

이학석사 학위논문

횡진동 모드를 이용한 주파수 가변
압전 트랜스듀서의 제작 및
특성 평가



2004년 2월

부경대학교 대학원

물 리 학 과

송 행 용

송행용의 이학석사 학위 논문을 인준함

2003년 12월 20일

주 심 이학박사 강 감 중



부 심 이학박사 도 시 흥



위 원 공학박사 김 무 준



<목차>

Abstract	1
I . 서론	2
II . 이론	4
II- I . 횡모드형 압전 진동자	4
II- II . GIC로 구현한 전자 인덕턴스	13
III . 실험 및 결과	18
III- I . GIC 제작 및 특성 해석 결과	18
III- II . 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 제작 및 특성	23
IV . 결론	35
참고문헌	36

Fabrication and characteristics evaluation of a frequency controllable ultrasonic transducer with transverse mode

Haeng-Yong Song

Department of Physics, Graduate School, Pukyong National University

Abstract

It was fabricated an ultrasonic transducer with transverse mode in order to get high radiation efficiency and omni-directional characteristics of a piezoelectric transducer. For achieving frequency variable characteristics, an electrode division method, was applied to the transducer.

The resonance frequency of the piezoelectric transducer was controlled by the variation of mechanical impedance through the method adding inductance in the electrical port separated from the piezo-electrical driving port. In general, solenoid type coil isn't suitable for the purpose when high inductance or a variable inductor is demanded. Therefore, it is considered the method which have inductance realized GIC(General Impedance Converter) with OP-Amps and Impedance elements.

From the analysis of simulation and experiment, it was confirmed that the GIC is changable linearly in the range from 0.2mH to 1.2mH. And, it was confirmed that the resonance frequency of the transducer is changable by the GIC in the range from 73kHz to 86kHz.

As the results of directivity measurement, it was confirmed that transducer has a weak directivity, that is the beam width of -3 dB is wider than 80° in water.

1. 서론

초음파의 과학적 연구는 제1차 세계대전 말에 프랑스의 물리학자 랑주뱅 (Langevin, Paul , 1872.1.23~1946.12.19) 이 잠수함을 탐지하는데 초음파를 사용하려 한 것이 처음이었다. 이렇게 시작된 초음파라는 학문은 비파괴검사, 의료용 초음파 진단장치, 초음파 세척기, 소나 등 여러분야에서 활용되어 지고 있다[1].

수중에서 사용되는 초음파 트랜스듀서는 주로 압전진동자의 두께진동모드를 이용한 경우가 많고[2,3], 또한 적층형 압전진동자를 이용하여 주파수 가변의 초음파 트랜스듀서가 제안된 바도 있다[4,5]. 한편 배열 음원을 이용한 빔형성 등에 있어서는 개개의 압전진동자들은 무지향성 음원이 요구되고 있다. 그러나 두께 진동모드 압전진동자를 사용하는 경우 무지향성을 얻기 위하여 방사면을 파장에 비해 작게 하면 전극면의 감소로 인하여 음향방사효율이 극단적으로 저하된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 무지향성 음원을 얻기 위해 방사면은 파장에 비해 줄이고, 음향방사효율을 고려하여 전극면은 크게하는 횡진동모드를 이용하는 무지향성 음원을 제안하였다.

아울러 본 연구에서는 압전체의 한쪽면을 전극분할하는 방법을 이용하여 주파수 가변 특성을 얻었는데, 먼저 전기구동용 압전체와 기계단 임피던스 가변용으로 쓸 압전체의 폭의 비율을 변화시켜가며 시뮬레이션을 했고, 1차파와 2차파의 결합계수를 모두 고려하여 사용주파수 환경에 맞는 가장 효율적인 폭을 선택해서 한쪽면을 분할하였다. 이렇게 분할된 압전진동자의 전기 단자에 인덕턴스를 부가

하는 방법으로, 인덕턴스에 의한 등가 기계임피던스를 변화시켜 압전 트랜스듀서의 공진주파수를 가변하였다[6]. 이때 사용주파수범위에 따라 매우 큰 인덕턴스가 요구되거나 공진주파수의 정밀제어를 위한 가변 인덕턴스가 요구되는데, 권선형 코일로 그것을 구현하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 연산증폭기와 저항 및 콘덴서를 사용한 임피던스 변환회로 GIC(General Impedance Converter)[7,8]를 이용하여 필요한 인덕턴스를 구현하는 방법에 대하여 고찰하였다.

이렇게 GIC로 구현된 인덕턴스를 전극분할된 압전 트랜스듀서의 기계단에 연결해 공진주파수를 변화시켰고, 횡모드형 압전 트랜스듀서의 등가회로를 해석해 시뮬레이션한 결과와 비교하였다.

끝으로 이렇게 제작된 트랜스듀서의 지향성을 수조에서 측정함으로써 그 지향특성을 고찰하였다.

II. 이론

II- 1. 횡모드형 압전 진동자

압전체의 전기 단자에 인덕턴스를 접속하는 것에 의해 공진 모드를 가변시킬 수 있다. 여기서는 횡모드형 주파수 가변 압전 트랜스듀서에 전기 신호를 인가할 때 주파수 특성을 등가회로를 사용하여 해석하고자 한다[9, 10].

횡진동모드를 사용하는 압전 진동자의 좌표계와 등가회로를 그림 1에 나타내었다. Z축 방향 위 아래에 전극면이 있고, 길이, 두께, 폭을 각각 l , t 및 b 로 나타내었다. 횡모드 진동자에서는 전극에 인가된 전기장에 의해 Y축 방향으로 진동 변위가 생기게 된다. 즉, 그림 1(b)와 같이 Z축 방향으로 전계 E_z 가 가해지면 기계적인 진동은 트랜스듀서의 양쪽 끝(Y축)을 통해 전달된다. 이때 트랜스듀서 양 가장자리에 작용하는 압축력을 F_1 , F_2 라 하고, 입자속도를 각각 ξ_1' , ξ_2' 라 두면 이들 사이의 관계는 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다[10].

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{\tan kb} + \frac{n^2}{\omega C_0} & \frac{Z_0}{\sin kb} + \frac{n^2}{\omega C_0} & \frac{n}{\omega C_0} \\ \frac{Z_0}{\sin kb} + \frac{n^2}{\omega C_0} & \frac{Z_0}{\tan kb} + \frac{n^2}{\omega C_0} & \frac{n}{\omega C_0} \\ \frac{n}{\omega C_0} & \frac{n}{\omega C_0} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1' \\ \xi_2' \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

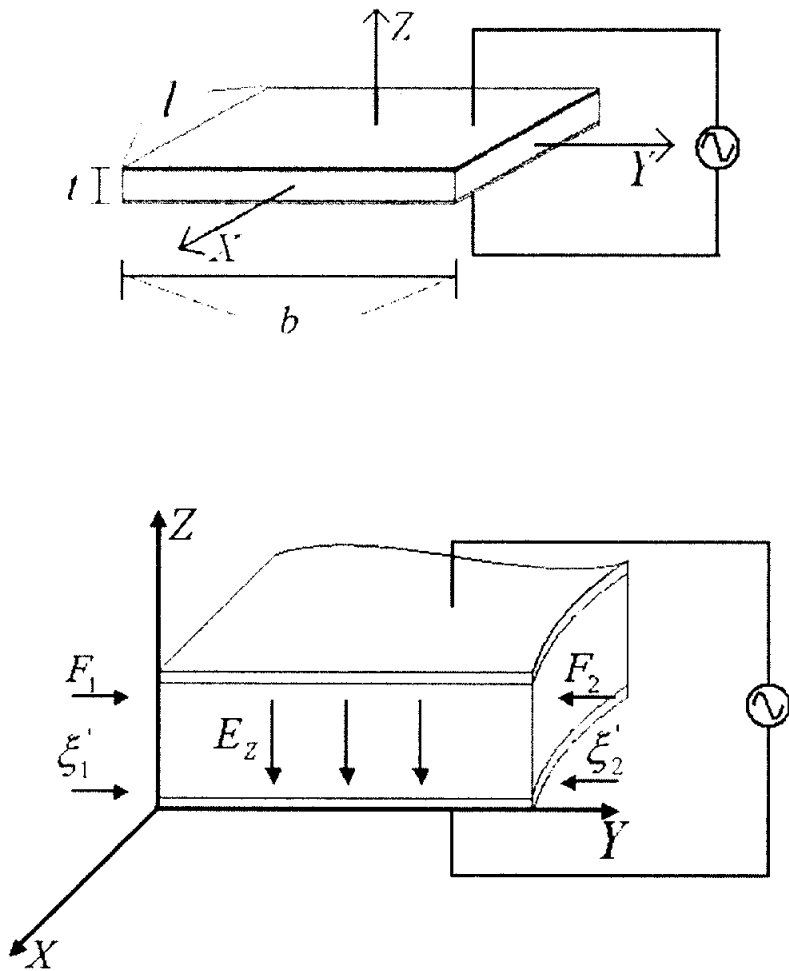


Fig .1. The coordinate system for extensional vibration of transverse-effect.

여기서, V_3 는 압전체의 전극간 전위차이며, I_3 는 전기단자에 흐르는 전류이다. 또한 파수는 $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{\omega}{v}$ 이고, ϵ_{33}^{LS} 를 유전율(permittivity)이라 두면 제동용량 C_0 는 $C_0 = \frac{\epsilon_{33}^{LS} b l}{t}$ 이다. 그외 각 요소 및 계수의 관계는 아래와 같다.

$$\text{특성 임피던스 : } Z_0 = \rho v b t$$

$$\text{권선비 : } n = \frac{d_{12} b}{S_{22}^E}$$

ρ : 밀도

c_{22}^E : 탄성 계수

d_{12} : 압전외상수

s_{22}^E : 탄성 컴플라이언스

$$\text{음속 : } v = \frac{1}{\sqrt{\rho S_{22}^E}} = \sqrt{\frac{c_{22}^E}{\rho}}$$

(1)식에서

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{Z_0}{\tan k l} + \frac{n^2}{\omega C_0} \quad (2)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{Z_0}{\sin k l} + \frac{n^2}{\omega C_0} \quad (3)$$

식 (2), (3)과 같이 두면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \frac{n}{\omega C_0} \\ Z_{21} & Z_{22} & \frac{n}{\omega C_0} \\ \frac{n}{\omega C_0} & \frac{n}{\omega C_0} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1' \\ \xi_2' \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)와 같은 압전체의 전기-기계 변환 기본식이 유도되고, 등가회로는 식(4)로부터 그림 2와 같은 6단자망 Mason등가회로가 유도된다. 이 등가회로에서 각각의 임피던스는 아래와 같다.

$$Z_1 = jZ_0 \tan(\omega l/2v) \quad (5)$$

$$Z_2 = -jZ_0 / \sin(\omega l/v) \quad (6)$$

본 연구에서는 주파수 가변을 목적으로, 그림 3(a)와 같이 압전체의 한쪽면의 전극을 분할하였고, 분할된 전기단자에 인덕턴스 L_e 를 부가하여 공진 특성을 제어한다. 그림 3(b)는 이렇게 3개의 전극으로 분할된 압전 진동자의 전기단자에 가변 인덕터 L_e 를 부가한 트랜스듀서의 Mason 등가회로를 나타낸다.

이때 임피던스 Z_{1C} , Z_{2C} , 및 Z_{1S} , Z_{2S} 는 다음과 같이 주어진다.

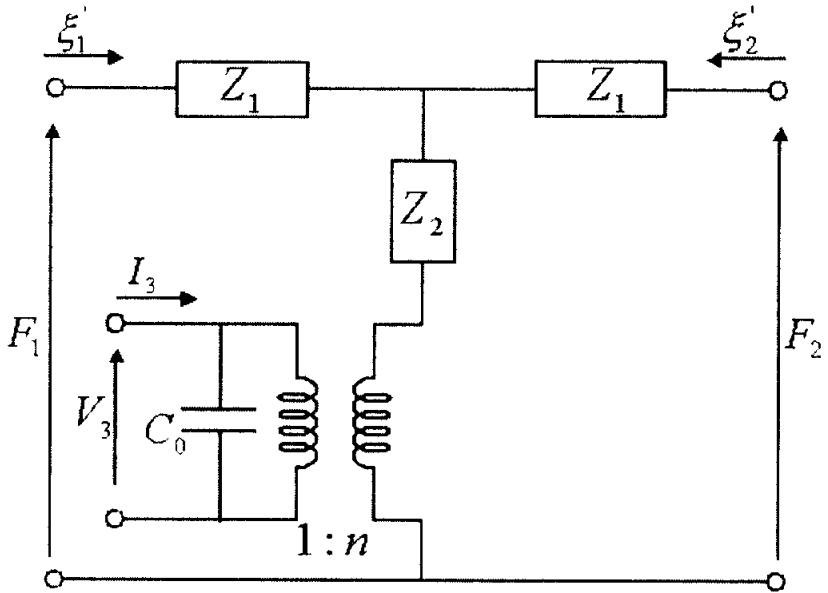
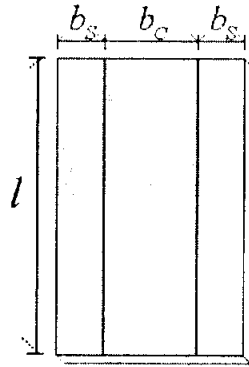
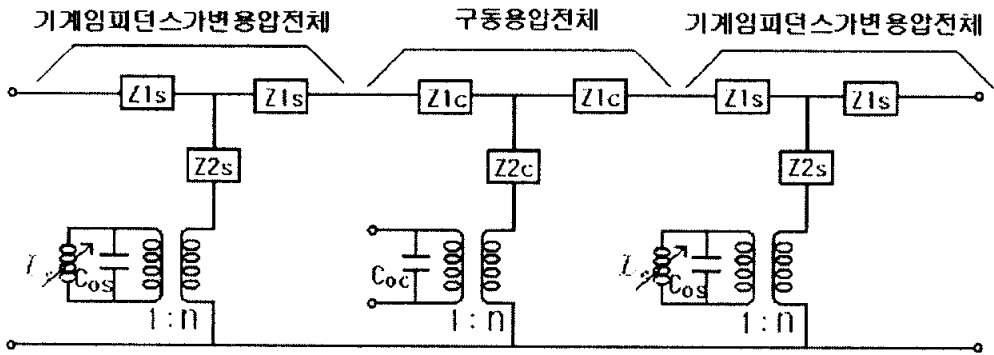


Fig .2. Equivalent circuit of Mason type with six terminals for transverse-effect piezoelectric vibrator.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Transducer with electrodes divided into 3 parts.

(b) Equivalent circuit of frequency controllable transducer with divided electrodes.

$$\begin{aligned}
Z_{1c} &= jZ_0 \tan(\omega b_c/2v) \\
Z_{2c} &= -jZ_0/\sin(\omega b_c/v) \\
Z_{1s} &= jZ_0 \tan(\omega b_s/2v) \\
Z_{2s} &= -jZ_0/\sin(\omega b_s/v)
\end{aligned} \tag{7}$$

단,

b_c : 구동용 압전체 면의 폭

b_s : 기계임피던스 가변용 압전체 면의 폭

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

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

을 나타낸다.

이 등가회로를 보면 양측에 있는 기계임피던스 가변용 압전체의 전기단에 각각 접속된 인덕턴스와 각 제동용량의 병렬 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{xe} = \frac{j\omega L_e}{1 - \omega^2 L_e C_{0s}} \tag{8}$$

이것은 권선비 1 : n 인 변압기(transformer)를 거쳐 다음과 같은 기계임피던스의 양이 된다.

$$Z_{sm} = \frac{j\omega L_e n^2}{1 - \omega^2 L_e C_{0S}} \quad (9)$$

즉 (9)식을 이용하여 기계임피던스가변용 압전체의 등가회로를 그리면 그림 4와 같다.

(9)식 및 그림 4로 부터 $\omega^2 L_e C_{0S} \approx 1$ 인 조건을 만족하면 Z_{sm} 은 매우 큰 기계임피던스의 양이 되고, 그림 3의 압전진동자 전체는 그 공진특성이 크게 변화할 것이 예측된다.

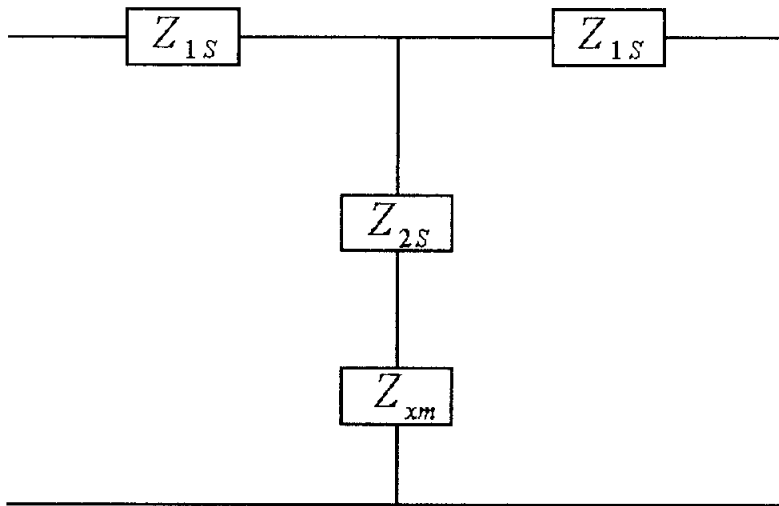


Fig. 4. Equivalent circuit consisted of mechanical impedance converted from electrical impedance

II-II . GIC로 구현한 전자 인덕턴스

그림 3에 나타낸 기계임피던스 가변용 압전체에 접속할 인덕턴스 L_e 의 값은 매우 정밀히 가변되어야 할 것이 요구되며 특성에 따라서는 매우 큰 값이 요구되기도 한다. 이를 코일을 감아 실현하기에는 우리가 따르기 마련이다. 따라서 본 연구에서는 GIC (General Impedance Converter)를 이용한 전자 인덕턴스에 대하여 고찰한다. GIC라는 것은 그림 5와 같이 2개의 OP-Amp와 5개의 임피던스 소자로 구성된 회로이다. 이 회로의 전체 임피던스는

$$Z_{12} = \frac{Z_a Z_b Z_e}{Z_c Z_d} \quad (10)$$

(10)식과 같이 나타낼 수 있고, $Z_a \sim Z_e$ 를 적당한 저항, 콘덴서로 치환하면, 등가적으로 인덕턴스의 특성을 가진 회로를 얻을 수 있다. 즉, 인덕턴스의 특성을 갖게 할 경우에는 (9)식과 같이 4개의 저항과 1개의 콘덴서로 구성하면 된다. 이 때,

$$\begin{aligned} Z_a &= R_a, \quad Z_b = R_b, \quad Z_c = R_c \\ Z_d &= -j \frac{1}{\omega C_d}, \quad Z_e = R_e \end{aligned} \quad (11)$$

이며, 식(10)에 식(11)를 대입하면

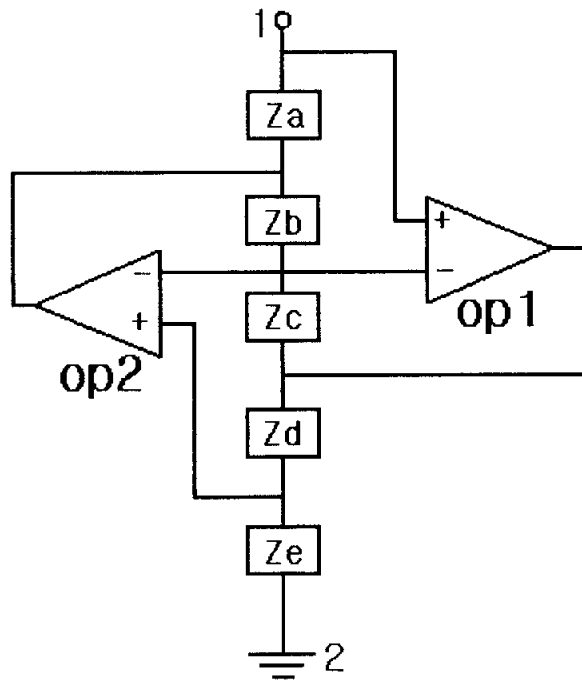


Fig. 5. Construction of the GIC(Generalized Impedance Converter).

$$Z = \frac{R_a R_b R_c}{R_b(-j\frac{1}{\omega C_d})} = j\omega \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (12)$$

(12)식과 같이 되므로 (13)식과 같은 인덕턴스 성분의 임피던스임을 알 수 있다.

$$L_e = \frac{R_a R_c C_d R_e}{R_b} \quad (13)$$

GIC를 회로의 동적 영역(dynamic range) 내에서의 동작을 이해하기 쉽게 하기 위해 그림 6과 같이 등가하였다.

Z_e 에 $e_1(=e_5)$ 의 전압을 가했을 때에 흐르는 전류를 i_3 로 했을 때, i_3 에 의한 Z_d 의 전압강하 $e_1(=e_3)$ 을 기준으로 해서, Z_b/Z_c 의 이득을 가진 반전 앰프를 통해서 전압 e_2 를 얻는다. 이 e_2 와 입력전압 e_1 과의 차이에 의해 Z_a 에는 i_1 의 전류가 흐르게 된다.

입력 임피던스는 e_1/i_1 으로 표시되기 때문에 임피던스는 e_2 의 값을 크게 하는 Z_b 와 Z_c 에 반비례하고, Z_a 와 Z_e 에 비례하고, 똑같이 i_1 을 제한하는 Z_a 에 비례한 값으로 된다.

OP_1 과 OP_2 및 $Z_b \sim Z_e$ 가 e_1 에 대해서 위상과 전압값을 변화시킨 전압을 발생하고, Z_a 가 그 전압에 의해 흐르는 전류를 컨트롤 하는 것 같이 2단계의 동작으로 되어 있기 때문에 $Z_b \sim Z_e$ 에서 전압의

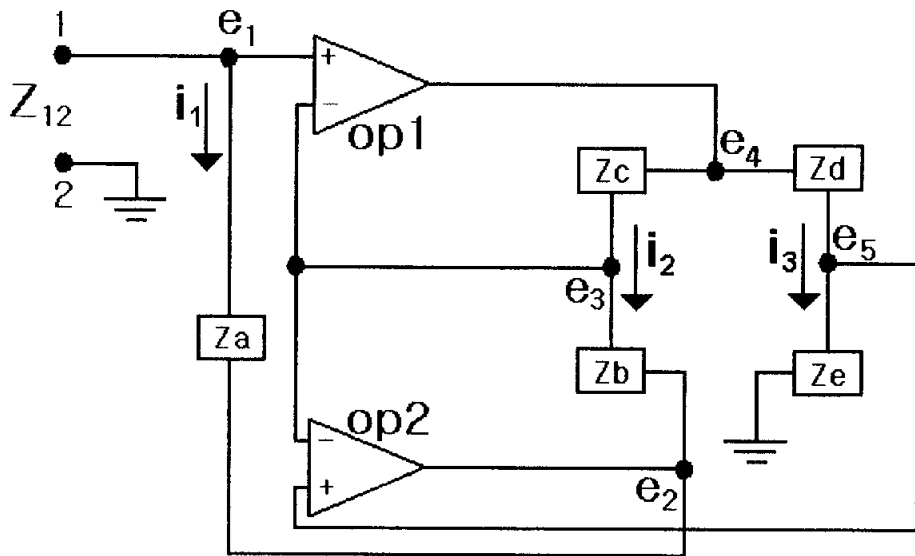


Fig. 6. Equivalent circuit of the GIC(Generalized Impedance Converter).

동적 영역이 결정된다.

예를 들면 사용하는 OP-Amp의 출력전압이 최대 $7 V_{rms}$ 이고, 출력 가능한 전류가 $3.5 mA_{rms}$ 이었다고 하면, 입력에 대해서 OP-Amp의 동작범위 내에서 동작시키는 것에는 Z_a 에는 $2 k\Omega (7V/3.5mA)$ 이상의 저항을 사용하도록 하는 것이 목표로 된다.(입력전류 i_1 이 $3.5 mA$ 이내가 되도록 하는 입력전압 e_1 에 대해, Z_a 는 $2 k\Omega$ 이하에서도 동작가능). OP-Amp의 전압 동적 영역 내에서 동작시키는 것에는 $e_1(1+Z_4/Z_5)$ 가 OP_1 의 최대출력전압이 되지 않도록 하고, 또 $[e_3-(e_4-e_3)(Z_2/Z_3)]$ 가 OP_2 의 최대 출력전압 내에 있도록 e_1 과 $Z_b \sim Z_e$ 를 결정한다.

(10)식에서는 $Z_a \sim Z_e$ 를 자유롭게 선택하는 것이 가능하도록 되어 있지만, 실제로는 OP-Amp의 동작조건으로부터 제한을 받는다. 그 조건으로서는 OP-Amp의 직류 루프의 성립과 OP-Amp의 귀환루프의 위상 변동에 의한 발진이다. 예를 들면 $Z_a \sim Z_e$ 을 전체 콘덴서로 한 경우 직류귀환 루프가 성립하지 않으므로 동작불가능한 것이 명백하다.

III. 실험 및 결과

III- 1. GIC 제작 및 특성 해석 결과

본 연구에서는 주파수 가변을 목적으로 사용될 전자 인덕턴스를 GIC회로로 구현 하였으며, GIC회로 제작시 사용한 소자의 값들은 아래와 같다.

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

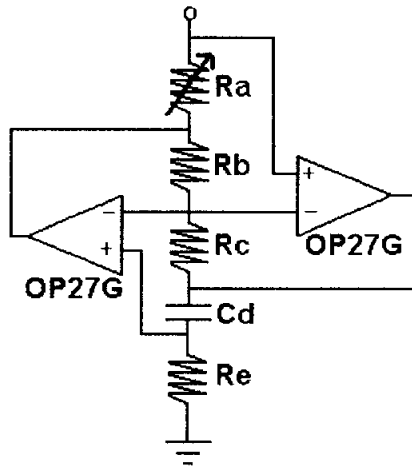
표 1은 사용된 연산증폭기(OP-27G)의 특성을 나타내는 것으로서, 온도 및 시간 드리프트와 잡음전압 레벨이 극히 적고, 슬루레이트와 동상신호제거비(CMRR)가 크다는 장점을 가지고 있다.

그림 7(a)는 위의 소자들로 구현한 GIC회로를, 그림 7(b)는 실제 기판에 제작된 전자 인덕턴스의 사진을 보여준다. 가변저항 R_a 의 변화에 따른 인덕턴스의 변화를 측정한 결과를 그림 8에 나타 내었다. 그림 8에서 가변저항 R_a 의 값이 증가할수록, 전자 인덕턴스 L_e 의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 제작된 GIC 가변 인덕터의 동작영역은 가변저항 R_a 의 변화에 따라 약 0.2 mH ~ 4.6 mH 범위의 값을 가지나, 가변저항을 29.5 Ω 에서 100 Ω 으로 변화시킨 경우, 주어진 주파수 영역에서 비교적 균일하게 가변됨을 확인할 수 있었고, 이때 전자 인덕턴스는 0.2 mH~1.2 mH 범위의 값을 가짐을 확인

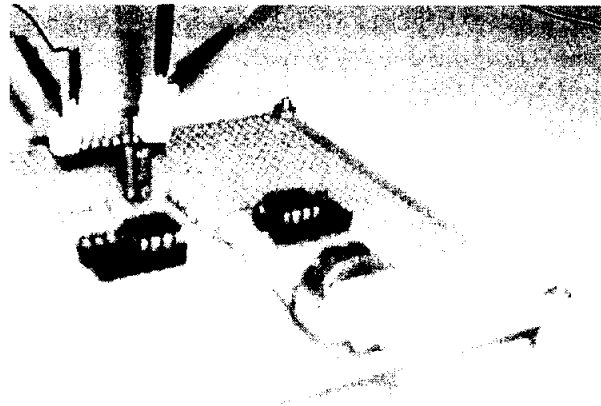
할 수 있었다. 이 영역을 벗어나면 저항 R_a 변화에 따라 인덕턴스가 매우 불규칙하게 변하므로, 사용하는데 무리가 따른다.

Table 1. Specifications of the operational amplifier(OP-27G) used in GIC(General Impedance Converter).

규격	기호	
입력오프셋전압	V_{os}	55(μV)
온도드리프트	$\Delta V_{os} / \Delta Temp$	0.4($\mu V / ^\circ C$)
시간드리프트	$\Delta V_{os} / \Delta Time$	0.4($\mu V / M_0$)
동상신호소거비	$CMRR$	118(dB)
슬루레이트	SR	2.8($V / \mu s$)



(a)



(b)

Fig. 7. Electrical Inductance made of two operational amplifiers.

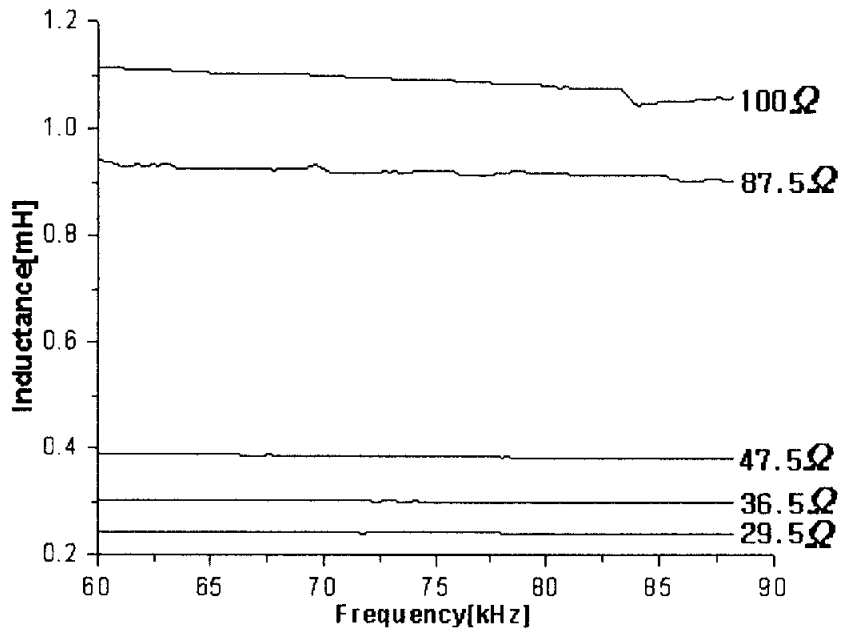


Fig. 8. Inductance variation according to R_a values.

III-II. 주파수 가변 압전 트랜스듀서의 제작 및 특성

본 논문에서는 높은 음향방사효율과 무지향성을 가지는 트랜스듀서를 만들기 위해 그림 9와 같은 횡모드형 압전진동자를 사용하였다. 가로 35 mm, 세로 20 mm, 두께 1 mm인 진동자의 한쪽면을 주파수 가변을 위해 그림 9와 같이 분할하여, 가운데 면은 구동부로 사용하고, 양 가장자리 면에는 GIC를 추가하였다.

전극면을 분할하기 전에 시뮬레이션을 통해, 어떻게 분할하는게 효율적인지를 예측하였다. 그림 10은 시뮬레이션을 통한 결과 그림으로, 분할된 가운데 면의 길이와 전자인덕턴스의 값을 변화시켜가며 결합계수를 비교하였다. (a), (b)는 각각 1차파와 2차파의 결합계수를 나타내는데, (a)결과에서 가운데면을 크게 분할하면 할수록 결합계수의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 (b)에서는 가운데 면의 길이가 길어질수록 최대결합계수값이 높은 L값에 나타나는 것을 볼 수 있다. 1차파와 2차파를 모두 고려, 사용가능한 주파수 환경에서 보면, 가운데면과 가장자리면의 비를 2:1로 분할한 즉 가운데 면을 10 mm 양 가장자리 면을 5 mm로 분할한 경우가 제일 나은 것을 볼 수 있다.

이렇게 분할된 트랜스듀서를 그림 11과 같이 Impedance Analyzer (hp4192A)를 이용하여 공진 특성을 측정하였다. 측정된 공진특성은 그림 12에 나타내었다. 공진주파수 73 kHz, 반공진주파수 75.2 kHz를 가지는 것으로 측정되었다. 40 kHz 부근에서 나타나는 공진특성은 트랜스듀서가 길이방향으로 진동하는 모드를 나타낸 것이다.

분할된 전극면의 가운데면은 구동부로 쓰고, 양가장자리면에는

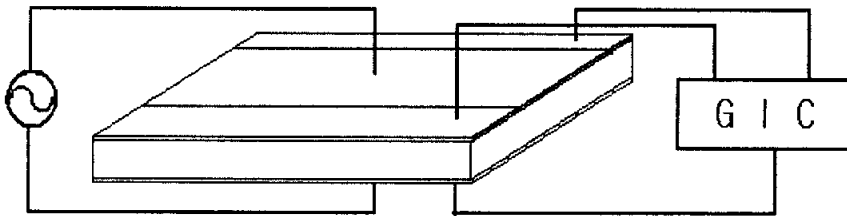
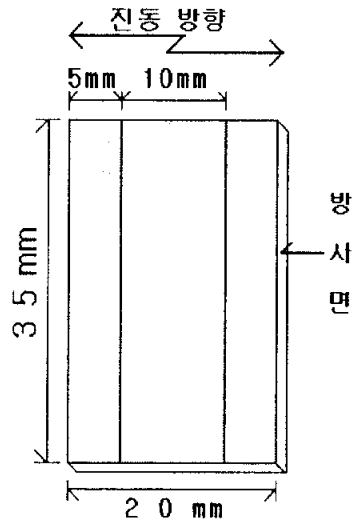
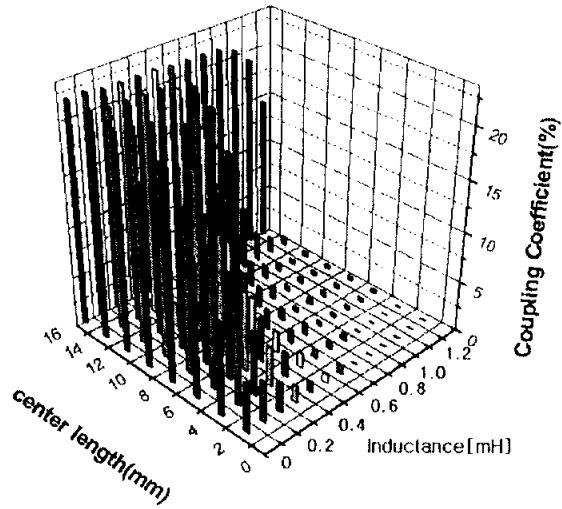
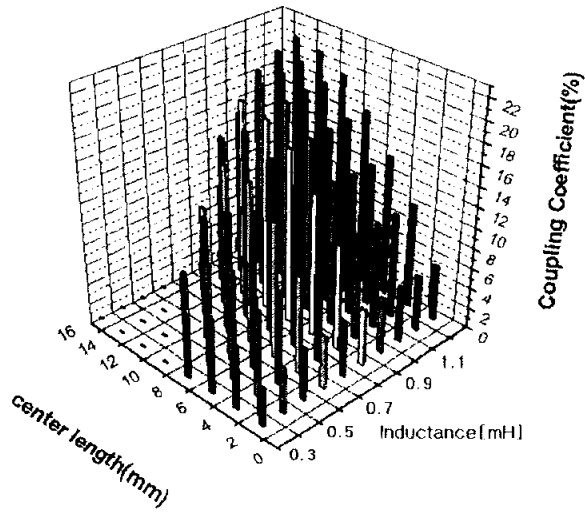


Fig. 9. Structure of piezoelectric transducer with GIC.



(a)



(b)

Fig. 10. Variation of coupling coefficients with the ratio of electrode division.

(a) 1st mode

(b) 2nd mode

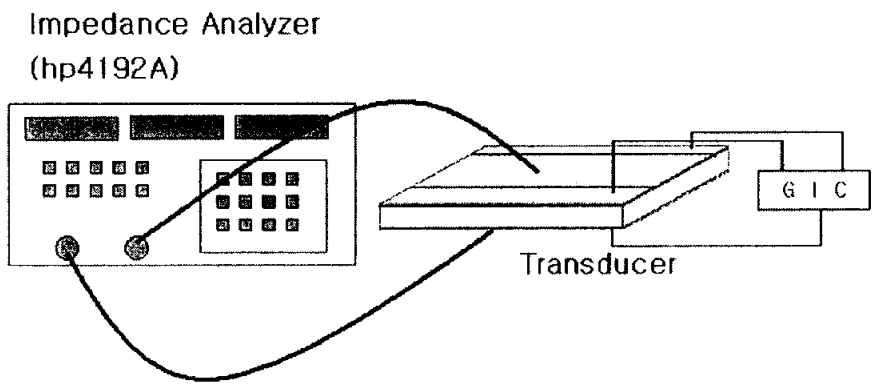


Fig. 11. Experimental setup for resonance characteristics measurement.

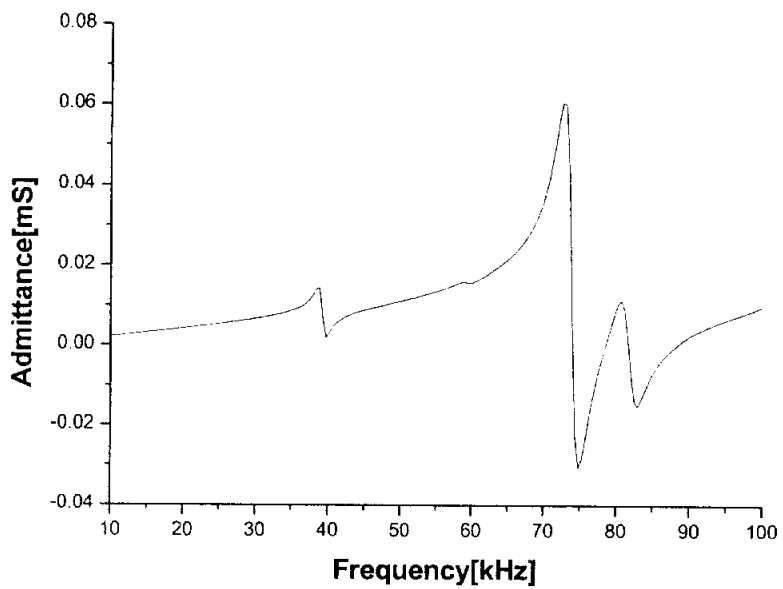


Fig. 12. Resonance characteristics of the piezoelectric transducer without GIC.

GIC(General Impedance Converter)로 구현한 인덕턴스 L_e 을 접속하고 변화시킴에 따라 공진주파수를 변화시켰다. 그림 13(a)는 전자 인덕턴스 L_e 변화에 따른 공진주파수 변화를 시뮬레이션으로 나타낸 것이고, 그림 b는 GIC로 구현한 인덕턴스 L_e 의 변화에 따른 공진주파수 변화를 측정된 결과이다. 이때, 시뮬레이션에서 사용한 물질상수의 값들을 표 2에 나타내었다. 약간의 차이는 있지만 대체로 비슷한 양상으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

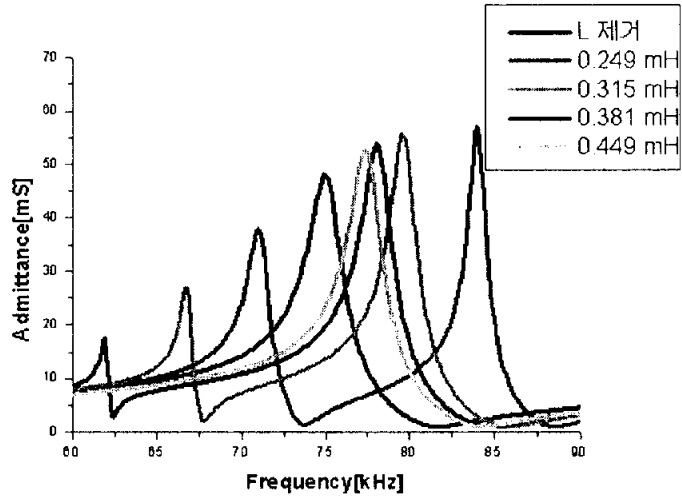
그림 14는 전자 인덕턴스 L_e 변화에 따른 공진주파수 변화를 시뮬레이션과 측정값으로 나타낸 것이다. 공진주파수의 변화 역시 비슷한 양상으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

다음은 전극 분할된 트랜스듀서의 지향성을 수조에서 측정했는데, 그 실험 장치도는 그림 15와 같다. 수중에서 73 kHz, 10 V_{pp}, carrier 5개의 Tone Burst파 신호를 트랜스듀서에 인가하고, Stepping Motor를 이용하여, 전극 분할된 트랜스듀서를 가로와 세로로 놓고 각각 주파수를 변화시키며, 1.8도씩 회전시키면서, 40 cm 떨어진 지점에서 Hydrophone (B&K 8103)으로 지향성을 측정하였다.

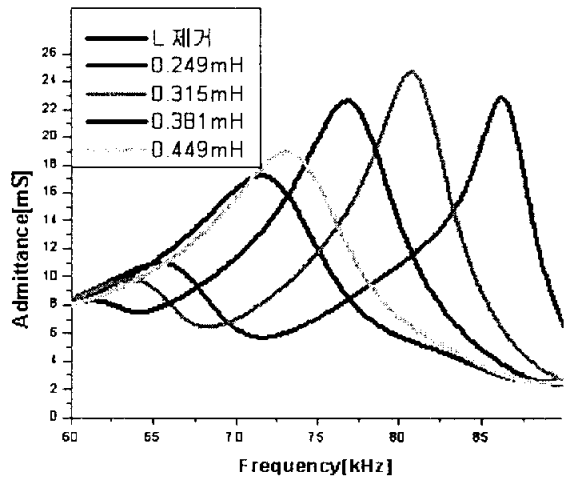
그림 16은 트랜스듀서의 지향성을 측정된 결과인데, 그림 16(a)의 결과는 트랜스듀서를 세로로 놓고, 주파수를 바꾸며 회전시킨 경우이다. 사용주파수에 따라 지향특성이 미소하게 변화하나 모든 경우에 대해 -3dB 빉폭은 약 80° ~ 83° 사이로 낮은 지향성을 나타내고 있다.

그림 16(b)의 결과는 (a)의 경우와 수직방향에 대한 지향성의 측정 결과로 -3 dB 빉폭은 약 26° ~ 30° 정도로 예리한 지향성을 나타내

고 있으며, 주파수가 낮아질수록 부엽의 준위가 낮아지고, 주엽의
빔폭이 증가함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 13. Variation of resonance frequencies with electronic inductance L_e .

(a) Theoretical results

(b) Experimental results

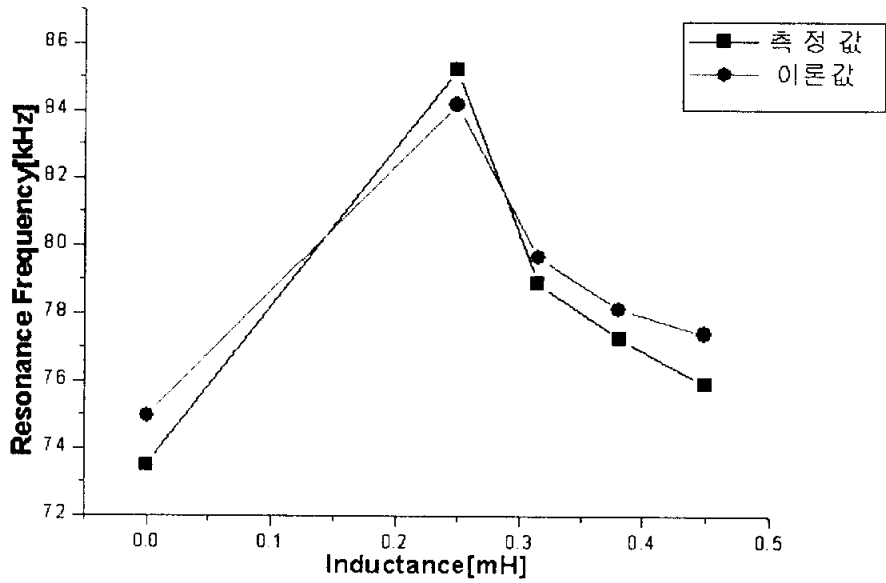


Fig. 14. Comparison of measurement with theoretical resonance frequencies variation.

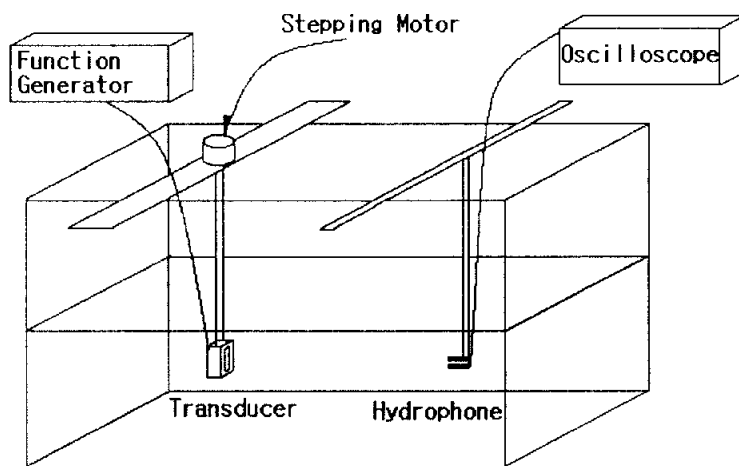
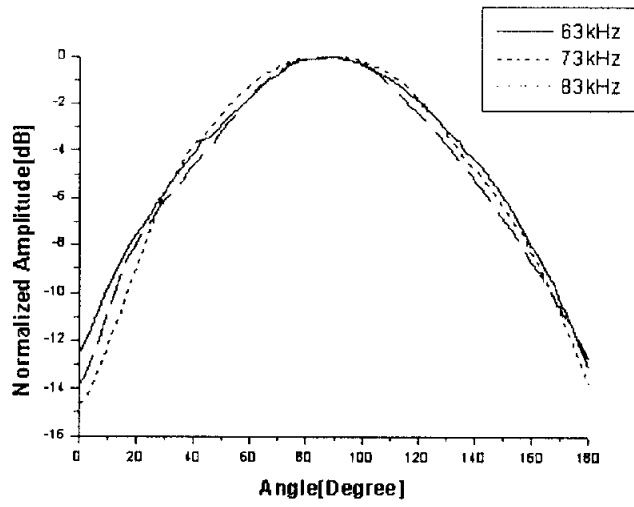
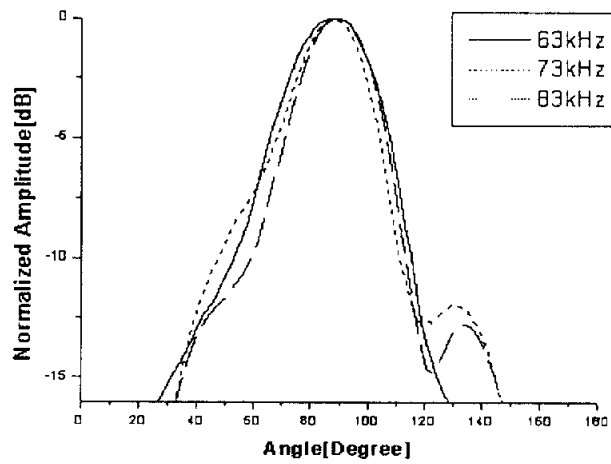


Fig. 15. Experimental setup for directivity measurement.



(a)



(b)

Fig. 16. Measurement results of the directivity pattern.

Table 2. Physical constants used in simulation

물질상수	값
밀도(ρ)	$7429 [kg/m^3]$
음속(c)	$2897 [m/s]$
압전외상수(d_{32})	$4.209 \times 10^{-10} [pC/N]$
유전율(ϵ)	$3.529 \times 10^8 [F/m]$

IV. 결론

본 연구에서는 초음파 압전 트랜스듀서를 제작하기 위해 높은 방사 효율과 무지향 특성을 갖는 횡진동모드를 이용한 초음파 트랜스듀서를 제작했고, 전극분할방법을 이용, 분할된 전기 단자에 인덕턴스를 부가하는 방법으로 주파수 가변 특성을 얻었다. 주파수 가변에 있어서는 GIC회로를 이용, 필요한 인덕턴스를 얻었으며, 제작된 트랜스듀서의 공진 및 지향 특성에 대해 고찰하였다.

인덕턴스로 사용하기 위해 제작된 GIC는 0.2 mH ~ 1.2 mH 사이에서 비교적 균일한 값을 얻을 수 있었고, 전극분할된 트랜스듀서의 기계단에 부가하여 가변시킨 결과, 인덕턴스가 없을 때의 기본공진 주파수가 73 kHz 인 것에 대해 약 86 kHz까지 연속적으로 가변이 가능함을 확인하였다.

끝으로 이렇게 제작된 트랜스듀서의 지향성을 확인하기 위해 측정 한 결과 -3 dB 빙폭이 80° 이상인 낮은 지향성을 나타내고 있음을 확인할 수 있어, 배열음원등에 이용할 경우 빔 형성에 유용하게 사용될 수 있음을 확인했다.

참고문헌

- [1] Y. Kikuchi : Ultrasonic Transducers, Corna Publishing Co. Tokyo, 1969.
- [2] Jindong Zhang; Hughes, W.J.; 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.
- [3] 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.
- [4] N. Chubachi and M. J. Kim. "A Transmission-Line Model Equivalent Circuit for Piezoelectric Transducers Including the Effect of Electrical Terminal Impedance, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 35, Part 1, No. 5B, 1996.
- [5] 김우준, 하강열, 김성부, 이종규, "다층 PZT 초음파 트랜스듀서에 대한 새로운 전송선로형 등가회로의 제안", 한국음향학회지, 제 14권, 제4호, pp. 29~37, 1995.
- [6] 中鉢 憲賢, 金 茂俊, "厚み縦振動モード圧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] 박송배, "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.

감사의 글

여러모로 많이 부족한 저에게 지난 2년 동안 많은 충고와 가르침을 주신 하강렬 교수님과 바쁘신 중에도 논문 심사와 지도를 해주신 김무준 교수님, 강갑중 교수님 도시홍 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러 이 논문을 위해 많은 도움을 주신 김정호, 김정순 선배님과 하나뿐인 동기 송인진군에게 감사드립니다. 끝으로 저를 위해 고생하시는 어머니께 이 논문을 바칩니다.