

압전 횡효과를 이용한 무지향성 주파수가변 초음파트랜스듀서

김정순 · 김무준*[†] · 하강렬* · 강갑중*

Frequency Controllable Wide-Beam Ultrasonic Transducer with Transverse Mode

Jung-Soon Kim, Moo-Joon Kim*[†], Kang-Lyeol Ha*, and Kab-Jung Kang*

Abstract

In order to obtain wide-beam characteristics and variable resonant frequency of a ultrasonic transducer for the array source, an electrode of transverse mode piezoelectric vibrator is divided, and an electronic inductance is connected to the divided electrodes. The electronic inductance is made by GIC (General Impedance Converter) circuit. Because the GIC circuit is made of OP-Amps and other passive elements, the value of the inductance can be selected easily. As the results, the electronic inductance is variable in the range from 0.2 mH to 1.2 mH. Using the inductance, the resonance frequency of the transducer can be changed in the range from 73 kHz to 86 kHz. In the directivity of the transducer, it is confirmed that the beam width of the transducer is wider than 80° at -3 dB in water.

Key Words : transverse mode, wide band ultrasonic transducer, variable frequency, array source, GIC circuit, electronic inductance

1. 서 론

수중에서 사용되는 초음파 트랜스듀서^[1,2]는 사용목적에 따라 적절한 방사 빔을 형성하기 위해 일반적으로 다수의 압전진동자^[3]를 배열하는 형태의 배열음원이 사용되고 있다. 이러한 배열음원의 경우, 목적으로 하는 빔 형성을 위해 각각의 압전진동자는 무지향의 방사특성이 요구된다. 초음파 트랜스듀서로 사용하는 압전진동자는 일반적으로 두께진동모드^[4,5]를 이용하는데, 두께진동모드의 경우, 무지향성을 얻기 위해서는 방사면을 파장에 비해 작게 해야 한다. 그러나 이렇게 되면 전극면의 감소로 인하여 음향방사효율이 극단적으로 저하되는 문제점이 나타나게 된다. 또한 탐지대상에 따라 최적의 사용 주파수는 달라지므로 넓은 주파수 대역폭의 탐지기가 요구되지만, 압전 초음파 트랜스듀서의 경우 사용 주파수 대역폭이 좁아 단일 공진주파수만을 사용하는 것이 일반적이므로 상이한 탐지대

상에 적용하기 위해서는 복수의 탐지 시스템이 필요하게 되는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복할 수 있는 대처방안으로써, 압전진동자의 횡효과 진동모드를 이용한 주파수가변형 무지향성 음원을 제안하였다. 압전횡효과를 이용할 경우, 방사면을 파장에 비해 좁게 함으로써 무지향성의 방사특성을 얻을 수 있으며 방사면에 비해 전극면을 넓혀 전기-음향변환효율을 높일 수 있다. 한편, 공진주파수를 가변^[6]하도록 하기 위해서 진동자의 전극을 분할하고 분할된 전극에 전기적인 인덕턴스를 부가하여 주파수 가변형 음원을 구현하였다. 전기적인 인덕턴스으로써, 연산증폭기와 저항 및 콘덴서를 사용한 임피던스 변환회로 GIC(General Impedance Converter)^[7,8]를 이용하여 주파수 가변형 음원을 구현하는 방법에 대하여 고찰하였다. 이는 권선형 코일로는 실현하기 어려운 범위의 인덕턴스를 얻는 방법으로, 주파수 가변의 폭을 넓히고 그 제어 방법을 간편하게 하기 위함이다. 또한, 전극 분할에 있어서 최적의 조건을 얻기 위하여, 구동용 전극과 공진주파수 가변을 위한 기계임피던스 제어용 전극의 면적비에 따른 특성을 이론 및 실험에 의해 검토하였다.

부경대학교 자연과학대학 물리학과(Department of Physics, Pukyong National University)

[†]Corresponding author: kimmj@pknu.ac.kr

(Received : August 6, 2004, Accepted : October 29, 2004)

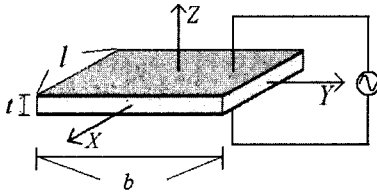


그림 1. 압전진동자의 구성도
Fig. 1. The coordinate system of piezoelectric vibrator.

2. 이 론

2.1. 횡모드형 압전 진동자

전극면이 Z축과 수직한 방향인, 길이 l, 두께 t, 폭 b 인 압전 진동자의 구조를 그림 1에 나타내었다^{9,10)}. 이 진동자에 Z축 방향으로 전계 E_z를 가하면 진동자의 압전횡효과에 의해 Y축 방향으로 진동 변위가 생기게 된다. 이때 트랜스듀서 양 단면에 작용하는 힘을 F₁, F₂라 하고 입자속도를 각각 ξ₁['], ξ₂[']라 두면, 식(1)과 같은, 압전체의 전기-기계 변환 기본식이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \frac{n}{\omega C_0} \\ Z_{21} & Z_{22} & \frac{n}{\omega C_0} \\ \frac{n}{\omega C_0} & \frac{n}{\omega C_0} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1' \\ \xi_2' \\ I_3 \end{bmatrix}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{Z_0}{\tan kl} + \frac{n^2}{\omega C_0}, \quad Z_{12} = Z_{21} = \frac{Z_0}{\sin kl} + \frac{n^2}{\omega C_0} \quad (1)$$

여기서, 각각의 파라미터는 아래와 같은 물리적인 양을 나타낸다.

ρ : 밀도, k : 파수, c₂₂^E : 탄성계수, d₁₂ : 압전외상수, s₂₂^E : 탄성컴플라이언스, ε₃₃^{TS} : 유전율(permissivity), V₃ : 압전체의 전극간 전위차, I₃ : 전기단자에 흐르는 전류, C₀ = ε₃₃^{TS}bl / t : 제동용량, Z₀ = ρvbt : 특성임피던스,

$$n = \frac{d_{12}b}{s_{22}^E} : \text{권선비}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{\rho s_{22}^E}} = \sqrt{\frac{c_{22}^E}{\rho}} : \text{음속}.$$

그림 2는 식(1)에 Mason등가회로를 적용하여 6단자 망 등가회로로 나타낸 것이다. 이 등가회로에서 각각의 임피던스는 아래와 같다.

$$Z_1 = jZ_0 \tan(\omega l / 2v) \quad (2)$$

$$Z_2 = -jZ_0 \sin(\omega l / v) \quad (3)$$

본 연구에서는, 그림 3(a)와 같이, 압전체의 한쪽면의 전극을 분할하였고 분할된 전기단자에 인덕턴스 L_e

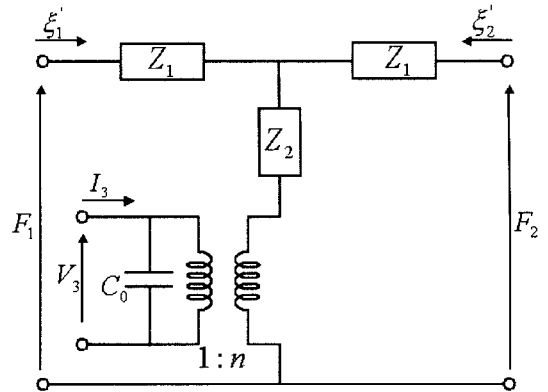
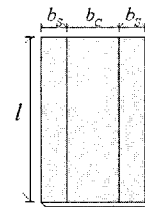
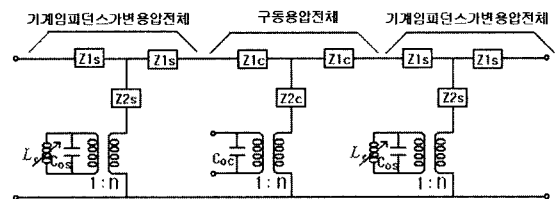


그림 2. 횡효과 압전진동자의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of Mason type for transverse effect piezoelectric vibrator.



(a)



(b)

그림 3. 전극분할된 압전진동자 및 등가회로
Fig. 3. (a) Transducer with electrodes divided into 3 parts. and (b) Equivalent circuit of frequency controllable transducer with divided electrodes.

를 추가하여 공진 특성을 제어함으로써 주파수 가변을 구현하였다. 이렇게 3개의 전극으로 분할된 압전진동자의 전기단자에 가변인덕터 L_e를 추가한 트랜스듀서의 Mason 등가회로를 그림 3(b)에 나타내었다. 여기서, 임피던스 Z_{1c}, Z_{2c} 및 Z_{1s}, Z_{1s}는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{1c} &= jZ_0 \tan(\omega b_c / 2v) \\ Z_{2c} &= -jZ_0 \sin(\omega b_c / v) \\ Z_{1s} &= jZ_0 \tan(\omega b_s / 2v) \\ Z_{1s} &= -jZ_0 / \sin(\omega b_s / v) \end{aligned} \quad (4)$$

단, b_c : 구동용 압전체면의 폭

b_s : 기계임피던스 가변용 압전체면의 폭

$$C_{0c} = \frac{\epsilon_{33}^{LS} b_c}{t} : \text{구동용 압전체 제동용량}$$

$$C_{0s} = \frac{\epsilon_{33}^{LS} b_s}{t} : \text{기계임피던스 가변용 압전체 제동용량}$$

이 등가회로에서 양측에 있는, 기계임피던스 가변용 압전체의 전기단에, 각각 접속된 인덕턴스와 제동용량의 병렬 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{xe} = \frac{j\omega L_e}{1 - \omega^2 L_e C_{0s}} \quad (5)$$

이것은 권선비가 1:n인 변압기(transformer)를 거쳐 다음과 같은 기계임피던스의 양이 된다.

$$Z_{xm} = \frac{j\omega L_e n^2}{1 - \omega^2 L_e C_{0s}} \quad (6)$$

식(6)에서 $w^2 = L_2 C_{0s} \approx 1$ 인 조건을 만족시키면 Z_{xm} 은 매우 큰 값이 되어 압전진동자 전체의 공진특성이 크게 변화할 것이 예측된다.

2.2. GIC로 구현한 전자 인덕턴스

그림 3에 나타낸 기계임피던스가변용 압전체에 접속할 인덕턴스 L_e 의 값은 매우 정밀하게 가변 되어져야 하고 특성에 따라서는 매우 큰 값이 요구되기도 한다. 따라서 본 연구에서는 GIC를 이용한 전자 인덕턴스에 대하여 검토하였다.

그림 4는 2개의 OP-Amp와 5개의 임피던스 소자로

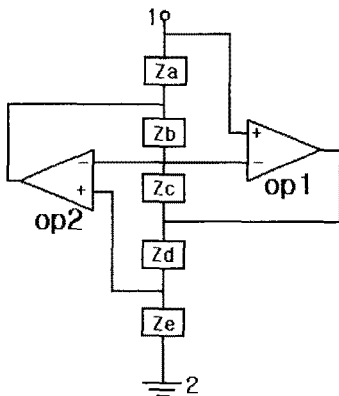


그림 4. GIC 회로

Fig. 4. Construction of the GIC (Generalized Impedance Converter).

구성된 회로로, 이 회로의 전체 임피던스는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{12} = \frac{Z_a Z_b Z_c}{Z_b Z_d} \quad (7)$$

인덕턴스의 특성을 갖게 할 경우에는, 식(8)과 같이, 4개의 저항과 1개의 콘덴서로 구성하면 된다.

$$Z_a = R_a, Z_b = R_b, Z_c = R_c, Z_d = -j \frac{1}{\omega C_d}, Z_e = R_e \quad (8)$$

식(7)에 식(8)를 대입하면,

$$Z = \frac{R_a R_b R_c}{R_b \left(-j \frac{1}{\omega C_d} \right)} = j \omega \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (9)$$

이 되므로 식(10)과 같은 인덕턴스를 얻을 수 있다.

$$L_e = \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (10)$$

여기서, R_a 에 가변저항을 사용함으로써 전자인덕턴스 L_e 를 가변시킬 수 있게 된다.

3. 실험 및 결과

3.1. GIC 제작 및 특성 해석 결과

본 연구에서는 주파수 가변을 목적으로 사용될 전자 인덕턴스를 GIC로 구현하였으며, GIC 제작시 사용된 각 소자의 값들은 아래와 같다.

$$R_a = 500\Omega, R_b = 12k\Omega, R_c = 10k\Omega, C_d = 0.1\mu F, R_e = 100\Omega$$

사용된 연산증폭기는 OP-27G로 2.8 V/ μ s의 슬루레이트를 갖고 있다.

그림 5는 위의 소자들로 구현한 GIC회로를 나타낸다. 주어진 주파수 범위 내에서의 가변저항 R_a 의 변화에 따른 GIC 인덕턴스 변화를 측정된 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서는 가변저항 R_a 의 값이 증가할수록 전자인덕턴스 L_e 의 값도 증가함을 알 수 있다. 제작된 GIC 가변인덕터의 동작영역은, 가변저항 R_a 의 변화범위, $29.5\Omega < R_a < 100\Omega$, 내에서 주어진 주파수 영역에 대해 비교적 균일한 분포로 약 0.2 mH~1.2 mH의 범위내로 가변됨을 확인할 수 있었다.

3.2. 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 제작 및 특성

본 논문에서는 높은 음향방사효율과 무지향성을 갖

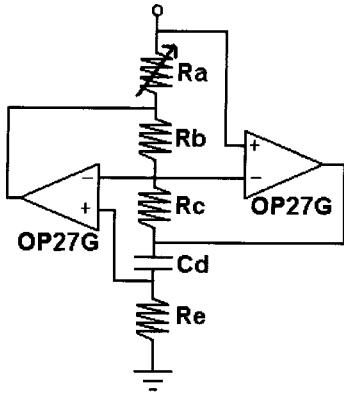


그림 5. 2개의 OP Amp로 제작된 전자인덕턴스
 Fig. 5. Electronic inductance made of two operational amplifiers.

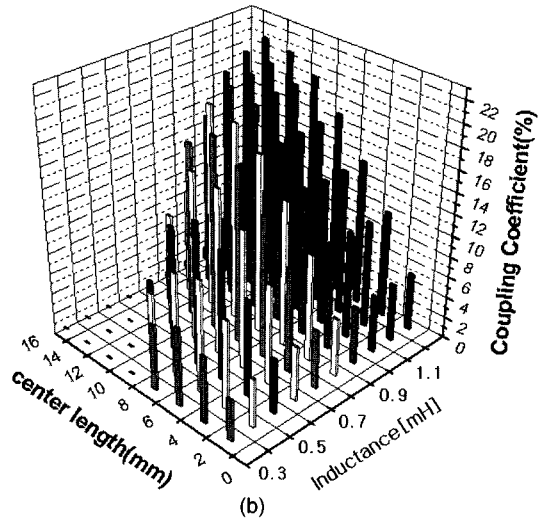
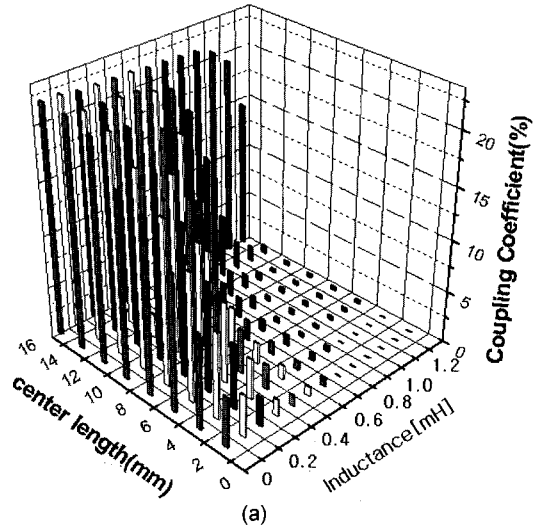


그림 8. 전극분할비에 따른 전기기계 결합계수의 변화
 Fig. 8. Variation of coupling coefficients with the ratio of electrode division. (a) 1st mode and (b) 2nd mode

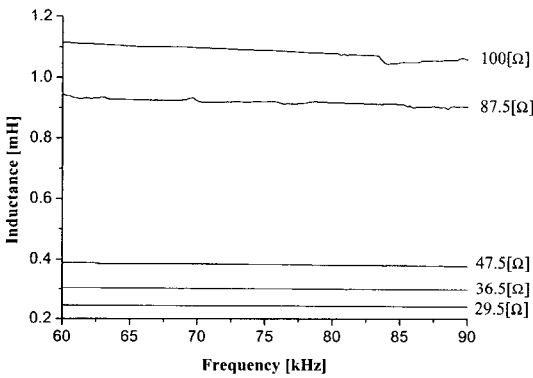


그림 6. R_a 변화에 따른 GIC 인덕턴스 변화
 Fig. 6. Inductance variation according to R_a values.

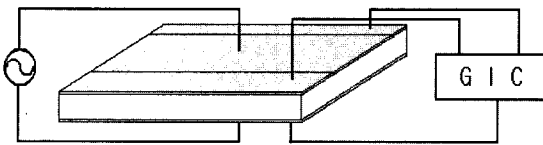


그림 7. GIC를 연결한 압전 트랜스듀서의 구조
 Fig. 7. Structure of piezoelectric transducer with GIC.

는 트랜스듀서를 만들기 위해 그림 7과 같은 횡모드형 압전진동자를 사용하였다. 길이 35 mm, 폭 20 mm, 두께 1 mm인 진동자의 한쪽 면을 주파수가변을 위해 그림 7과 같이 분할하여 가운데면 b_c 는 구동부로 사용하고 양 가장자리면 b_s 에는 GIC를 부가하였다.

전극면의 분할에 있어 최적의 분할비를 구하기 위해 그림 3(b)의 등가회로를 이용하여 입력어드미턴스 특성을 구하고 이 결과로부터 효율적인 분할에 대한 검

토를 수행하였다. 이때 진동자의 전체폭, 즉, $b = b_c + 2b_s$ 는 일정하게 두고 b_c 와 b_s 의 분할비를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 계산결과로부터 알 수 있는 공진 및 반공진 주파수로부터 전기기계 결합계수를 구하였다. 그림 8은 압전체의 분할된 가운데 면의 길이 b_c (center length) 및 전자인덕턴스의 변화에 대한 결합계수의 변화를 나타내었다. 그림에서 (a)는 1차 공진모드의 결합계수를, (b)는 2차 공진모드의 결합계수를 각각 나타내는데, (a)결과를 보면, b_c 는 증가할수록, L_c 는 감소할수록 결합계수의 값은 증가함을

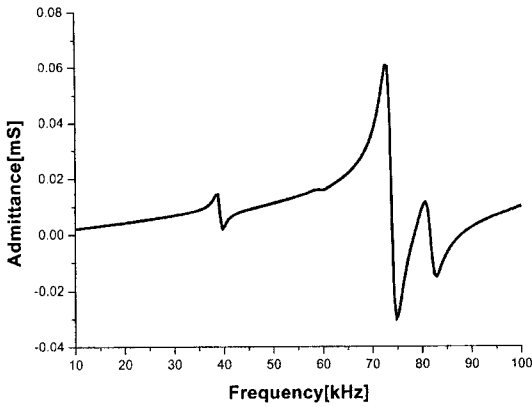


그림 9. 압전 트랜스듀서의 공진특성
Fig. 9. Resonance characteristics of the piezoelectric transducer without GIC.

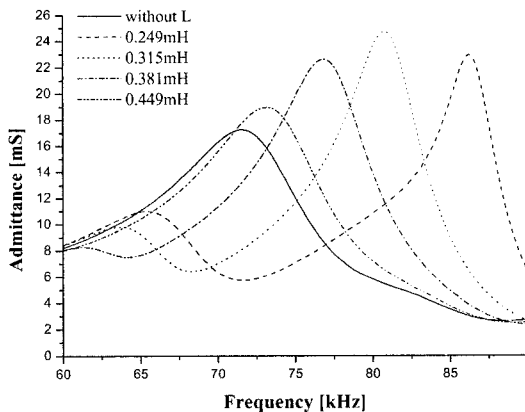
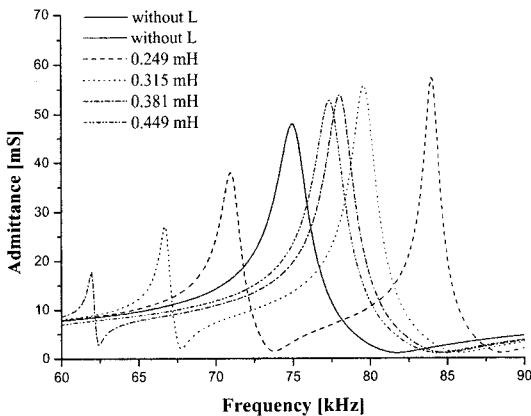


그림 10. L_e 변화에 따른 공진특성
Fig. 10. Variation of resonance frequencies to electronic inductance L_e . (a) Theoretical results and (b) Experimental results

알 수 있었다. 이에 반해 (b)에서는 b_c 및 L_e 의 값이 동시에 커져야만 결합계수가 증가함을 알 수 있다. 따라서 동일한 인덕턴스의 값을 사용하였을 경우, 1차 공진모드 및 2차 공진모드가 동시에 큰 결합계수를 갖기 위해서는 b_c 와 b_s 의 비가 약 2:1로 분할된 경우이다. 즉, 가운데 면을 10 mm, 양 가장자리면을 5 mm로 분할한 경우 두 모드가 동시에 좋은 효율을 나타냄을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 전극 분할비를 2:1로 결정하여 압전체를 전극 분할한 후, Impedance Analyzer (HP4192A)를 이용하여 공진 특성을 측정하여 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 결과로부터 공진주파수는 73 kHz, 반공진주파수는 75.2 kHz임을 알 수 있었다. 그림에서 40 kHz 부근에 나타난 공진특성은 트랜스듀서의 길이방향(l 방향)에 대한 진동모드가 나타난 것으로 볼 수 있다.

그림 10은 인덕턴스 L_e 의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 나타내고 있다. 그림 10(a)는 시뮬레이션 계산에 의한 결과를, 그림 10(b)는 실험에 의한 측정결과를 나타낸다. 시뮬레이션에 사용된 물질상수의 값들은 표 1에 나타내었다. 두 결과를 비교해 보면, 어드미턴스값 자체는 상당한 차이를 보이고 있지만, 이는 본 연구의 목적에 있어서는 의미가 없는 값이기 때문에 문제되지 않는다. 그러나, L_e 의 변화에 따른 공진주파수의 변화 경향을 보면 두 결과가 유사한 변화경향을 가짐을 알 수 있다.

그림 11은 전자인덕턴스 L_e 의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 이론값과 측정값을 비교하여 나타낸 것으로, 두 결과가 유사한 변화양상을 보임을 알 수 있었다.

전극 분할된 트랜스듀서의 길이방향(l 방향)과 폭방향(b 방향)에 대해 주파수를 변화시켰을 때의 지향성을 측정된 결과를 그림 12에 나타내었다. 측정은, 800 mm × 800 mm × 1200 mm의 수조속에서 73 kHz, 10 V_{pp}, carrier 5개의 Tone Burst파 신호를 트랜스듀서에 인가하여 트랜스듀서중심에서 40 cm 떨어진 지점에서 Hydrophone (B&K 8103)을 사용하여 1.8도 간격으로 회전하여 방사특성을 측정하였다. 우선, 트랜스듀서의 폭방향

표 1. 시뮬레이션에 사용된 물질 상수
Table 1. Physical constants used in simulation

물질상수	값
밀도(ρ)	7429 [kg/m ³]
음속(c)	2897 [m/s]
압전외상수(d_{32})	4.209×10^{-10} [pC/N]
유전율(ϵ)	3.529×10^6 [F/m]

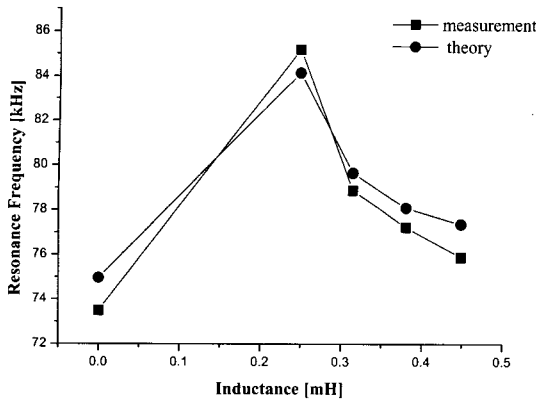


그림 11. L_e 변화에 대한 공진주파수 변화
Fig. 11. Comparison of measurement with variation of resonance frequencies in theory.

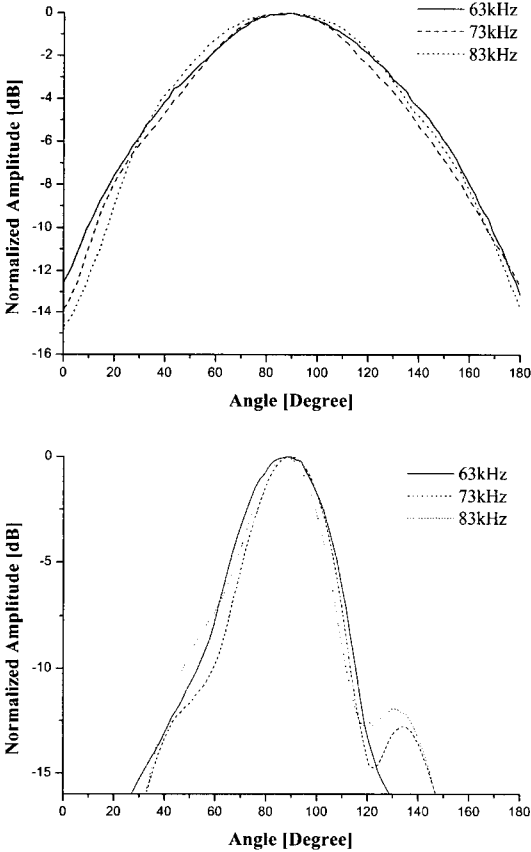


그림 12. 지향특성곡선
Fig. 12. Results of the directivity pattern.

(b 방향)에 대한 그림 12(a)의 결과는 공진주파수가 63 kHz, 73 kHz, 83 kHz인 경우의 지향성을 나타낸 것

이다. 주파수변화에 따른 지향특성은 미소한 변화를 보이지만, 세 경우 모두에 대해 -3 dB 빔폭은 약 80°~83° 사이로 비교적 낮은 지향특성을 보였다. 그림 12(b)의 결과는 트랜스듀서의 길이방향(l 방향), 즉, (a)와 수직한 방향에 대한 지향성의 측정결과를 나타낸 것으로, -3 dB 빔폭이 약 26°~30°로 비교적 예리한 지향성을 나타내고 있으며, 주파수가 낮아질수록 부엽의 준위가 낮아지고 주엽의 빔폭이 증가함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 배열음원에 이용되는 진동소자로서, 압전 횡효과 진동모드를 이용한 주파수 가변형 압전 트랜스듀서를 제안 및 구현하였다. 본 연구에서는 주파수 가변을 위하여 압전체를 전극 분할하였고, 분할된 압전체의 전기단자에 가변인덕턴스를 부가하기 위하여 GIC를 이용한 전자 가변 인덕턴스를 제작하였다. 제작된 GIC는 0.2 mH~1.2 mH 사이에서 비교적 균일한 값을 얻을 수 있었다. 또한, 이를 전극 분할된 트랜스듀서의 기계단에 부가하여 가변시킨 결과, 인덕턴스를 부가하지 않았을 때의 기본공진주파수가 73 kHz인 것에 비해, 공진주파수가 약 73 kHz~86 kHz까지 연속적으로 가변 가능함을 확인하였다. 제작된 트랜스듀서의 지향성을 측정된 결과, -3 dB 빔폭이 80° 이상인 비교적 낮은 지향특성을 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 구현한 횡효과 진동모드를 이용한 주파수 가변형 압전 트랜스듀서를 배열음원에 이용할 경우, 빔 형성 및 주파수 가변이 요구되는 측정시에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 김정환, 김무준, 하강열, “도플러 효과에 의한 주파수 변화에 대응하는 수중 초음파변환자의 제안”, *센서학회지*, 제8권 제1호, pp. 16, 1999.
- [2] 하강열, 김무준, 강갑중, 현병국, 채민구, 今野和彦, “2차원 배열 수중 청음기의 제작과 초음파 음장 측정에서의 응용”, *센서학회지*, 제10권 제5호, pp. 320, 2001.
- [3] 황성필, 김무준, 하강열, 강갑중, “LiTaO₃ 단결정을 사용한 압전변압기의 개발”, *센서학회지*, 제11권 제3호, pp. 132, 2002.
- [4] Jindong Zhang, Hughes, W. J., and Hladky-Hennion, A. C., “Concave Cymbal Transducers”, *Applications of Ferroelectrics*, 1998. ISAF 98. Proceedings of the Eleventh IEEE International Symposium on,

pp. 255-258, 24-27 Aug. 1998.

[5] S. A. Vera, M. Febbo, C. A. Rossit, and A. E. Dolinko, "Transverse Vibrations of Circular Annular Plates with Edges Elastically Restrained Against Rotation, Used in Acoustic Underwater Transducers", *Ocean Engineering*, Vol. 29, Issue 10, pp. 1201-1208, August 2002.

[6] 中鉢 憲賢, 金 茂俊, "厚み縦振動モード壓電振動子の傳送線路モデル等價 回路による多層構造超音波

トランスジューサの特性解析について", 電子情報通信學會(日本), US92, No. 9, pp. 67-72, 1992.

[7] 박승배, 신회로이론, 문운당, 1996.

[8] 岡村 勉夫, OPアンプ回路の設計, CQ出版社, 1990.

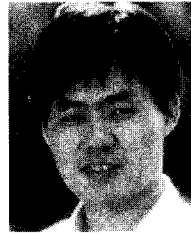
[9] Takuro Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity", *Oxford University Press*, 1990.

[10] Velimer M. Ristic, "Principles of Acoustic Devices", *John Wiley & Sons, Inc.*, 1983.



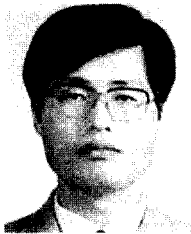
김 정 순

- 1996 2월 부경대학교 물리학과(이학사)
- 1999 2월 부경대학교 음향진동공학과 (공학석사)
- 2002 3월 Tokyo University of Agriculture & Technology, Bio-Applications and Systems of Engineer(공학박사)
- 2003 2월 Researcher in Tokyo University of Agriculture & Technology, Venture Business Lab.
- 2003 9월 ~ 현재 부경대학교 음향진동공학연구소 연구원
- 주관심분야 : 의료 초음파, 초음파 영상, 초음파 음장 해석 및 측정



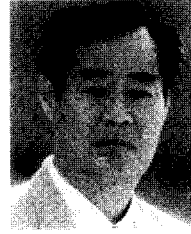
김 무 준

- 1985년 부산수산대학 응용물리학과(이학사)
- 1990년 부산수산대학 대학원 응용물리학과(이학석사)
- 1994년 일본 도호후쿠(東北) 대학 대학원 공학연구과(공학박사)
- 1994 ~ 현재 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수
- 주관심분야 : 압전 진동자의 특성해석 및 초음파 트랜스듀서의 설계, 제작



하 강 열

- 1978년 부산수산대학 어업학과(수산학사)
- 1982년 부산수산대학 대학원 수산물리학과(수산학석사)
- 1990년 일본 도호후쿠(東北) 대학 대학원 공학연구과(공학박사)
- 1991~현재 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수
- 주관심분야 : 초음파 트랜스듀서의 제작 및 응용, 초음파 음장 측정 및 해석



강 갑 중

- 1963년 경북대학교 사범대학 물리학과(이학사)
- 1982년 부산대학교 대학원 물리학과(이학석사)
- 1989년 영남대학교 대학원 물리학과(이학박사)
- ~ 현재 부경대학교 물리학과 교수
- 주관심분야 : MOS소자의 방사선에 의한 퇴화 원인 규명 및 방사선 영향 저감기법 연구