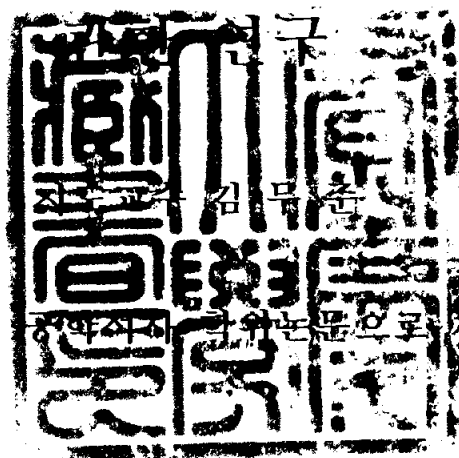


719
H.O.24
24
-2

공학석사 학위논문

부임피턴스 변환회로를 이용한 두께 모드 압전 진동자의 특성개선에



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2003년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학 협동과정

황 성 필

황성필의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주 심 공학박사 하 강 열



위 원 공학박사 김 천 덕



위 원 공학박사 김 무 준



목 차

Abstract	1
1. 서론	2
2. 부임피던스 변환(NIC) 회로를 이용한 품질계수 제어	4
2.1 NIC 회로	4
2.2 품질계수 제어원리	9
2.3 시뮬레이션 및 실험방법	14
2.4 시뮬레이션 및 실험결과	20
2.4.1 입력 어드미턴스	20
2.4.2 진동면에서의 입자속도	24
3. NIC 회로를 이용한 전기음향 변환효율 및 수신감도 개선	26
3.1 전기음향 변환효율	26
3.2 수신감도 개선원리	30
3.3 실험방법	32
3.4 실험결과	34
4. 결론	38
참 고 문 헌	41

A Study for Characteristics Improvement of Thickness Mode Piezoelectric Vibrator Using a Negative Impedance Converter Circuit

Sung-Phil, Hwang

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

Abstract

In underwater, ultrasonics transducer is a sensor that it detects the object by generating and receiving ultrasonic and the characteristics of transducer is defined as output, frequency and directivity. In general, ultrasonic transducer is shared at high frequency transducer and low frequency transducer in underwater. In the case of low frequency transducer, it has detection distance of long range but it is difficult to identify of the object by low resolution. In the case of high frequency transducer, it has high direction resolution by focusing acoustic wave but it is a weak point that the attenuation is serious. Therefore, high frequency transducer with high sensitivity is required in underwater ultrasonic system.

In this paper, we apply the NIC (negative impedance converter) circuit to a two-layered thickness mode piezoelectric vibrator and investigate its electro-mechanical characteristics such as input admittance, particle velocity, electro-acoustic efficiency and receiving sensitivity of the vibrator. From the theoretical and experimental results, the quality factor, particle velocity and electro-acoustic efficiency is improved as large as the vibrator without the NIC circuit. Also, in underwater, the receiving sensitivity of the vibrator is improved in small voltage.

1. 서론

초음파는 1880년 Jacques와 Pierre Curie가 크리스탈에 기계적인 힘을 가하면 크리스탈 양단에 전하가 발생한다는 압전현상을 발견하고, 1921년경에 Langevin이 수정진동자를 이용하여 초음파 응용의 시초가 되는 초음파 탐촉자를 제작한 것이 시초였다. 그 이후로, 제 1차 세계대전 및 제 2차 세계대전의 경험을 바탕으로 비약적인 기술의 진보가 이루어졌으며, 새로운 압전소재의 개발과 전자공학의 발달로 인해 최근에는 과학 및 군사분야뿐만 아니라 산업분야에 이르기까지 사용범위와 수요가 점차 확대되고 있는 추세이다. 이러한 초음파 응용은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 초음파 에너지를 동력으로 이용하는 것과 초음파를 정보 모체로써 통신과 계측에 이용하는 것이 있다. 전자의 경우는 초음파 모터, 초음파 용접기 및 초음파 세척기가 대표적이며, 후자의 경우는 어군 탐지기, 의료용 초음파 영상진단기 그리고 초음파 정밀 계측기 등이 있다. 초음파 트랜스듀서의 재료로는 전기회로와의 임피던스 정합이 뛰어나고, 압전성 및 전기·기계 결합특성이 우수한 PZT계 압전 세라믹이 사용되고 있다[1].

이러한 초음파의 응용분야 중 수중음향 트랜스듀서는 전기 음향 변환기로서 초음파를 발생 또는 수신하여 물체의 탐지, 식별 및 추적하는 센서이며, 그 특성은 출력, 주파수 그리고 지향성 등에 의해 결정된다. 이러한 수중음향 트랜스듀서는 주파수에 따라 저주파 및 고주파 트랜스듀서로 나눌 수 있다. 저주파 트랜스듀서의 경우, 음파가 멀리까지 전달되므로 긴 탐지거리를 가지지만 해상도가 저하되어 물체의 식별이 어렵고 트랜스듀서의 크기가 커지는 단점이 있으며, 고주파 트랜스듀서의 경우 음파를 집중 하여 송수신하는 방향 분해능은 우수하지만 감쇠가 큰 단점이 있다. 그러므로 의료용 초음파

진단등 비교적 가까운 물체를 탐지할 경우 고주파 트랜스듀서가 사용되며, 해양에서와 같이 원거리 물체의 탐지가 필요한 경우 저주파 트랜스듀서가 사용된다. 따라서, 높은 감도를 가지는 고주파 트랜스듀서가 수중 초음파 장치에 요구되어지고 있다.

그러므로, 트랜스듀서의 특성개선이 요구되어지고 있으나, 그 대다수의 연구가 압전 진동자에 다른 원소를 첨가 혹은 복합산화물을 결합시켜 새로운 압전소자를 개발하거나, 트랜스듀서의 구조적 성형을 이용한 방법이다. 하지만, 이 경우 압전재료 선택에 제약과 개발 소요시간이 길고, 트랜스듀서의 구조변형이 어렵다는 단점이 있다[2]-[3]. 한편, Y. Tomikawa 등은 전극분할된 횡진동 모드 압전 진동자에 연산증폭기를 이용한 negative impedance converter (NIC) 회로를 적용하여 압전 진동자의 전기 및 기계적 특성을 향상시켜 품질계수를 개선시킨 바가 있으며, 이러한 특성개선 방법을 굴곡 타입 초음파 센서에 적용하여 공기중에서 수신감도를 향상시킨 연구가 발표된 바 있다[4]-[5]. 그러나, NIC 회로를 이용한 특성개선 방법은 공기중, 즉 무부하 상태에서 그 가능성이 확인되었지만, 다른 음향매질에서의 특성개선 가능성은 아직 미지수이다. 또한, 현재까지 연구된 횡모드 및 굴곡모드에서의 적용 외에 다른 진동모드에 대한 적용가능성에 대하여 보고된 바가 없다.

이에, 본 연구에서는 이러한 NIC 회로를 이용한 특성개선 방법을 수중음향 트랜스듀서에 적용하여 그 가능성을 확인하고자 한다. 일반적으로 수중음향 트랜스듀서에 사용되는 두께 모드 압전 진동자를 분극방향이 서로 마주보게 적층한 후, NIC 회로를 적용하였다. 그리고 공기중에서 트랜스듀서의 전기 및 기계적 특성의 실험결과를 PSpice를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 또한, 공기중에서의 실험 및 시뮬레이션 결과를 바탕으로 수중에서의 전기음향 변환효율 및 수신감도를 측정하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 부임피턴스 변환(NIC) 회로를 이용한 품질계수 제어

본 장에서는 서론에서 언급한 바와 같이 부임피턴스 변환(NIC) 회로를 이용하여, 두께 모드 압전 진동자의 품질계수를 개선하기 위한 방법을 나타내고 있다. 먼저, NIC 회로의 구조 및 동작원리에 대하여 고찰하고, 이를 진동자에 적용하여 품질계수가 개선됨을 이론적으로 고찰하였다.

또한, NIC 회로가 연결된 압전 진동자의 전기·기계적 특성을 측정하여 NIC 회로와 진동자의 등가회로가 결합된 PSpice 모델의 시뮬레이션과 비교하여 본 연구의 유용성을 확인하였다.

2.1 NIC 회로

반전 입력과 비반전 입력이 모두 연산귀환 되는 연산증폭기를 Fig. 1에 나타내었으며, 키르히호프의 전압법칙(KVL)으로부터 아래의 식들을 유도할 수 있다. 여기서 a 는 전압이득이다.

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

$$v_1 - i_1 r_1 - v_o = 0 \quad (2)$$

$$v_1 - i_1 r_1 + i_2 r_2 - v_2 = 0 \quad (3)$$

식 (2), (3)을 이용해서 식 (1)을 정리하면 다음과 같다.

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

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

일반적으로 이상적인 연산증폭기에서, 전압이득 $a = \infty$ 이므로 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

따라서, 식 (7)을 식 (2)에 대입하면 식 (8)과 같이 주어진다.

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

또한, 임의의 임피던스 Z_2 가 출력단에 연결되어 있다고 가정할 때, 입력 임피던스를 고려하면 Fig. 2에 나타낸바와 같이 임피던스 Z_2 는 다음과 같이 주어진다.

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

식 (6), (7), (8)에 의해 입력 임피던스 Z_1 은 아래와 같이 주어진다.

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

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

식 (11)에 의해 Fig. 2에 나타낸 회로의 입력 임피던스는 출력단에 연결된 임피던스에 대하여 음의 값을 가지게 된다. 즉, 이 회로는 Negative Impedance Converter (NIC) 회로가 된다[6].

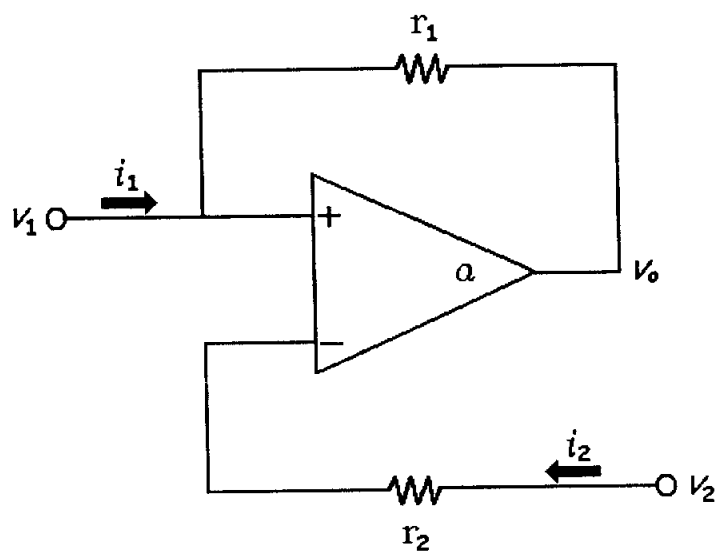


Fig. 1 Negative impedance converter(NIC) circuit

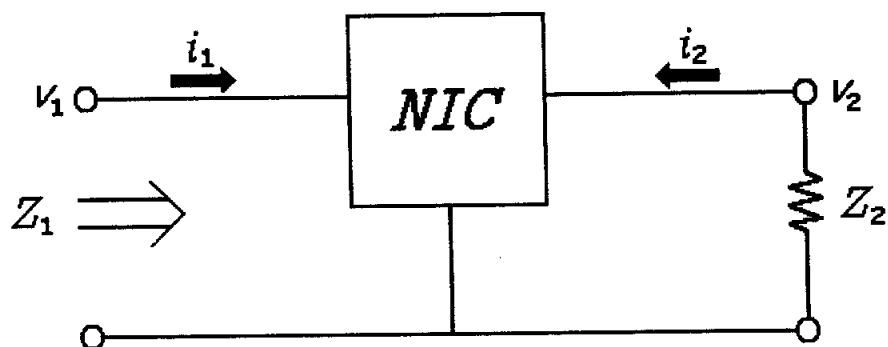


Fig. 2. Block diagram of the NIC circuit

2.2 품질계수 제어원리

두께 모드 압전 진동자의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 두 개의 압전 진동자는 동일한 특성을 가지며, 분극방향이 서로 마주보게 적층되어있다. 또한, 각 압전층을 구동용 압전층 및 특성제어용 압전층으로 구분하였다. Fig. 3에서 1-1' 단은 구동용 압전층의 입력단이며, 2-2' 단은 NIC 회로가 연결되어 압전 진동자의 품질계수를 제어하는 제어단을 나타낸다.

Fig. 3의 압전 진동자를 전송선로를 이용한 등가회로로 나타내면 Fig. 4(a)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $Cd1$ 및 $Cd2$ 는 각 압전 진동자의 제동용량을 나타내며, L_o 와 L_o' 은 각 압전 진동자의 음의 제동용량을 대신하여 등가 인덕턴스로 나타낸 것이다. Fig. 4(a)를 기본 공진주파수에 대한 회로로 바꾸기 위해 임피던스 파라메타(Z_1, Z_2, Z_1', Z_2')를 정리하면, Fig. 4(b)와 같이 R_m, L_m, C_m 으로 나타낼 수 있고, 트랜스포머 양단의 L_o 와 L_o' 를 정리하고 트랜스포머를 소거하면 Fig. 4(c)와 같은 R, L, C 회로로 나타낼 수 있다[7].

NIC 회로가 적용된 압전 진동자를 Fig. 5와 같이 나타내었으며, 이 회로의 입력 어드미턴스는 식 (12)와 같다.

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

여기서, NIC 회로의 저항 R_1 과 R_2 의 값을 동일하게 두면, NIC 회로의 입력 어드미턴스는 식 (13)와 같다.

$$Y_{IN} = -\left\{j\omega C_S + \left(\frac{1}{R_S}\right)\right\} \quad (13)$$

NIC 회로의 negative element들을 등가소자로 표현하면 Fig. 6의 점선부분과 같이 $-C_S$ 와 $-R_S$ 가 진동자에 병렬로 연결된 형태로 나타낼 수 있다. 그러므로, NIC 회로의 negative element C_S 값을 진동자의 제동용량 $Cd2$ 와 동일한 값으로 두면, NIC 회로의 C_S 는 진동자의 제동용량 $Cd2$ 을 소거하게 되므로 품질계수는 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서, NIC 회로가 적용된 압전 진동자의 품질계수는 NIC 회로의 저항 R_S 의 값에 의해 결정되며, 저항 R_S 가 트랜스듀서의 등가저항 R 에 근사한 값을 가질 때, 품질계수 Q 는 최대가 된다.

$$Q = \frac{\omega L}{R - R_S} \quad (14)$$

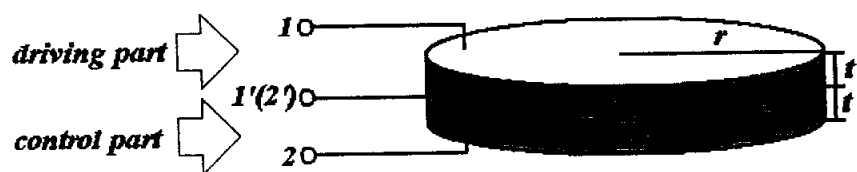
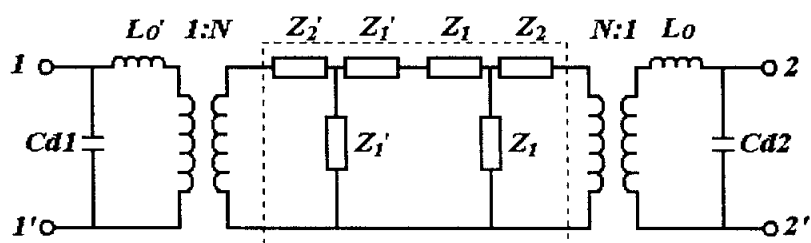
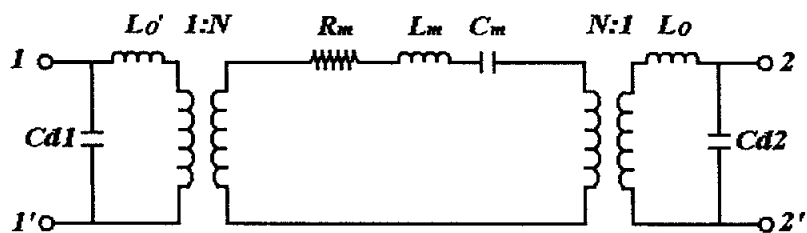


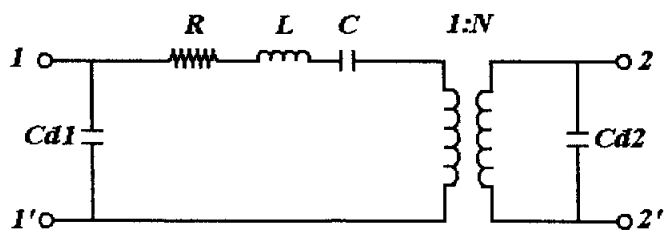
Fig. 3 Thickness mode piezoelectric vibrator



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Equivalent circuit of the thickness mode vibrator

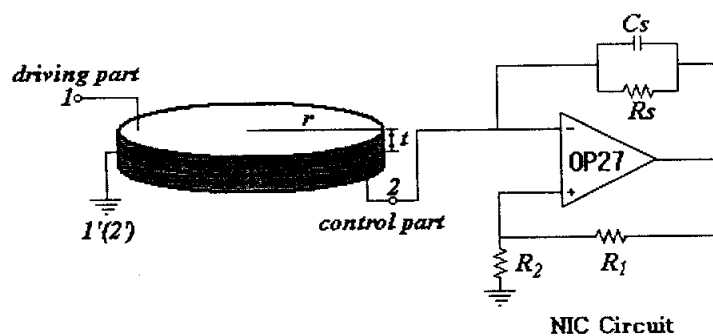


Fig. 5 Construction of the vibrator with the NIC circuit

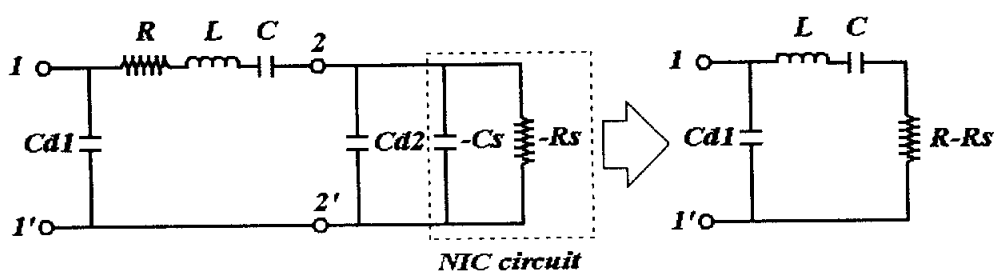


Fig. 6 Principle of the quality factor control

2.3 시뮬레이션 및 실험방법

Fig. 7은 NIC 회로가 연결된 압전 진동자를 PSpice 모델을 나타낸 것이며, 저항 R_0 는 계측기의 내부저항을 고려한 것이다[8]-[9]. 시뮬레이션방법은 $1V_{pp}$ 의 교류전원을 구동전압으로 인가하고 주파수를 327~339kHz까지 변화시키면서, NIC 회로의 저항 R_S 의 변화에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 저항 R_0 에 걸리는 전압과 전류의 비로 시뮬레이션 하였다. 단, NIC 회로의 C_S 값은 진동자의 제동용량 C_d2 와 동일한 값을 가지며, 연산증폭기에 인가되는 직류전압은 $\pm 12V$ 이다.

실험방법은 제어단에 연결된 NIC 회로의 저항 R_S 의 변화에 따른 진동자의 입력 어드미턴스 특성을 Network Analyzer(R3754A)로 측정하였으며, 또한 진동면 A에서의 진동속도를 Laser Vibrometer(AT3500)로 측정하였다. Fig. 8와 Fig. 9는 각각 압전 진동자의 입력 어드미턴스와 진동속도를 측정하기 위한 실험 장치도를 나타낸 것이다.

Table I은 압전 진동자의 물질 상수값들을 나타내며, Table II는 등가회로에 사용된 상수 값들을 나타내었다.

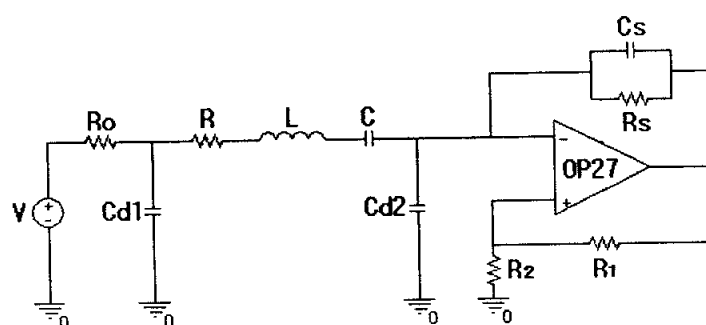


Fig. 7 PSpice model of the vibrator with the NIC circuit

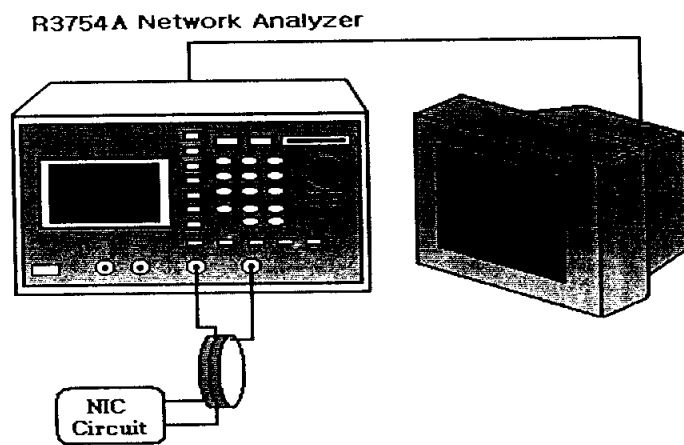


Fig. 8 Schematic of input admittance measurement

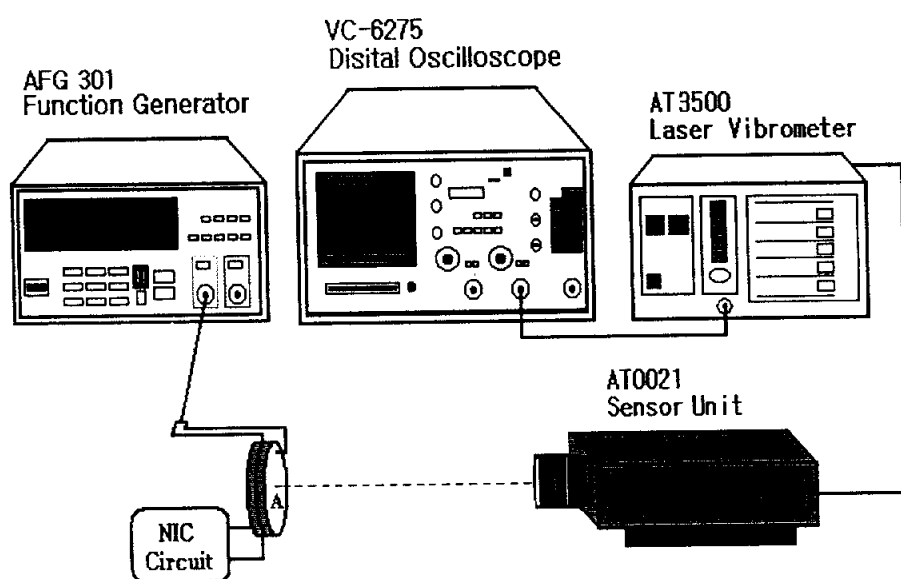


Fig. 9 Schematic of vibration velocity measurement

Table I. Constants of thickness mode piezoelectric vibrator

Items	Values
Radius	25.0 mm
Thickness	3.05 mm
Density	7975 kg/m ³
Center frequency	332 kHz
Phase velocity	4235 m/s

Table II. Constants used in PSpice simulation

Items	Values
R	32.5 Ω
L	3.85 mH
C	58.9 pF
$Cd1$	6.0 nF
$Cd2$	6.01 nF
R_0	50 Ω
R_1, R_2	13 k Ω

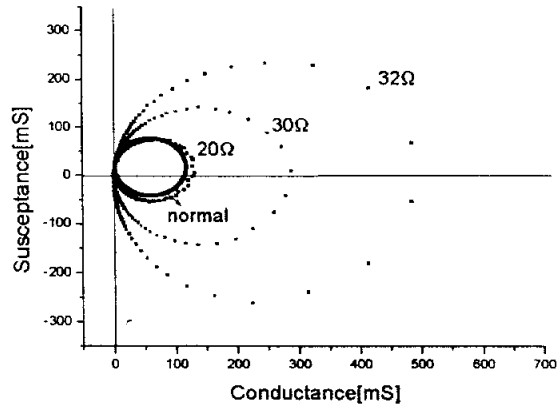
2.4 시뮬레이션 및 실험결과

2.4.1 입력 어드미턴스

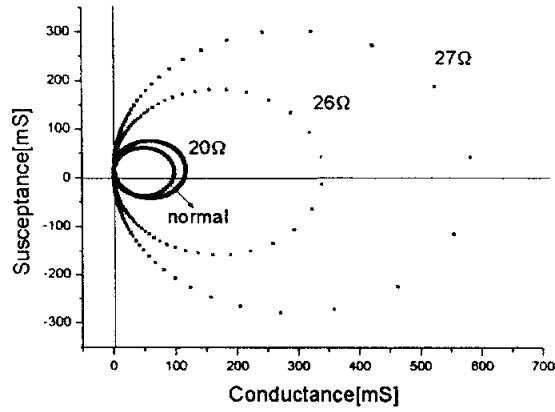
Fig. 10과 Fig. 11는 NIC 회로의 저항 R_s 의 변화에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스 특성에 대한 시뮬레이션 및 실험결과이며, 여기서 ‘normal’은 NIC 회로를 연결하지 않고 압전 진동자만을 구동시켰을 때의 입력 어드미턴스를 나타낸다.

Fig. 10의 결과, NIC 회로의 저항 R_s 값이 증가함에 따라 진동자의 입력 어드미턴스가 증가함을 알 수 있다. 이것은 NIC 회로의 negative element인 저항 R_s 에 의해 진동자의 등가저항이 감소하게 되므로 식 (14)에서와 같이 진동자의 품질계수가 증가함을 의미한다. 그러나 Fig. 11의 실험결과, NIC 회로의 저항 R_s 가 33.3Ω 이 되면 진동자의 입력 어드미턴스의 컨덕턴스 성분이 음의 값을 가지게 되는데, 이것은 NIC 회로의 저항 R_s 가 진동자의 등가저항 R 보다 큰 값을 가지게 되어 전체 임피던스가 음의 값을 가지게 되기 때문이다. 그리고 시뮬레이션 결과 또한, 실험결과와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 시뮬레이션과 실험결과가 차이를 나타내는 것은 실제 압전 진동자의 상수값과 이론적으로 계산된 압전 진동자의 상수값에서 발생하는 오차와 시뮬레이션 시 고려하지 않은 접착층에 의한 것이라 사료된다.

Table III은 NIC 회로의 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 진동자의 품질계수를 나타내고 있다. 그 결과, NIC 회로를 적용한 압전 진동자의 품질계수는 적용하지 않은 경우에 비해 20배정도 향상되었음을 알 수 있다.

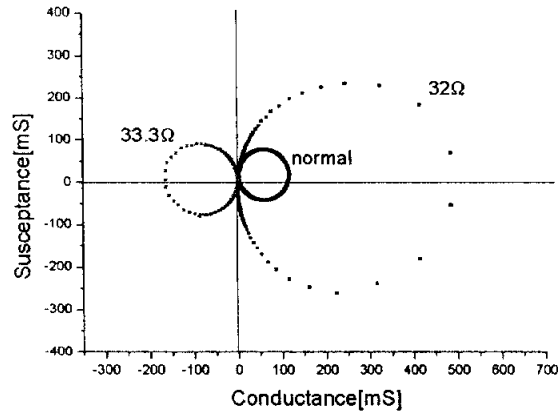


(a) Measurement

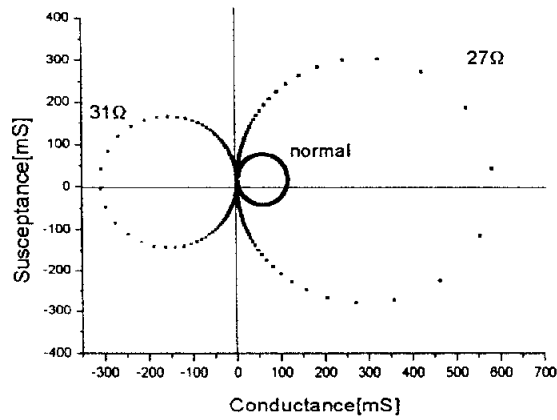


(b) Simulation

Fig. 10 Results of input admittance for various value of R_S .(in Air)



(a) Measurement



(b) Simulation

Fig. 11 Results of input admittance for various value of R_S .(in Air)

Table III. Comparison of the quality factor

	Origin value (without the NIC)	Maximum value (with the NIC)
Quality factor	246	4672

2.4.2 진동면에서의 입자속도

Fig. 12는 압전 진동자의 진동면 A에서의 입자속도를 v_o 로 규격화한 실험결과이다. 여기서 v_o 는 'normal'일 때의 입자속도를 나타내며, v_o 는 1.2mm/s이다. 실험결과, NIC 회로의 저항 R_S 가 증가함에 따라 즉, 진동자의 등가 저항성분이 negative elements에 의해 감소함에 따라 진동면 A에서의 입자 속도는 증가함을 알 수 있다.

NIC 회로가 적용된 두께 모드 트랜스듀서의 전기 및 기계적 특성에 대한 시뮬레이션 및 실험결과로부터 NIC 회로의 negative element에 의해 압전 진동자의 입력어드미턴스 및 진동속도가 제어됨을 알 수 있었으며, PSpice를 이용한 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, NIC 회로를 적용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 20배정도 품질계수가 향상됨을 확인 할 수 있었다.

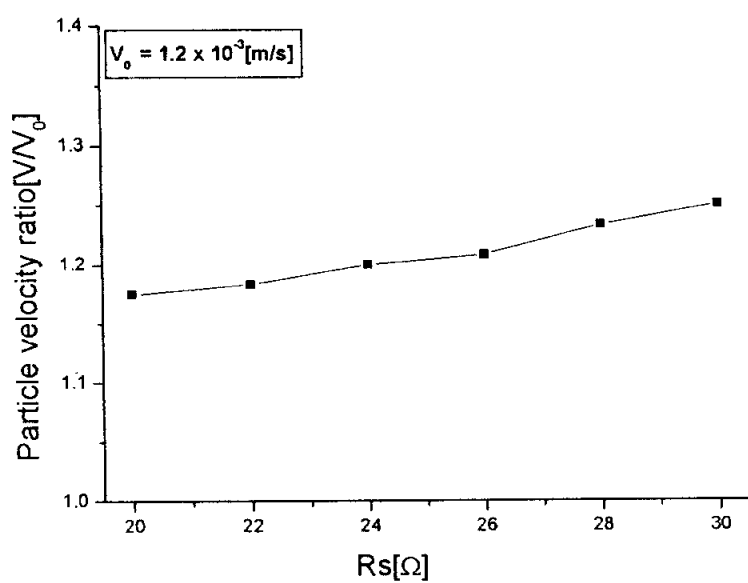


Fig. 12 Particle velocity of the vibrator on vibrating surface

3. NIC 회로를 이용한 전기음향 변환효율 및 수신감도 개선

공기중에서 NIC 회로를 적용함으로써 압전 진동자의 전기·기계적 특성이 개선됨을 확인하였다. 따라서, 본 장에서는 이러한 결과를 바탕으로 수중에서 NIC 회로를 적용할 경우 진동자의 특성개선이 이루어지는지 확인하고자 한다. 우선, 공기 및 수중에서 NIC 회로의 적용 유무에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 측정하고, 이를 이용하여 전기음향 변환효율 개선 가능성을 확인해 보았다. 또한 NIC 회로에 의한 수신감도가 개선됨을 이론 및 실험적으로 고찰하였다.

3.1 전기음향 변환효율

Fig. 13에 나타낸 것과 같이 부하가 있는 경우에, 공진주파수에서 어드미턴스 Y_{f_0} 를 식 (15)로 두면, 진동자의 전기입력파워 W_e 와 음향출력파워 W_a 는 식 (16)과 식 (17)과 같이 주어진다.

$$Y_{f_0} = G_{f_0} + jB_{f_0} \quad (15)$$

$$W_e = G_{f_0} V^2 \quad (16)$$

$$W_a|_{f=f_0} = \left(1 - \frac{|Y_{m0}|}{|Y_{m00}|}\right) |Y_{m0}| V^2 \quad (17)$$

전기입력파워 W_e 와 음향출력파워 W_a 의 비를 전기음향 변환효율 η_{ea} 로 두면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{ea} = \frac{W_a}{W_e} = \frac{|Y_{m0}|}{G_{f0}} \cdot \frac{r_a}{r_a + r} \times 100 \quad [\%] \quad (18)$$

또한, 전기기계 변환효율 η_{em} 은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 W_m 은 기계진동파워이다.

$$\eta_{em} = \frac{W_m}{W_e} = \frac{W_T + W_a}{W_e} \times 100 \quad [\%] \quad (19)$$

$$\eta_{em} = \frac{|Y_{m0}| V^2}{G_{f0} V^2} = \frac{|Y_{m0}|}{G_{f0}} \times 100 \quad [\%] \quad (20)$$

그리고 기계음향 변환효율 η_{ma} 는 아래와 같다.

$$\eta_{ma} = \frac{W_a}{W_m} = \frac{W_a}{W_T + W_a} \times 100 \quad [\%] \quad (21)$$

$$\eta_{ma} = \frac{r_a}{r + r_a} \times 100 \quad [\%] \quad (22)$$

이상의 식들로부터 전기음향 변환효율은 식 (23)과 같은 관계가 성립되고,

전기단자에서 측정할 수 있는 양으로 나타내면 식 (24)와 같다[10].

$$\eta_{ea} = \eta_{em} \cdot \eta_{ma} \times 100 \quad [\%] \quad (23)$$

$$\eta_{ea} = \frac{|Y_{m0}|}{G_{f0}} \left(1 - \frac{|Y_{m0}|}{|Y_{m00}|} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (24)$$

여기서, G_{f0} , Y_{m0} , Y_{m00} 는 각각 수중에서의 컨덕턴스와, 어드미턴스 그리고 공기중에서 어드미턴스 값을 나타낸다.

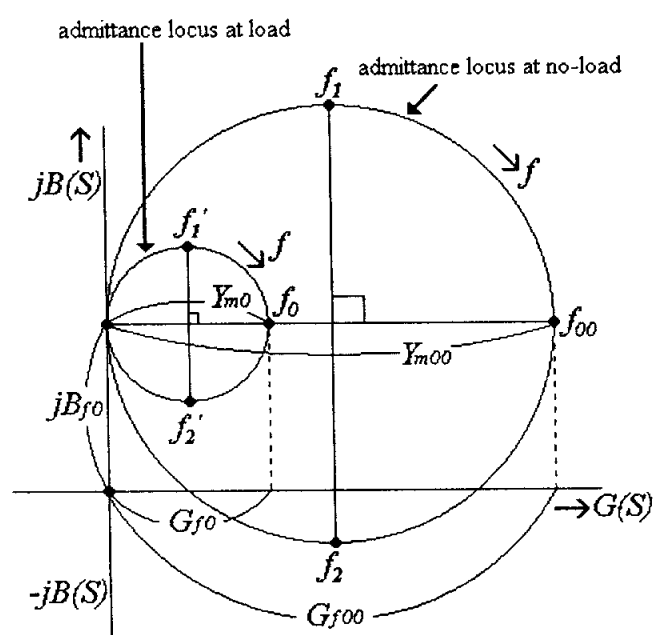


Fig. 13 Admittance loci at load and no-load.

3.2 수신감도 개선원리

일반적으로 센서의 수신감도 S_R 은 식 (24)과 같이 주어진다.

$$S_R = \frac{\alpha A S}{C S_I} \frac{1}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + \frac{\Omega^2}{Q^2}}} \quad (25)$$

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

$$\omega_{oI} = \sqrt{\frac{s_I}{m}},$$

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

ω_{oI} 는 전류 I 가 일정할 때 각속도를 나타내고 A, S, C, α, s_I 는 각각 힘 계수, 수신면적, 제동용량, 굴절계수 그리고 stiffness이다.

반면에, 외부 음압이 없는 정상상태에서의 수신감도는 식 (26)과 같이 주어진다.

$$S_{Ro} = \frac{A_o S}{C s_{Io}} \quad (26)$$

따라서, 공진각주파수 ω_{oI} 에서 수신감도 S_R 은 식 (27)과 같이 나타낼 수

있다.

$$S_R = S_{Ro} \cdot \alpha \left(\frac{S_{Io}}{S_I} \right) \left(\frac{A}{A_o} \right) Q \quad (27)$$

결국, NIC 회로를 이용하여 두께 모드 압전 트랜스듀서의 등가저항 R 을 감소시켜 품질계수 Q 를 증가시킴으로써 수신감도를 개선시킬 수 있다.

3.3 실험방법

Fig. 14는 수중에서 압전 진동자의 수신특성을 측정하기 위한 장치도로서, 송신기와 수신기로 사용된 트랜스듀서의 특성은 동일하며, 송신기와 수신기 간의 간격은 0.5m이다. 실험방법은 송신기에 $1V_{pp}$ 의 교류전원을 구동전압으로 인가하면서, 수신기에 연결된 NIC 회로의 저항 R_s 의 변화에 따른 수신전압을 Digital Oscilloscope(VC-6275)로 측정하였다.

또한, 앞선 실험을 통해 얻은 결과로부터, 최대 수신전압이 측정되는 NIC 회로의 저항 R_s 값을 선택한 후, 송신기의 전압변화에 따른 수신기의 수신전압 준위를 측정하였다.

모든 실험들은 실온 23.0°C 에서 이루어졌고, 온도에 대한 감도변화는 고려치 않았으며, 증폭기 및 필터는 사용하지 않았다.

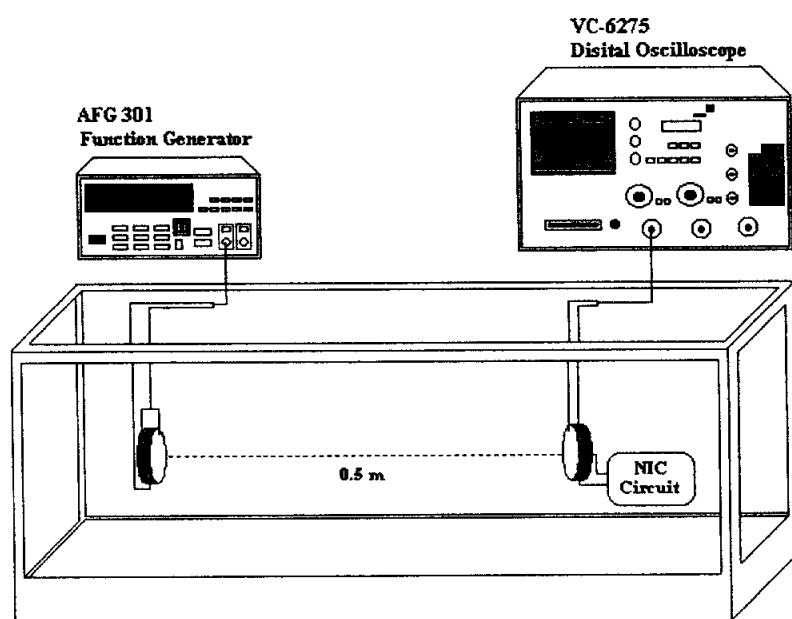


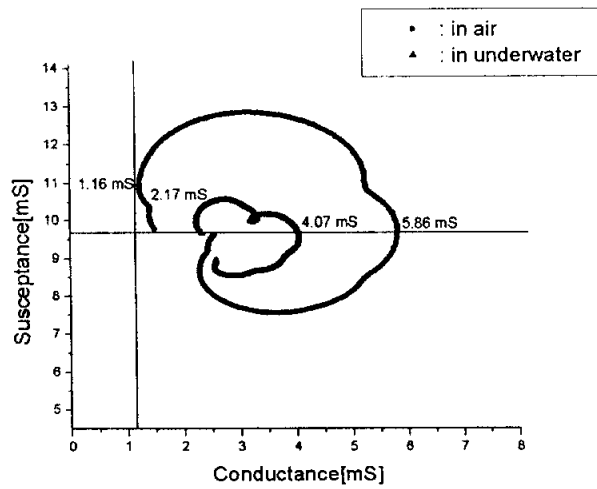
Fig. 14 Measurement of the receiving sensitivity

3.4 실험결과

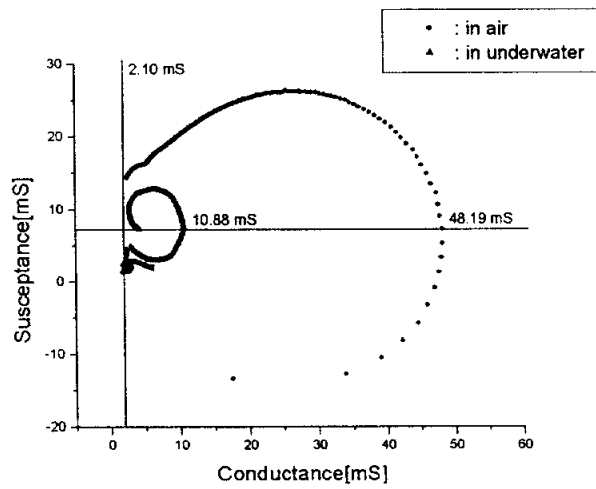
Fig. 15는 각각 공기 및 수중에서 NIC 회로의 적용 유무에 따른 압전 진동자의 입력 어드미턴스를 나타낸 것이다. Fig. 15로부터 얻은 컨덕턴스 및 어드미턴스 값들을 식 (24)에 대입하여 전기음향 변환효율을 계산하고 'normal'일 때와 비교하였다. 그 결과, NIC 회로를 적용한 경우의 전기음향 변환효율은 65.3%로 NIC 회로를 적용하지 않은 경우의 27.8%보다 2.5배정도 전기음향 변환효율이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 16은 송신기의 구동전압을 $1V_{pp}$ 로 하고 수신기에 연결된 NIC 회로의 저항 R_S 의 변화에 따른 수신전압으로, 저항 R_S 의 값이 16Ω 일 때, 수신전압이 최대가 됨을 알 수 있다. 여기서, 'normal'일 때 수신전압은 $45.6mV_{pp}$ 이다.

Fig. 17은 Fig. 16의 결과로부터 얻은 수신전압이 최대가 되는 NIC 회로의 저항 R_S 을 선택하고, 송신기의 구동전압을 $1\sim 10V_{pp}$ 까지 변화시켜 가면서 수신전압 준위를 측정한 결과로서, 'normal'일 때에 비해 수신전압 레벨이 최소 2dB, 최대 17dB까지 향상됨을 알 수 있다.



(a) without the NIC



(b) with the NIC

Fig. 15 Variations of admittance loci about acoustic medium

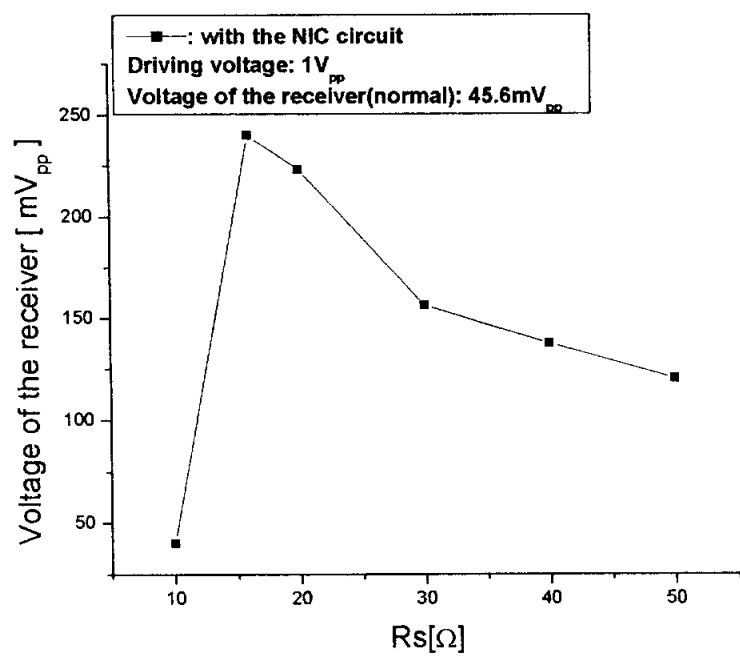


Fig. 16 Voltage of the receiver of the various R_s

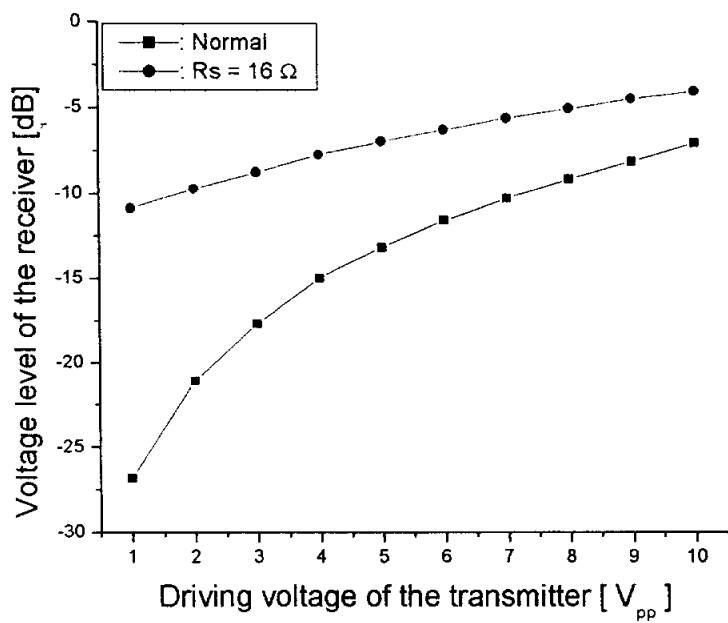


Fig. 17 Voltage level of the receiver versus driving voltage

4. 결론

본 연구에서는 수중음향 트랜스듀서에 일반적으로 사용되는 두께 모드 압전 진동자에 NIC 회로를 적용하여 특성개선 가능성을 확인하였다. 그 결과, 공기중에서 압전 진동자는 NIC 회로의 저항 R_s 에 의해 진동자의 등가저항이 감소하여 품질계수 및 진동속도 등의 전기·기계적 특성이 개선되었으며, PSpice를 이용한 시뮬레이션 결과와도 잘 일치함을 확인하였다. 또한, NIC 회로를 적용한 경우는 품질계수가 4672인데 반해, NIC 회로를 적용하지 않은 경우는 246으로 압전 진동자의 품질계수가 20배정도 향상됨을 확인하였다.

이러한 공기중에서의 두께 모드 압전 진동자의 특성개선 결과를 토대로, 수중에서 NIC 회로를 적용시 압전 진동자의 특성개선 가능성을 확인해보았다. NIC 회로가 적용된 진동자를 각각 공기 및 수중에서 측정한 입력 어드미턴스의 실험결과로부터 전기음향 변환효율을 구하면 NIC 회로를 적용한 경우가 65.3%로 NIC 회로를 적용하지 않은 27.8%보다 전기음향 변환효율이 2.5배정도 향상되었으며, 진동자의 수신감도는 또한 저전압에서 17.5dB, 고전압에서 2dB이상 개선됨을 확인할 수 있었다. 따라서, NIC 회로를 수중음향 트랜스듀서에 적용할 경우, 높은 입력 DC 전압 범위를 가지는 연상증폭기가 NIC 회로에 사용된다면 고주파 트랜스듀서의 감도는 크게 개선될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Kikuchi : Ultrasonic Transducers, Cerna Publishing Co. Tokyo, 1969.
- [2] 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.
- [3] Y. Sugawara, K. Onitsuka, S. Yohikawa, Q. Xu, R. E. Newnham, and K. Uchino, "Metal-ceramic composite actuators", J. Amer. Ceramic Soc., Vol. 75, No. 4, pp. 996-998(1992)
- [4] Y. Tomikawa, H. Tamura, C. Kusakabe, "Basic Investigation on Achieving High Resonance Quality Factor of Piezoelectric Vibrator", Jpn. J. Phys. Vol. 36, pp. 3030-3033, 1997.
- [5] K. Yanai, Y. Tomikawa, K. Sakurai and C. Kusakabe, "Q-Value Control of Piezoelectric Vibrator with Negative Impedance Converter Circuit", Jpn. J. Phys. Vol. 36. pp. 3034-3036, 2001.
- [6] L. Goras, C. Marcuta, "On Linear Inductance and Capacitance Time Conversion Using NIC-Type Configurations", IEEE. Vol. 40, NO. 5, 1993.

- [7] C. Y. Lin, "Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converters", Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, July 15, 1997, Blacksburg, Virginia.
- [8] Maione E., Tortoli P., Lypacewicz G., Nowicki A., "PSpice Modelling of Ultrasound Transducers: Comparison of Software Models to Experiment", Ultrason., Ferroelect., and Freq. Contr., IEEE Transactions on, Vol. 46, Issue. 2, pp. 399-406, March 1999.
- [9] W. M. Leach, Jr., "Controlled-Source Analogue Circuits and PSpice Models for Piezoelectric Transducers", IEEE Tras., Ultrason., Ferroelect., Freq., Contr., Vol. 41, No. 1, pp. 60-66, January, 1994.
- [10] 超音波工學, 株式會社 コロナ(社), 日本電子機械工業會 編, pp. 55-58, 1993.

감사의 글

지난 3년 동안 부족한 저를 지도해주신 김무준 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 어려운 문제에 봉착했을 때, 학문적으로 부족한 부분을 일깨워주시고 아낌없이 조언 해주신 하강열 교수님과 항상 변함없이 지켜 봐주신 김천덕 교수님께도 감사의 말씀 드립니다. 실험실에 같이 생활하면서 어려울 때마다 물심 양면으로 조언해주신 배민건 선생님과 정호 선배님에게 감사의 말씀 드립니다. 또한, 늘 함께 해준 친구, 행용, 인진, 그리고 학부 후배님들에게도 고맙다는 말을 전합니다. 마지막으로 언제나 저를 믿어주신 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다.