

공학석사 학위논문

압전 트랜스듀서의 특성제어 및 굴곡형 초음파 센서의 감도 개선에 관한 연구

지도교수 김 무 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



부경대학교 대학원

음향진동공학 협동과정

고 영 인

고영인의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 김 천 덕

위 원 공학박사 하 강 열

위 원 공학박사 김 무 준



목 차

Abstract	1
1. 서론	2
2. 압전 진동자의 품질 계수 제어를 위한 부임피던스 변환 (NIC) 회로의 적용	5
2.1 부임피던스 변환회로	5
2.2 품질계수 제어 원리	9
2.3 NIC 회로가 적용된 횡진동 압전 변환기의 PSpice Model	12
2.3.1 Modeling Methods	12
2.4 시뮬레이션 및 실험 방법	15
2.5 시뮬레이션 및 실험 결과	18
2.5.1 입력 전기 어드미턴스	18
2.5.2 진동면에서의 입자속도	21
3. 굴곡형 초음파 센서의 감도 개선에 응용	23
3.1 굴곡형 센서의 구조 및 동작 원리	25
3.2 굴곡형 초음파 센서의 제작	26
3.3 수신 감도 개선 원리	28
3.4 실험 방법 및 결과	31
3.4.1 입력 어드미턴스 및 진동속도 측정 방법	31
3.4.2 입력 어드미턴스 및 진동속도 측정 결과	33
3.4.3 수신감도 측정 방법	36
3.4.3 수신감도 측정 방법 결과	37
4. 결 론	41
참고문헌	43

A Study for Characteristic Control of Piezoelectric Transducer and Sensitivity Improvement of Flexural-Type Ultrasonic Sensor

Young-In, Ko

*Interdisciplinary Program of Acoustic and Vibration Engineering, Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

The mechanical quality factor of a piezoelectric vibrator with divided electrodes is improved by adding a NIC (negative impedance converter) circuit. However, with respect to design and performance analysis, more study about the coupling effect of the mechanical characteristics of the vibrator and the electrical characteristics of the NIC is needed.

In this paper, we newly propose a simulation model combining the modified Redwood equivalent circuit for the vibrator and the NIC circuit. The model is based on a simulation model for a single element piezoelectric vibrator, and a popular circuit simulation program of the PSpice is employed. The output mechanical characteristics on the acoustic port can be obtained by using the model. We apply the proposed model to analyze the electro-mechanical characteristics of a transverse mode piezoelectric vibrator with divided electrodes and the NIC circuit, and investigate its efficiency by comparing with experimental results. And also, by adopting the method to a flexural-type piezoelectric sensor, the receiving sensitivity of the sensor can be improved, and its capability is confirmed by experiments.

1. 서론

오늘날 초음파는 1921년경 Langevin이 초음파 측심기(測深機)를 만들어 실용적인 초음파를 발생시킨 이후로 과학과 산업의 다양한 분야에서 넓게 이용되고 있으며, 초음파 에너지의 물리적, 화학적, 생물학적 효과들을 직접적으로 이용하여 지난 수 십년 동안 수중 소나, 탄성 표면파 필터, 비파괴검사용 센서, 초음파 모터, 초음파 세척기, 의료용 초음파 진단기 등 다양한 응용분야에 적용되어지고 있다[1].

전기 음향 변환기인 초음파 트랜스듀서는 초음파를 발생시키고 수신하는데 많이 사용되고 있는데, 특히 공기 중에서 일반적으로 사용되고 있는 굴곡 타입 압전 초음파 센서는 구조가 간단하고 성능이 좋으므로 여러 분야에 응용되고 있다. 굴곡형 압전 센서에 사용되고 있는 소자는 압전체 층과 탄성체 층이 접합된 형태를 가지는데, 접합 구조에 따라 압전 유니몰프 혹은 압전 바이몰프라고도 불린다. 이러한 압전 유니몰프와 바이몰프는 큰 진동 변위를 발생시키므로 저주파 영역에서 액츄에이터 소자로서 많이 연구되어져 왔고 큰 진동 변위를 발생시킬 수 있다는 장점에 기인하여 굴곡형 압전 소자들은 기중 초음파 센서에 응용되고 있는데, 특히 거리 측정용 센서 및 기계의 자동 제어용 센서로 많이 사용되고 있다. 그런데 이러한 굴곡형 압전 소자는 일반적으로 낮은 전기 기계 결합계수를 가지고 있기 때문에 압전체와 탄성체간의 탄성율비 및 두께 비를 조정함으로써 전기기계 결합계수를 개선하여 진동 변위를 개선시키는 연구들이 수행되고 있으며[2]-[3], 무늬(Moonie)나 심벌(Symbol)형과 같이 기하학적인 변화에 의해 좀 더 큰 변위를 발생시킬 수 있는 소자들도 개발되어 지고 있다[4]-[6]. 하지만 이러한 탄성률 및 두께

비의 변화에 의한 특성 개선은 재료 선택의 한계를 가지고 있기 때문에 다소 제한적이라고 할 수 있고, 기하학적인 변화에 의해 특성이 개선된 소자들은 구조성형의 어려움으로 인해 재현성을 가지는 소자의 대량생산이 어렵기 때문에 아직까지는 실제 산업현장에서 실용화되지 못하고 있다.

한편, 초음파 트랜스듀서의 재료로 많이 이용되고 있는 PZT와 같은 압전 세라믹 진동자는 좋은 전기 기계 변환 효율을 가지고 있으나 전기 및 기계적 성능의 향상을 위해 높은 품질계수가 요구되어지는 경우가 있다. 이에 Y. Tomikawa 등에 의해 횡진동 모드의 압전 진동자에 연산증폭기를 이용한 Negative Impedance Converter(NIC) 회로를 적용하여 압전 진동자의 품질계수를 향상 시켜서 전기 및 기계적 특성을 실험적으로 개선시킨 바가 있다 [7]-[8]. 이 방법은 연산증폭기를 작동시키기 위한 별도의 직류전원이 필요하다는 단점에도 불구하고 압전 진동자의 전기 기계 결합계수 및 품질 계수를 크게 개선시켰다. 그러나 진동자에 적용되는 NIC회로를 구성하는 능동소자인 연산증폭기는 그 특성이 이상적이지 않고 사용하는 연산증폭기의 종류에 따라서 회로의 특성이 변화하기 때문에 진동자에 적용할 수 있는 실제적인 NIC회로의 설계 방법이 확립되어 있지 못한 실정이다. 또한 기계체인 압전 진동자와 전자회로인 NIC회로가 결합된 형태에 대한 통괄적인 특성 해석이 충분하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 범용 회로 해석 프로그램인 PSpice를 도입하여 압전 진동자의 전송선로형 등가회로에 시판되는 연산증폭기의 실제적인 특성이 고려된 NIC 회로가 적용된 모델을 제안하였다[9]. 제안된 모델에서는 압전 진동자의 기계단에 대한 출력 특성의 해석이 가능하므로 횡진동 모드의 압전 진동자의 품질계수를 제어하기 위해 적용하는 NIC 회로의 기초적인 설계

방침을 확립할 수 있고 진동자와 NIC회로가 결합된 형태에 대한 전기 및 기계적 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 비교함으로써 그 유용성을 확인하였다. 또한 이러한 연구를 굴곡 타입 센서의 특성 개선에 응용하기 위하여 굴곡 진동 소자의 특성을 개선하기 위해 사용되어져 왔던 기존의 방법-압전체와 탄성체간의 탄성율비 및 두께 비의 조정, 기하학적인 변형 등-대신에 NIC 회로를 적용하여 굴곡 진동 소자의 진동성능을 개선시킴으로써 굴곡 타입 초음파 센서의 감도를 개선하였다. 이러한 목적에 기인하여 굴곡 진동 소자의 물성치비에 따른 특성의 변화는 고려하지 않고, 굴곡 진동 소자를 전기적인 R, L, C 소자로 구성된 단일 진동자로 간주하여 여기에 적합한 NIC회로를 설계한 후 실험을 통해 NIC 회로를 적용하지 않은 경우의 굴곡 타입 센서의 수신 특성을 NIC 회로를 적용한 센서의 특성과 비교함으로써 본 연구의 유용성을 확인하였다.

2. 압전 진동자의 품질 계수 제어를 위한 부임피던스 변환(NIC) 회로의 적용

본 장에서는 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 NIC 회로를 압전 진동자에 적용하여 진동자의 품질계수를 개선하기 위한 방법으로 먼저 NIC 회로의 구조 및 동작원리에 대하여 고찰하고 이를 횡진동 모드의 압전 진동자에 적용하였을 경우 압전 진동자의 품질계수가 개선됨을 이론적으로 고찰하였다.

또한 범용 회로 해석 프로그램인 PSpice를 사용하여 전자회로인 NIC 회로와 기계회로인 압전 세라믹 진동자의 등가회로가 결합된 모델에 대한 해석가능성을 검토하기 위해 전기단에서의 입력 어드미턴스 특성과 기계단에서 입자 속도 특성을 시뮬레이션 하고, 이러한 시뮬레이션을 바탕으로 NIC 회로를 설계한 후 진동자의 전기 및 기계적인 특성을 측정하고 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 본 연구의 유용성을 확인하였다.

2.1 부임피던스 변환회로

반전과 비반전 입력이 모두 연산귀환연결된 Fig. 1 (a)의 연산증폭기를 고려해보면 키르히호프의 전압 등식으로부터 다음 세가지 식을 얻는다.

$$v_o = a(v_1 - v_2) \quad (1)$$

$$v_1 - i_1 r_1 + i_2 r_2 - v_2 = 0 \quad (2)$$

$$v_1 - i_1 r_1 - v_o = 0 \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)에 의해 다음의 관계를 얻는다.

$$v_o = a(v_1 - v_2) = a(i_1 r_1 - i_2 r_2) = v_1 - i_1 r_1 \quad (4)$$

$$i_1 r_1 \left(1 + \frac{1}{a}\right) - \frac{v_1}{a} = i_2 r_2 \quad (5)$$

일반적으로 연산 증폭기의 이득 a 가 매우 크다는 조건하에서 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 \quad (6)$$

$$i_1 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right) i_2 \quad (7)$$

식 (2)의 관계에 의해서

$$v_1 = v_2 \quad (8)$$

여기서 임피던스 Z_2 가 출력단에 연결되었을 때의 외관상의 입력 임피던스를 고려 해 보면 Fig. 1 (b)에 의해 임피던스 Z_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_2 = - \frac{v_2}{i_2} \quad (9)$$

입력 임피던스는 식 (6), (7)과 (8)에 의해

$$Z_1 = \frac{v_1}{i_1} = \frac{v_2}{r_2 i_2 / r_1} \quad (10)$$

$$Z_1 = - \frac{r_1}{r_2} Z_2 \quad (11)$$

식 (11)에 의하면 이 회로의 외관상 입력 임피던스는 출력단에 연결된 임피던스의 음의 값을 갖게 된다. 즉, 이 회로는 Negative Impedance Converter(NIC)가 된다[10].

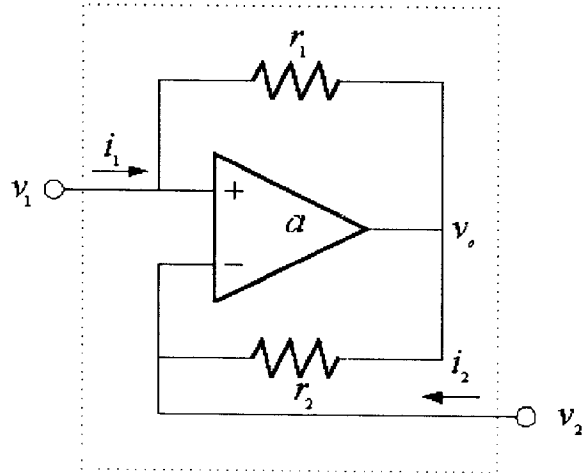


Fig. 1 (a) Negative impedance converter(NIC) circuit

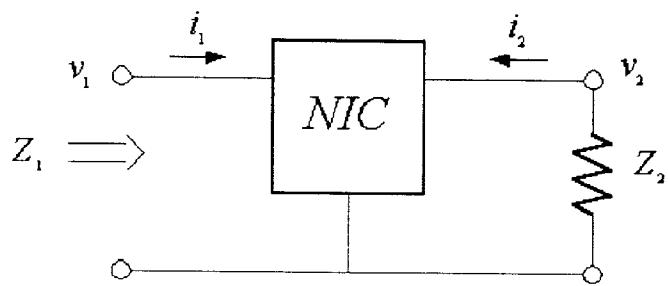


Fig. 1 (b) Block diagram of NIC circuit

2.2 품질계수 제어 원리

NIC 회로를 적용하기 위한 전극이 분할된 횡진동 모드의 압전 세라믹 진동자와 등가회로를 Fig. 2에 나타내었다. 1-1' 단은 구동 전원과 접속되는 입력단이며, 2-2' 단은 NIC 회로와 접속되어 압전 세라믹 진동자의 품질계수를 제어하는 제어단을 나타낸다. 진동자의 제어단에 적용하기 위한 NIC 회로를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 이 회로의 입력 어드미턴스는 식 (12)와 같다.

$$Y_{IN} = -\frac{R_1}{R_2} \left\{ j\omega C_s + \frac{1}{R_s} \right\} \quad (12)$$

식 (12)에서 R_1 과 R_2 를 같은 값으로 두면 NIC회로의 입력 어드미턴스는 $-j\omega C_s - (1/R_s)$ 로 표현되기 때문에 이 negative elements를 등가 소자로 표현하면 Fig. 4 (b) 점선 부분과 같이 $-Cd'$ 과 $-R'$ 이 진동자에 병렬 연결된 형태로 나타난다. 그러므로 NIC 회로의 negative elements 가 진동자의 공진시의 저항성분 R 과 제동용량 $Cd2'$ 을 제거함으로써 진동자의 품질계수는 식 (13)과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = \frac{\omega L}{R - R'} \quad (13)$$

따라서 식 (13)으로부터, NIC 회로의 negative elements를 적절히 조정함으

로써 진동자의 품질계수를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

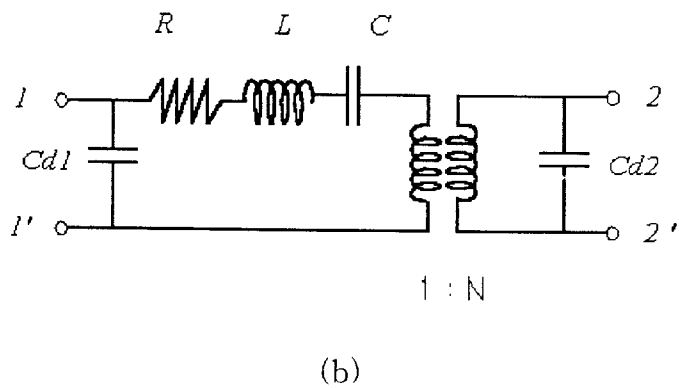
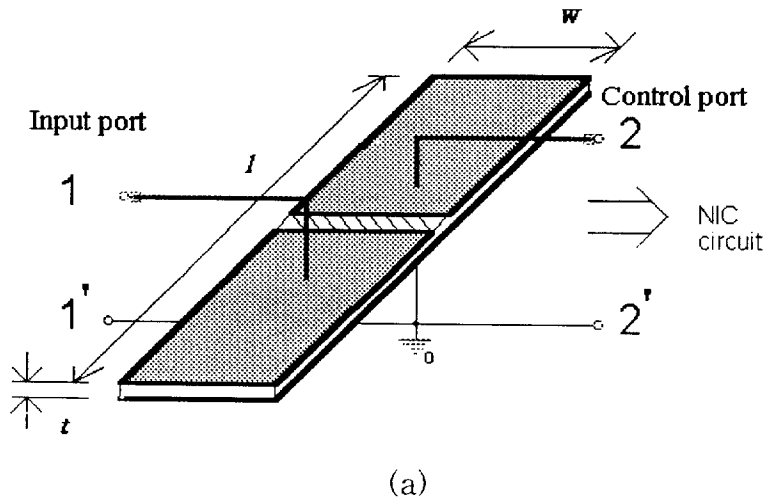


Fig. 2. Transverse mode vibrator with divided electrodes

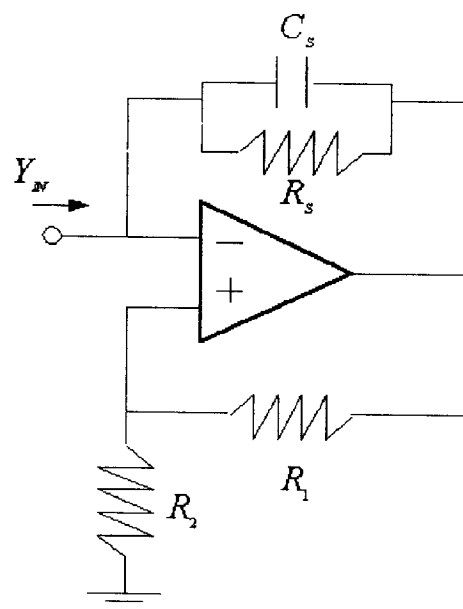


Fig. 3 Construction of NIC circuit

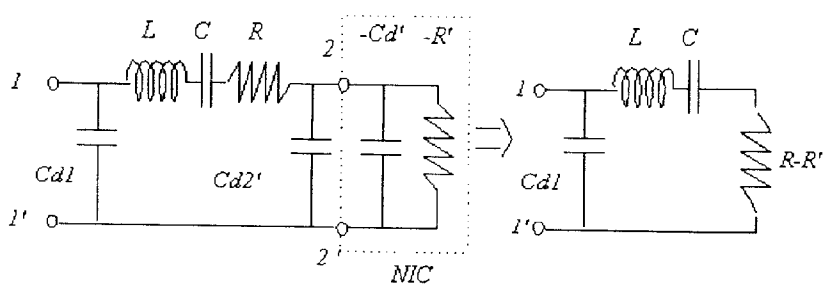


Fig. 4 Principle of quality factor control

2.3 NIC회로가 적용된 횡진동 압전 트랜스듀서의 PSpice Model

2.3.1 Modeling Methods

압전 진동자의 등가회로는 Redwood의 전송선로 모델을 기초로하여 PSpice 모델에서는 손실있는 전송선로로 표현할 수 있다[11]-[12]. 전송선로는 Fig. 5과 같이 단위 길이당 R, L, C, G 와 같은 집중 정수 요소로 나타낼 수 있는데 전송선로를 따라 진행하는 정현파의 전파는 특성 임피던스 Z_o 와 전파상수 γ 의 복소수 형태로 기술할 수 있다[13].

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (15)$$

여기서, $\omega = 2\pi f$ 이고 γ 의 실수부는 전송선로의 감쇠 상수를 나타내며, 허수부의 β 는 위상 속도 v_p 를 나타내므로 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (16)$$

고주파 근사($G=0, \omega L \gg R$)를 사용하면 식 (14)와 (15)는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$Z_o \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (17)$$

$$v_p \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (18)$$

여기에서 전송선로의 특성 임피던스 Z_o 에 압전 진동자의 특성 임피던스 $\rho v_p A$ 를 대입함으로써 선로 정수 L , C , G 는 각각 $L = \rho A$, $C = 1/(v_p^2 L)$, $G = 0$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 ρ 는 압전 진동자의 밀도, A 는 진동 방향에 수직인 면적, v_p 는 위상속도이다. 그리고 R 값은 공진시에 측정된 저항값을 사용함으로써 단일 공진 모드에 대한 최적의 근사된 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 전극이 2개로 분할된 형태의 압전 진동자에 NIC회로가 적용된 것을 나타내었다. 압전 진동자의 입력단과 전극이 분할된 부분, 제어단을 각각 전송선로로 표현하여 PSpice 모델로 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기에서 점선 부분이 NIC회로를 나타내며 진동자의 제어단에 병렬로 접속하게 된다.

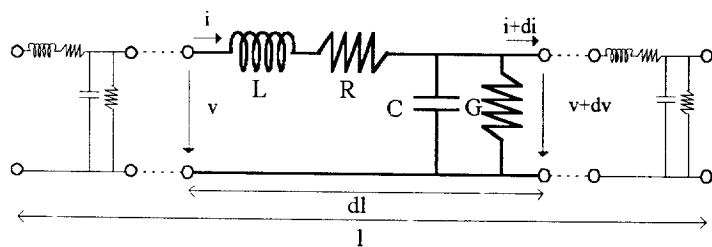


Fig. 5 Lumped segment of the lossy transmission line

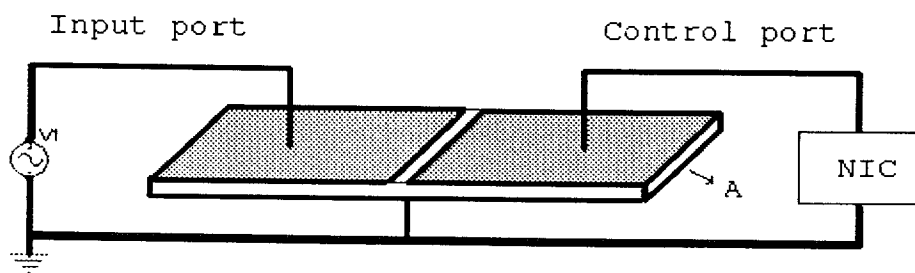


Fig. 6 Piezoelectric vibrator with NIC circuit

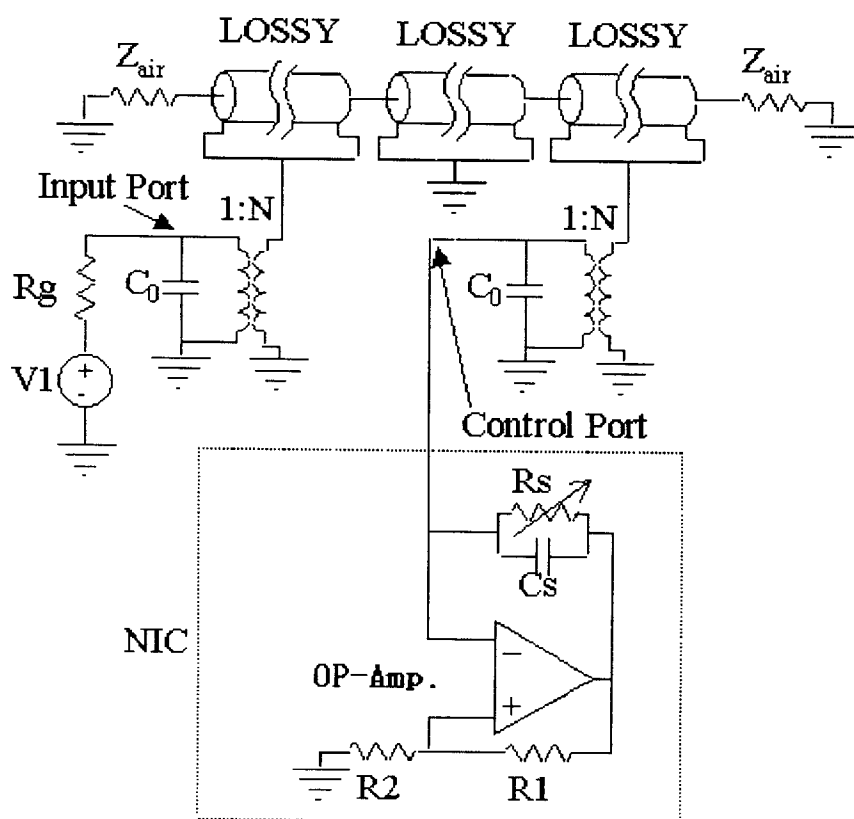


Fig. 7 PSpice implementation of piezoelectric vibrator with NIC circuit

2.4 시뮬레이션 및 실험 방법

시뮬레이션에서는 구동전원으로 1V인 교류전원을 인가하고 Fig. 7의 NIC 회로의 R_s 를 바꿔가면서 41kHz에서 43kHz까지 주파수 sweep을 하였다. 이때 입력단에 나타나는 전압과 전류의 비로 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 시뮬레이션 하였다. 또한 전기 음향 상사에 의해 공기의 음향 임피던스 Z_{air} 에 흐르는 전류의 변화를 시뮬레이션 함으로써 Fig. 6의 진동면 A의 진동속도를 알 수 있다.

실험에서는 Fig. 6의 제어단에 접속된 NIC 회로의 R_s 를 변화시켜 가면서 입력 어드미턴스 특성과 진동면 A에서의 진동속도를 Network analyzer (RS3754A)와 Laser vibrometer (AT3500)로 각각 측정하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 입력 어드미턴스와 진동속도에 대한 실험 장치도를 나타낸 것이다.

시뮬레이션과 실험에서 사용된 압전 진동자의 물질 상수는 Table I과 같다. Table I의 상수값들을 이용하여 식 (17)과 (18)로부터 전송선로의 L , C 값은 각각 $L=15.75$ mH, $C=7.823$ μ F 으로 얻어졌고, 등가회로에 사용된 다른 상수 값들은 Table II에 나타내었다. 그리고 R_g 는 전원의 내부저항을 나타내고 Z_{air} 는 공기의 음향 임피던스를 나타내며 C_o 와 N 은 각각 진동자의 제동용량과 전기기계 변환상수를 나타낸다.

Table I. The constants of piezoelectric vibrator

Items	Values
Center frequency	41.98 kHz
Density	7176.57 kg/m ³
Phase velocity	2843.08 m/s
Length	33.90 mm
Width	6.0 mm
Thickness	0.35 mm

Table II. Constants used in PSpice simulation

Items	Values
R _g	50 Ω
C _o	10 nF
C _s	12 nF
Z _{air}	1.469 m Ω
N	0.008
R ₁ , R ₂	15 k Ω
R	41 Ω

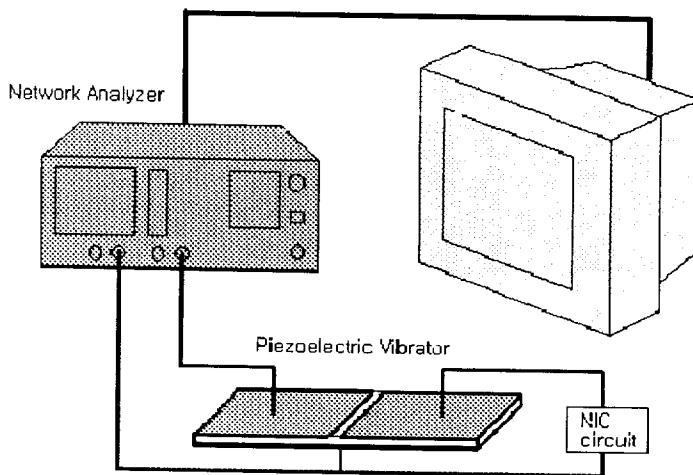


Fig. 8 Schematic of input admittance measurements

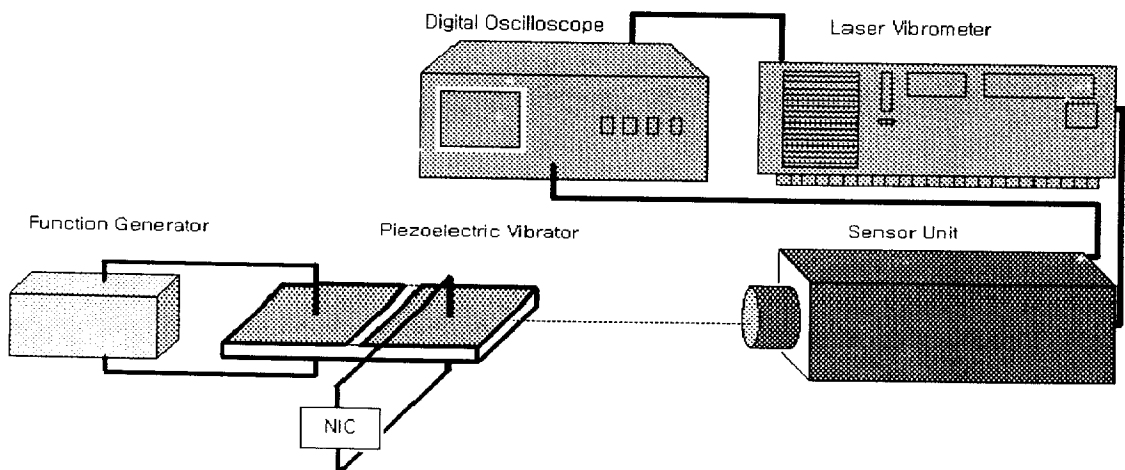


Fig. 9 Schematic of vibration velocity measurements

2.5 시뮬레이션 및 실험 결과

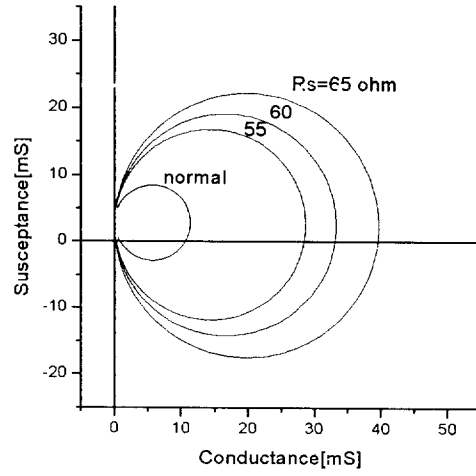
2.5.1 입력 전기 어드미턴스

Fig. 6에 나타낸 진동자의 입력 어드미턴스 특성에 대한 시뮬레이션과 실험 결과를 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다. Fig 10의 결과에서는 R_s 의 변화에 따라 입력 어드미턴스가 증가 됨을 보이고 있다. 이것은 진동자의 등가 저항 성분이 NIC 회로에 의해 감소됨을 의미하며 따라서 압전 진동자의 기계적 품질계수가 커짐을 의미한다. 그런데 Fig 11의 실험 결과에서 보여지는 바와 같이 R_s 가 110Ω 이상이 되면 입력 어드미턴스의 컨덕턴스 성분이 음의 값 이 됨을 보이고 있는데, 이것은 NIC 회로의 부임피던스가 진동자의 등가 임피던스 보다 커졌기 때문이다. 여기서 Normal은 NIC회로가 적용되지 않은 경우를 의미한다.

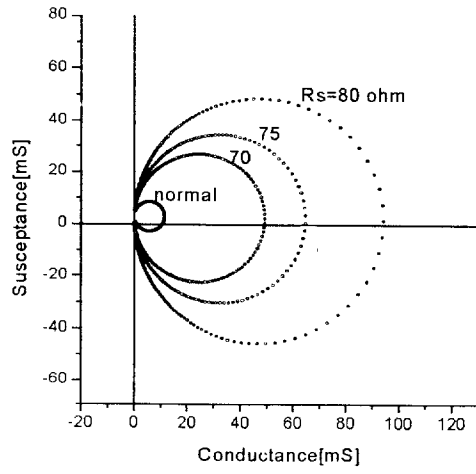
Table III은 실험 결과로부터 NIC 회로를 적용하여 얻은 품질계수의 최대치와 적용하지 않은 경우의 품질계수를 나타내었다.

Table III. Comparison of the quality factor

	Origin value (without NIC)	Maximum value (with NIC)
Quality factor	23.2	1961

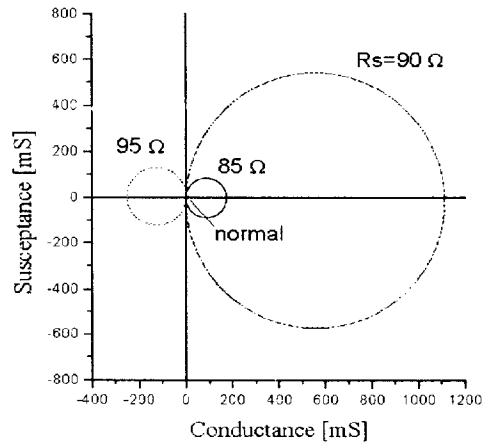


(a) Simulation

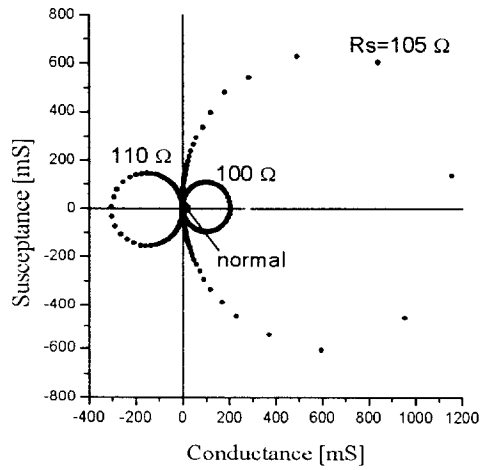


(b) Experiment

Fig. 10 Admittance loci with change of R_s for the two-electrodes vibrator



(a) Simulation



(b) Experiment

Fig. 11 Admittance loci with change of R_s for the two-electrodes vibrator

2.5.2 진동면에서의 입자속도

Fig. 6 (a)의 진동면 A에서의 입자속도의 규격화된 시뮬레이션과 실험 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 v_0 는 Normal일때의 입자속도를 나타내고 이때의 입자속도 v_0 는 시뮬레이션과 실험에서 각각 81.19 mm/s, 29.98 mm/s 였다. 실험 및 시뮬레이션 결과로부터 NIC 회로의 R_s 가 커질수록 즉, 압전 진동자의 등가 저항성분이 작아질수록 진동면에서의 입자속도가 커지는 것을 알수 있다. 또한 실험에 비해 시뮬레이션에서의 입자속도가 크게 나타나는데, 이것은 실제 측정시에 진동자의 경계조건이 시뮬레이션에서 고려되지 않았기 때문이라고 생각된다. 그러나 입자속도의 변화경향에 대한 시뮬레이션과 실험의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

NIC회로가 적용된 횡진동 압전 진동자의 전기 및 기계적 특성에 대한 시뮬레이션과 실험 결과로부터 본 연구에서 제안된 전자회로와 기계회로가 결합된 PSpice 해석모델의 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 시뮬레이션 모델을 바탕으로 설계한 NIC회로의 부임피던스를 적절히 선택하여 압전 진동자의 품질계수를 제어함으로써 진동자의 전기 및 기계적인 특성을 제어할 수 있음을 확인하였고 그 결과 진동자의 품질계수가 NIC회로를 적용하지 않은 경우에 비하여 약 80배 이상 증가함을 확인할 수 있었다.

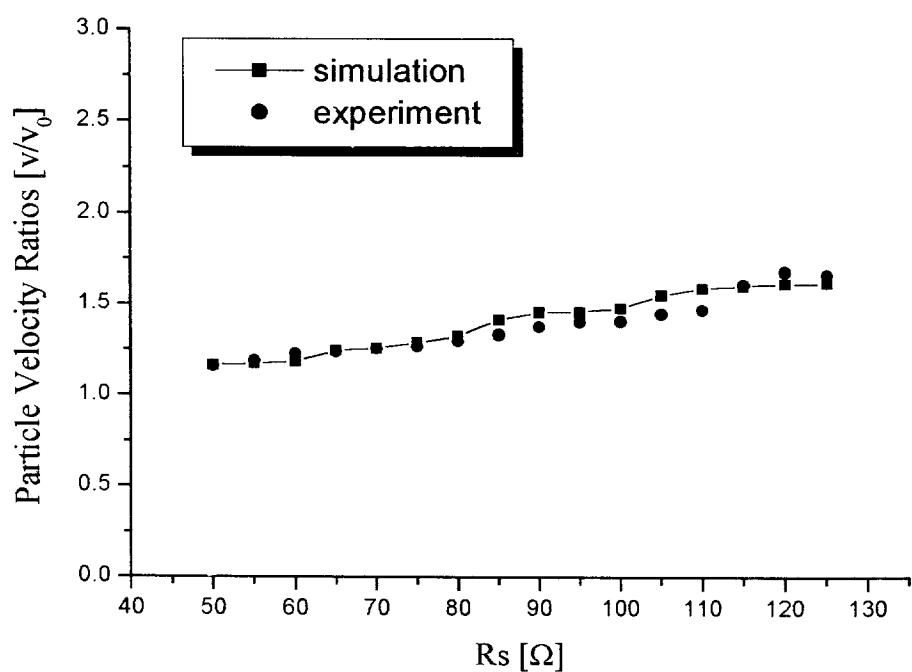


Fig. 12 Particle velocity on vibrating surface

3. 굴곡형 초음파 센서의 감도 개선에 응용

일반적으로 NIC 회로는 연산증폭기의 입력 전압의 한계 범위에서만 정상적으로 동작하기 때문에 압전 진동자의 입력 전압에 의해 기계적으로 구동된 진동자의 출력단의 전압이 연산증폭기의 입력 전압 한계 범위를 벗어나면 정상적으로 동작하지 않는다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 초음파 센서가 외부 음압을 수신시에는 진동자에 유기되는 전압이 미소하다는 점에 착안하여 본 연구에서는 횡진동 모드의 압전 진동자에 NIC회로를 적용하여 전기 및 기계적 특성을 개선 시키는 방법을 굴곡형 초음파 센서에 적용하여 굴곡형 초음파 센서의 수신감도를 개선하고자 하였다. 따라서 본 장에서는 먼저 굴곡형 센서의 구조 및 동작 원리에 대하여 기술하고, 실제 굴곡형 초음파 센서를 제작한 후 NIC 회로가 센서에 적용되어 수신 감도가 개선됨을 이론적으로 고찰하였다. 또한 굴곡 모드에 대한 일반적인 등가회로는 아직 제시된 바가 없는 관계로 본 연구에서는 굴곡 진동자를 단일 진동자로 간주하여 전기적인 등가 회로로 표현한 후 그 특성을 시뮬레이션 하여 NIC 회로를 설계하였다. 그리고 제작한 굴곡형 초음파 센서의 입력 어드미턴스 및 입자 속도 특성과 수신 감도특성을 NIC 회로를 적용하지 않은 경우와 비교 함으로써 본 연구의 유용성을 확인하였다.

3.1 굴곡 타입 기중 초음파 센서의 구조 및 동작 원리

일반적인 굴곡형 기중 초음파 센서는 Fig. 13과 같이 구성되어 있다. 이러한 센서의 특성은 지지 방법이나 케이스의 모양, 보호 및 지향성 조정용 캡에 따라 영향을 받지만 기본적인 성능은 음원 소자로 사용되는 유니몰프형의 굴곡형 압전 소자의 특성에 따라 정해진다.

압전 유니몰프는 Fig. 14에서 보여지는 것처럼 횡진동의 압전 세라믹에 금속탄성체가 접합된것으로 정전압 인가시 압전 세라믹이 길이 방향으로 팽창하게 되는데 서로 접합되어 있는 금속과 압전 세라믹의 탄성률비 및 두께비의 차이에 의해 Fig. 14 (a)와 같이 팽창 하게 되고 역전압 인가시에는 Fig. 14 (b)와 같이 수축하게 된다. 따라서 교류전압을 인가함으로써 수축과 팽창을 반복하게 되어 음파를 발생 시키게 된다[14]-[15].

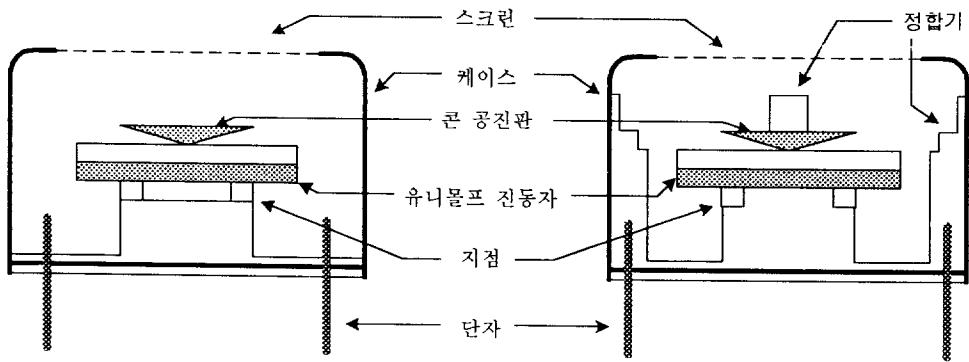


Fig. 13 Construction of ultrasonic sensors

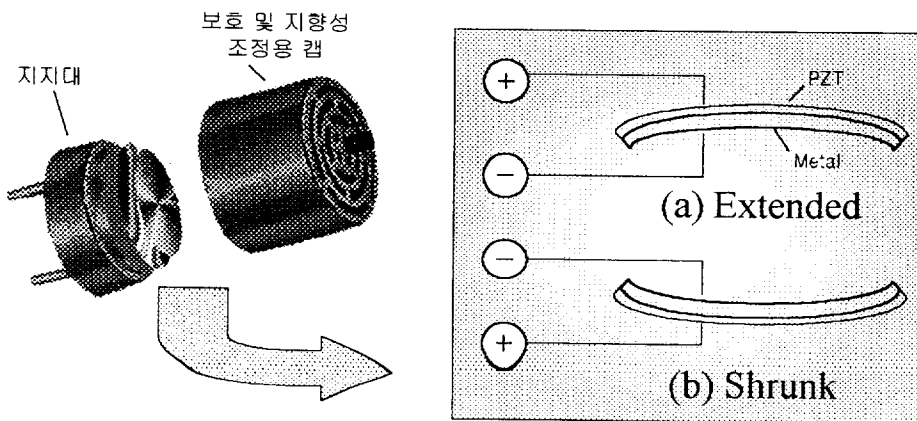


Fig. 14 Ultrasonic sensor and flexural mode of unimorph

3.2 굴곡 타입 초음파 센서의 제작

본 연구에서 사용한 압전 진동자는 Fig. 15에 보여지는 바와 같이 공진 주파수가 40kHz인 굴곡 타입 디스크이며 PZT와 stainless steel로 구성되어 있다. 진동자의 전극은 노드지점을 기준으로 분할되었고, 분할된 부분의 내부와 외부를 각각 입력단과 제어단으로 구성 하였으며, 제어단 2-2'단에 NIC 회로가 연결된다. 그리고 실제 초음파 센서에 적용하기 위하여 Fig. 15에서 보여지는 것처럼 진동자의 노드 부분을 지지대에 부착하였으며, 이것의 기본 공진 모드에 대한 등가회로는 Fig. 16과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 Table IV는 전극이 분할 된 초음파 센서의 등가 회로 상수를 나타낸 것이다.

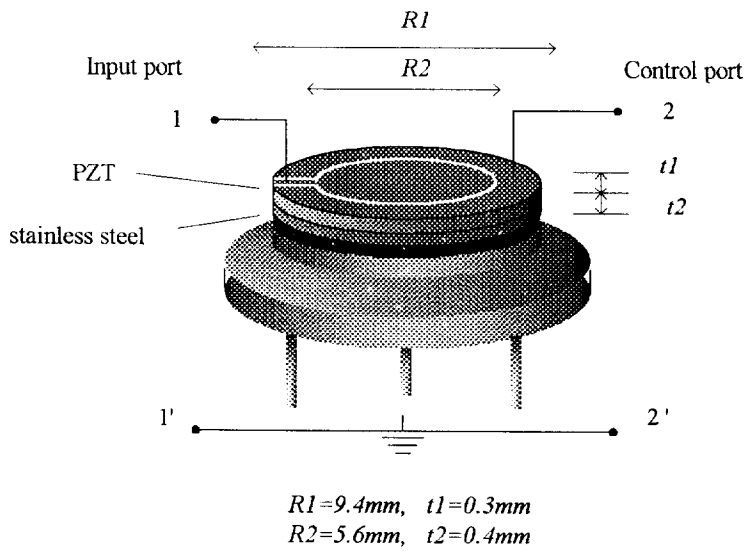


Fig. 15 Flexural-type ultrasonic sensor

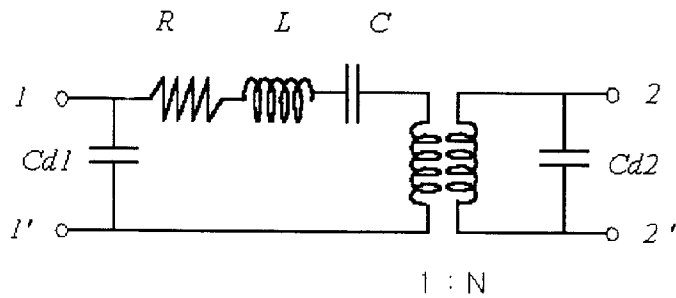


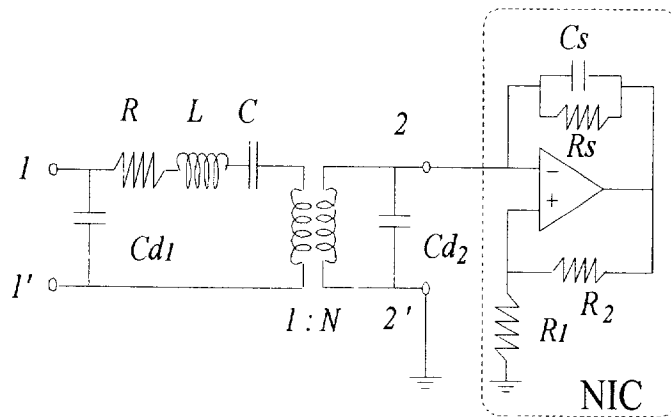
Fig. 16 Equivalent circuit of ultrasonic sensor

Table IV. Equivalent circuit constants of ultrasonic sensor with separated electrodes.

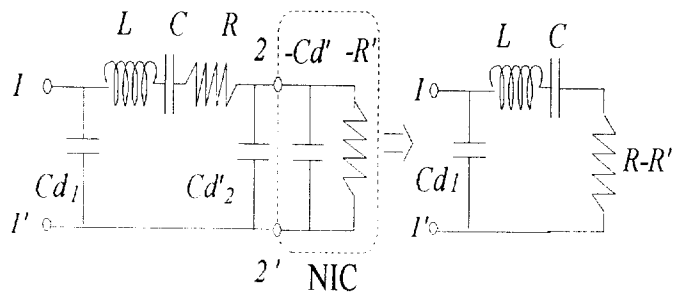
Items	Values
Center frequency f_0	43.03 kHz
Equivalent resistance R	2.61 $k\Omega$
Equivalent inductance L	342.17 mH
Equivalent capacitance C	39.20 pF
Damped capacitance $Cd1$	1.02 nF
Damped capacitance $Cd2$	816.77 pF
Transformer ratio N	3.39

3.3 수신 감도 개선 원리

Fig. 17은 굴곡 타입 센서의 2-2' 단에 NIC 회로가 병렬로 접속된 형태를 낸다. 앞서 횡진동 압전 진동자에서 논의된 바와 마찬가지로 Fig. 17 (a)의 2-2' 단에서 NIC 회로의 입력 어드미턴스는 $Y_{IN} = -(R_1/R_2)\{j\omega C_S + (1/R_S)\}$ 으로 나타나고, R_1 과 R_2 를 같은 값으로하여 NIC회로를 구성하면 Fig. 17 (b)에서와 같이 negative elements가 센서의 2-2' 단에 병렬로 접속된 형태로 나타낼수 있으며 결과적으로 Fig. 17 (b)에서 센서의 품질계수는 $Q = \omega L / (R - R')$ 으로 표현된다. 따라서 NIC 회로에 의한 $-R'$ 을 조절함으로써 굴곡 타입 센서의 품질계수를 개선할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 17 Equivalent circuits for sensitivity improvement

한편, 일반적으로 센서의 수신 감도 S_R 은 정의에 따라 다음과 같이 주어진다[1].

$$S_R = \frac{\alpha A S}{C s_I} \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + \frac{\Omega^2}{Q^2}}} \quad (19)$$

여기서 $\Omega = \frac{\omega}{\omega_{oI}}$

$\omega_{oI} = \sqrt{\frac{s_I}{m}}$: 전류 I 가 일정할 때의 각속도

$$Q = \frac{\omega_{oI} m}{r} = \frac{s_I}{\omega_{oI} r}$$

그리고 A , S , C , α , s_I 는 각각 힘계수, 수신면적, 제동용량, 반사계수, stiffness를 나타낸다. 이때 외부 음압이 없는 정상상태에서의 수신 감도는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{Ro} = \frac{A_o S}{C s_{Io}} \quad (20)$$

따라서 공진시의 수신 감도 S_R 은 식 (21)와 같이 쓸 수 있다.

$$S_R = S_{Ro} \cdot \alpha \left(\frac{s_{Io}}{s_I} \right) \left(\frac{A}{A_o} \right) Q \quad (21)$$

결국, NIC 회로를 적용하여 굴곡 타입 진동자의 공진시의 저항성분을 제거하여 품질계수 Q 를 크게 함으로써 센서의 수신감도를 개선시킬 수 있다.

3.4 실험 방법 및 결과

3.4.1 입력 어드미턴스 및 진동속도 측정 방법

Fig. 15에서와 같이 전극이 분할 된 굴곡 타입 초음파 센서의 입력어드미턴스를 제어단을 단락시킨 상태에서 Network Analyzer로 측정하였고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 시뮬레이션을 기초로 하여 설계한 NIC 회로를 Fig. 18과 같이 굴곡 타입 초음파 센서의 제어단에 연결하고 NIC 회로의 R_s 를 변화시켜 가면서 입력 어드미턴스를 측정하고 Normal일때와 비교하였다.

Normal은 전극을 분할하지 않은 경우와 마찬가지로 입력단과 제어단을 모두 구동하는 것을 의미한다. 이 때 주파수 범위는 40~45kHz이고 구동 전압은 $1V_{p-p}$ 였다. NIC 회로에 사용된 연산증폭기는 OP27G이고 여기에 각각 +12,-12V의 DC 전원이 인가 되었다. R_1 , R_2 는 $15k\Omega$ 의 같은 값으로 두고 C_s 는 $1nF$ 으로 하였다.

NIC회로가 연결된 굴곡형 센서의 진동속도는 Fig. 19과 같이 Laser Vibrometer를 사용하여 진동면의 중심에서 측정하였다. 이때 NIC회로의 R_s 값은 어드미턴스원이 가장 커졌을 때의 값으로하고 신호 발생기로부터 44.5kHz의 정현파를 인가하고 구동 전압을 0.1-1V까지 변화시켜 가면서 진동 속도를 측정하고 Normal 일때와 비교하였다.

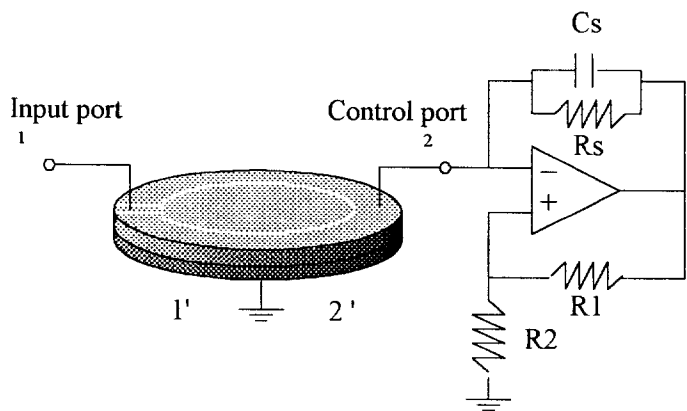


Fig. 18 Flexural-type vibrator with NIC circuit

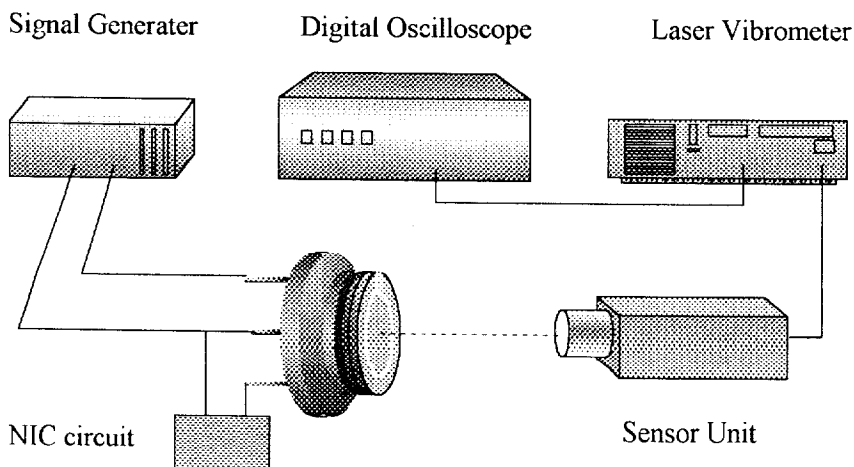


Fig. 19 Measurements of the particle velocity

3.4.2 입력 어드미턴스 및 진동속도 측정 결과

Fig. 20은 전극이 분할된 굴곡 타입 초음파 센서의 제어단을 단락 시킨 상태에서 측정한 입력 어드미턴스의 실험 결과와 등가회로의 제어단을 단락 시킨 상태에서의 시뮬레이션 결과로 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 21 (a)와 (b)는 NIC회로가 연결된 굴곡 타입 초음파 센서의 입력 어드미턴스 특성과 진동속도에 대한 실험결과를 나타낸 것으로 Fig. 21 (a)에 보여지는 것처럼 NIC회로의 R_s 가 증가함에 따라 입력 어드미턴스 원이 Normal에 비해 약 3배 정도 커지는 것을 알 수 있다. 그런데 R_s 가 $10.8k\Omega$ 이상이 되면 회로가 발진하기 때문에 NIC회로의 C_s 값을 변화시켜야 한다.

Fig. 21 (b)는 NIC회로의 R_s 가 $10.8k\Omega$ 일때 구동전압을 변화시켜 가면서 측정한 진동속도로 센서의 진동속도가 Normal에 비해 약 2배 정도 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 실험결과로부터 NIC회로가 센서의 공진시의 저항 성분을 제거함으로써 진동 변위가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그런데 일반적으로 연산증폭기의 출력은 외부 입력 DC 전압 범위 내에서만 왜곡없는 신호가 출력되므로, 센서의 입력이 어느 정도 커지면 NIC회로가 정상적으로 동작하지 않는다. 하지만 미소 신호에 대한 진동성능은 크게 개선됨을 Fig. 21의 결과로부터 알 수 있다.

따라서 이상의 결과들로부터 NIC 회로를 적용하여 굴곡 타입 센서의 수신 특성 개선 가능성을 확인 할 수 있다.

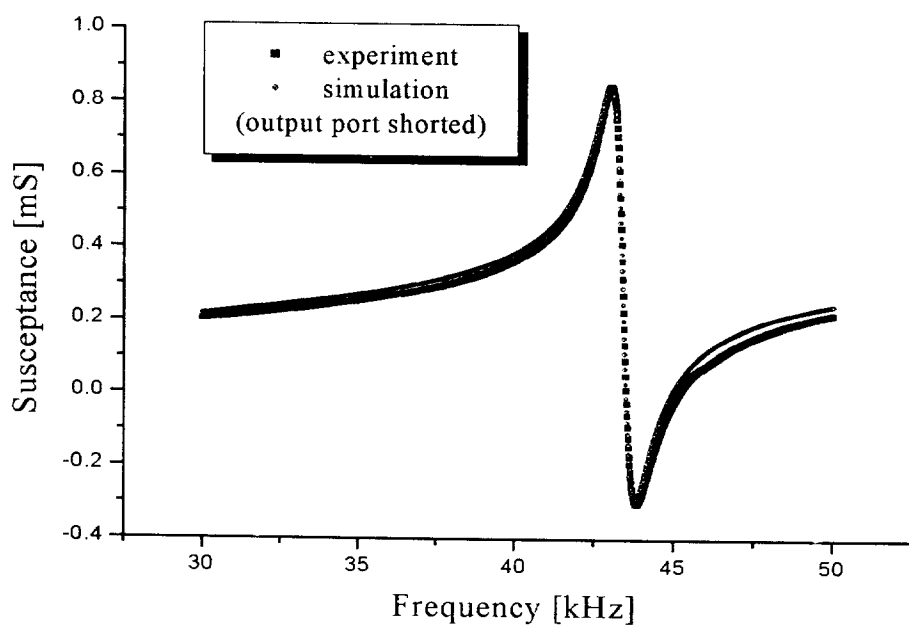
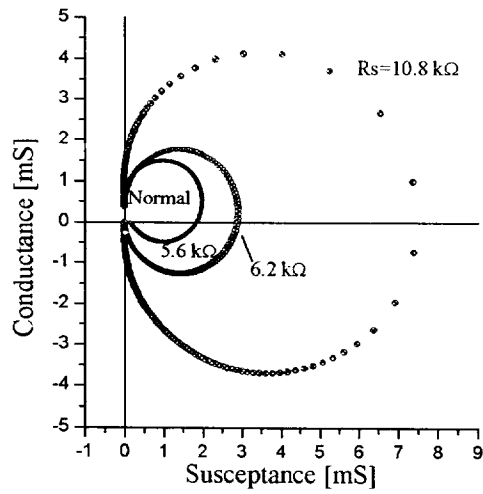
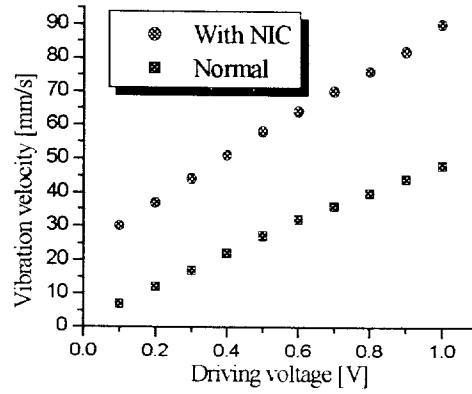


Fig. 20 Input admittance of simulation and experiment



(a)



(b)

Fig. 21 (a) Input admittance loci for the various R_s
(b) Particle velocity for the various voltage

3.4.3 수신 감도 측정 방법

Fig. 22는 수신 특성 측정 장치도로 송신기는 NICERA CO.의 공칭 주파수가 40kHz인 C40-16PU를 사용하였다. 송신기로부터 0.05m 떨어진 거리에 제작한 센서를 수신기로 사용하여 NIC 회로의 R_s 를 변화시켜 가면서 수신기의 출력 전압 레벨을 측정하였다. 또한 적절한 R_s 값을 선택한 후, 송신기의 구동전압을 변화시켜 가면서 수신기의 출력 전압 레벨을 측정하였다. 그리고 송신기의 구동 전압을 $10V_{p-p}$ 로 하고 수신기를 송신기로부터 2m 거리까지 0.05m 간격으로 이동하면서 수신 전압 레벨을 측정하였고 Normal 일때와 비교 하였다. 모든 실험들은 실온 $23.0^{\circ}C$ 에서 이루어졌고 온도에 대한 감도 변화는 고려되지 않았으며 증폭기 및 필터는 사용되지 않았다.

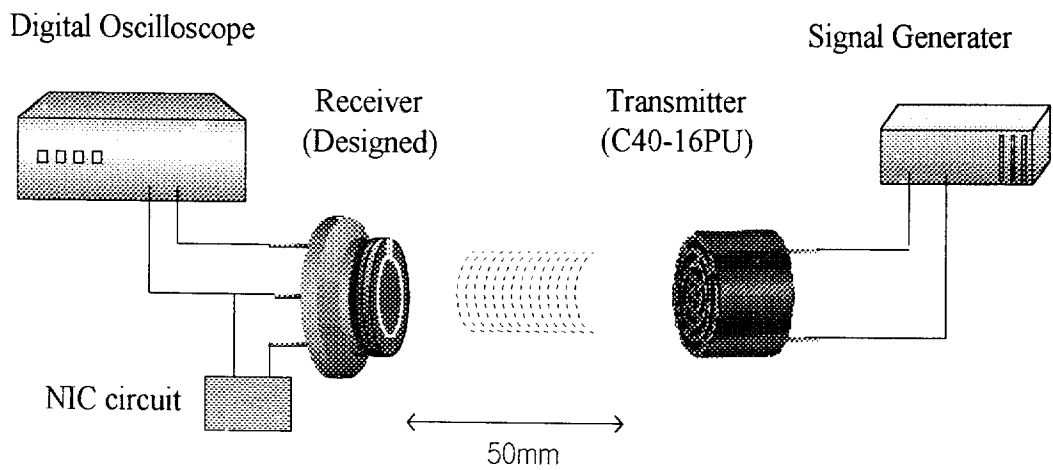


Fig. 22 Measurements of the receiving sensitivity

3.4.4 수신 감도 측정 결과

Fig. 23은 송신기의 구동전압을 $10V_{p-p}$ 로 하고 수신기에 적용된 NIC회로의 R_s 를 변화시켜 가면서 수신 전압 준위를 측정한 결과로, NIC회로의 R_s 가 $6.2k\Omega$ 일 때 수신전압 준위가 가장 커지고 $6.2k\Omega$ 이상이 되면 작아진다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 NIC회로의 R_s 가 $6.2k\Omega$ 이상이 되면 시간영역에서 연산증폭기로부터 증폭된 신호가 외부 입력 DC 전압 범위를 벗어나기 때문에 생긴 파형의 왜곡에 의한 것으로 여겨진다. 여기서 Normal 일때의 수신전압 준위는 $-19.6dBm$ 이다.

Fig. 24는 Fig. 23의 결과로부터 수신 전압 준위가 최대가 되는 R_s 를 선택하고 송신기의 구동 전압을 변화시켜 가면서 수신기의 전압레벨을 측정한 결과로, Normal에 비해 수신전압 레벨이 약 $20dBm$ 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

거리에 따른 수신전압 레벨을 측정한 결과를 Fig. 25에 나타내었다. NIC 회로가 적용된 센서의 경우에는 출력 신호가 $2m$ 이상에서도 수신되었지만 Normal인 경우에는 $0.05m$ 이상에서는 신호와 노이즈가 구분되지 않았다.

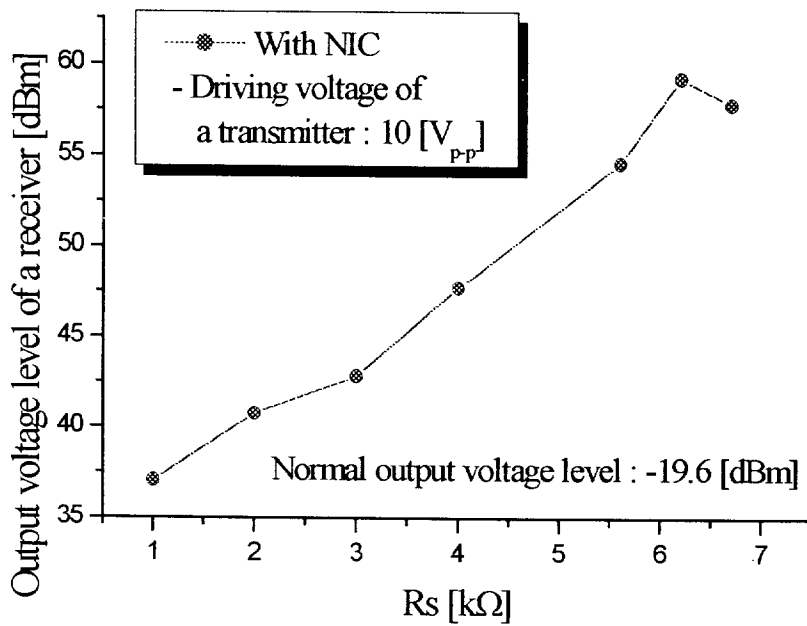


Fig. 23 Output voltage levels of the receiver for the various R_s

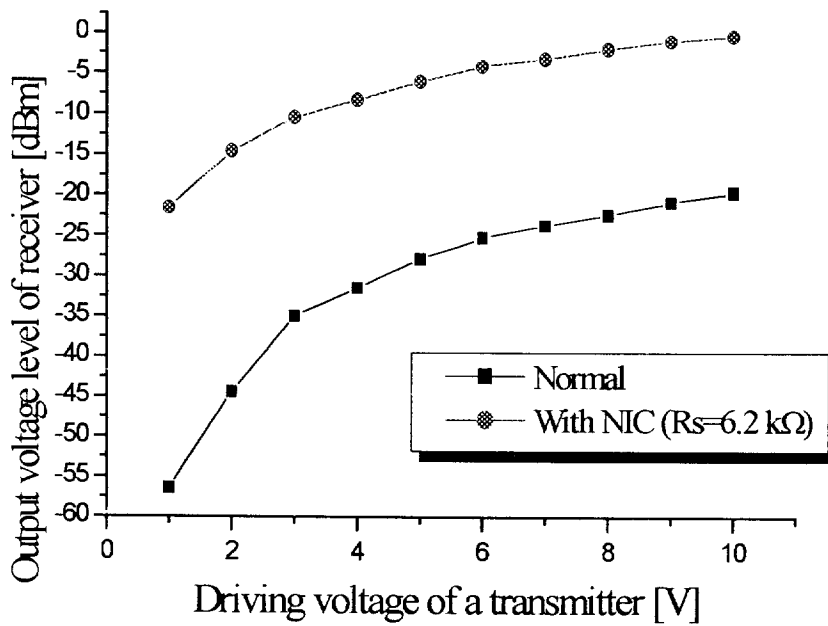


Fig 24 Output voltage levels of the receiver versus driving voltages of a transmitter

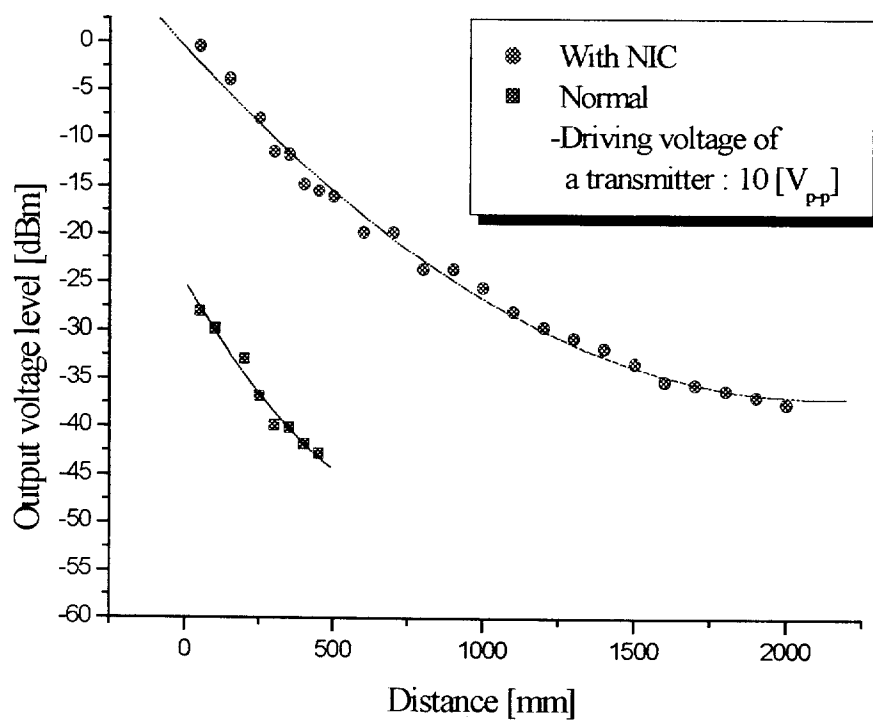


Fig. 25 Output voltage levels of the receiver versus distance

4. 결 론

본 연구에서는 압전 트랜스듀서의 특성을 제어하기 위한 방법으로 횡진동 모드의 압전 진동자의 전송선로형 등가회로와 NIC 회로가 결합된 형태의 PSpice 모델을 제시하였다. 그 결과, 시뮬레이션에 의해 부임피던스의 변화에 따라 제어되는 압전 세라믹 진동자의 품질계수의 경향이 실험 결과와 일치됨을 확인 하였고, NIC 회로를 적용하지 않은 경우는 품질계수가 23.2 인 데 반해 NIC 회로를 적용한 경우는 1961로 압전 진동자의 품질계수가 수십 배 정도까지 제어됨을 실험으로 확인 하였다.

따라서 시뮬레이션으로부터 NIC 회로에 의한 압전 진동자의 전기적인 특성 및 진동 특성의 변화를 예측 할 수가 있으므로 압전 진동자와 전자회로가 결합된 디바이스의 설계에 적용 가능함을 확인 하였고 이러한 연구를 굴곡 타입 초음파 센서에 응용하기 위하여 굴곡 타입 초음파 센서를 제작한 후 NIC 회로를 적용한 결과 NIC 회로에 의한 등가 부저항이 굴곡 타입 진동자의 공진시의 저항성분을 감소시킴으로써 PZT층과 탄성체층간의 물성치비의 변화나 기하학적인 변형없이 굴곡 타입 진동자의 진동성능이 연산증폭기의 성능에 의존하여 저전압 영역에서 제한적으로 개선되어질 수 있음을 확인 하였다. 또한 이러한 방법을 초음파 수신 센서에 적용한 결과 굴곡 타입 초음파 센서의 수신 감도가 기존의 센서보다 약 20dBm 이상 개선됨을 실험을 통해 확인 하였다. 따라서 만약 높은 입력 DC전압 범위를 가진 성능 좋은 연산증폭기가 NIC회로에 사용되어진다면 굴곡 타입 초음파 센서의 송신 감도 또한 크게 개선될 것으로 예상되고 향후에는 좀 더 넓은 범위에서 다양한 주파수를 가진 초음파 센서를 제작할 수 있을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Kikuchi : Ultrasonic Transducers, Corna Publishing Co. Tokyo, 1969
- [2] Q. M. Wang, X. H. Du, B. Xu, L. E. Cross, "Electromechanical Coupling and Output Efficiency of Piezoelectric Bending Actuators", IEEE. UFFC. Vol. 46, NO. 3(1999)
- [3] Q. M. Wang, X. H. Du, B. Xu, L. E. Cross, "Theoretical analysis of the sensor effect of cantilever piezoelectric benders", J. Appl. Phys. Vol. 85, No. 3(1999)
- [4] Y. Sugawara, K. Onitsuka, S. Ysohikawa, Q. Xu, R. E. Newnham, and K. Uchino, "Metal-ceramic composite actuators", J. amer. Ceramic Soc., Vol. 75, No. 4, pp. 996-998(1992)
- [5] A. Pogan, K. Uchino, and R. E. Newnham, "Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps 'cymbal'", IEEE Trans. UFFC. Vol. 44, No. 3, pp. 597-605(1997)
- [6] D. E. Glumac, W. P. Robbins, "A Planar Unimorph-Based Actuator with Large Vertical Displacement Capability", IEEE. UFFC. Vol. 45, No. 5(1998)
- [7] H. Tamura, Y. Tomikawa, C. Kusakabe, "Basic Investigation on Achieving High Resonance Quality factor of Piezoelectric vibrator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 pp. 3030-3033(1997)

- [8] K. Yanai, Y. Tomikawa, K. Sakurai, and C. Kusakabe, " Q-Value Control of Piezoelectric Vibrator Using Operational Amplifier Circuit", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36 pp. 3034-3036(1997)
- [9] Y. I. Ko, M. J. Kim, K.L. Ha, Y. Tomikawa, "PSpice Simulation on Piezoelectric Vibrator with Negative Impedance Converter Circuit", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 pp. 3707-3708(2001)
- [10] L. Goras, C. Marcuta, "On Linear Inductance and Capacitance Time Conversion Using NIC-Type Configurations", IEEE. Vol. 40, NO. 5(1993)
- [11] W. M. Leach, "Controlled-Source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducer", IEEE. UFFC. Vol. 41, NO. 1(1994)
- [12] V. M. Ristic : Principles of Acoustic Devices, JOHN WILLEY & SONS
- [13] A. Puttmer, P. Hauptmann, R. Lucklum, O. Krause, and B. Henning, " SPICE Model for Lossy Piezoceramic Transducers", IEEE. UFFC. Vol. 44, No. 1(1997)
- [14] X. Li, W. Y. Shih, I. A. Aksay, W. H. Shih, "Electromechanical Behavior of PZT-Brass Unimorph", J. Am. Ceram. Soc. 82. 1733-40(1999)
- [15] S. Sherrit, B. K. Mukherjee, R. Tasker, "An Analytical Solution for the Electromechanical Coupling Constant of an Unloaded Piezoelectric Bimorph", IEEE. UFFC. Vol. 46, NO. 3(1999)

감사의 글

먼저 학부 3년과 대학원 2년 동안 부족한 저를 지도해주신 김부준 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 항상 학문적으로 부족한 부분을 일깨워 주시고 도움을 주신 하강열 교수님께도 감사의 말씀을 드리며, 논문의 주심을 맡아주시고 아낌없이 지도해주신 김천덕 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 실험실에서 지난 2년 동안 동거동락한 병천, 병국, 은주, 기욱, 민구, 성필, 성욱선배, 그리고 학부 후배들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶고, 어려울 때마다 많은 조언을 해주신 배민건 선생님께 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 용당의 정호 선배, 현승씨, 성호씨, 백열씨, 정화씨께도 감사의 말씀을 전합니다. 끝으로 오늘의 제가 있기까지 아낌없이 뒷바라지 해주신 부모님께 이 논문을 바칩니다.