisted of two-layered piezoelectric vibrators. Efficiency of each vibrator is controlled in 2nd harmonic mode by electrical capacitance. Therefore, the beam width of the transducer array can be controlled by changing the capacitance. The directivity characteristics of the array were analyzed experimentally and theoretically. As the results, it is confirmed that -3 dB beam width of main lobe can be controlled in the range of 7.6° ~ 16.2°.

Keywords: Two-layered piezoelectric vibrators, Transducer array, Directivity characteristics, Beam width, Amplitude weighting, Efficiency control

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.1)

I. 서론

공간상의 표적을 추정하거나 생체 내부의 형태를 진단 하려면 물리적 특성과 기하학적 구조, 위치 등의 정보 등을 알고 있는 초음파 트랜스듀서 어레이로 음파를 방사하고, 표적 또는 생체 내부로부터 반사되는 신호만을 검출하여 다양한 특성을 추출해 내야 한다. 그러나 초음파 트랜스듀서 어레이로 수신된 신호는 표적의 반사 특성, 다중 전파 경로에 의한 영향, 주변의 환경에 의한 집

음 등에 의해 수신 신호가 복잡한 형태로 나타난다. 따라서 송신 지향 특성이나 수신 지향 특성은 목적 대상의 특성과 운용상황에 부합하는 적절한 지향 특성을 형성할 수 있어야 한다[1,2].

초음파 트랜스듀서 어레이의 지향 특성은 일반적으로 진동자의 방사 면적, 진동자간의 거리, 진폭 가중치 등에 의해 결정된다. 그러나 진동자간의 거리 그리고 방사 면적은 트랜스듀서 어레이의 제작과정에서 사용 목적에 맞게 최적화 과정을 통해 고정되어진다[3].

사용 목적에 맞는 지향특성을 갖기 위한 진폭 가중치는 주어진 허용 부엽 준위에 대하여 가장 작은 빔폭을 가지는 Dolph-Chevyshev 기법, 부엽을 임의의 임계치

책임저자: 김무준 (kimmj@pknu.ac.kr)
608-737 부산시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 자연과학대학 물리학과
(전화: 051-620-6349; 팩스: 051-611-6357)

이하로 하는 Taylor distribution 기법, Gaussian distribution 기법 등에 의해 얻어질 수 있다[4].

이러한 진폭 가중치를 구현하는 방법으로는 전기단에 접속한 변압기의 권선비를 조절하는 방법, 혹은 digital 구동장치를 사용하여 각 소자에 인가하는 진폭비를 직접 제어하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 진동자의 전기단에 있어서 입력 조건을 변화시키는 기존의 방법과는 달리 진동자 자체의 특성 변화로 인한 음향단의 출력 변화를 이용하여 가중치를 구현하는 트랜스듀서 어레이를 제안하였다. 이것의 구현은 전기적인 용량을 이용하여 공진 모드의 음향 파워를 제어할 수 있는 2층 구조 트랜스듀서를 이용하여 가능하며[5], 진동자의 특성을 제어하기 위해 사용하는 전기적인 용량은 트랜스듀서 어레이의 제작 후에도 조절이 가능하여 사용 목적에 따른 지향성 변화를 얻기에 용이하리라 기대된다. 따라서 본 연구에서는 제안한 트랜스듀서 어레이의 특성의 이론적 해석을 위하여 우선 Mason 등가회로를 이용한 해석법을 검토하였고, 제작한 트랜스듀서 및 어레이의 동작 특성을 이론 및 실험적으로 해석하였다.

II. 이론 및 시뮬레이션

2.1. 2층 구조 압전 트랜스듀서

기본 공진 주파수가 f_0 인 특성이 동일한 두 장의 압전체를 같은 분극 방향으로 접착하여 동작시켰을 때, 각 압전체에 인가되는 전압 V_1 과 V_2 의 크기가 같을 경우에는 두 장의 압전체 전체 두께로 정해지는 공진 주파수 $0.5 f_0$ 를 기본모드로 하며 그 기수차 조화파가 그림 1과 같이 나타난다. 또한 두 장 중 한 장의 압전체만을 구동할 경우에는 진동하는 진동자에 의해 정해지는 기본모드 f_0 및 두 장의 전체 두께로 정해지는 공진 모드 $0.5 f_0$ 를 그림 2와 같이 생성시킬 수 있다. 따라서 2층 트랜스듀서의 각 구동전압의 크기를 적절히 제어하면 압전체가 한 장일 때와 두 장일 때의 특성을 동시에 얻을 수 있고, 또한 그때 생성되는 진동 모드의 효율을 제어할 수 있게 된다. 이를 구현하기 위하여 그림 3(a)에 나타난 것과 같이 특성이 동일한 두 압전체를 분극 방향이 일치하도록 적층시키고, 한 장의 압전체의 전기단에 전기적인 용량 C_x 를 부가하는 방법을 제안한다. 이때 Mason 등가회로를 이용한

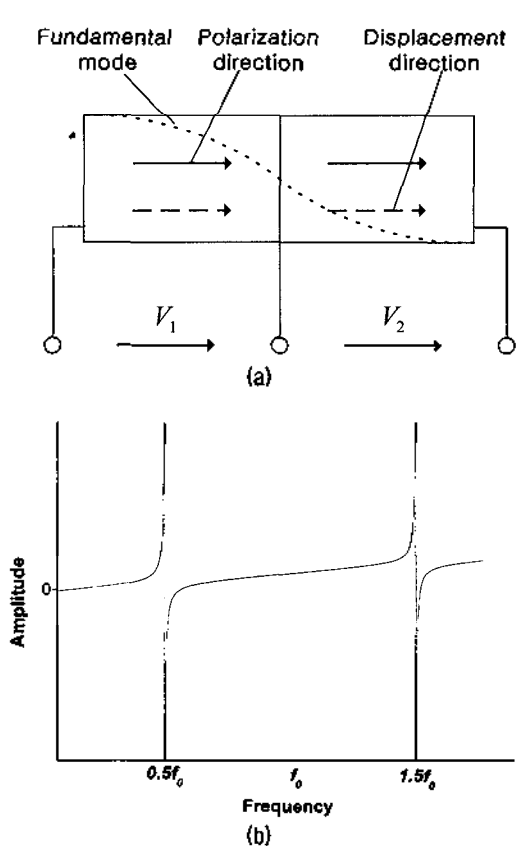


그림 1. 구동 전압 V_1 과 V_2 의 크기가 같을 경우의 기본 진동 모드(a) 및 어드미턴스 특성(b)
 Fig. 1. Fundamental resonance mode(a) and admittance characteristics(b) in case of $V_1 = V_2$.

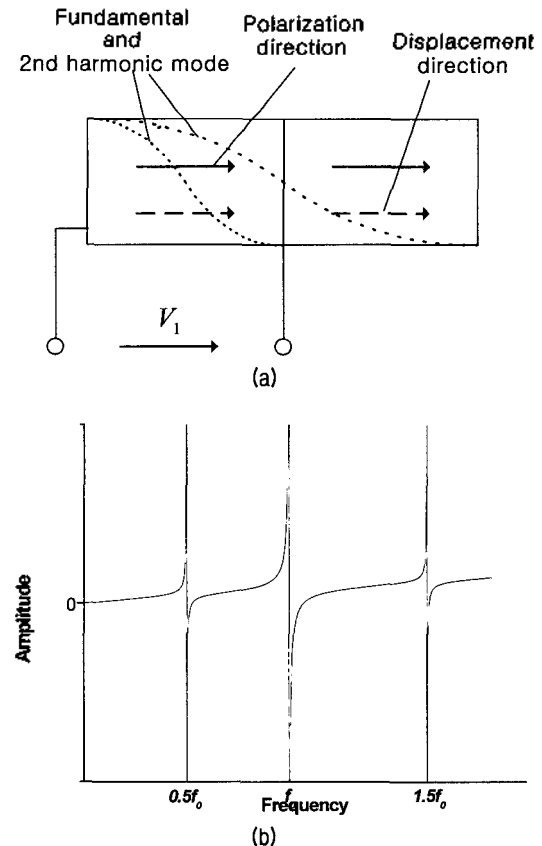


그림 2. 전압 V_1 만 구동할 경우의 기본 진동 모드(a) 및 어드미턴스 특성(b)
 Fig. 2. Fundamental resonance mode(a) and admittance characteristics(b) without V_2 .

등가회로를 그림 3(b)에 나타내었다.

2층 구조 트랜스듀서의 특성 해석은 그림 3의 Mason 등가회로에서 임피던스 파라미터를 구함으로써 회로를 해석하는 것이 가능하다. 압전체 Td1과 Td2로 구성된 진동자에 대한 임피던스 파라미터의 6단자 임피던스 행렬은 각각 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다[6].

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a11} & Z_{a12} & Z_{a13} \\ Z_{a12} & Z_{a11} & Z_{a13} \\ Z_{a13} & Z_{a13} & Z_{a33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

단 $Z_{a11} = -jZ_0 \cot \frac{\omega l}{c}$, $Z_{a12} = -jZ_0 \csc \frac{\omega l}{c}$,
 $Z_{a13} = nZ_a$, $Z_{a33} = Z_a$

$$\begin{bmatrix} F_3 \\ F_4 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{b11} & Z_{b12} & Z_{b13} \\ Z_{b12} & Z_{b11} & Z_{b13} \\ Z_{b13} & Z_{b13} & Z_{b33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_3 \\ v_4 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

단 $Z_{b11} = -jZ_0 \cot \frac{\omega l}{c} + n^2 Z_c$, $Z_{b12} = -jZ_0 \csc \frac{\omega l}{c} + n^2 Z_c$, $Z_{b13} = nZ_b$, $Z_{b33} = Z_b$

여기서, Z_0 는 특성 기계 임피던스, C_0 는 재동용량, ω 는 각주파수, n 는 전기-기계변환비, $F_1 \sim F_4$ 및 $v_1 \sim v_4$ 는 각 압전체의 양 단면에 있어서의 힘 및 입자속도이며, l 과 c 는 압전체의 두께 및 음속이다. 그리고 Z_a 는 C_0 에 의한 임피던스이며, Z_b 는 Z_a 와 C_x 에 의한 임피던스의 합성 임피던스이고, Z_c 는 $-Z_a$ 와 Z_b 의 합성 임피던스이다.

그림 3의 Mason 등가회로에서 $F_2 = F_3$, $v_3 = -v_2$ 이므로 식 (1)과 식 (2)에 대입하면 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_4 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{d11} & Z_{d12} & Z_{d13} & Z_{d14} \\ Z_{d12} & Z_{d22} & Z_{d23} & Z_{d24} \\ Z_{d13} & Z_{d23} & Z_{d33} & Z_{d34} \\ Z_{d14} & Z_{d24} & Z_{d34} & Z_{d44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_4 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

단, $Z_{a11} + Z_{b11} = Z_{ab}$ 라고 놓으면

$$Z_{d11} = Z_{a11} - \frac{Z_{a12}^2}{Z_{ab}}, \quad Z_{d12} = \frac{Z_{a12}Z_{b12}}{Z_{ab}},$$

$$Z_{d13} = Z_{a13} - \frac{Z_{a12}Z_{a13}}{Z_{ab}}, \quad Z_{d14} = \frac{Z_{a12}Z_{b13}}{Z_{ab}}$$

$$Z_{d22} = Z_{b11} - \frac{Z_{b12}^2}{Z_{ab}}, \quad Z_{d23} = \frac{Z_{a13}Z_{b12}}{Z_{ab}},$$

$$Z_{d24} = Z_{b13} - \frac{Z_{b13}Z_{b12}}{Z_{ab}}$$

$$Z_{d33} = Z_{a33} - \frac{Z_{a13}^2}{Z_{ab}}, \quad Z_{d34} = \frac{Z_{a13}Z_{b13}}{Z_{ab}},$$

$$Z_{d44} = Z_{b33} - \frac{Z_{b13}Z_{b13}}{Z_{ab}}$$

또한 그림 3에서 $V = V_1 + V_2$, $I = I_1 = I_2$ 이므로 식 (3)은 6단자 Z-행렬로 식 (4)와 같이 등가할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_4 \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{d11} & Z_{d12} & Z_{d13} + Z_{d14} \\ Z_{d12} & Z_{d22} & Z_{d23} + Z_{d24} \\ Z_{d13} + Z_{d14} & Z_{d23} + Z_{d24} & Z_{d33} + 2Z_{d34} + Z_{d44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_4 \\ I \end{bmatrix} \quad (4)$$

따라서 그림 3의 2층 구조 트랜스듀서에 대하여 일반적인 전기 음향 변환기의 Z-행렬 형식으로 표현할 수 있게 된다. 이 2층 구조 트랜스듀서에 음향부하 R_L 과 배면체 R_b 가 접속된 경우를 그림 4에 나타내었다. 이 경우 식 (4)의 경계 조건은 다음과 같이 되며, 식 (5)를 식 (4)에

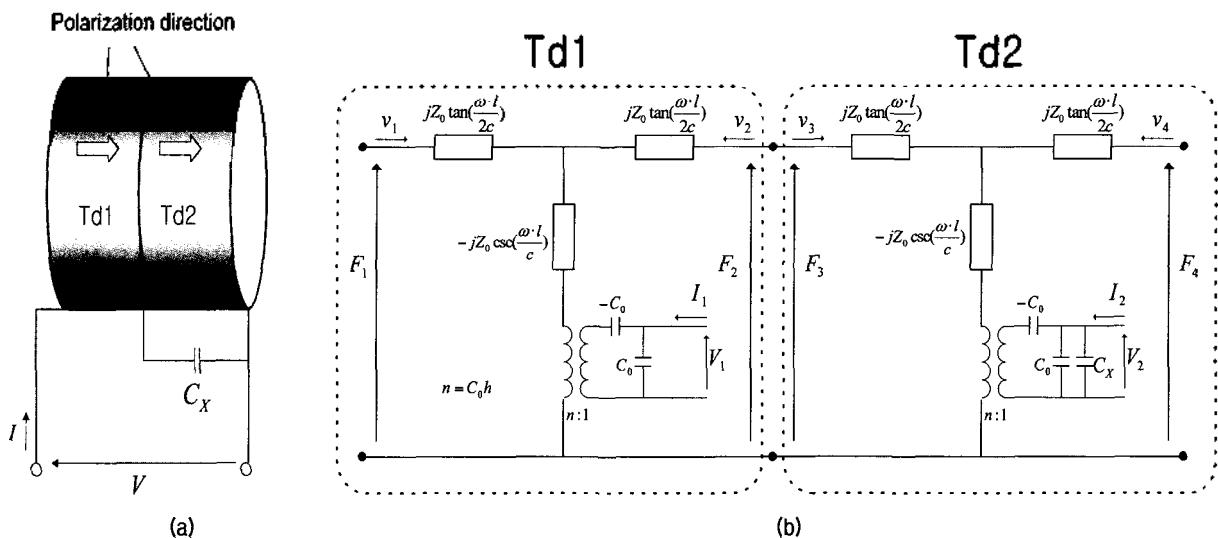


그림 3. 2층 구조 트랜스듀서의 구성(a) 및 Mason 등가회로
 Fig. 3. Construction(a) and Mason equivalent circuit(b) of two-layered transducer.

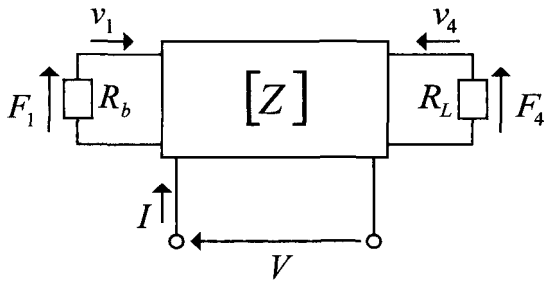


그림 4. 2층 구조 트랜스듀서의 6단자 등가 회로
Fig. 4. Six-terminal network of two-layered transducer.

대입하면 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$F_1 = -R_b v_1, \quad F_4 = -R_L v_4 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a1} + R_b & Z_{a2} & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a2} & Z_{a2} + R_L & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a3} + Z_{a4} & Z_{a3} + Z_{a4} & Z_{a3} + 2Z_{a4} + Z_{a4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_4 \\ I \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러므로 식 (6)을 이용하여 식 (7)과 같이 입사 속도 v_4 가 얻어지며, 식 (7)과 경계조건인 식 (5)를 이용하면 음향 부하에 작용하는 힘 F_4 를 구할 수 있다.

$$v_4 = \frac{\begin{vmatrix} Z_{a1} + R_b & 0 & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a2} & 0 & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a3} + Z_{a4} & V & Z_{a3} + 2Z_{a4} + Z_{a4} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_{a1} + R_b & Z_{a2} & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a2} & Z_{a2} + R_L & Z_{a3} + Z_{a4} \\ Z_{a3} + Z_{a4} & Z_{a3} + Z_{a4} & Z_{a3} + 2Z_{a4} + Z_{a4} \end{vmatrix}} \quad (7)$$

2.2. 트랜스듀서 어레이의 지향 특성 가변

트랜스듀서 어레이의 지향 특성은 일반적으로 진동자의 진폭 가중치와 방사 면적 그리고 진동자간의 거리에 의해 결정된다. 본 연구에서는 2층 구조 트랜스듀서를 진동자로 사용하여, 각 진동자의 진폭 가중치를 제어함으로써 지향 특성을 제어할 수 있는 트랜스듀서 어레이를 제안하였다.

제안한 트랜스듀서 어레이는 2층 구조 트랜스듀서를 등 간격으로 선형 배열하였다. 이 경우, 트랜스듀서 어레이의 원거리 지향 함수는 진동자 한 개의 원거리 지향함수 $E(f, f_x)$ 와 선형 어레이 원거리 지향함수 $S(f_x)$ 의 곱

으로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$D(f, f_x) = S(f_x)E(f, f_x) \quad (8)$$

여기서, $S(f_x) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} a_n \exp(j2\pi f_x n d)$ 이며, $E(f, f_x) = 2 \frac{J_1[(2\pi a/\lambda) \sin \theta]}{(2\pi a/\lambda) \sin \theta}$ 이다.

단, N : 진동자의 총 수, a_n : n 번째 진동자의 진폭 가중치, f : 주파수, d : 진동자의 중심간 거리, $f_x = \sin \theta \cos \varphi / \lambda$, λ : 파장, J_1 : 제1종 Bessel함수, a : 진동자의 반경, θ, φ : 관측점에 대한 구좌표 방위각.

따라서 어레이의 진동요소로 사용되는 2층 구조 트랜스듀서 각각의 음향 파워가 제어되면, 식 (8)의 진폭 가중치 a_n 이 제어되는 것이므로 트랜스듀서 어레이의 지향 특성을 가변할 수 있다.

III. 실험 및 결과

실험에서 사용한 2층 구조 트랜스듀서는 동일한 특성을 갖는 압전 세라믹 두 장을 접착하고 전기적인 용량 C_x 를 한 쪽의 압전체 전기단자에 부가하여 제작하였다. 배면체로는 에폭시를 사용하였으며 실험에 사용된 압전체의 물성은 표 1과 같다.

제작된 압전 트랜스듀서의 주파수 특성 측정은 신호발생기에서 펄스폭 $10 \mu s$, 전압 $5 V$ 의 펄스 신호를 압전 트랜스듀서에 인가한 후, 수중에서 그 응답을 디지털 오실로스코프에서 관측하여 퍼스널 컴퓨터로 주파수 특성을 분석하였다.

전기단에 부가한 C_x 의 변화에 따른 제작한 트랜스듀서의 주파수 응답 특성 변화의 실험결과를 그림 5에 나타내었다. 또한 식 (9)와 식 (11)을 이용한 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다.

실험 결과를 보면 C_x 가 부가되지 않는 경우에는 전체에 의한 기본 공진 모드 주파수만이 약 80 kHz 에서 나타남을 알 수 있다. 그러나 C_x 를 부가하면 기본 공진 모드의 2배에 해당하는 제 2차 공진 주파수가 약 $157 \sim 170 \text{ kHz}$ 에

표 1. 실험에 사용한 압전체의 물성
Table 1. Material property of piezoelectric vibrator.

Resonance Frequency [kHz]	Clamped Capacitance [pF]	Velocity [%]	Characteristic Impedance [MRayl]	Electromechanical Coupling Coefficient	Thickness [mm]	Diameter [mm]
157	220	2720	21.2	0.68	8	10

서 나타나고, 그 크기가 C_x 에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 시뮬레이션 결과인 그림 6과 비교하면 C_x 에 따른 주파수 특성의 변화가 잘 일치하고 있다. 2차 공진 주파수가 나타나는 157~170 kHz에서 특정 주파수를 선택하여 2층 구조 트랜스듀서에 인가하고 C_x 를 변화 시키면 그 출력 음향 파워의 크기를 제어할 수 있다. 그러므로 2층 구조 트랜스듀서를 트랜스듀서 어레이의 각 진동자로 이용하면 C_x 로 각 진동자의 음압의 크기를 제어할 수 있으므로 식 (12)의 진폭 가중치 a_n 을 제어할 수 있다.

그림 5와 같은 특성을 갖는 2층 구조 트랜스듀서 5개를 사용하여 본 연구에서 제안한 트랜스듀서 어레이를 그림 7과 같이 제작하였다. 제작에 사용된 2층 구조 트랜스듀

서에 제 2차 공진 모드인 157 kHz를 인가할 경우, 지향 특성은 그림 8과 같으며, -3 dB 빔 폭은 64°이었다.

제작된 트랜스듀서 어레이의 진폭 가중치 비에 따른 지향 특성을 측정하기 위한 장치도를 그림 9에 나타내었다. 2층 구조 트랜스듀서의 사용 공진 모드는 C_x 로 제어 가능한 제2차 공진 모드를 사용하였으며, 트랜스듀서 어레이에 인가된 주파수는 그림 5의 결과에서 가장 큰 제2차 공진모드의 진폭을 가지는 6.8 nF 일 때의 제 2차 공진 모드인 157 kHz를 인가하였다. 따라서 신호발생기에서 157 kHz, 전압 10 V, burst 10개의 Tone burst파를 트랜스듀서 어레이의 각 진동자에 동시에 인가하고, 수중에 방사한 후 Stepping Motor를 이용하여 트랜스듀서 어레이를 1.8°씩 회전시키면서 70 cm 떨어진 위치에서 Hydro-

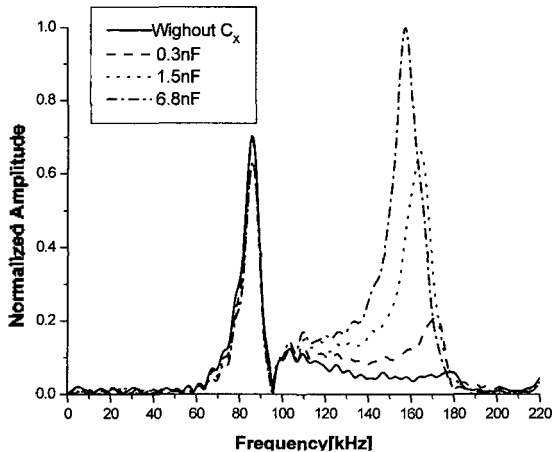


그림 5. 캐패시터 C_x 변화에 따른 주파수 응답의 측정 결과
Fig. 5. Experimental results of frequency response for various capacitor C_x values.

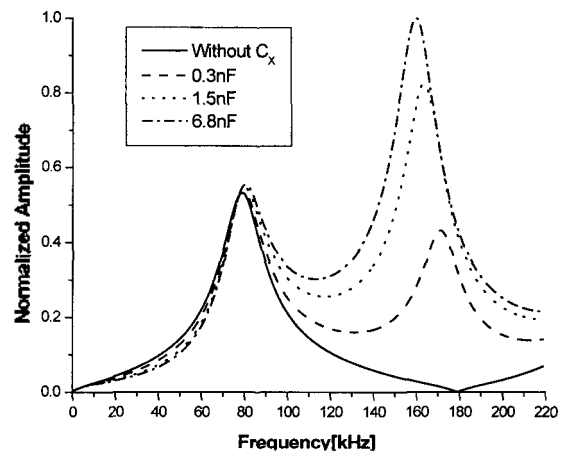


그림 6. 캐패시터 C_x 변화에 따른 주파수 응답의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of frequency response for various capacitor C_x values.

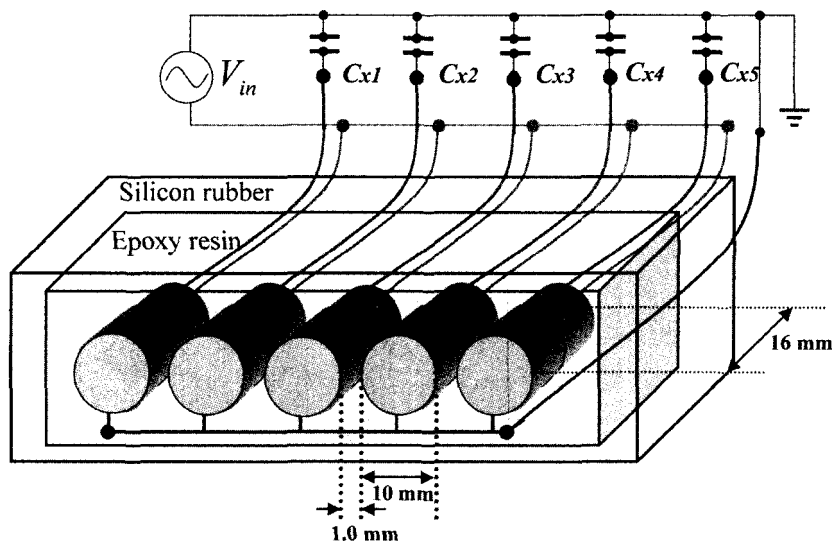


그림 7. 제안한 트랜스듀서 어레이의 구성
Fig. 7. Schematic of the transducer array.

phone (B&K 8103)으로 지향특성을 측정하였다.

각 진동자에 접속된 C_x 로 제어된 트랜스듀서 어레이의 음압 진폭비는 1:1:1:1:1, 0.25:0.6:1:0.6:0.25, 0.15:0.3:1:0.3:0.15, 0:0.5:1:0.5:0으로 하였다. 이 때, -3 dB

빔 폭을 표 2에 나타내었다. 그림 10은 지향 특성의 측정 결과를 시뮬레이션과 비교하여 나타내었다. 그 결과를 수치 해석과 비교하면 부엽에서는 다소 차이가 있지만 진폭 가중치의 변화에 따른 주엽의 변화 경향은 잘 일치

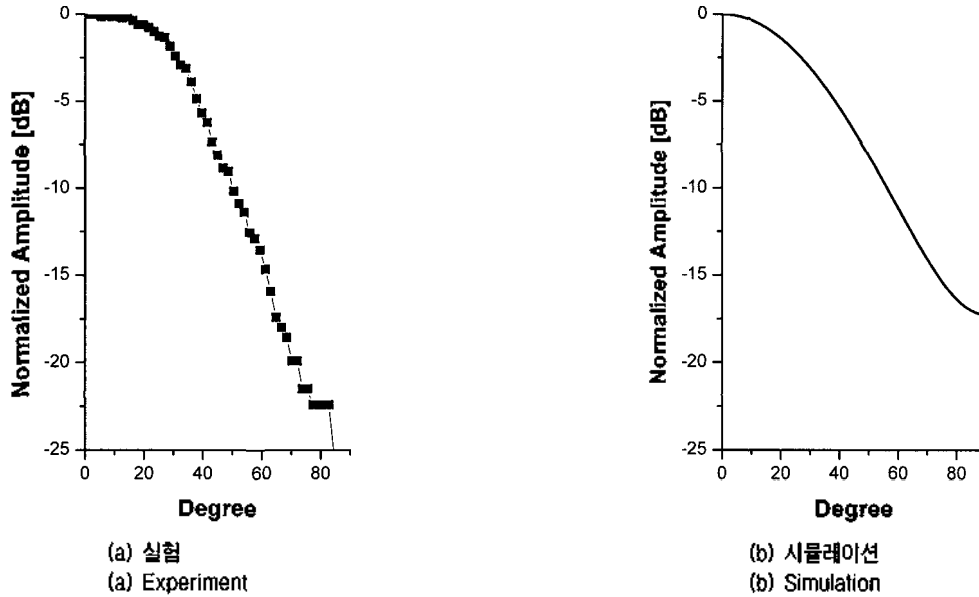


그림 8. 단일 2층 구조 트랜스듀서의 지향 특성
Fig. 8. Directivity characteristics of the two-layered transducer.

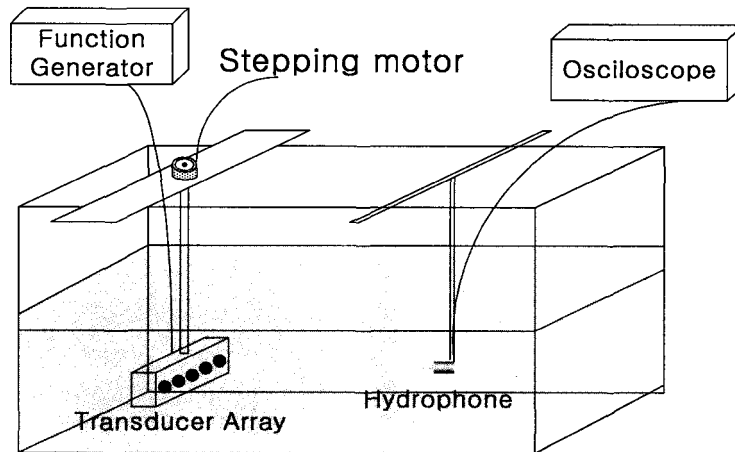
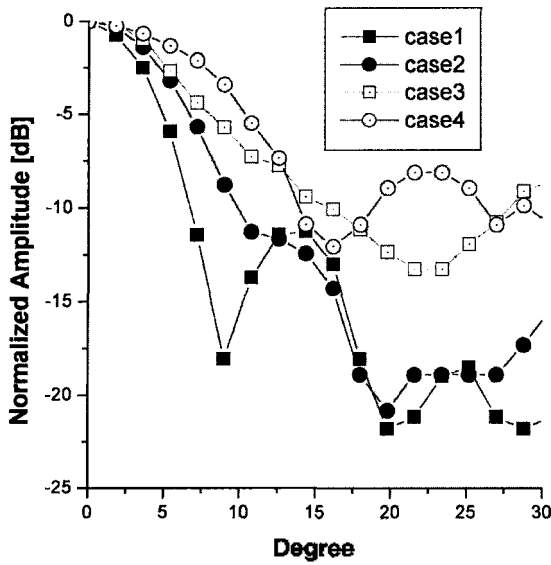


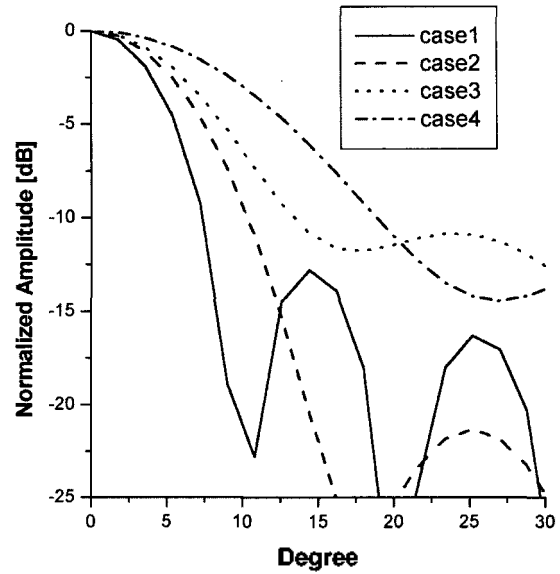
그림 9. 지향 특성 측정 장치도
Fig. 9. Experimental set up for directivity characteristics measurements.

표 2. 진폭 가중치의 비에 따른 빔 폭
Table 2. Beam width for various weighting ratio.

	Amplitude weighting ratio					Beam width -3 dB [°]	
	1st	2nd	3rd	4th	5th		
Case1	1	1	1	1	1	7.6	8.3
Case2	0.25	0.6	1	0.6	0.25	10.2	11.4
Case3	0.15	0.3	1	0.3	0.15	11.5	13.4
Case4	0	0.5	1	0.5	0	16.2	19.9



(a) 실험
(a) Experiment



(b) 시뮬레이션
(b) Simulation

그림 10. 진폭 가중치 분포에 따른 제작한 트랜스듀서 어레이의 지향 특성 변화
Fig. 10. Directivity characteristic changes of the transducer array for various amplitude weighting.

하고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 2층 구조 트랜스듀서에 전기적인 용량 C_x 를 부가하고 변화시킴에 의해 기본 공진 주파수의 2배에 해당하는 공진 모드의 진폭을 제어할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이 2층 구조 트랜스듀서를 트랜스듀서 어레이에 적용함으로써 용이하게 지향 특성을 가변시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 제안한 트랜스듀서 어레이를 목적에 따라 지향 특성을 간단하게 가변시킴으로써 보다 정도 높은 계측이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 2층 구조 트랜스듀서를 이용하여 지향 특성을 가변할 수 있는 트랜스듀서 어레이를 제안하였다. 2층 구조 트랜스듀서는 동일한 특성을 갖는 압전체를 적층하고 그 한 장의 압전체에 전기적인 용량 C_x 를 부가하고 변화시킴으로써 기본 공진 모드의 2배에 해당하는 제 2차 모드를 발생시키고 그 음향 파워를 제어할 수 있다. 2층 구조 트랜스듀서를 진동자로 한 선형 어레이를 제작하고, 각 진동자에서 방사되는 음압의 진폭 비를 C_x 의 변화로 제어한 결과 빔 폭이 $7.6^\circ \sim 16.2^\circ$ 의 범위에서 간단하게 제어 가능함을 확인하였다.

이것은 제안된 트랜스듀서 어레이를 초음파 진단 장치

나 표적을 탐지하는 소나 등에 이용할 경우, 트랜스듀서 어레이가 제작된 이후에도 사용 목적에 따른 지향특성의 변경이 용이하여 그 응용 분야가 많을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양수산개발원 기획연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임 (No. 20010010).

참고 문헌

1. Y. Li and J. A. Zagzebski, "A frequency domain model for generating B-mode images with array transducers," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, **46**, 690-699, 1999.
2. J. P. Huissoon and D. M. Mozlar, "Optimization of the sound pressure level pattern for a curved array sonar transducer," *J. Sound Vib.*, **149**, Issue 1, 125-136, 1991.
3. L. J. Zoomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-time Signal Processing*, CRC Press, Boca Raton, Chap. 7, 497-579, 1995.
4. L. J. Zoomek, *Underwater Acoustics*, Academic Press, Orlando, Chap. 4, 94-152, 1985.
5. J.-H. Kim, C.-D. Kim, M.-J. Kim, K.-L. Ha and N. Chubachi, "Design of the double ultrasonic transducer for nonlinearity measurement of acoustic wave," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**,

3652-3653, 2001.

6. Velimir M. Ristic, *Principles of Acoustic Devices*, John Wiley & Sons, New York, Chap. 5, 117-173, 1993.

저자 약력

● 김 정 호 (Jung-Ho Kim)



1999 2월: 부경대학교 전기공학과 (공학사)
2001 2월: 부경대학교 전기공학과 (공학석사)
2001 3월~ 현재: 부경대학교 음향진동공학과 박사
수료
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 제작 및 초음파
음장 측정

● 송 인 진 (In-Jin Song)



2002년 2월: 부경대학교 물리학과 (이학사)
2002년~ 현재: 부경대학교 음향진동공학과 석사과
정 재학
※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 제작 및 초음파
음장 측정

● 김 무 준 (Moo-Joon Kim)

한국음향학회지 제21권 제7호 참조

● 하 강 렬 (Kang-Lyeol Ha)

한국음향학회지 제21권 제7호 참조

● 김 천 덕 (Chun-Duck Kim)

한국음향학회지 제22권 제1호 참조