

바이몰프형 밴딩 액츄에이터를 이용한 선집속형 초음파 트랜스듀서의 초점 거리 제어

Focal Length Control of Line-focus Ultrasonic Transducer Using Bimorph-type Bending Actuator

채민구*, 김무준**, 하강열**
(Min-Ku Chae*, Moo-Joon Kim**, Kang-Lyeol Ha**)

*부경대학교 대학원 음향진동공학협동과정, **부경대학교 물리학과
(접수일자: 2002년 8월 12일; 수정일자: 2003년 2월 7일; 채택일자: 2003년 3월 15일)

초음파 트랜스듀서는 초점거리의 제어를 위해서 각 진동요소에 전기회로를 이용한 위상가중치를 부가하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방법은 진동요소가 증가함에 따라 전기회로가 더욱 복잡해진다. 본 연구에서는 바이몰프형 액츄에이터를 신호의 송수신을 하는 PVDF의 뒷부분에 삽입하여 선집속형 트랜스듀서를 제작하였다. 이 트랜스듀서를 사용하여 액츄에이터에 인가되는 전압 변화에 의해 기계적으로 초점거리를 제어할 수 있었다. 이 방법을 사용한 결과 수중에서 선집속형 초음파 트랜스듀서의 초점거리를 곡률 반경의 10%범위까지 제어 가능함을 확인하였다.

핵심용어: 바이몰프, 액츄에이터, 선집속, 초점거리, PVDF

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.1, 4.7)

Fo: medical ultrasonic transducer, phase-weighting method has been used for controlling focal length with electric circuit at each vibrating element. However, the electric circuit is complex as the number of vibrating elements is increased. In this paper, we fabricated line-focus transducer with a bimorph-type piezoelectric actuator. The polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric type polymer film is used for transmitting and receiving of ultrasonic signal. Using this transducer, focal length of the transducer can be controlled mechanically by changing voltage of the actuator. It is confirmed that focal length of the transducer can be controlled in range of 10% to radius of curvature.

Keywords: Bimorph, Actuator, Line-focus, Focal length, PVDF

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.1, 4.7)

1. 서론

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 위해서 측방향의 스캐닝과 음축방향의 초점거리를 변화시킨다. 측방향의 스캐닝방법은 크게 전기적 스캐닝 방법과 기계적 스캐닝 방법으로 나눈다[1,2].

전자의 경우는 배열된 각 진동요소에 여기하는 전기신호에 위상가중치를 주어 스캐닝하는 방법이고, 후자의 경우는 트랜스듀서를 기계적인 구동력에 의해 스캐닝하는 방식이다. 하지만 위의 방법들 모두 음축 방향으로 초점을 변화시키기 위해서는 전기 회로를 부가하여 각 진동 요소에 여기되는 신호의 위상가중치 분포를 변화시키는 방식을 사용하고 있다[3]. 이러한 방법은 진동 요소의 증가에 따라 부가되는 전기회로가 더욱더 증가하게 된다. 한편, PZT로 대표되는 압전 세라믹 재료를 목적에 맞게 접합하여 정밀하게 제어되는 구동력을 가지는 액츄에이터가 주목을 받고 있다. 액츄에이터는 그 모양과 접합 방법에 따라 유니몰프, 바이몰프, 무니, 심벌 등이 있으며 현재 가장 널리 이용되고 있는 것이 바이몰프형 액츄에

책임저자: 김무준 (Kimmj@pknu.ac.kr)
30-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 물리학과
전화: 051-620-6349; 팩스: 051-611-6357

이터이다. 바이폴프형 액츄에이터는 적층형 액츄에이터에 비해 변위의 확대율이 크고, 세라믹 판을 접착제로 붙이므로 제작이 용이하며 정밀한 조작이 가능하여 초정밀 안내기구, VTR 헤드 등에 가장 널리 이용되고 있다[4]. 따라서 본 연구에서는 음축 방향의 초점을 변화시키기 위해서 바이폴프형 밴딩 액츄에이터의 변형력을 이용하여 PVDF의 뒷부분에 액츄에이터를 삽입한 트랜스듀서를 제작하고[5], 액츄에이터에 인가되는 전압 변화에 대한 곡률 반경 변화를 측정하였다. 또한 곡률 반경 변화에 대한 수중에서 음장 분포의 변화를 측정하여 시뮬레이션과 비교 분석함으로써 기계적인 초점거리 제어의 가능성을 확인하였다.

II. 이론 및 제작

2.1. 이론

본 연구에서는 동일한 특성의 압전세라믹 2장으로 구성된 바이폴프형 액츄에이터를 제작하였다. 그림 1과 같이 바이폴프에 전압을 인가할 때 압전 횡효과에 의해 한 쪽 판이 늘어나면 다른 판은 줄어들게 된다. 전체로서는 판과 판이 접착제로 고정되어 있기 때문에 일정한 방향으로 모멘트 M 이 발생한다[6]. 이때 직사각형판의 임의의 단면에 작용하는 모멘트 M 은 식 (1)과 같다.

$$M = M_V - K_C \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2}$$

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

여기서 l 은 세라믹 판의 길이, t 는 두께, b 는 폭, M_V 는 전압에 따른 모멘트, K_C 는 체적력, e_{32} 압전상수, k_{32} 는 전기·기계 결합계수, c_{22}^D 는 강성계수 (stiffness), ξ 는 z 축 방향의 변위이고 V 는 전압이다. z 축 방향의 변위 ξ 를 임의의 y 축 지점에서 z 축 방향으로 발생하는 이차 방정식의 형태로 가정하면 식 (2)와 같다.

$$\xi = c_1 y^2 + c_2 y + c_3 \quad (2)$$

여기서 c_1, c_2, c_3 는 각각 상수 계수이다. 액츄에이터의 중심 $y = 0$ 인 지점이 고정되어 있고 z 축을 기준으로 좌우 대칭이면 변위 $\xi = 0$ 이다. 따라서 $c_2 = c_3 = 0$ 이다. 또한, 액츄에이터의 양 끝단 즉 $y = \pm l/2$ 에서 $M = 0$ 이므로 식 (1)과 식 (2)에서 c_1 을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = 2c_1 = \frac{M_V}{K_C} \quad (3)$$

식 (1)과 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 전압 변화에 대한 z 축 방향의 변위 ξ 를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (4)에서 y 축의 각 지점에서 z 축 방향의 변위 ξ 는 세라믹의 크기와 재료의 상수 값들이 주어지면 구동 전압 V 에 대해 선형적으로 변화함을 알 수 있고, 주어진 전압 V 에 대해 y 축에 따른 변위 ξ 의 분포는 2차 함수를 나타낼 수 있다.

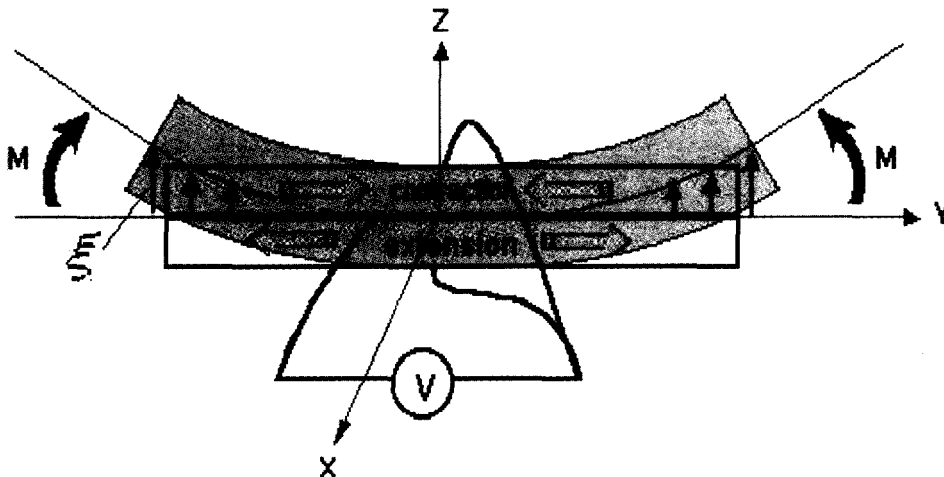


그림 1. 액츄에이터의 구동 원리
Fig. 1. Driving principle of actuator.

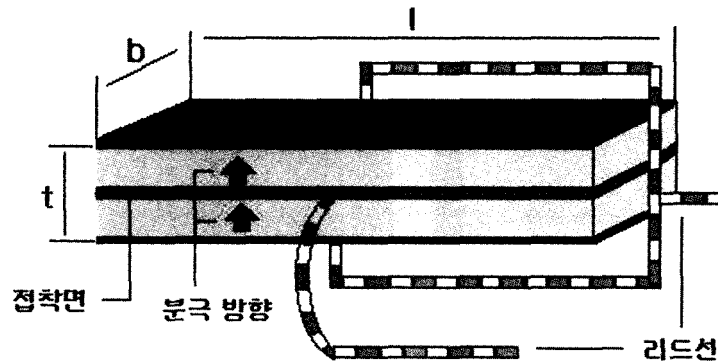


그림 2. 액추에이터의 구조
Fig. 2. Construction of actuator.

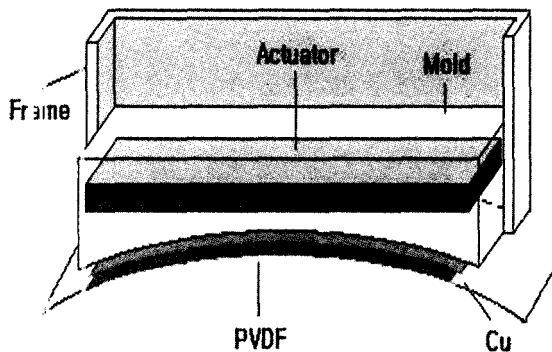


그림 3. 트랜스듀서의 구조
Fig. 3. Construction of transducer.

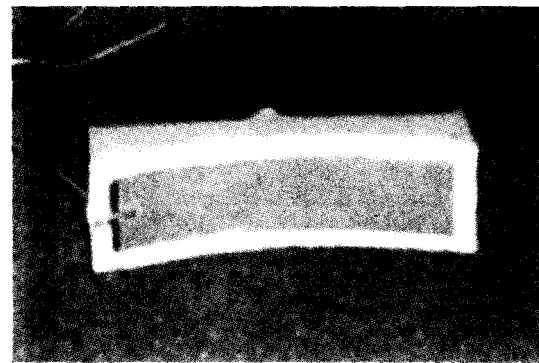


그림 4. 실험에 이용된 트랜스듀서의 사진
Fig. 4. Photograph of transducer used in experiment.

2.2 트랜스듀서의 제작

그림 2와 같이 길이 (l) 7[cm], 폭 (b) 1.6[cm], 두께 (t) 0.05[cm]인 세라믹 판 두 장을 분극 방향이 같도록 에폭시도 접착한 후 10.5[cm]의 반경을 가지는 원통에 그림 3과 같이 틀을 만들고 실리콘을 부어 곡면을 만든다. 여기에 이미 제작한 액추에이터를 삽입하고 다시 실리콘으로 완전히 채운다. 신호의 송수신을 위해서 앞쪽 곡면에 길이 7[cm], 폭 1.6[cm], 두께 110[μ m]의 PVDF를 접착한다. PVDF는 수신 특성이 우수한 반면 송신 특성은 그렇지 못하기 때문에 PVDF와 같은 크기의 두께 0.1[mm]인 구리 단을 접착하게 되면 PVDF가 공진 특성을 갖게 되므로 PVDF의 배면체로 사용하였다[7]. 그림 4는 제작한 트랜스듀서이다.

다. 그래프를 보면 전압이 0[V]에서 -200[V]까지 변화하면 -z축 방향으로 변위가 증가하고, 0[V]에서 200[V]까지 변화하면 +z축 방향으로 변위가 증가함을 알 수 있다.

그림 3과 같이 액추에이터가 삽입된 트랜스듀서 구조라면 액추에이터의 발생 변위에 따라 액추에이터를 싸고 있는 몰드의 곡률 반경이 변화할 것임을 예측할 수 있다.

III. 시뮬레이션 및 실험

스 (4)를 이용하여 액추에이터에 전압을 -200[V]에서 200[V]까지 100[V]씩 변화시키면서 y축 방향의 각 지점에서 z축 방향의 변위 ξ 를 계산하여 그림 5에 나타내었

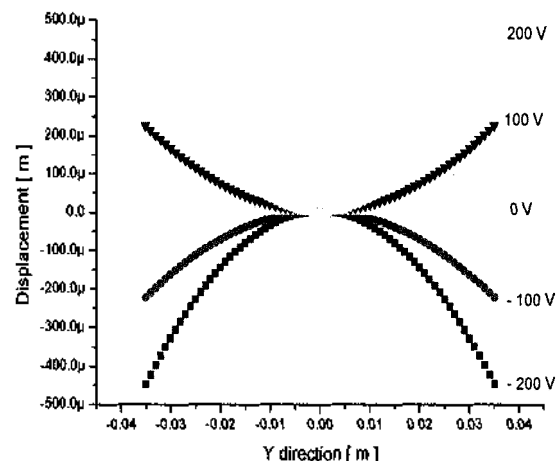


그림 5. 전압 변화에 따른 액추에이터의 변위
Fig. 5. Displacement of actuator for various voltage.

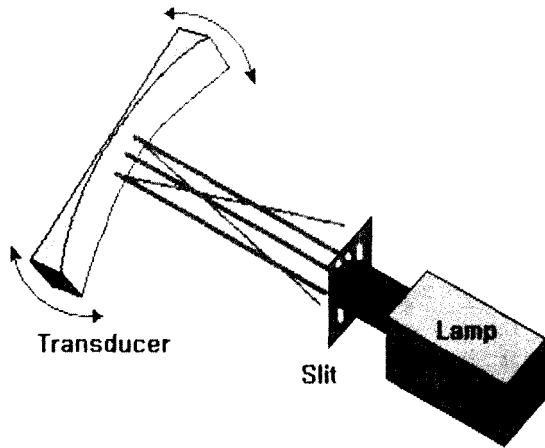


그림 6. 곡률 반경 측정 장치도
Fig. 6. Experimental setup for measuring radius of curvature.

표 1. 전압 변화에 따른 곡률 반경의 변화
Table 1. Radius of curvature change for various voltage.

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

전압에 대한 트랜스듀서의 곡률 반경의 변화를 측정하기 위해서 아래의 그림 6과 같이 장치하고, 광원으로부터 트랜스듀서에 입사한 평행광이 곡면에 반사되어 모이는 초점은 곡률 반경의 2배와 같다는 사실을 이용한다.

$$R = 2f_D \quad (5)$$

여기서 f_D 는 초점거리이고 R 은 곡률 반경이다. 그림 6의 실험에서 초점의 뚜렷한 구별을 위해 광원 앞에 슬릿을 설치하여 평행광선으로 만들었다. 그림 7은 그림 6과 같은 구성으로 평행광선이 트랜스듀서의 곡면에서 반사하여 초점에서 모이는 모습의 예이다.

이와 같은 방법으로 액츄에이터에 전압을 -200[V]에서 200[V]까지 변화시키면서 그에 따른 곡률 반경을 측정 한 값을 표 1에 나타내었다. 이 결과를 보면 액츄에이터에 인가한 전압을 -200[V]에서 200[V]까지 변화시켰을 때 총 초점거리의 변화 폭은 12[mm]이다. 표 1의 곡률 반경의 측정치를 대입하여 수중에서 음장분포의 전압 변화에 따른 초점 거리 변화를 음장 계산 프로그램인 Ultrasim을 이용하여 시뮬레이션 하였다[8]. 그림 8은 수중에서의 음장 분포를 측정하기 위한 구성도이다. 이 장치에 이용된 스텝핑 모터의 최소 이동 범위는 10[μm]이다. 트랜스듀서



그림 7. 곡률 반경 측정 예
Fig. 7. Example of measuring radius of curvature.

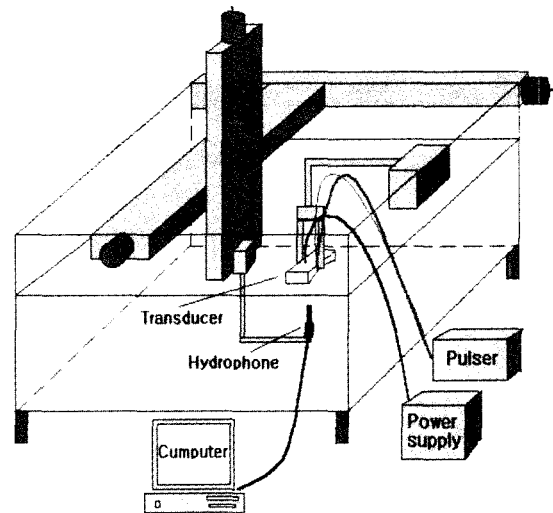


그림 8. 음장 측정 장치도
Fig. 8. Experimental setup for measuring acoustic field.

에 펄스 신호를 여기하기 위한 Pulser와 액츄에이터에 전압 변화를 주기 위한 Power supply, 음장 분포를 측정하기 위한 하이드로폰을 컴퓨터에 연결하여 데이터를 분석하도록 구성하였다.

IV. 결과

표 1의 곡률 반경 측정치를 이용하여 -200[V]에서 200[V]까지 전압을 변화시킬 때의 곡률 반경 변화에 대해 수중에서의 음장 분포 변화를 시뮬레이션하여 그림 9에 나타내었다. 이 결과를 보면 인가 전압 -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. 그림 8과 같

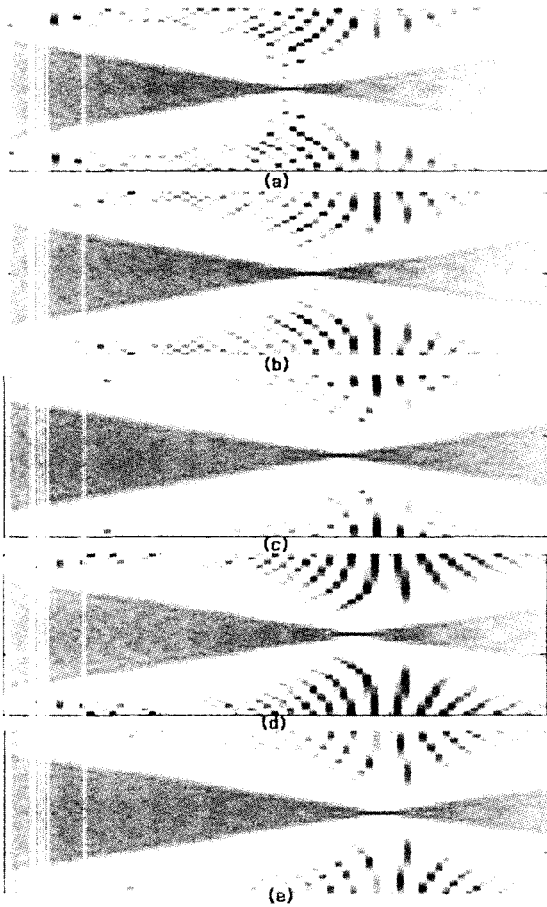


그림 9. 음장이 시뮬레이션 결과
 Fig. 9. Simulation results of acoustic field.
 (a) $V = -200[V]$, $f_D = 96.5[mm]$ (b) $V = -100[V]$, $f_D = 99.4[mm]$
 (c) $V = 0[V]$, $f_D = 103.2[mm]$ (d) $V = 100[V]$, $f_D = 105.4[mm]$
 (e) $V = 200[V]$, $f_D = 108.5[mm]$

본 연구는 이를 이용하여 액츄에이터에 전압을 -200[V]에서 200[V]까지 변화시키면서 수중에서의 음장 분포를 측정 결과를 나타낸 그림 10에 나타내었다. -200[V]에서 초점거리가 100.6[mm]이고 200[V]에서 초점거리는 110.4[mm]로 전압 변화에 대해 총 9.8[mm]의 초점거리 변화가 제어 가능함을 확인하였다. 그림 9와 그림 10을 비교해 보면 실제 측정된 초점거리의 변화가 시뮬레이션 값보다 2.2[mm] 작은 것을 알 수 있는데 이것은 실제 측정에서 액츄에이터의 변위 표 1에서 측정된 값보다 작음을 나타낸다. 여기서 우리가 DC 전압에 대해서 시뮬레이션과 측정시의 초점거리가 일치하지 않는 것은 곡률 반경을 측정하기 위한 수중에서 평행광선에 의한 초점이 형성될 때 수차에 의한 초점의 늘어짐이 발생하게 되는데 이때 늘어난 부분의 변위 지주를 임의로 초점으로 정하여 시뮬레이션에 사용하였기 때문이라고 생각된다. 또한 측정 결과가 시뮬레이션보다 초점거리의 변화 폭이 조금 작은 것은 선집속

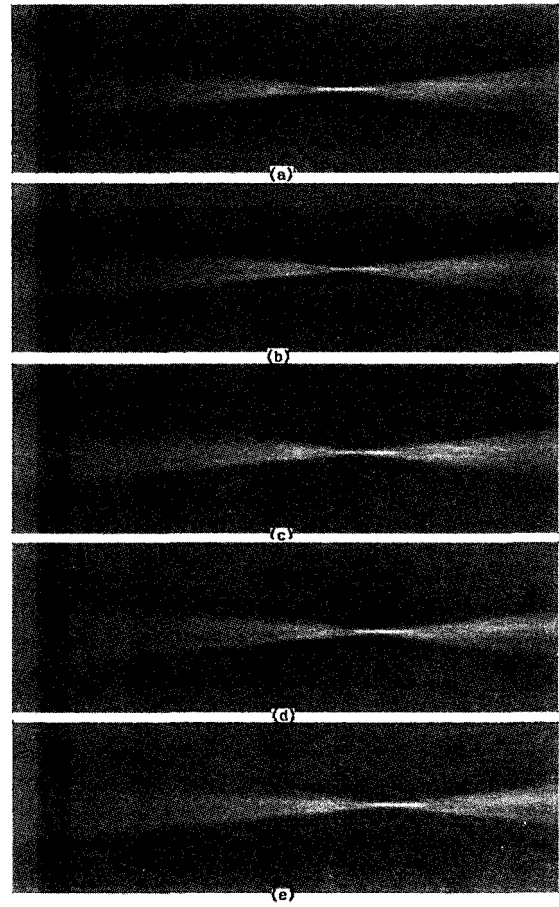


그림 10. 음장분포의 측정 결과
 Fig. 10. Measurement results of acoustic field.
 (a) $V = -200[V]$, $f_D = 100.6[mm]$ (b) $V = -100[V]$, $f_D = 103.7[mm]$
 (c) $V = 0[V]$, $f_D = 106.7[mm]$ (d) $V = 100[V]$, $f_D = 108.9[mm]$
 (e) $V = 200[V]$, $f_D = 110.4[mm]$

형 트랜스듀서를 수중에서 측정하기 위해서 스펀지를 이용하여 고정하였는데 이로 인해 액츄에이터의 발생 변위가 완전히 전달되지 못했기 때문이다.

V. 결론

본 연구에서는 세라믹의 두께와 세라믹에 인가되는 DC 전압과 전압에 따른 발생 변위의 관계를 고려하여 바이몰프형 밴딩 액츄에이터를 제작하였고, 인가하는 DC 전압의 방향과 크기를 변화시킴으로써 액츄에이터에서 발생하는 변위의 방향과 크기를 변화시켰다. 그리고 이 액츄에이터를 삽입한 초점이 선에 집중되는 선집속형 트랜스듀서를 제작하고 액츄에이터에 인가하는 DC 전압을 변화시켜 트랜스듀서의 곡률 반경의 변화를 측정하였다. 이 곡률 반경의 측정값을 음장 계산 소프트웨어인 Ultrasim

에 적용하여 수중에서의 음장 분포 변화를 시뮬레이션하고, 수조에서 측정한 값과 비교하였다. 그 결과 선집속형 트랜스듀서의 경우에는 액츄에이터에 인가하는 DC 전압을 -200[V]에서 200[V]까지 변화시켰을 때 100.6[mm]에서 110.4[mm]까지 초점거리를 제어할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 액츄에이터에 인가되는 DC 전압 변화에 대해 발생하는 액츄에이터의 변위를 이용하여 직접적으로 트랜스듀서의 곡률 반경을 변화시켜 주었다. 앞으로 액츄에이터에서 발생하는 변위를 더욱 크게 증가시켜 주도록 액츄에이터의 구조에 대한 설계가 이루어진다면 트랜스듀서의 제어 가능한 초점거리 영역이 더욱 더 넓어질 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. A. Goldstein and R. L. Powis, "Ultrasonic instruments and devices I," *Physical Acoustics*, X X III, 106-111, 1999.
2. A. Goldstein and R. L. Powis, "Ultrasonic instruments and devices I," *Physical Acoustics*, X X III, 101-102, 1999.
3. A. Goldstein and R. L. Powis, "Ultrasonic instruments and devices I," *Physical Acoustics*, X X III, 124-130, 1999.

4. 김진수, 압전 액츄에이터와 초음파 전동기, 82-88, 명현출판사, 대전 2000.
5. Q. M. Wang and X. H. Du, "Electromechanical coupling and output efficiency of piezoelectric bending actuators" *IEEE, Trans. UFFC*, 46 (3), 1997.
6. T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, 105-107, Sendai, 1990.
7. 현병국, 이가욱, 허강열, 김무준, 배종림, "PVDF 극소형 수중 청음기의 제작 및 특성 평가," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19 1(s), 381-384, 2000.
8. S. Holm, "Ultrasim-a toolbox for ultrasound field simulation," in *Proc. Nordic Matlab Conference*, Oslo, Norway, page Oct. 2001.

저자 약력

● 채 민 구 (Min-Ku Chae)

2001년: 부경대학교 물리학과 졸업 (이학사)
 2003년: 부경대학교 대학원 음향진동공학과 졸업 (공학석사)
 ※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서의 제작 및 초음파 음장 측정

● 김 무 준 (Moo-Joon Kim)

2002년 한국음향학회지 제21권 제7호 참조

● 하 강 열 (Kang-Lyeol Ha)

2002년 한국음향학회지 제21권 제7호 참조