

論文93-30A-2-4

## 초음파 구면 액체 렌즈 변환기에 관한 해석

## (A Study on an Ultrasonic Transducer with a Spherical Liquid Lens)

尹 伶 重\*, 朴 漢 奎\*

(Young Joong Yoon and Han Kyu Park)

## 要 約

본 논문에서는 압전 세라믹 변환기에 구면 액체 렌즈를 결합시킨 초음파 구면 액체 렌즈 변환기를 설계 하여, 변환기로 부터 두꺼운 액체 렌즈를 통해 방사된 음장의 분포를 구하기 위한 효율적인 해석 방법을 제시하고, 실험실 모델을 제작, 실험하여 이론치와 비교하여 잘 일치된 결과를 얻었다. 또한, 렌즈내의 액체량을 조절하여 렌즈막의 곡률 반경을 변화시켜, 능동적으로 초점 거리를 가변시킬 수 있음을 보였다.

## Abstract

In this paper, the ultrasonic transducer with a spherical liquid lens is designed and an efficient method to calculate the acoustic field radiated from the transducer is presented. A prototype ultrasonic transducer with a spherical liquid lens is constructed and tested. The experimental results are compared with those of the computer simulations and good agreements are achieved. The dynamic control of the geometric focus is obtained by adjusting the radius of curvature of the lens membrane with the volumetric control of the liquid in the lens.

## [. 서론

초음파 영상기에서는 1차원 위상 배열 변환기의 수직방향 빔을 기하학적으로 집속시키기 위해 초음파 렌즈를 주로 사용한다.<sup>[1,2]</sup> 초음파 렌즈의 재질로는 금속, 프라스틱, 또는 액체등이 이용되며, 렌즈의 초점 거리는 곡률 반경과 매질내에서의 음속으로 결정 된다. 이중 액체 렌즈는 오래전 초음파 영상 장치에 사용되었으며<sup>[3,4]</sup>, 최근 온열 치료기에도 사용되었다.<sup>[5]</sup>

액체 렌즈는 일반적으로 고체 렌즈보다 더 낮은 감쇠 계수와 인체에 대해 더 좋은 임피던스 정합 특성을 지니고 있다. 또한, 렌즈막을 탄성체로 만든다면 렌즈내의 액체량을 조절하여 초점 거리를 능동적으로 가변시킬 수 있다.

초음파 변환기로 부터 렌즈를 거쳐 방사된 음파에 의한 음장의 분포는 렌즈 형태에 따라 여러 방법으로 계산된다. 얇은 초음파 고체 렌즈의 음장 분포는 렌즈 표면에 따른 상대적인 위상차만을 고려하여 계산하거나<sup>[1,6]</sup>, 또는 오목한 구면의 렌즈 표면을 일정한 위상 분포를 갖는 개구면으로 변환시켜 계산한다<sup>[7]</sup>. 그러나 액체 렌즈의 경우는 두께가 초점거리에 비해 무시할 수 없으므로 상기와 같은 방법으로는 계산이 힘들며, 두꺼운 렌즈 모델에 대한 해석 방법을 이용해야 한다. 작은 곡률 반경으로 강한 집속효과를 내

\* 正會員, 延世大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Sciences & Technology  
Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1992年 8月 24日

는 작은 개구면의 두꺼운 렌즈에 대해서는, 렌즈를 여러개의 연속적인 박막의 결합으로 취급하여 해석할 수 있다.<sup>[8]</sup> 개구면이 큰 경우는 Huygens의 원리에 의거해서 렌즈 표면을 2차 음원의 분포로 간주하여, 1차 음원에 의한 2차 음원의 분포를 구하고 다시 2차 음원에 의한 음장의 분포를 구한다.<sup>[9]</sup> 이 방법에서는 계산을 용이하게 하기 위해, 각각의 음원의 분포를 수 많은 점원의 집합으로 간주하여 단순히  $e^{-kr}/R$  항만을 증가산함으로써 주어진 장점에서의 음속 포텐셜을 구했다. 그러나 이 방법은 렌즈 표면에서 2차 음원의 수직 성분이 모두 같은 방향이 아니므로 곡률 반경이 작아지면 정확도가 떨어지게 되고, 또한 상당량의 계산을 요하게 된다.

본 논문에서는 능동적인 집속 능력과 높은 이득을 지닌 초음파 구면 액체 렌즈 변환기를 설계하여 그 특성에 대한 효율적인 이론적, 해석 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 2차 음원에서의 수직 성분을 고려하여 정확도를 높이고, 수정된 사각형 방사체 방법을 사용하여 계산의 효율성을 높이려고 한다. 그리고, 실험실 모델을 제작하여 음의 강도 분포를 측정하여 이론치와 비교하고자 한다.

## II. 이론적 해석

### 1. 구면 액체 렌즈에 의한 기하학적 집속

대부분 액체내에서의 음속은 물보다 늦으므로 초음파를 집속시키기 위해서는 볼록 렌즈 형태를 취해야 한다. 실제 액체 볼록 렌즈면은 포물면이지만, 작은 개구면에 대해서는 구면으로 근사시킬 수 있다.<sup>[11]</sup> 평면-볼록 렌즈의 기하학적인 초점 거리는 기하광학과의 유사성에 따라

$$f = \frac{R}{C_w/C_1 - 1} \quad (1)$$

으로 근사적으로 나타낼 수 있으며<sup>[11]</sup>, 이때 R은 렌즈의 곡률 반경,  $C_w$ 와  $C_1$ 은 각각 물과 렌즈내에서의 음속이다. 그러나 실제 초점 거리는 구면 렌즈의 수차로 인해서 식 (1)보다 적게된다.<sup>[12]</sup> 그림 1에서 점 F에 초점을 맺기 위해서는 경로 1,2,3의 송신 시간이 같아야 하고, 초점에서 같은 위상을 가져야 한다. 따라서

$$\frac{f}{C_w} + \frac{l_0}{C_1} = \frac{1}{C_1} + \frac{\sqrt{y_1^2 + [f + (l_0 - 1)]^2}}{C_w} \quad (2)$$

의 관계식을 만족해야 하며, 이때  $l_0$ 와 1은 각각 렌즈

의 중심과 높이  $y_1$ 에서의 렌즈 두께이다. 이로부터 렌즈의 초점거리는 다음과 같다.

$$f = \frac{R}{C_w/C_1 - 1} - \frac{(C_w/C_1)^2(l_0 - 1)}{2(C_w/C_1 - 1)} \quad (3)$$

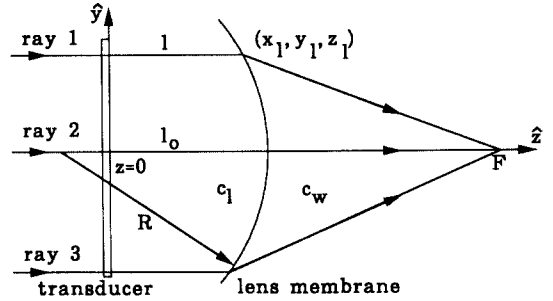


그림 1. 초음파 구면 액체 렌즈

Fig. 1. Ultrasonic spherical liquid lens.

위에서 보듯이 렌즈의 초점거리는 렌즈막의 곡률 반경과 렌즈 액체의 음속에 의해 결정된다. 곡률 반경은 렌즈 내의 액체량에 따라 결정되지만, 렌즈막의 팽창 한계에 의해 제한을 받으며, 개구면의 반경이하로는 줄일 수가 없다. 따라서 렌즈막의 가변 범위와 필요한 초점거리 영역에 의해 사용가능한 렌즈 액체의 음속 범위를 식 (1)로부터 구할 수 있다. 최대 음속  $C_{1,max}$ 은 최소 곡률 반경과 최소 초점 거리로 결정된다.

$$C_{1,max} = \frac{C_w}{\frac{R_{min}}{f_{min}} + 1} \quad (4)$$

음속의 최소값은 렌즈막의 변형없이 변할 수 있는 최대 곡률 반경에 의해 결정된다. 또한 액체의 음속은 온도에 따라 변화하므로, 액체내에서 초음파의 흡수가 적고, 온도 변화 정도가 작은 액체를 선택해야 안정된 초점을 얻을 수 있다.

### 2. 음장의 계산

강성 배플로 둘러 쌓인 음원으로부터 나오는 파가 무한장의 등방성의 균질한 매질내를 전파할 때, 장내에서의 음압은 아래의 Rayleigh 적분식으로 표현될 수 있다.

$$P = \frac{j\rho c}{\lambda} \int \frac{e^{-\alpha + jk}r}{r} u \perp ds \quad (5)$$

이때  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $k$ 는 각각 매질 내에서의 밀도, 음속, 파장, 감쇠계수, 파동수를 나타내며,  $r$ 은 음원과 장내의 점간의 거리이고,  $S$ 는 음원의 면적이며,  $u_{\perp}$ 은 음원 표면에서 음속의 수직 성분을 나타낸다. 이때 변환기는 정현파로 구동된다고 가정했으며, 시간 변수인  $e^{j\omega t}$ 항은 생략했다.

변환기로 부터 방사된 파는 변환기에 근접한 영역 내에서는 변환기 개구면적 내에서 평행광을 유지하고, 변환기의 근거리 장과 원거리 장의 경계가 되는 천이영역을 지나면서부터 발산하기 시작한다. 한 변이  $D$ 인 정사각형 변환기에 대한 천이영역은 다음과 같다.

$$Z_{TR} = 1.4 D^2 / (4\lambda) \tag{6}$$

이 천이영역 이후의 원거리 장에 대해서는 Fraunhofer 근사를 적용하여 장패턴을 구할 수 있다. 이때 원거리 장패턴은 변환기에서의 음속 분포에 대한 공간 Fourier 변환으로 구한다.

그러나 근거리 영역에서는 식 (5)를 계산하는것이 매우 복잡하다. 따라서 변환기를 여러개의 작은 부소자의 결합으로 가정하여, 장점이 부소자에 대해 원거리 영역이 되도록 미소하게 변환기를 나누면 각각의 부소자에 대한 원거리 장 패턴의 총합으로 전체 변환기의 근거리 장패턴을 구할 수 있다. 부소자 면적내에서 음속의 수직 성분이 균일하다고 가정하면, 변환기의 음압 패턴은 다음과 같이 표시된다.

$$P = \frac{j\rho c}{\lambda} \sum_{m=1}^M u_{\perp m} \int_{\Delta A} \frac{e^{-(\alpha+jk)r}}{r} dA \tag{7}$$

여기서  $M$ 은 면적  $\Delta A$ 를 지닌 부소자의 수이며,  $u_{\perp m}$ 은  $m$ 번째 부소자에서의 음속의 수직성분이다.

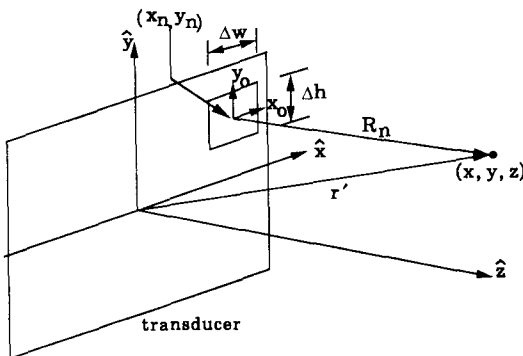


그림 2. 사각형 방사체 방법의 좌표계  
Fig. 2. Geometry used in the rectangular radiator method.

만약, 변환기 개구면을 그림 2에서 보는 바와 같이  $M$ 개의 작은 사각형으로 분할하면, 사각형 방사체 방법으로 점  $(x, y, z)$ 에서의 음압을 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$P = \frac{j\rho c \Delta A}{\lambda} \sum_{m=1}^M \frac{u_{\perp m}}{R_m} e^{-(\alpha+jk)R_m} \text{sinc}\left(\frac{X'_m \Delta w}{\lambda R_m}\right) \text{sinc}\left(\frac{y'_m \Delta h}{\lambda R_m}\right) \tag{8}$$

여기서  $\Delta A = \Delta w \Delta h$ ,  $u_{\perp m}$ 은  $m$ 번째 부소자에서의 음속의 수직성분,  $R_m$ 은  $m$ 번째 부소자와 장점간의 거리이며,  $x'_m = x - x_m$ ,  $y'_m = y - y_m$ , 그리고 점  $(x_m, y_m)$ 은  $m$ 번째 부소자의 중심점이다. 거리  $z$ 에 있는 점에서의 음압을 구하기 위해서는 식(8)의  $\Delta w$ 와  $\Delta h$ 가 모두 다음 관계식을 만족해야 한다.

$$\Delta w, \Delta h \leq \sqrt{\frac{4\lambda z}{C}} \tag{9}$$

이때 상수  $C$ 는 거리  $z$ 에서의 장패턴을 구하는데 있어서 사각형 부소자의 원거리 장 패턴을 사용할 수 있도록 충분히 큰 값을 택한다.<sup>[10]</sup>

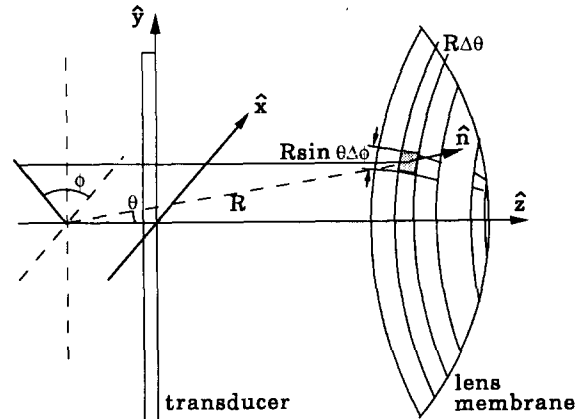


그림 3. 구면 액체 렌즈가 부착된 변환기의 좌표계  
Fig. 3. Geometry of the spherical liquid lens transducer.

그림 3에 구면 액체 렌즈가 결합된 변환기의 구조를 나타냈다. 이 결합체의 음압 방사 패턴을 구하기 위해서는 Huygens의 원리에 따라 렌즈 표면을 2차 음원에 대한 분포로 간주한다. 따라서, 1차 음원인 변환기에 의한 2차 음원의 분포를 먼저 구한 뒤, 2차 음원에 의한 장점에서의 장패턴을 구하면 된다. 만약 변환기 개구면과 렌즈 표면을 미소한 사각형의 음원 부소자로 나누면, 사각형 방사체 방법으로 렌즈막 상에서의 음속의 분포를 구할 수 있으며, 또한 그 결과

로 장내의 음압도 계산할 수 있다. 먼저, 2차 음원인 렌즈 표면에서의 음속의 수직 성분은 1차 음원의 방사에 의한 렌즈 표면에서의 음속 포텐셜  $\Psi$ 의 경도와 면벡터의 내적으로써 구할 수 있다.

$$u_{\perp n} = \nabla \Psi \cdot \hat{s} \quad (10)$$

여기서 첨자  $n$ 은 렌즈 표면상의  $n$ 번째 부소자들의 의미하며, 면벡터  $\hat{s}$ 는 렌즈면이 구면으로 되어 있으므로

$$\hat{s} = \sin\theta \cos\phi \hat{x} + \sin\theta \sin\phi \hat{y} + \cos\theta \hat{z} \quad (11)$$

로 표시된다.

이때 렌즈와 변환기는 강성 배플로 둘러 쌓여있고, 각 사각형 부소자에서의 음속은 부소자 면적내에서는 일정하다고 가정한다. 만약 변환기가  $M$ 개의 작은 부소자로 나뉘진다면, 렌즈면 상의 점  $(x_1, y_1, z_1)$ 에서의 음속 포텐셜은 각 사각형 부소자에 의한 포텐셜의 총합으로 표시된다.

$$\Psi_n(x_1, y_1, z_1) = -\frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M u_{\perp m} \int_{\Delta A'} \frac{e^{-\alpha(1+jk_1)r_m}}{r_m} dA' \quad (12)$$

여기서  $u_{\perp m}$ 은 변환기내의 면적  $\Delta A'$ 인  $m$ 번째 사각형 부소자에서의 음속의 수직성분이며,  $\alpha$ 와  $k_1$ 은 각각 렌즈 매질내에서의 감쇠 계수와 파동수이다. 렌즈 표면과 변환기 사이의 거리  $r_m$ 은 이항분포에 따라 아래와 같이 근사시킬 수 있다.

$$r_m = \left[ (x_1 - x_m - x_0)^2 + (y_1 - y_m - y_0)^2 + z_1^2 \right]^{1/2} \\ \approx R_m - x'_m x_0 / R_m - y'_m y_0 / R_m \quad (13)$$

이때  $R_m = \sqrt{x_m'^2 + y_m'^2 + z_1^2}$ ,  $x'_m = x_1 - x_m$ ,  $y'_m = y_1 - y_m$ , 그리고  $(x_0, y_0)$ 는 그림 2에서  $m$ 번째 부소자의 중심  $(x_m, y_m)$ 에 대한 부소자내의 점이다.  $\nabla$ 연산자는 렌즈표면  $(x_1, y_1, z_1)$ 에 적용되므로,

$$\nabla \Psi_n = \frac{\partial \Psi_n}{\partial x_1} \hat{x} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial y_1} \hat{y} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial z_1} \hat{z} \quad (14)$$

이 되며, 식 (12)를 대입하면 다음과 같다.

$$\nabla \Psi_n = -\frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M u_{\perp m} \int_{\Delta A'} \frac{e^{-\alpha(1+jk_1)R_m}}{R_m} \left[ \frac{1 + \alpha_1 R_m + jk_1 R_m}{R_m^2} \right] \\ e^{j k_1 x'_m x_0} e^{j k_1 y'_m y_0} [(x'_m - x_0) \hat{x} + (y'_m - y_0) \hat{y} + z_1 \hat{z}] dx_0 dy_0 \quad (15)$$

이때 부소자의 면적  $\Delta A'$ 도 관계식 (9)를 만족해야 한다. 따라서 각 렌즈 표면상의 부소자에서의 음속의 수직성분은 식 (11)과 (15)를 (10)에 대입함으로써 구할 수 있다. 장점에서의 음압의 분포를 구하기 위해서는 위에서 구한 렌즈 표면에서의 음속의 수직 성분 분포를 식 (8)에 대입하면 된다. 이때 식 (8)의 모든 변수들은 전파 매질, 즉 물 또는 인체 조직, 내에서의 값들이며,  $R_m$ 은 렌즈 표면에서 장점까지의 거리이다.

식 (8)을 렌즈로부터의 방사에 사용하기 위해서는 구면 렌즈의 표면을 같은 폭을 지닌 여러개의 동심환으로 나눈 뒤, 각 환을 호의 크기가 환의 폭과 같도록 작은 섹터로 다시 나눈다. 이때 호와 폭의 크기 역시 식 (9)를 만족해야 한다. 이렇게 만들어진 각 섹터는 사각형 음원으로 간주될 수 있다. 이때 각  $\emptyset$ 에 위치한 사각형 음원은  $\emptyset$ 만큼 회전되어 있으므로, 식 (8)의 sinc함수는 Fourier 변환의 회전 법칙에 따라 수정되어야 한다.

$$R_{\emptyset} \{h(x, y)\} \xrightarrow{F} R_{\emptyset} \{H(X, Y)\} \quad (16)$$

여기서  $H(X, Y)$ 는  $h(x, y)$ 의 Fourier 변환식이고,  $\emptyset$ 는 회전각이다. 따라서 식 (8)의 변수  $x'_m$ 과  $y'_m$ 은 각각  $x'_m \cos \emptyset + y'_m \sin \emptyset$ 와  $y'_m \cos \emptyset - x'_m \sin \emptyset$ 로 대체되어야 한다.

### III. 실험 및 고찰

본 연구에서는 액체 렌즈가 부착된 평판 사각형 압전 세라믹 변환기를 제작하고, 음압의 분포를 측정하여, 앞서 제시한 이론 결과와 비교하였다. 사용된 변환기는 온열 치료기에 많이 사용하는 압전 세라믹 (PZT-8, Channel Industries, C5800)으로 크기는 53.5mm x 53.5mm 이고, 두께는 2.06mm이며, 공진 주파수는 1031 kHz이다. 렌즈에 사용된 액체는 Dow Corning사의 silicon oil (DC 200, 50cs)이며, 펄스 에코 방법으로 측정된 액체의 초음파 특성은 다음의 표 1과 같다.

표 1. 측정된 silicon oil의 초음파 특성

Table 1. Measured acoustical properties of silicon oil.

액체	점성 (cs)	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	음속 (m/s)	온도상승 (m/s <sup>2</sup> c)	감쇠계수 (Np/cm @MHz)
Silicon oil	50	980	1010	-2.65	0.055

이 액체는 낮은 감쇠 계수를 지니며, 물과 유사한 밀도를 지니므로 실험시 액체 무게에 의한 구면 렌즈면의 찌그러짐은 최소화 할 수 있다.

렌즈막은 1.59mm 두께의 천연 고무막을 사용했으며, 렌즈의 직경은 77.5mm이고, 팽창되지 않은 상태의 렌즈 부피는 약 310ml이다. 음압은 직경 1mm의 PVDF 수중 청음기 (Medisonics, ME101)로 측정했으며, 측정된 출력은 전자 증폭기를 통해 디지털 오실로스코프 (Hewlette Packard, HP5341A)에 입력된다. IBM-PC로는 3축 스텝 모우터 제어를 통해 수중 청음기의 좌표 및 경로를 조정하고, 측정된 자료를 입력 처리한다. 변환기는 함수 발생기 (Wavetek, 143)에 의해 변환기의 공진주파수로 여기시켰으며, 렌즈 액체는 양을 조절하기 위해 속도를 가변시킬 수 있는 롤러 펌프 (Masterflex, 7520-25)를 통해 렌즈내로 입출력 시켰다. 모든 실험은 가스를 제거한 물을 담은 58cm x 58cm x 37cm 크기의 수조내에서 수행되었으며, 실험 구성도는 그림 4에 나타난 것과 같다.

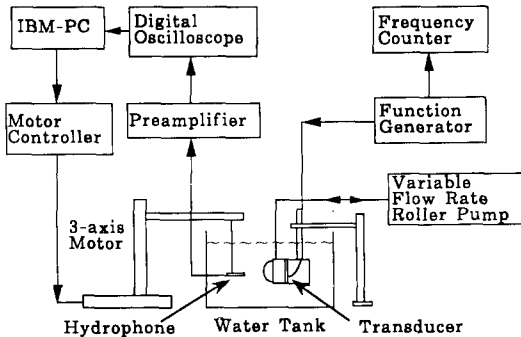
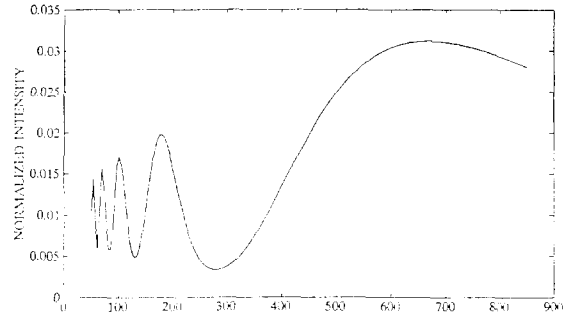


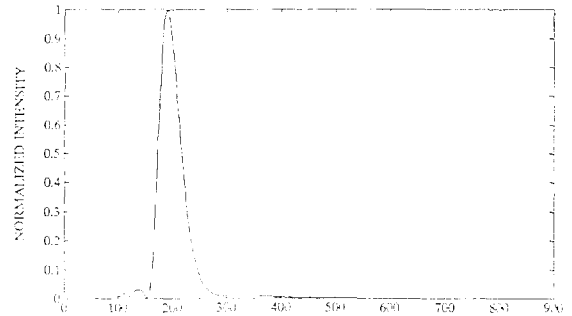
그림 4. 실험 장치 구성도

Fig. 4. Block diagram of the experimental setup.

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 평판 사각형 변환기에 렌즈가 없는 경우와 구면 액체 렌즈가 부착된 경우의 z축 방향의 음의 강도를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교한 것으로, 렌즈가 부착된 변환기 경우의 (그림 5(b)) 최대치에 대해 두 결과를 정규화시킨 것이다. 그림 5 (b)의 구면 액체 렌즈는 곡률 반경 70mm로 이 액체 렌즈를 부착함으로써 초점거리가 사각형 변환기의 천이 영역보다 훨씬 짧아지고 ( $z_f=190\text{mm}$ ), 초점에서의 이득 또한 15dB 정도 증가됨을 알 수 있다.



(a) Z(mm)



(b) Z(mm)

그림 5. (a) 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 평판 사각형 변환기의 z축 방향 음의 강도 분포 (b) 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 구면 액체 렌즈 변환기의 z축 방향 음의 강도 분포

Fig. 5. (a) Simulated intensity pattern on z-axis for single square transducer (b) Simulated intensity pattern on z-axis for spherical liquid lens transducer with 70mm radius of curvature.

그림 6과 7은 실제 제작된 구면 액체 렌즈가 부착된 변환기에 의한 음의 강도 분포를 각각 y축과 z축 방향으로 측정된 결과를 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 이론치와 비교한 것으로 서로 잘 일치됨을 알 수 있다. 이때 렌즈의 곡률 반경은 70mm이며, 음압은 각 방향 1mm 간격으로 측정하였다. 이 경우 식 (1)에 의한 초점거리는 199.7mm이나, 두꺼운 블록 렌즈의 구면 수차에 의한 오차로 그림 7에서 보듯이 z축 상의 초점거리는 변환기로부터 190mm 떨어진 점에 위치하며, y축 상에는 중앙인  $y=0\text{mm}$  점에 위치하게 된다. 이때 측정된 3-dB 빔폭은 y축 상에는 2.

8mm, z축 상에는 30mm이다. 변환기 형태가 x축과 y축에 대해 서로 대칭이므로 x축 방향의 측정은 생략하였다. 그림 8은 렌즈의 액체량을 조절하므로써 렌즈의 곡률 반경 변화에 따른 z축 상의 음의 강도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 액체의 양을 증가시키면, 곡률 반경이 작아지며, 따라서 강한 집속 효과를 나타내게 된다. 렌즈막의 제한으로 곡률 반경은 65mm에서 95mm까지 변화를 시켰으며,

석된다. 사용 주파수에서 약 1.5λ 인 렌즈막 두께내에서의 음의 굴절 및 반사에 의한 영향과 렌즈내의 온도 변화에 따른 음속의 변화에 의한 영향을 컴퓨터 시뮬레이션시 무시했으며, 렌즈 곡률 반경의 측정 오차가 원인이었던 것으로 생각된다. 따라서 좀 더 얇으면서 탄성이 좋은 렌즈막의 사용과 렌즈내의 온도 안정을 위한 장치 구성으로 오차를 줄일 수 있다.

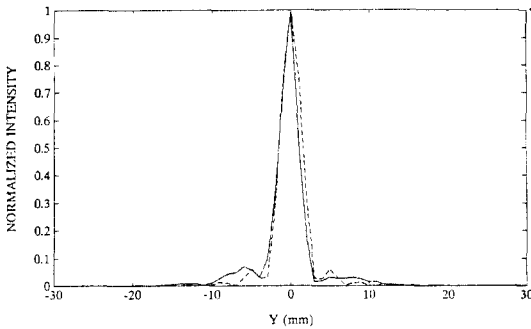


그림 6. 구면 액체 렌즈 변환기의 y축 음의 강도 분포 (—:실험치, - - :이론치)  
Fig. 6. y-axis intensity pattern for spherical liquid lens transducer.

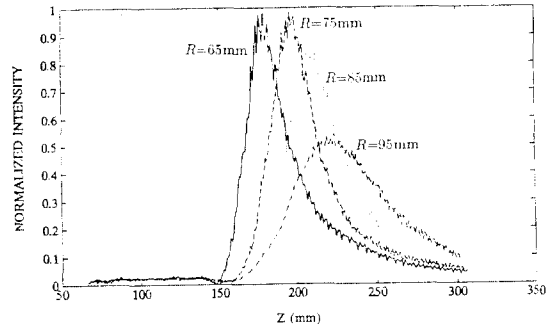


그림 8. 구면 액체 렌즈 변환기의 곡률 반경 변화에 따른 z축 음의 강도 분포  
Fig. 8. z-axis intensity pattern for spherical liquid lens transducer with different radius of curvature.

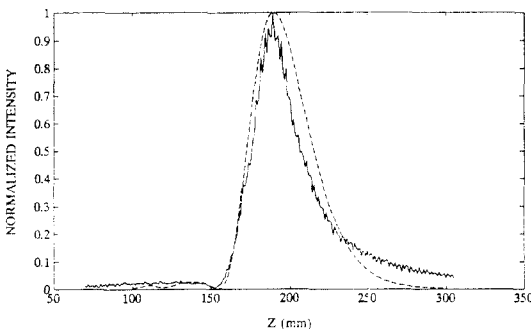


그림 7. 구면 액체 렌즈 변환기의 z축 음의 강도 분포 (—:실험치, - - :이론치)  
Fig. 7. z-axis intensity pattern for spherical liquid lens transducer.

이때 초점은 179mm에서 225mm까지 변화했다. 그림에서 보듯이, 곡률 반경이 커짐에 따라 렌즈막이 평탄해지고, 따라서 집속 능력이 떨어져서 초점에서의 음의 강도가 감소하고, 초점거리가 멀어지며, 빔 폭도 증가함을 알 수 있다. 위의 결과에서 나타난 이론치와 실험치 간의 차이는 다음에 기인한 것으로 분

#### IV. 결론

본 연구에서는 구면 액체 렌즈가 부착된 사각형 변환기에 대해 효율적인 이론적 해석 방법을 제시하고, 실험실 모델을 제작하여 그 측정 결과를 비교 분석하였다. 해석 방법은 Huygens 원리에 근거하여 렌즈 표면을 2차 음원으로 간주하고, 1, 2차 음원에서의 방사를 음원의 수직 성분을 고려하여 각각 수정된 사각형 방사체 방법으로 계산함으로써 장점에서의 음압의 분포를 구했으며, 실험 결과 z축상의 초점거리는 변환기로부터 190mm 떨어진 점에 위치하며, y축 상에는 y=0mm 점에 위치하여 이론치와 일치하였다. 이러한 해석 방법은 두꺼운 렌즈 시스템, 예를 들면 두꺼운 원통형 렌즈등의 해석에도 적용 가능하다고 생각한다. 또한 구면 액체 렌즈를 사용함으로써, 초점에서의 집속 능력을 높이고, 좁은 빔 폭으로 높은 이득을 얻을 수 있으며, 렌즈내의 액체량을 조절하므로써 초점 거리를 능동적으로 가변시킬 수 있어서 초음파 온열 치료와 같이 높은 에너지를 필요로 하는데 사용할 수 있으며, 또한 위상 배열 변환기와 함께 사용하면 3차원 적인 초점 조절도 가능하다. 반면, 집

속 능력의 가장 중요한 요소인 초음파 액체 렌즈에 사용할 액체의 선택과 액체 특성에 따라 장패턴에 미치는 영향등에 관해 더 많은 연구가 필요하다.

參考文獻

[1] D. L. Folds, "Focusing properties of solid ultrasonic cylindrical lenses." *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.53, no.3, pp. 826-834, 1973.

[2] J. D. Larson III, "An Acoustic transducer array for medical imaging - Part I," *Hewlett-Packard J.*, vol. 34, no.10, pp. 17-22, 1983.

[3] G. C. Knollman, J. L. S. Bellin and J. L. Weaver, "Variable-focus liquid-filled hydroacoustic lens," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 49, no. 1, pp. 253-261, 1971.

[4] F. S. Foster and J. W. Hunt, "Transmission of ultrasound beams through human tissue-focusing and attenuation studies," *Ultrasound Med. Bilo.*, vol. 5, pp.257-268, 1979.

[5] Y. J. Yoon and P. J. Benkeser, "Ultrasound phased arrays with variable geometric focusing for hyperthermia applications," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, vol. 39, no. 3, pp. 273-278, Mar. 1992.

[6] Y. Sugawara, J. Kushibiki and N. Chubachi, "Theoretical analysis on acoustic fields formed by focusing devices in acoustic microscopy," in *Proc. 1986 IEEE Ultrason. Symp.*, pp. 783-788, 1986.

[7] A. Penttinen and M. Luukkala, "Sound pressure near the focal area of an ultrasonic lens," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 9, pp.1927-1936, 1976.

[8] E. Pino and E. A. Ash, "Imaging with thick acoustic lenses," in *Proc. 1984 IEEE Ultrason. Symp.*, pp.614-617, 1984.

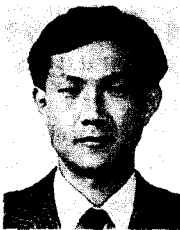
[9] D. Robert, R.Ludwig and F. J. Looft, "A general purpose computer program for studying ultrasonic beam patterns generated with acoustic lenses," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 37, no. 1, pp. 90-94, 1988.

[10] K. B. Ocheltree and L. A. Frizzel, "Sound field calculation for rectangular sources," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, vol. UFFC-36, no. 2, pp. 242-248, 1989.

[11] D. Sette, "Ultrasonic lenses of plastic materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 21, no.4, pp. 375-381, 1949.

[12] T. Tarnoczy, "Sound focusing lenses and waveguides," *Ultrason.*, pp.115-127, 1965.

著者紹介



尹 兪重 (正會員)  
 1959年 3月 9日生. 1981年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사), 1986年 9月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사). 1991年 12月 Georgia Institute of Technology 졸업 (공학박사).

1992年 3月~1993年 3月 한국 전자 통신 연구소 위성통신기술연구단. 현재 연세대학교 전파공학과 조교수. 주관심 분야는 위성통신, 안테나 및 전파 전파 등임.

朴 漢 奎 (正會員) 第29卷 A編 第4號 參照  
 현재 연세대학교 전파공학과 교수