공학석사 학위논문

바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 이용한 집속형 트랜스듀서의 초점거리 제어에 관한 연구

지도교수 [illegible]

이 논문을 공학[illegible]으로 제출함

2005년 2월

부경대학교 대학원

음향진동공학협동과정

채 민 구

채민구의 공학석사 학위논문을 인준함

2002 년 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. 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 이용한 트랜스듀서의 초점거리 제어 4
2-1. 초점거리 제어의 원리 4
2-1-1. 직사각형 엑츄에이터 4
2-1-2. 원형 엑츄에이터 7
2-2. 트랜스듀서의 구조 및 제작 11
2-2-1. 엑츄에이터의 제작 11
2-2-2. 선집속형 트랜스듀서 13
2-2-3. 점집속형 트랜스듀서 13
2-3. 시뮬레이션 및 실험 방법 15
2-3-1. 전압 변화에 따른 트랜스듀서의 곡률 반경 변화 15
2-3-2. 수중에서의 음장 분포 시뮬레이션 18
2-3-3. 수중에서의 음장 분포 측정 21
2-4. 시뮬레이션 및 실험 결과 23
2-4-1. 선집속형 트랜스듀서 23
2-4-2. 점집속형 트랜스듀서 29

3. 탐지대상의 위치 확인에 적용 38
3-1. 실험 방법 38
3-2. 실험 결과 40

4. 결론 42

참 고 문 헌 43

A study for Focal Length Control of Line-Focus and Point-Focus Transducers Using Bimorph-Type Bending Actuator

Min-Ku, Chae

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

Abstract

Using a bimorph-type bending actuator, we proposed a new method which can control the focal length of a transducer by the electric DC voltage. We designed two kinds of focal length controllable ultrasonic transducers with actuators, those are a line-focus type and a point-focus type transducers. The polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric type polymer film is used for transmitting and receiving of ultrasonic signal. Using the method, it is confirmed by investigation of the acoustic field in underwater that focal length can be controlled in range of 10% to the radius of transducer curvature. Also, adopting the method to detection of copper which is inserted in agar medium, location of copper can be detected.

1. 서론

초음파는 1921년경 제작된 초음파 측심기를 시작으로 연구되기 시작했지만 공업적으로 이용하지 못한 것은 일반적으로 기술 수준이 낮고, 가격이 비싸며, 군사 목적으로 비밀리에 추진된 것이 큰 원인이라고 생각할 수 있는데, 기타 진동자로서 수정 진동자가 사용된 것도 하나의 원인으로 그 당시에는 그렇게 폭넓은 이용이 이루어지지 않았다.

세계 2차 대전이 끝나갈 무렵부터 시작해서 초음파에 관한 연구 성과가 일시에 해제되고 국제적 교류도 활발해져서 상업적 응용개발에 박차를 가했다. 신호적인 면에서는 탐상기와 어군 탐지기를 중심으로 동력적인 응용 면에서는 가공기와 세척기를 중심으로 하여 초음파 붐이라 할 정도로 초음파가 주목을 받게 되었다. 한편, PZT로 대표되는 압전 세라믹 재료를 목적에 맞게 접합하여 정밀하게 제어되는 구동력을 가지는 엑츄에이터가 주목을 받고 있다. 엑츄에이터란 어떠한 입력 에너지를 기계적 출력 에너지인 변위·응력으로 변환하는 변환기로 정의된다. 엑츄에이터는 그 모양과 접합 방법에 따라 유니몰프, 바이몰프, 무늬, 심벌 등이 있으며 현재 가장 널리 이용되고 있는 것이 바이몰프형 엑츄에이터이다. 바이몰프형 엑츄에이터는 적층형 엑츄에이터에 비해 변위의 확대율이 크고, 세라믹 판을 접착제로 붙이므로 제작이 용이하며 정밀한 조작이 가능하여 초정밀 안내기구, VTR 헤드 등에 가장 널리 이용되고 있다[1][2].

최근에 들어 의료용 목적으로 많이 이용되는 초음파 진단기는 신체의 여러 부위를 진단하는데 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 초음파 진단기에서 가장 중요한 부분이 진단 대상까지 초음파 신호를 보내고 다시 받아들이는 트랜스듀서이다. 이 트랜스듀서로 진단 대상에 대한 정보를 얻기 위해서는 측

방향의 스캐닝과 음축방향의 초점거리를 변화시켜야 한다.[3]

측방향의 스캐닝방법은 크게 전기적 스캐닝 방법과 기계적 스캐닝 방법으로 나누어진다[4]. 전자의 경우는 배열된 각 진동자에 여기 하는 전기신호에 위상가중치를 주어 스캐닝 하는 방법이고, 후자의 경우는 트랜스듀서를 기계적인 구동력에 의해 스캐닝 하는 방식이다. 하지만 위의 방법들 모두 음축방향으로 초점을 변화시키기 위해서는 전기 회로를 부가하여 각 진동자에 여기 되는 신호의 위상가중치 분포를 변화시키는 방식을 사용하고 있다. 이러한 방법은 진동자의 증가에 따라 부가되는 전기회로가 더욱더 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 음축 방향의 초점을 변화시키기 위해서 인가전압에 따른 기계적인 변위를 가지는 바이몰프형 엑츄에이터를 이용하여 트랜스듀서의 곡률 반경을 변화시키는 방법을 제안하였다. 이에 엑츄에이터에 인가되는 전압 변화에 대한 곡률 반경 변화를 측정하고, 엑츄에이터를 삽입한 트랜스듀서를 제작하여 곡률 반경 변화에 대한 수중에서 음장 분포의 변화를 측정하였으며 이를 음장 계산 프로그램인 Ultrasim을 이용하여 시뮬레이션 한 것과 비교 분석함으로써 기계적인 초점거리 제어의 가능성을 확인하였다[5]. 또한, 이러한 연구를 물과 비슷한 물성을 갖는 한천매질 속에 얇은 구리판을 넣어 구리판의 위치를 확인하는데 적용하여, 트랜스듀서의 초점거리를 변화시켜 가면서 삽입된 구리판에서 돌아오는 반사파를 측정하여 구리판의 위치를 확인하였다.

2. 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 이용한 트랜스듀서의 초점거리 제어

본 장에서는 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 기계적으로 초점거리를 변화시키기 위해 이용된 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터의 동작 원리에 대해 이론적으로 고찰하고 엑츄에이터와 트랜스듀서의 구조 및 제작과정을 소개하고, 엑츄에이터를 삽입한 트랜스듀서의 곡률 반경이 엑츄에이터에 인가된 전압에 비례하여 증가함을 실험적으로 확인하였다. 또한 전압 변화에 따른 수중에서의 음장 분포를 음장 계산 프로그램인 Ultrasim을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이를 실제 측정한 값과 비교하여 본 연구의 유용성을 확인하였다.

2-1. 초점거리 제어의 원리

2-1-1. 직사각형 엑츄에이터

Fig. 1과 같이 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터에 전압을 인가할 때 압전 횡효과에 의해 한쪽 판이 늘어나면 다른 판은 줄어들게 된다. 전체로서는 판과 판이 접착제로 고정되어 있기 때문에 일정한 방향으로 모멘트 M이 발생한다[6]. 이때 임의의 단면에 작용하는 모멘트 M은 식(1)과 같다[7].

$$M = M_V - K_C \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2}$$
$$M_V = e_{32} b t V, \quad K_C = b c_{22}^D t^3 (4 - 3k_{32}^2) \tag{1}$$

여기서, t 는 세라믹 판의 두께, b 는 폭, M_V는 전압에 따른 모멘트, K_C는 단위 질량당 작용하는 외력, e_{32} 압전상수, k_{32}는 전기·기계 결합계수, c_{22}^D는 stiffness, u_z 는 z축 방향의 변위이고 V 는 전압이다. z축 방향의 변위 u_z를 임의의 축 지점에서 z축 방향으로 발생하는 이차방정식의 형태로 가정하

면 식 (2)와 같다.

$$u_z = c_1 y^2 + c_2 y + c_3 \tag{2}$$

여기서 c_1, c_2, c_3는 각각 상수 계수이다. 엑츄에이터의 중심 $y = 0$ 인 지점에서 z축을 기준으로 좌우 대칭이면 변위 $u_z = 0$ 이다. 따라서 $c_2 = c_3 = 0$ 이다. 또한, 엑츄에이터의 양 끝단 즉 $y = \pm l/2$에서 $M = 0$ 이므로 식 (1)과 식 (2)에서 c_1 을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = 2c_1 = \frac{M_V}{K_C} \tag{3}$$

식 (1)과 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 전압 변화에 대한 z축 방향의 변위 u_z를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_z = \frac{e_{32} y^2}{2c_{22}^D t^2 (4 - 3k_{32}^2)} V \tag{4}$$

식 (4)에서 y축의 각 지점에서 z축 방향의 변위 u_z는 세라믹의 크기와 재료의 상수 값들이 주어지면 구동 전압 V에 대해 선형적으로 변화함을 알 수 있고, 주어진 전압 V 에 대해 변위 u_z의 분포는 2차 함수를 나타냄을 알 수 있다. 이를 전압 변화에 따른 y축 각 지점에서 z축 방향의 변위 u_z 를 계산해보면 Fig. 2와 같다.

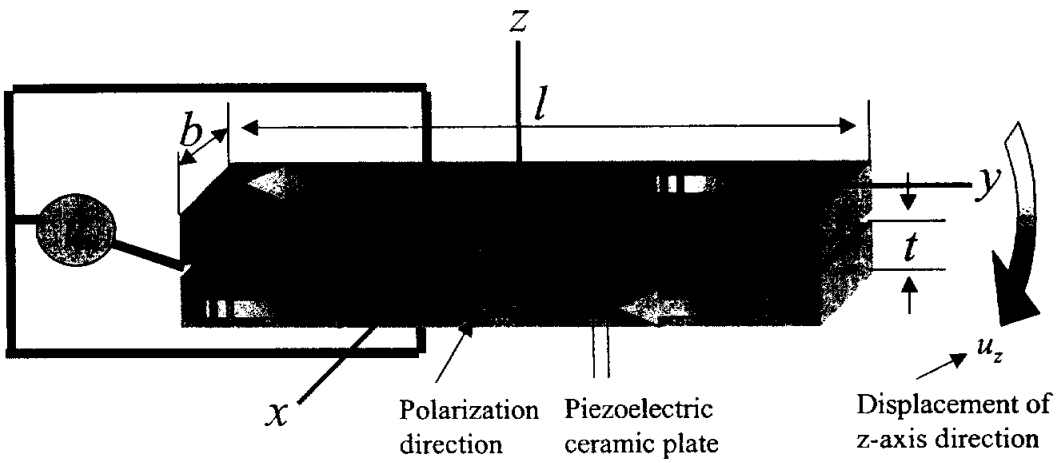

Fig. 1 Driving principle of actuator (rectangular type)

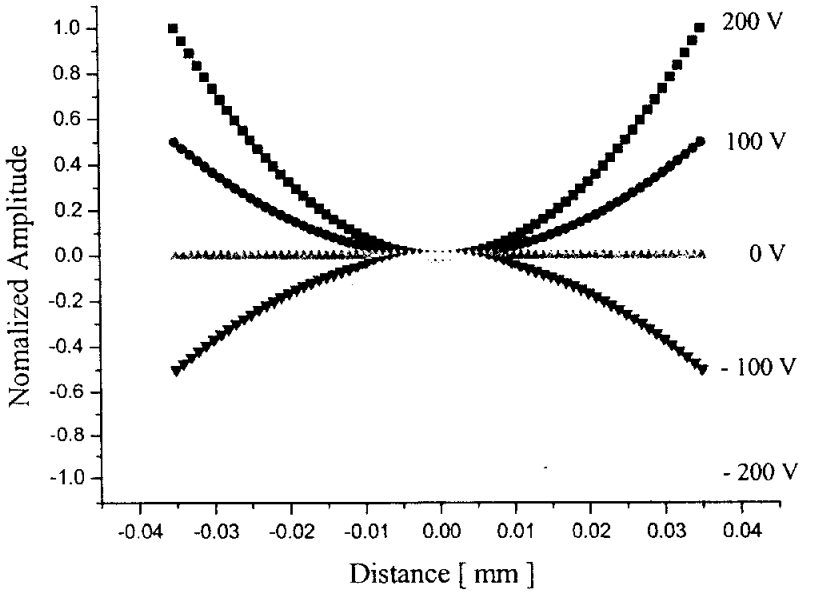

Fig. 2 Displacements of actuator for various DC voltages (Rectangular type)

2-1-2. 원형 엑츄에이터

Fig. 3의 반경이 a이고 두께가 t 인 원형 압전 세라믹판 한 장에 전압을 걸어주면 반지름 방향의 변위 u_r의 일반해는

$$u_r = c_1 \frac{r^2+1}{2r} - c_2 j \frac{r^2-1}{2r} \tag{5}$$

로 표현된다. 여기서 c_1, c_2는 상수이다. 경계조건에서 $r = 0$ 일 때 $u_r = 0$ 이므로 (5)식에서

$$\begin{aligned} 0 &= (c_1 - jc_2)\frac{r}{2} + (c_1 + jc_2)\frac{1}{2r} \\ c_1 &= -jc_2 \end{aligned} \tag{6}$$

로 표현된다. 따라서 u_r은 아래의 식과 같다.

$$u_r = c_1 r \tag{7}$$

원통좌표계에서 압전 요소에 대한 구성방정식은 아래와 같이 표현된다[8][9].

$$T_{rr} = c_{11}\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \sigma\frac{u_r}{r}\right) - e_{31}\frac{V}{t} \tag{8}$$

여기서, T_{rr}은 응력이고, c_{11}은 stiffness이고, σ는 Poisson's ratio 이며 e_{31}은 압전상수, V는 전압이며 아래와 같이 표현된다.

$$c_{11} = \frac{1}{s_{11}^E(1-\sigma^2)} \tag{9}$$

$$\sigma = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E} \tag{10}$$

$$e_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} \tag{11}$$

여기서, d_{31}은 압전 변형 상수이다. $r = a$ 에서 응력 $T_{rr} = 0$ 이므로 식 (7)을 식(8)에 대입하여 정리하면 c_1은

$$c_1 = \frac{e_{31}}{c_{11}(1+\sigma)} \frac{V}{t} \tag{12}$$

이 된다. 이 식(12)를 식(7)에 대입하여 정리하면

$$u_r = \frac{e_{31}}{c_{11}} \frac{V}{t} \frac{r}{(1+\sigma)} \tag{13}$$

로 표현되는 반지름 방향의 변위를 구할 수 있다. Fig. 3과 같이 분극 방향이 같은 두 장의 압전 세라믹 판을 접착하고, DC 전압을 반대 방향으로 인가하게 되면 u_r 의 방향이 서로 반대가 되어 결국은 z축 방향으로 움직이도록 변형력이 발생할 것이다. Fig. 4와 같이 변형력에 의해 원호의 형태로 변형이 일어났다고 가정하면 아래의 (14)식과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} r - u_r &= (R - t)\theta \\ r + u_r &= (R + t)\theta \\ r &= R\theta \end{aligned} \tag{14}$$

식(14)를 연립하여 풀어주면 아래와 같다.

$$\theta = \frac{u_r}{t}\ ,\ R = \frac{r}{\theta} = \frac{t}{u_r} r \tag{15}$$

Fig. 4는 L을 빗변으로 가지는 직각삼각형이므로

$$\begin{aligned} L\cos\theta &= R\ ,\ L = \frac{R}{\cos\theta} \\ l &= L - R\ ,\ u_z = l\cos\theta \end{aligned} \tag{16}$$

따라서, 식(16)에 식(15), 식(13)을 대입하여 정리하면 z축 방향의 변위 u_z는 아래의 식으로 주어진다.

$$u_z = \frac{c_{11} t^2 (1+\sigma)}{e_{31} V} \left[1 - \cos\left\{ \frac{e_{31} V r}{c_{11} t^2 (1+\sigma)} \right\} \right] \tag{17}$$

DC 전압 변화에 따른 z축 방향의 변위 u_z 를 계산해보면 Fig. 5와 같다.

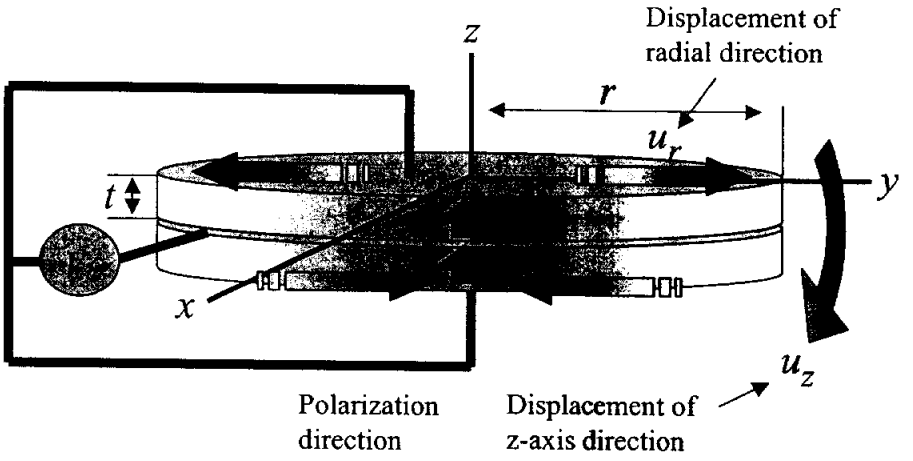

Fig. 3 Driving principle of actuator (circular type)

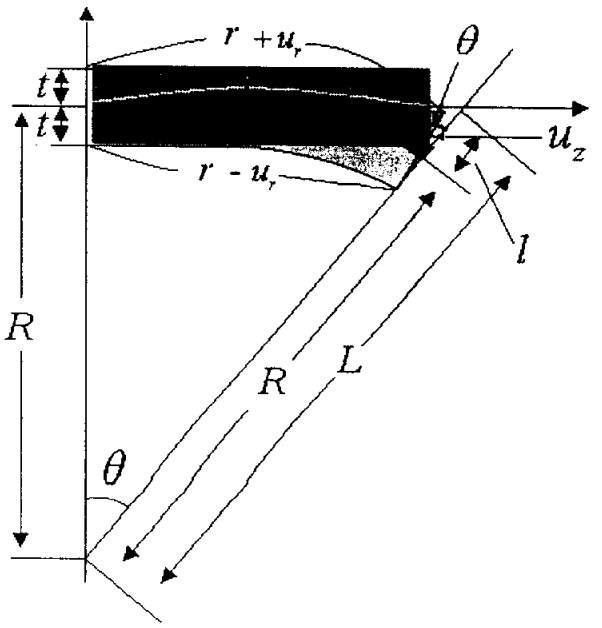

Fig. 4 Displacement in z-axis of actuator

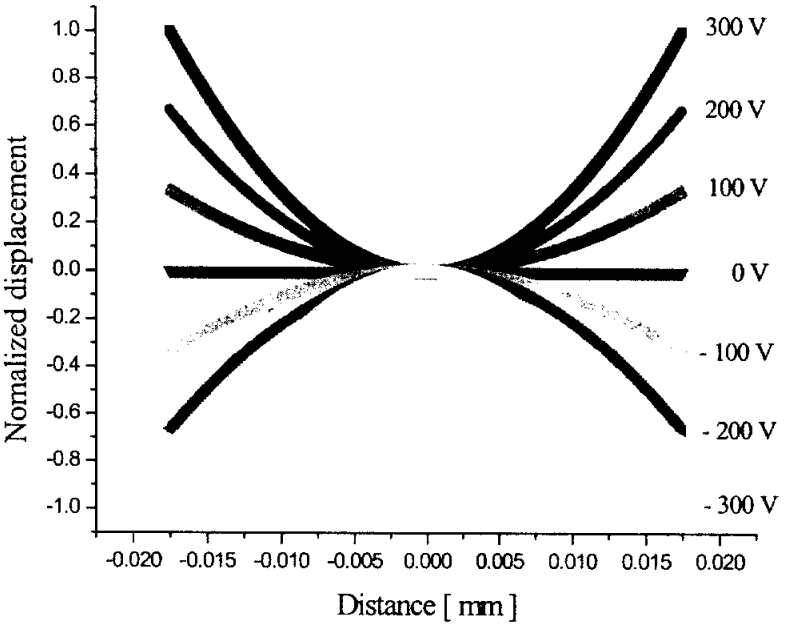

Fig. 5 Displacements of actuator for various DC voltages (circular type)

2-2. 트랜스듀서의 구조 및 제작

이 절에서는 엑츄에이터의 설계시 인가되는 DC전압과 발생 변위에 관한 위의 식(4)와 식(17)을 압전 세라믹의 두께가 변화함에 따라 어떻게 변화하는지 알아보고 실험 목적에 적합한 압전 세라믹을 선정하여 엑츄에이터를 제작하였다. 그리고 이 제작한 엑츄에이터를 뒷부분에 삽입하여 PVDF를 이용한 트랜스듀서를 제작하였다.

2-2-1. 엑츄에이터의 제작

압전 세라믹은 분극 과정을 통해 압전성을 가지도록 전압을 걸어준다. 보통 분극 DC전압이 1~2 [kV/mm]이기 때문에 압전 세라믹에 인가할 수 있는 DC전압의 최대값은 분극 DC전압보다 작아야 한다. 따라서 세라믹의 두께가 얇아질수록 인가 전압은 작아진다. 세라믹의 두께와 세라믹에 인가되는 DC 전압과 전압에 의한 발생 변위의 관계는 식(4)와 식(17)을 이용하여 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, rectangular type과 circular type의 두 경우 모두 같은 재질의 세라믹이며, 세라믹의 길이와 반경을 10[mm]로 고정하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 세라믹의 두께가 0.1[mm]에서 1[mm]로 증가하면 엑츄에이터에 인가하는 DC전압이 100[V]에서 1000[V]로 증가하지만 최대 인가 전압에서의 발생 변위가 약 10배 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 세라믹의 길이와 반경이 같다면 rectangular type 보다 circular type의 엑츄에이터가 같은 두께에서 더 큰 발생 변위를 가진다는 것도 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 사항을 고려하여 rectangular type의 경우에는 두께 0.3[mm], circular type의 경우에는 두께 0.4[mm]인 압전 세라믹을 이용하였다.

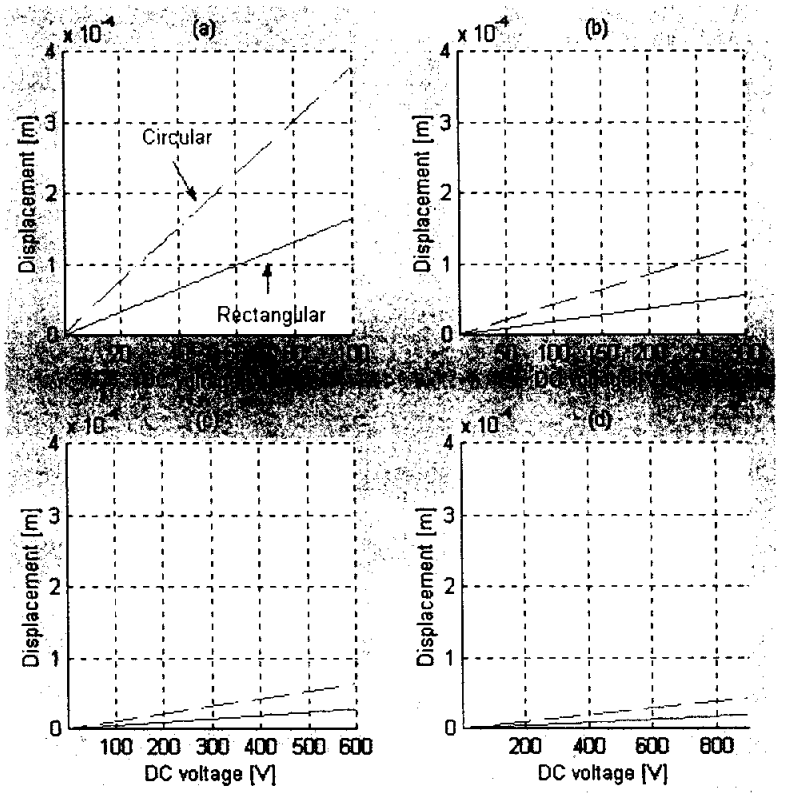

Fig. 6 Displacements of actuators for various DC voltages and thickness of piezoelectric ceramic
(a) t = 0.1[mm], (b) t = 0.3[mm],
(c) t = 0.6[mm], (d) t = 0.9[mm]

2-2-2. 선집속형 트랜스듀서

Fig. 1과 같이 길이(l) 7[cm], 폭(b) 1.6[cm], 두께(t) 0.3[mm]인 세라믹판 두 장을 분극 방향이 같도록 도전성 에폭시로 접착하고 세라믹판의 양끝과 가운데 지점에서 리드선을 연결하여 엑츄에이터를 제작한다. 다음으로 10.5[cm]의 반경을 가지는 원통에 Fig. 7과 같이 틀을 만들고 실리콘을 부어 곡면을 만든다. 여기에 이미 제작한 엑츄에이터를 삽입하고 다시 실리콘으로 완전히 채운다. 신호의 송수신을 위해서 앞쪽 곡면에 길이 7[cm], 폭 1.6[cm], 두께 110[μm]의 PVDF를 접착한다. PVDF는 수신 특성이 우수한 반면 송신 특성은 그렇지 못하기 때문에 PVDF와 같은 크기의 두께 0.1[mm]인 구리판을 접착하여 PVDF의 배면체로 사용하였다[10].

2-2-2. 점집속형 트랜스듀서

Fig. 3과 같이 반경 r = 17.5[mm], 두께 t = 0.4[mm]인 세라믹 판 두 장을 분극 방향이 나란하도록 도전성 에폭시를 이용하여 접착한다. 리드선을 양끝과 가운데 지점에서 연결하여 DC 전압 방향의 변화에 따라 변위 방향이 변하도록 하는 엑츄에이터를 제작한다. 선집속형과 마찬가지로 곡률 반경이 107[mm]인 구에 실리콘을 이용하여 일정한 곡면을 만든다. 그리고 곡면 위에 엑츄에이터를 올리고 실리콘으로 완전히 몰딩 처리한다. 곡면 앞에는 반경 35[mm], 두께 110[μm]인 PVDF를 신호의 송수신을 위해서 접착한다. PVDF와 같은 크기의 구리판을 접착하여 PVDF의 배면체로 사용하였다. Fig. 8은 실험에 이용한 두 종류의 트랜스듀서를 나타내었다.

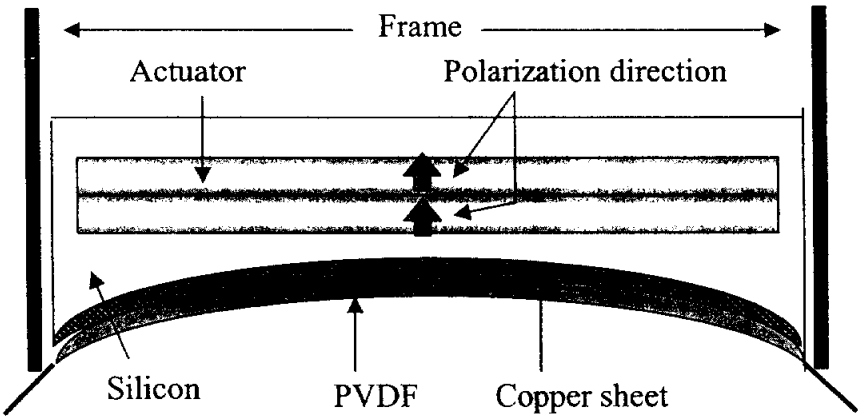

Fig. 7 Construction of transducer

Fig. 8 Photograph of transducers used in experiment

2-3. 시뮬레이션 및 실험 방법

앞의 식 (4)와 식 (17)은 직사각형과 원형 엑츄에이터의 Z축 방향의 변위를 나타내는 식이다. 두 식 모두 인가 DC 전압의 크기와 방향 변화에 대해 u_z의 크기와 방향이 변화하는 것을 Fig. 2와 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. 이로 미루어 볼 때 트랜스듀서가 Fig. 7과 같은 구조로 제작되었기 때문에 엑츄에이터에 인가되는 DC 전압을 변화시켜 주면 발생하는 엑츄에이터의 변위에 의해서 일정한 곡률 반경을 가지고 있던 트랜스듀서의 곡면을 변화시켜 줄 수 있음을 알 수 있다. 이 절에서는 인가 전압에 대한 트랜스듀서의 곡률 반경 변화를 측정한다. 또한 측정된 값을 이용하여 수중에서의 음장 분포를 시뮬레이션하고 실제 측정한 음장 분포와 비교하였다.

2-3-1. DC 전압 변화에 따른 트랜스듀서의 곡률 반경 변화

트랜스듀서의 곡률 반경이 인가 전압에 대해 어떻게 변화하는지 측정하기 위해 광원으로부터 트랜스듀서에 입사한 평행광선이 곡면에 반사되어 모이는 초점은 곡률 반경의 2배와 같다는 사실을 이용하였다.

$$R = 2f \tag{18}$$

여기서 f 는 초점거리이고 R 은 곡률 반경이다. Fig. 9는 선집속형의 경우에 곡률 반경을 측정하기 위한 장치도 이다. 이 실험에서 초점의 뚜렷한 구별을 위해 광원 앞에 슬릿을 설치하여 몇 가닥의 평행광선으로 만들었다. 엑츄에이터에 연결된 Power supply를 통해 DC 전압을 -200[V]에서 100[V]간격으로 200[V]까지 인가하면서 반사되어 모이는 초점을 기록하고 식 (18)을 이용하여 곡률 반경을 측정하였다. 엑츄에이터를 제작하기 위해 이용된 압전 세라믹의 분극 DC 전압이 1~2 [kV/mm]이고 선집속형의 경우 세라믹의 두께

는 0.3[mm], 점집속형의 경우는 0.4[mm]이기 때문에 너무 큰 전압에서는 분극을 파괴할 염려가 있었고, 접착된 세라믹 판의 간격이 좁기 때문에 단락되는 문제 또한 있었기 때문에 최대 DC 전압을 선집속형의 경우는 200[V], 점집속형의 경우는 300[V]까지 인가하였다. 선집속형의 경우와 점집속형의 경우의 측정한 결과를 Table I 과 TableⅡ에 각각 나타내었다.

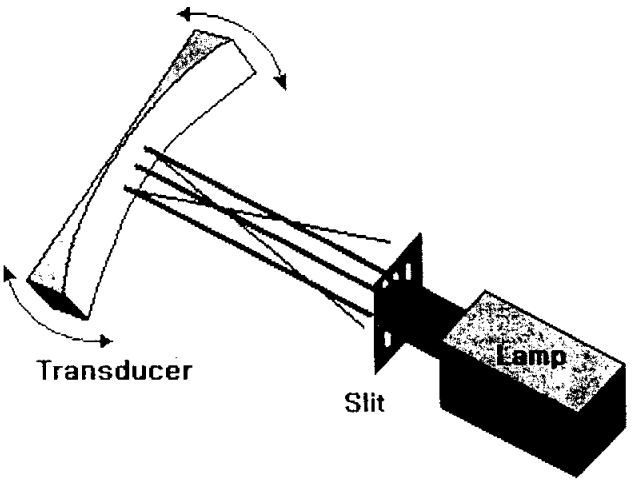

Fig. 9 Experimental setup for measuring radius of curvature
(Line-focus type)

Table I . Change in radius of curvature (Line-focus type)

Voltage [V]	Radius of curvature [mm]
-200	96.5
-100	99.4
0	103.2
100	105.4
200	108.5
Total	12

Table II. Change in radius of curvature (Point-focus type)

Voltage [V]	Radius of curvature [mm]
-300	94.8
-200	97
-100	98.8
0	101.2
100	103.2
200	105.2
300	107.8
Total	13

2-3-2. 수중에서의 음장 분포 시뮬레이션

Table Ⅰ과 TableⅡ의 곡률 반경의 측정치를 대입하여 수중에서 선집속형의 경우는 -200[V]에서 200[V]까지, 점집속형의 경우는 -300[V]에서 300[V]까지 100[V]간격으로 DC 전압을 변화시키면서 음장 분포의 변화를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에는 음장 계산을 위한 Matlab toolbox인 Ultrasim을 이용하였다. Ultrasim은 트랜스듀서의 형태, 측정하고자 하는 관찰 영역, 초음파가 전파되는 매질의 형태까지 조절이 가능하다. Fig. 10은 Ultrasim에서 시뮬레이션을 하기 위한 명령창을 나타낸다. 이 명령창에서 트랜스듀서의 형태와 전파되는 관찰 영역, 여기파의 형태, 매질의 상태 등을 입력할 수 있다. Fig. 11은 결과를 출력하는 창이다. TableⅢ은 시뮬레이션을 위해서 명령창에 입력한 데이터를 나타내는데 여기에서는 점집속형의 경우에 인가 전압을 0[V]로 했을 때의 입력 사항이다. 여기서 곡률 반경으로 입력한 값은 Tabel Ⅰ과 TableⅡ에서 측정한 값을 대입하였다.

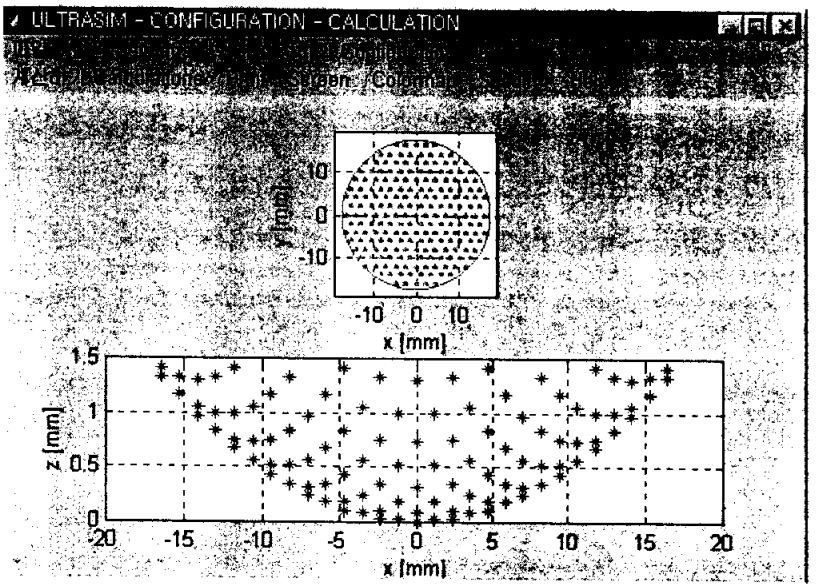

Fig. 10 Configuration tool of Ultrasim

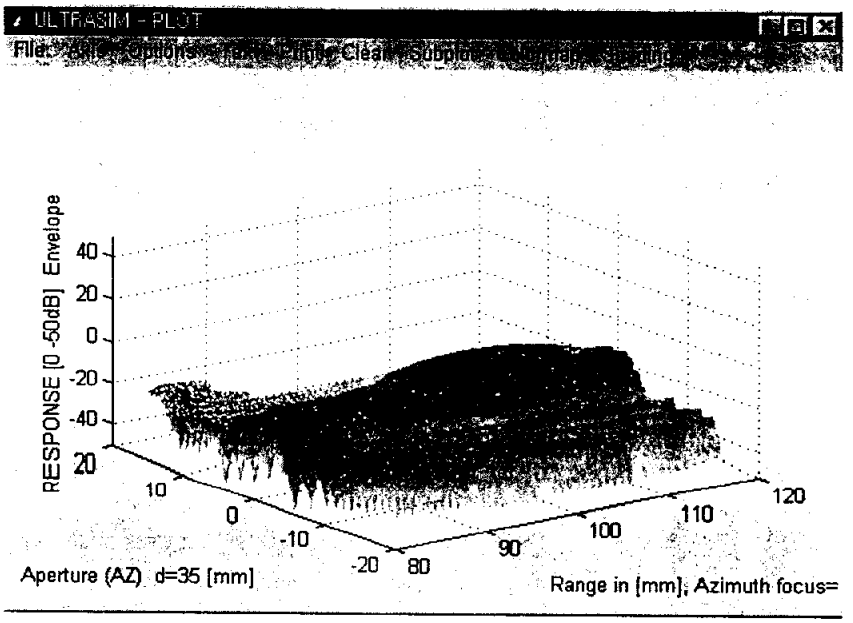

Fig. 11 Graphic tool of Ultrasim

TableⅢ. Input data of Ultrasim

Items		Values
Radius of curvature		101.2 [mm]
Transducer aperture		35 [mm]
Pulse type		Ultrasim
Observation range	y-axis	-15~15 [mm]
	z-axis	80~120 [mm]

2-3-3. 수중에서의 음장 분포 측정

Fig. 12는 수중에서의 음장 분포를 측정하기 위한 구성도 이다. 트랜스듀서에 펄스 신호를 여기하기 위한 Pulser와 엑츄에이터에 DC 전압 변화를 주기 위한 DC Power supply, 음장 분포를 측정하기 위한 하이드로폰을 컴퓨터에 연결하여 데이터를 분석하도록 구성하였다. 하이드로폰은 스텝핑 모터에 연결되어 xyz 방향으로 스캐닝 할 수 있도록 되어 있다. 본 연구에서는 y-z 면에 대해서 스캐닝 하여 DC 전압을 100[V]씩 변화시키면서 음장 분포를 측정하였다. 선집속형의 경우는 -200[V]에서 200[V]까지, 점집속형의 경우는 -300[V]에서 300[V]까지 변화시키면서 음장 분포의 변화를 측정하였다. 측정 시에는 트랜스듀서가 DC 전압 변화에 대해 가능한 자유롭게 움직일 수 있도록 선집속형의 경우는 스펀지로 트랜스듀서를 감아서 트랜스듀서를 고정하였고, 점집속형의 경우는 엑츄에이터에 후부에 연결된 리드선의 일부를 직경 2[mm]의 구리선을 이용하였기 때문에 구리선을 고정함으로써 트랜스듀서의 움직임을 최대한 자유롭게 하였다.

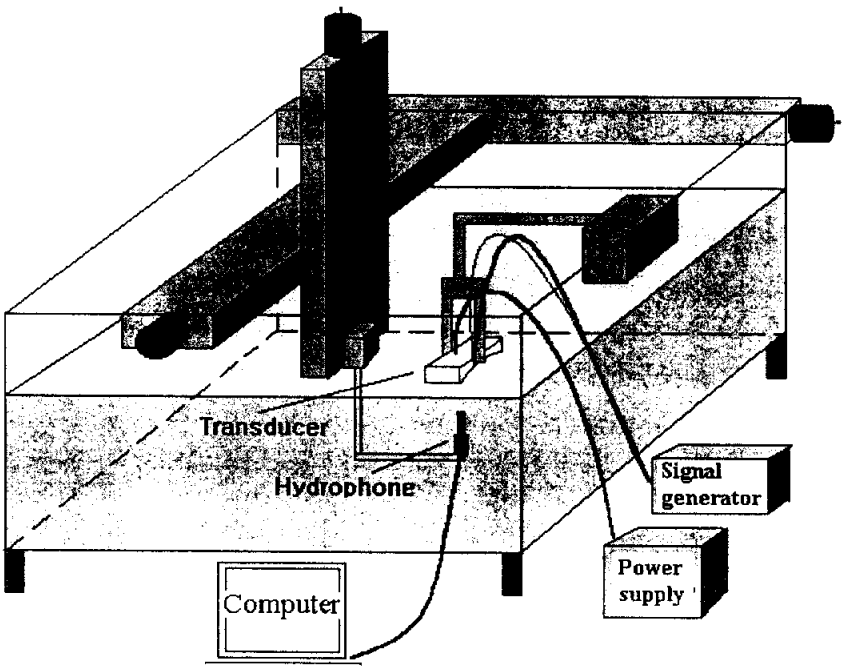

Fig. 12 Experimental setup for measuring acoustic field

2-4. 시뮬레이션 및 실험 결과

2-4-1. 선집속형 트랜스듀서

선집속형 트랜스듀서의 경우에 -200[V]에서 200[V]까지 인가 DC 전압 변화에 따른 음장 분포의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 Fig. 13(a), Fig. 13(b), Fig. 14(a), Fig. 14(b), Fig. 15(a), Fig. 15(b), Fig. 16(a), Fig. 16(b), Fig. 17(a), Fig. 17(b)에 각각 나타내었다.

선집속형의 경우에 시뮬레이션 시에 전압이 -200[V]일 때 초점거리가 96.5[mm] 이고 200[V]일 때 초점거리가 108.5[mm]로 총 초점거리의 변화 폭은 12[mm]이다. 측정 시에는 -200[V]에서 초점거리가 100.6[mm] 이고 200[V]에서 초점거리는 110.4[mm]로 DC 전압변화에 대해 총 9.8[mm]의 초점거리 변화가 발생함을 확인할 수 있다. 여기서 각 인가 DC 전압에 대해서 시뮬레이션과 측정시의 초점거리가 일치하지 않는 것은 곡률 반경을 측정하기 위한 실험에서 평행광선에 의한 초점이 형성될 때 수차에 의한 초점의 늘어짐이 발생하게 되는데 이때 늘어진 부분의 중앙 지점을 임의로 초점으로 잡았기 때문이라고 생각된다. 또한 측정 결과가 시뮬레이션 보다 초점거리의 변화 폭이 조금 작은 것은 선집속형 트랜스듀서를 수중에서 측정하기 위해서 스펀지를 이용하여 고정하였는데 이로 인해 엑츄에이터의 발생 변위가 완전히 전달되지 못했기 때문이다. 그림에서 전압은 DC전압을 나타내고, f_D 는 초점거리를 나타낸다.

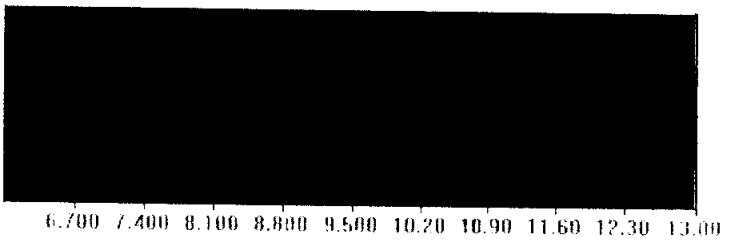

Fig. 13(a) Measurement results of acoustic field

Voltage = -200[V], f_D = 100.6[mm]

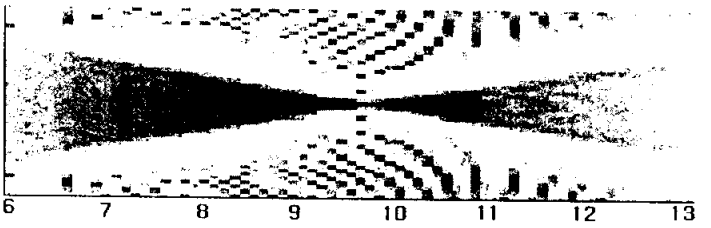

Fig. 13(b) Simulation results of acoustic field

Voltage = -200[V], f_D = 96.5[mm]

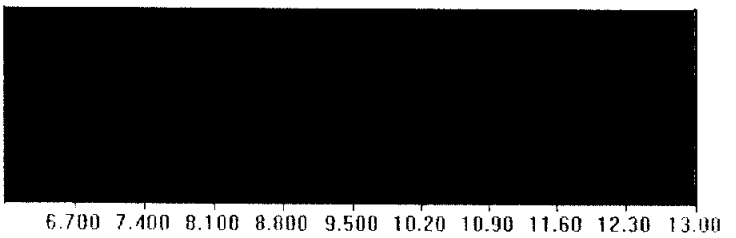

Fig. 14(a) Measurement results of acoustic field
Voltage = -100[V], f_D = 103.7[mm]

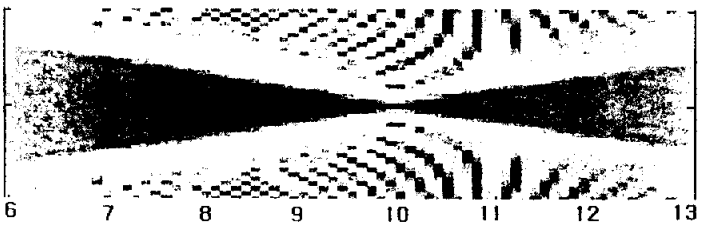

Fig. 14(b) Simulation results of acoustic field
Voltage = -100[V], f_D = 99.4[mm]

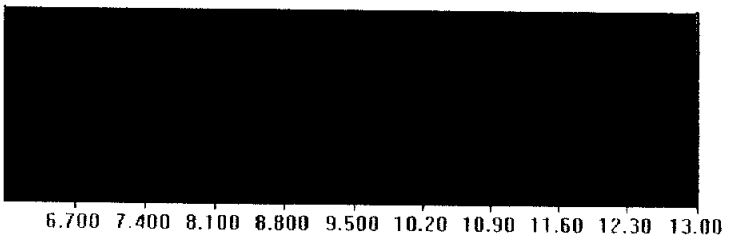

Fig. 15(a) Measurement results of acoustic field

Voltage = 0[V], f_D = 106.7[mm]

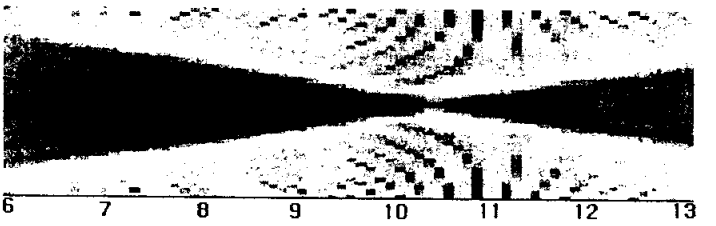

Fig. 15(b) Simulation results of acoustic field

Voltage = 0[V], f_D = 103.2[mm]

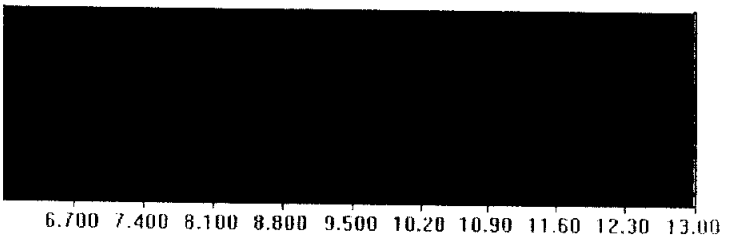

Fig. 16(a) Measurement results of acoustic field

Voltage = 100[V], f_D = 108.9[mm]

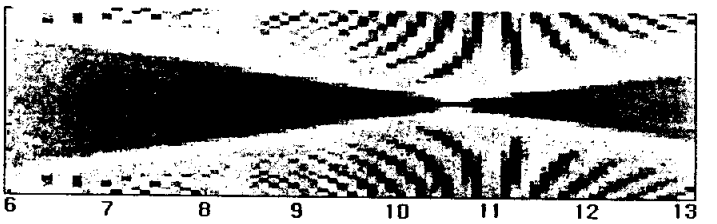

Fig. 16(b) Simulation results of acoustic field

Voltage = 100[V], f_D = 105.4[mm]

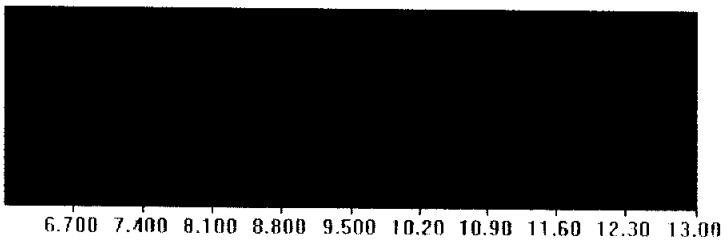

Fig. 17(a) Measurement results of acoustic field
Voltage = 200[V], f_D = 110.4[mm]

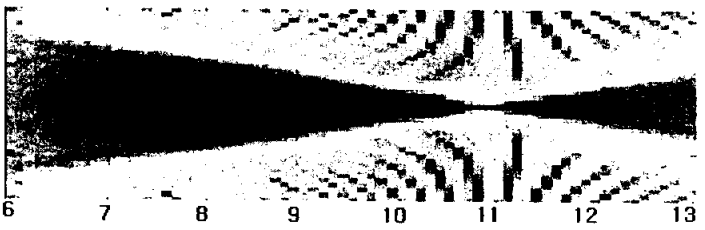

Fig. 17(b) Simulation results of acoustic field
Voltage = 200[V], f_D = 108.5[mm]

2-4-2. 점집속형 트랜스듀서

점집속형의 경우에는 -300[V]에서 300[V]까지 DC 전압 변화에 따른 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 이 결과를 Fig. 18(a), Fig. 18(b), Fig. 19(a), Fig. 19(b), Fig 20(a), Fig. 20(b), Fig. 21(a), Fig. 21(b), Fig. 22(a), Fig. 22(b), Fig. 23(a), Fig. 23(b)Fig. 24(a), Fig. 24(b)에 각각 나타내었다.

점집속형의 경우에는 시뮬레이션 시에 DC 전압이 -300[V]일 때 초점거리가 94.8[mm] 이고 300[V]일 때 초점거리가 107.8[mm]로 총 초점거리의 변화폭은 13[mm]이다. 측정 시에는 -300[V]에서 초점거리가 94.2[mm] 이고 300[V]에서 초점거리는 107.6[mm]로 DC 전압변화에 대해 총 13.4[mm]의 초점거리 변화가 발생함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션보다 측정 시에 더 큰 초점거리의 변화를 나타낸 것은 시뮬레이션에 이용된 TableⅡ의 측정값이 수차에 의해서 조금 차이가 있었기 때문이다. 선집속형의 경우와 점집속형의 경우에 수중에서 측정된 초점거리를 TableⅣ에 나타내었다.

두 경우 모두 DC전압이 증가함에 따라 초점이 트랜스듀서로부터 더 멀리 형성되고 이 결과들은 시뮬레이션과 거의 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 이상의 결과들로부터 진동요소의 어레이나 전기회로 없이 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 이용하여 트랜스듀서의 초점거리를 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

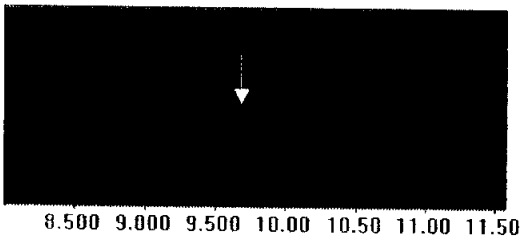

Fig. 18(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = -300[V], f_D = 94.2[mm]

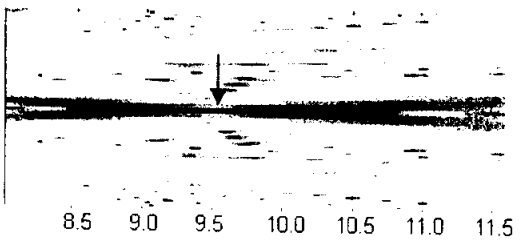

Fig. 18(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = -300[V], f_D = 94.8[mm]

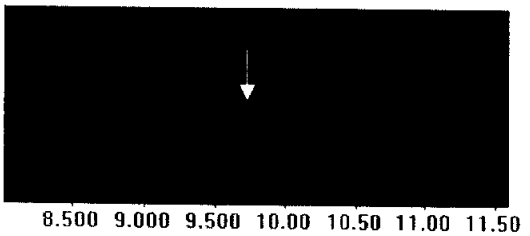

Fig. 19(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = -200[V], f_D = 95.42[mm]

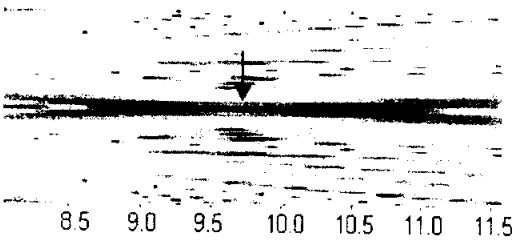

Fig. 19(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = -200[V], f_D = 97[mm]

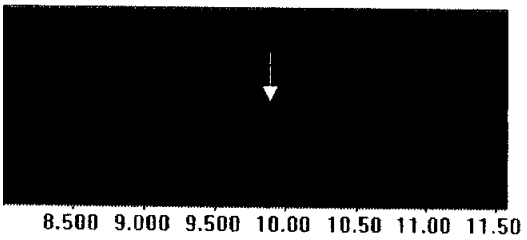

Fig. 20(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = -100[V], f_D = 97.29[mm]

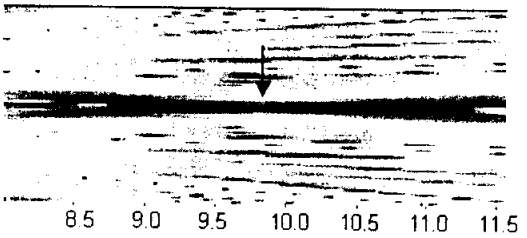

Fig. 20(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = -100[V], f_D = 98.8[mm]

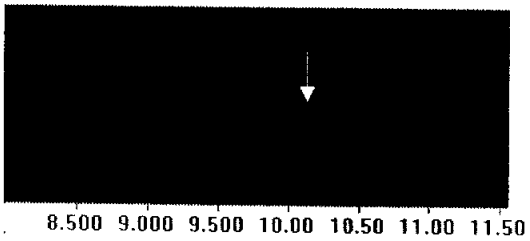

Fig. 21(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = 0[V], f_D = 99.78[mm]

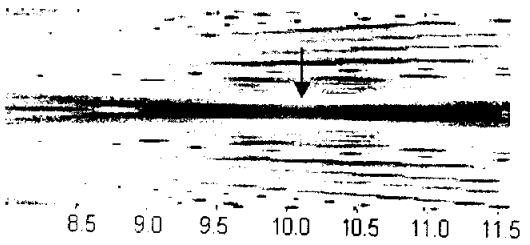

Fig. 21(b) Measurement result of acoustic field

Voltage = 0[V], f_D = 101.2[mm]

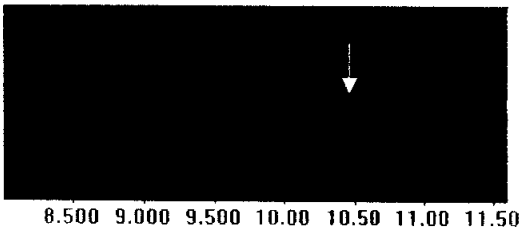

Fig. 22(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = 100[V], f_D = 102.02[mm]

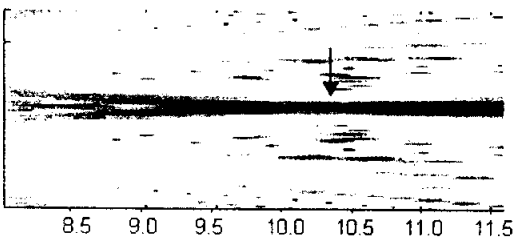

Fig. 22(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = 100[V], f_D = 103.2[mm]

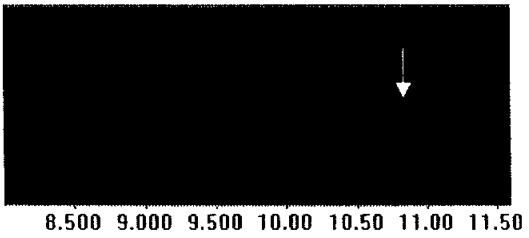

Fig. 23(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = 200[V], f_D = 105.04[mm]

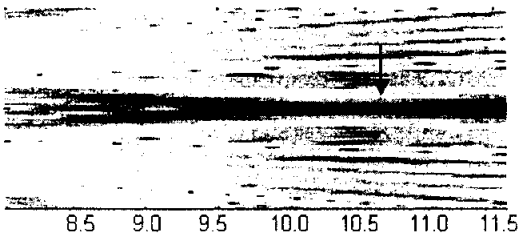

Fig. 23(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = 200[V], f_D = 105.2[mm]

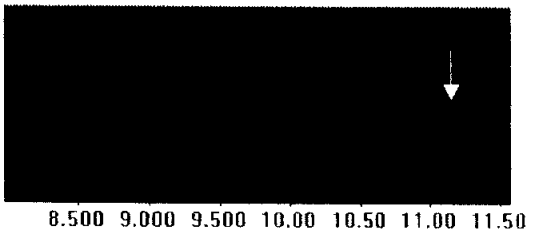

Fig. 24(a) Measurement result of acoustic field

Voltage = 300[V], f_D = 107.6[mm]

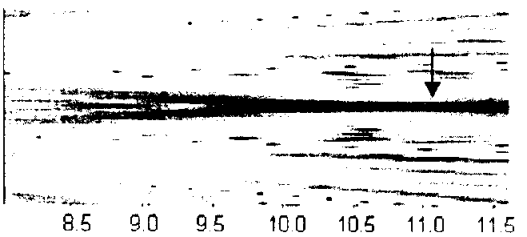

Fig. 24(b) Simulation result of acoustic field

Voltage = 300[V], f_D = 107.8[mm]

Table Ⅳ. Changing focal length about various voltages

Voltage [V]	Line focus type [mm]		Point focus type [mm]	
	Simulation	Measurement	Simulation	Measurement
-300			94.8	94.2
-200	96.5	100.6	97.0	95.42
-100	99.4	103.7	98.8	97.29
0	103.2	106.7	101.2	99.78
100	105.4	108.9	103.2	102.02
200	108.5	110.4	105.2	105.04
300			107.8	107.6
Total	12.0	9.8	13.0	13.4

3. 탐지대상의 위치 확인에 적용

본 장에서는 앞장에서 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 이용하여 트랜스듀서의 초점거리를 제어한 것을 적용하여 트랜스듀서의 위치를 변화시키지 않고 한천매질 속에 삽입되어 있는 구리의 위치를 확인하였다.

3-1. 실험 방법

먼저, Fig. 25와 같이 한천매질 속에 길이15[cm], 폭2[mm], 두께0.2[mm]인 구리를 삽입하였다. 그림과 같이 트랜스듀서를 위치하고 엑츄에이터에 연결된 DC power supply의 인가 전압을 20[V]씩 변화시켜 트랜스듀서의 초점거리를 변화시켰다. 이 때 구리에서 반사되는 반사파의 크기를 측정하였다. 또한, 트랜스듀서를 y축 방향으로 -4[mm]에서 1[mm]씩 4[mm]까지 이동시키면서 z축 방향으로 초점을 변화시켜 y-z 면에 대해 측정하였다. 우뭇가사리로 만든 한천분말과 물을 1 : 50의 비율로 섞어서 100℃까지 가열한 다음 냉각시켜 한천매질을 제작하였다. 한천매질의 두께는 183.2mm 이다.

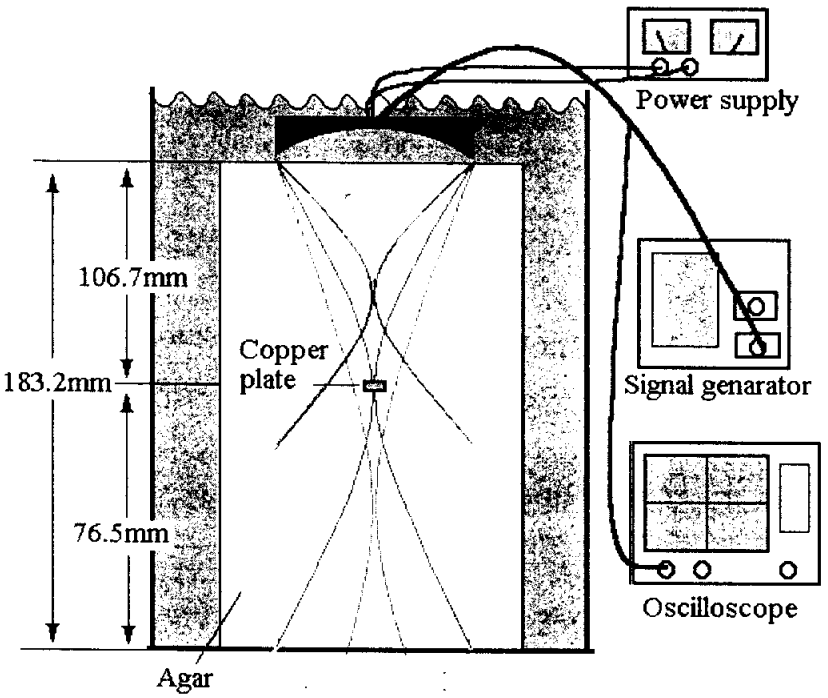

Fig. 25 Experimental setup for detecting copper plate

3-2. 실험 결과

트랜스듀서의 초점 변화에 대한 반사파의 크기를 측정하여 Fig. 26에 나타내었다. 구리의 위치가 106.7[mm]에 위치하고 있기 때문에 트랜스듀서의 초점이 구리의 위치와 일치할 때 반사파의 크기가 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 27은 y-z 면에 대하여 측정한 그림이다. 이 그림에서 반사파의 크기가 최대가 되는 지점이 깊이 방향에 대한 위치가 된다.

이 실험을 통해 트랜스듀서를 이동시키지 않고 엑츄에이터에 DC 전압을 인가하여 트랜스듀서의 초점을 변화시키는 것만으로 깊이 방향에 대한 구리의 위치를 확인할 수 있었다.

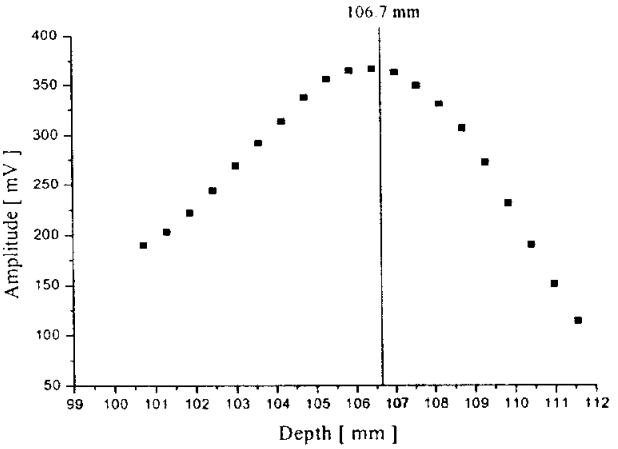

Fig. 26 Receiving amplitude for various depth

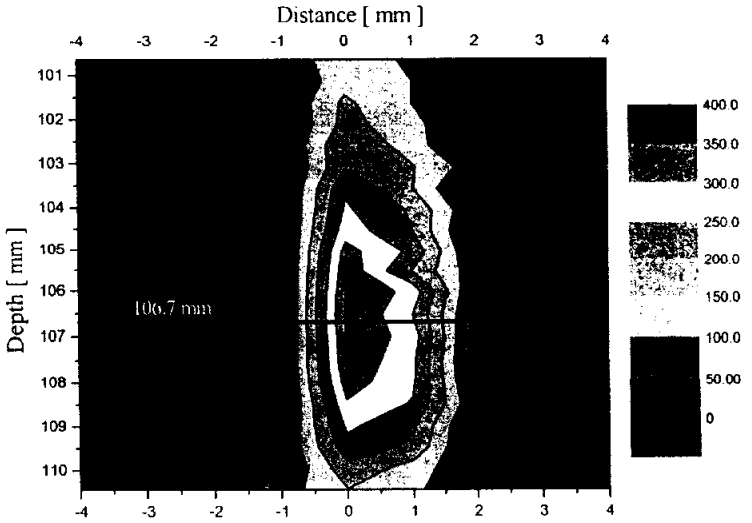

Fig. 27 Receiving amplitude for various depth and distance

4. 결론

본 연구에서는 세라믹의 두께와 세라믹에 인가되는 DC 전압과 전압에 따른 발생 변위의 관계를 고려하여 바이몰프형 밴딩 엑츄에이터를 제작하였고, 인가하는 DC 전압의 방향과 크기를 변화시킴으로써 엑츄에이터에서 발생하는 변위의 방향과 크기를 변화시켰다. 그리고 이 엑츄에이터를 삽입한 초점이 선에 집속되는 Line-focus 형과 한 점에 집속되는 point-focus 형 트랜스듀서를 제작하였다. 엑츄에이터에 인가하는 DC 전압을 변화시켜 트랜스듀서의 곡률 반경의 변화를 측정하였다. 이 곡률 반경의 측정값을 음장 계산 소프트웨어인 Ultrasim에 적용하여 수중에서의 음장 분포 변화를 시뮬레이션하고, 수조에서 측정한 값과 비교하였다. 그 결과, line-focus형 트랜스듀서의 경우에는 엑츄에이터에 인가하는 DC 전압을 -200V에서 200V까지 변화시켰을 때 100.6mm에서 110.4mm까지 초점거리를 제어할 수 있었으며, point-focus형 트랜스듀서의 경우는 DC 전압을 -300V에서 300V까지 변화시켰을 때 94.2mm에서 107.6mm까지 초점거리를 제어할 수 있음을 확인하였다. 이러한 연구를 탐지대상의 위치를 확인하기 위해 음축 방향에 대해 스캐닝 하는데 적용하였다. 그 결과 트랜스듀서는 고정된 채로 간단하게 초점거리를 변화시켜 한천 매질 속에 삽입된 구리에서 반사되는 반사파를 측정함으로써 구리의 위치를 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 엑츄에이터에 인가되는 DC 전압 변화에 대해 발생하는 변위를 이용하여 직접적으로 트랜스듀서의 곡률 반경을 변화시켜 주었다. 그러나 엑츄에이터에서 발생하는 변위를 더욱 크게 증가시켜 주도록 엑츄에이터의 구조에 대한 설계가 이루어진다면 트랜스듀서의 제어 가능한 초점거리 영역이 더욱 더 넓어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 김진수, "압전 엑츄에이터와 초음파 전동기",(대전, 2000) pp. 82-88

[2] 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)

[3] A. Goldstein, "Medical Ultrasonic Diagnostics", Academic Press, 1999, pp.106-111, pp119-123

[4] A. Goldstein, "Medical Ultrasonic Diagnostics", Academic Press, 1999, pp.101-105

[5] Sverre Holm, "A toolbox for ultrasound field simulation", Nordic Matlab Conference, Oslo, 2001

[6] Takuro Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity"(Sendai,1990), pp. 105-107

[7] 富川義朗, "超音波エレクトロニクス振動論", (1997) pp.123-127

[8] Takuro Ikeda, "Fundamentals of Piezoelectricity"(Sendai,1990), pp. 101-103

[9] Sung K. Ha, Young H. Kim, "Impedance and Admittance Matrices of Symmetric Piezoelectric Annular Bimorphs and their Applications" J, Acoustic. Soc. Am.108, pp.2125-2133

[10] M. Toda, "Narrowband Impedance Matching Layer for High Efficiency Thickness Mode Ultrasonic Transducers" IEEE Trans. UFFC. 49 (2002) No.3, 299

감사의 글

지난 5년 동안 많이 부족한 저를 지도해 주신 김무준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 많은 어려움에 부닥치었을 때 늘 아낌없이 조언 해주신 하강열 교수님께도 감사의 말씀 드리며, 항상 변함없이 지켜 봐주신 김천덕 교수님께도 감사의 말씀 드립니다. 같은 실험실에서 어려울 때마다 물심 양면으로 조언해주신 배민건 선생님과 정호 선배님에게 감사의 말씀 드립니다. 또한, 늘 함께 해준 성필, 행용, 인진, 그리고 학부 후배 님들에게도 고맙다는 말을 전합니다. 마지막으로 언제나 저를 믿어주신 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다.