

구면 액체 렌즈 초음파 위상 배열 변환기에 관한 연구

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

尹 伶 重 * 朴 漢 奎 *

(Young Joong Yoon and Han Kyu Park)

요 약

본 논문에서는 선형 위상배열기에 구면 액체 렌즈를 부착하여 위상 배열기의 전자적 빔의 집속과 구면 렌즈의 기하학적 빔의 집속을 결합하여 선형 위상 배열기의 단점인 종축방향으로의 빔폭을 줄이고 액체 렌즈로 초점을 가변시켜 실시간내에 다양한 빔패턴의 변화를 줄 수 있는 시스템을 연구하였다. 설계된 시스템의 프로토타입을 제작하여 실험한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션과 비교하여 그 특성을 확인하였으며, 좁은 빔폭으로 빠르게 빔 패턴을 변화시킬 수 있으므로 온열치료기나 또는 초음파 영상기에 사용이 가능하다.

Abstract

In this paper, an ultrasonic phased array transducer with spherical liquid lens, which utilizes both electronic focusing by linear phased array and variable geometric focusing by spherical lens, is investigated. This system reduces the elevational beamwidth which is disadvantage of the 1-dimensional linear phased array, and adds real-time dynamic focusing capability by controlling the volume of liquid in the lens. A prototype of this transducer is constructed and tested. The experimental results are compared with those of computer simulations. The range of applications are in the hyperthermia applicators or ultrasonic image system with narrow beam and rapid scanning characteristics.

I. 서 론

초음파 영상기에서 높은 분해능을 얻거나 또는 온열 치료에서 정상 세포나 뼈조직 등에의 고온을 피하고 큰 심부 종양에 균일한 고온의 분포를 얻기 위해서는 종양의 가장자리를 따라 예리하게 집속된 초음파로 주사시켜야 한다.^[1] 전자적으로 빔을 주사 및 집속시키는 위상 배열 변환기와 기계적으로 주사시키는 집속형 변환기 등이 이러한 목적을 달성하기 위해 개발되었다. 위상 배열 변환기 시스템은 기계적인 주사 시스템보다

환자에게 불편함이 없이 더 빠른 주사 속도를 나타내며, 또한 더 다양한 집속 능력을 지니고 있다. 또다른 장점으로서는 위상 배열 변환기에 의해 다중 초점 패턴의 직접 합성을 행할 수 있으며, 이는 원하는 빔 패턴을 만들기 위해 각 배열 소자에 필요한 진폭과 위상을 Pseudoinverse method^[2]를 이용하여 구할 수 있다.

2차원 평면 위상 배열기는 각 변환기 소자의 진폭과 위상을 조절함으로써 원하는 초점에서 높은 이득을 지니며 3차원적으로 초음파를 집속시키고 주사시킬 수 있다. 그러나, 2차원 위상 배열기는 고 전력을 요하는 온열 치료기에 사용하기 위해서는 넓은 면적에 수 많은 소자와 이를 조정하는 복잡한 전자 회로를 필요로 한다. 이러한 문제점을 보완하기 위해, 2차원 배열기와

* 正會員, 延世大學校 電波工學科

(Dept. of Radio Communications Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1994年8月22日, 수정완료일: 1995年11月2日

비슷한 면적을 지니면서 더 적은 수의 소자로 만들어진 수정된 위상 배열기가 설계되었다.^{13,41} 이러한 시스템들은 구동 소자를 배열기의 서로 다른 부집함으로 변환하거나, 또는 구동 신호의 주파수를 바꿈으로써 좁은 빔폭으로 3차원 주사가 가능하다. 그러나 이들은 소자의 높이 방향으로 빔이 집중되지 않아서 초점에서 상대적으로 낮은 이득을 나타낸다.

충분한 이득을 지니면서 소자 수를 줄이기 위해, 고정된 기하학적인 빔의 집속과 전자적인 집속을 결합한 여러가지 형태의 시스템이 설계되었다. 이러한 치료기들은 충분한 이득을 나타내지만 임상 사용에 있어서는 몇가지 문제점이 있다. 원통형 위상 배열기는 배열 소자를 원통면 상에 배열하여 위상 배열기의 전자적인 초점에 원통면에 의한 기하학적인 초점을 첨가시켜 높은 집속 능력을 나타내지만, 여전히 소자의 높이 방향으로 빔이 집중되지 않아 넓은 빔폭을 지녀 상대적으로 낮은 이득을 지닌다.¹⁶¹ 구면에 2차원으로 작은 소자가 배열된 2차원 구면 위상 배열기는 매우 좁은 빔폭으로 높은 이득을 지니고 다양한 집속 및 주사 능력을 나타내지만, 많은 소자와 복잡한 전자 회로를 필요로 한다.¹⁶¹ Sector-vortex 배열기는 구면 위상 배열기보다 훨씬 적은 수의 소자로 좁은 빔폭의 초점을 형성하지만 중심 축 상에만 빔이 형성되는 단점이 있다.¹⁷¹ 또한 상기의 시스템들은 모두 기하학적인 빔의 집속이 소자의 배열 형태에 따라 고정되어 있다.

II. 구면 액체 렌즈 위상 배열 변환기

이미 개발된 여러 종류의 위상 배열 변환기에 의한 온열 치료기의 성능을 더욱 개선하기 위해서 본 논문에서는 위상 배열 변환기에 의한 전자적인 집속과 가변의 기하학적인 집속을 결합한 초음파 온열 치료기에 관해 연구하였다. 그림 1에서 보듯이 이 치료기는 전자적 집속 능력을 지닌 1차원 선형 위상 배열기를 근거로 하고 있다. 종축 방향인 y 축에 해당하는 각 소자의 높이는 h 이고, 소자의 폭과 소자간의 간격은 각각 w 와 d 이다. 횡축 방향인 x 축 방향으로의 총 개구면 폭은 L 이다. 위상 배열기 만으로는 종축 방향으로 빔이 집중되지 않으므로, 그 앞에 초음파 렌즈를 부착하여 초점에서의 이득을 높이고, 종축 방향으로도 좁은 빔폭을 지니도록 하였다.

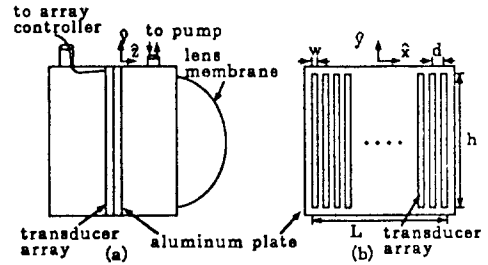


그림 1. 구면 액체렌즈 초음파 위상배열 변환기 (a)측면 (b)후면

Fig. 1. A spherical liquid-lens phased array transducer. (a)sideview (b)rearview

초음파 진단기에서는 종축 방향의 빔 폭을 줄이고 이득을 높이기 위해 원통형 고체 렌즈를 선형 위상 배열기에 부착하여 많이 사용하고 있다. 고체 렌즈는 초점이 고정되어 있으며 렌즈 내에서 초음파의 흡수가 많아 손실이 큰 단점이 있다. 반면, 원통형 액체 렌즈를 사용할 경우에는 전자적인 빔의 집속에 기하학적인 집속을 추가시킬 수 있으며, 실시간 내에 액체의 양을 조절하여 능동적인 초점의 가변을 행할 수 있고, 고체 렌즈보다 손실이 적다. 그러나, 실제 정확한 원통형 액체 렌즈는 만들기가 매우 힘들며, 최소의 수차를 지닌 구면 액체 렌즈는 보다 쉽게 구현할 수 있다.^{18,91} 따라서, 위상배열기의 전자적 집속과 액체 렌즈의 기하학적 집속의 결합으로 초점영역에서 좁은 빔폭으로 높은 이득을 얻을 수 있으며, 실시간 내에 빔의 빠른 이동이 가능하여 큰 심부 종양에 대한 고온의 온열 치료 또는 높은 해상도의 초음파 영상기에 사용이 가능하다.

1. 위상 배열 변환기

균일한 크기의 신호로 구동된 이상적인 선형 위상 배열기의 경우, 원거리장 패턴은 배열 구조에 의한 배열 패턴과 각 소자의 특성에 의한 소자 패턴의 곱으로 표시된다. 이때 많은 수의 배열 소자를 사용하면, 주 로브의 빔폭을 줄이고, 부 로브의 크기를 감소시킬 수 있다. 이러한 위상 배열기의 각 소자에 그림 2(a)와 같은 선형 위상 분포를 가하면 빔의 주사 방향을 조절할 수 있다. 반면, 그림 2(b)와 같이 원형의 2차원 위상 분포를 가하면 근거리 영역에서 빔의 집속 및 주사 방향을 조절할 수 있다. 이때 각 소자에 필요한 위상 분포 ϕ_n 은 식(1)로 표시되며¹¹⁰¹, 근거리 영역 내의

점 PF에 초점을 맺고자 할 때는 식(2)와 같이 근사화 된다.

$$\phi_n = kf[1 + (nd/f)^2 + 2(nd/f)\sin\theta_0]^{1/2} - 1 \quad (1)$$

$$\phi_n \cong kf \left[\frac{(nd)^2}{2f} + nd\sin\theta_0 \right] \quad (2)$$

이때 f 는 초점 거리이고, d 는 소자간 간격이며, θ_0 는 주사 방향이다. 그리고 θ_0 의 각도로 주사시킬 때 $z = z_0$ 면상에 나타나는 그레이팅 로브의 위치는

$$x = z_0 \tan[\sin^{-1}(\lambda/d - \sin\theta_0)] \quad (3)$$

이다.

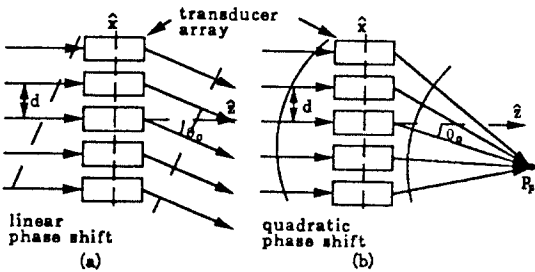


그림 2. 선형위상배열기
(a) 빔의 주사 (b) 빔의 집속
Fig. 2. Linear phased array.
(a) beam steering (b) beam focusing

2. 액체의 선택

에너지 집속을 위한 초음파 액체 렌즈는 액체의 성질에 따라 그 특성이 좌우된다. 그림 1에서와 같이 초음파 액체 렌즈를 위상 배열기에 부착하여 초음파 온열 치료기에 사용하기 위해서는, 사용 되는 액체가 다음의 조건을 만족해야 한다.

- 1) 액체 렌즈가 적당한 초점을 맺기 위해서는 물의 음속과 액체 음속간에 차이가 있어야 한다. 대부분 액체내에서의 음속은 물보다 낮으므로 초음파를 집속시키기 위해서는 볼록 렌즈 형태를 취해야 한다. 평면-볼록 렌즈의 기하학적인 초점 거리는 기하광학과의 유사성에 따라¹¹¹⁾

$$f = \frac{R}{c_w/c_l - 1} \quad (4)$$

으로 근사적으로 나타낼 수 있으며, 이때 R 은 렌즈의 곡률 반경, c_w 와 c_l 은 각각 물과 렌즈내에서의 음속이다. 따라서 렌즈의 초점거리는 렌즈막

의 곡률 반경과 렌즈 액체의 음속에 의해 결정되며, 곡률 반경은 렌즈 내의 액체량에 따라 결정된다. 하지만, 렌즈막의 팽창 한계에 따라 제한을 받으며, 또한 개구면의 반경 이하로 줄일 수는 없다. 따라서 렌즈막의 가변 범위와 필요한 초점 거리 영역에 의해 사용 가능한 렌즈 액체의 음속 범위를 식 (4)로부터 구할 수 있다. 최대 음속 $c_{l,max}$ 은 최소 곡률 반경과 최소 초점 거리로 결정된다.

$$c_{l,max} = \frac{c_w}{\frac{R}{f_{min}} + 1} \quad (5)$$

음속의 최소값은 렌즈막의 변형없이 변할 수 있는 최대 곡률 반경에 의해 결정된다.

- 2) 렌즈막의 곡면 왜곡을 최소로 줄이기 위해서는, 액체의 밀도가 물과 비슷해야 한다. 렌즈막의 영향을 최소로 하기 위해 가능한 얇은 렌즈막을 사용하므로, 무거운 액체를 사용할 경우 렌즈막이 아래로 처지게 되어 정확한 구면이 형성될 수 없으며, 반대로 너무 가벼운 액체는 렌즈막이 위로 올라가게 된다.
- 3) 액체의 밀도와 음속의 곱으로 표시되는 음향 임피던스는 최대의 에너지 전달을 위해 물의 음향 임피던스에 근접해야 한다.
- 4) 종양 내의 효과적인 온도 상승을 위해 렌즈 내에서의 감쇠는 최소화 해야한다. 액체 내에서의 감쇠 상수는 흡수계수와 산란 계수로 나누며, 이중 흡수 계수는 액체의 점도에 비례하므로, 낮은 점도를 지닌 액체를 사용해야 한다.
- 5) 렌즈 액체에서의 초음파 흡수로 인한 온도 상승은 액체의 음속을 변화시키고, 따라서 초점 거리의 변화를 초래한다. 온도 변화에 따른 초점 거리의 변화는 다음 관계식으로 나타난다.

$$\frac{\Delta f}{\Delta T} = \frac{\Delta f}{\Delta c_l} \cdot \frac{\Delta c_l}{\Delta T} = \frac{R c_w}{(c_w - c_l)^2} \cdot \frac{\Delta c_l}{\Delta T} \quad (6)$$

여기서, $\Delta c_l/\Delta T$ 는 액체 음속의 온도 계수이다. 그러므로, 낮은 온도 계수의 액체를 사용하고, 강제적인 순환 방식등을 이용하여 온도 변화를 최소화해야 한다. 이상의 조건중 처음 세가지는 서로 상반된 조건이므로 최적 조건을 찾아야 한다.

본 연구에서는 초음파 렌즈로 사용하기 위해 전자

액체로 많이 쓰이는 Silicon Oil과 Perfluorocarbon의 몇가지 종류에 대해 그 특성들을 측정하여 표 1에 비교하였다. 측정은 Pulse-echo방법¹¹²⁾으로 실온에서 행했다. 표 1에서 보듯이, Silicon Oil은 대체적으로 상기 조건을 만족하나 감쇠 상수 값이 상대적으로 Perfluorocarbon에 비해 크며, Perfluorocarbon은 낮은 감쇠 상수를 지닌 반면, 밀도가 물의 약 2배에 가깝다. 따라서 본 연구에서는 Silicon Oil (50cs)로 실험을 행하였다.

표 1. 액체의 초음파 특성
Table 1. Acoustic Properties of Liquids.

액 체	특 성	점성	밀도	음 속	온도 상수	감쇠계수
	(cs)	Kg/m ³	m/s	m/s ² C	Np/cm ² MHz	
Silicon oil (DC200,5cst)	5	913	980.0	-2.77	0.012	
Silicon oil (DC200,50cst)	50	980	1010.0	-2.60	0.055	
Perfluorocarbon (1:1 FC40 & FC75)	1.5	1820	620	-3.9	0.006	
물 (25°C)	1	998	1497.0	+2.4	2.5x10 ⁻¹	

3. 전자적 집속과 기하학적 집속의 결합

빔이 선형 위상 배열 변환기로 부터 액체렌즈를 통해 방사될때, 렌즈와 물간의 음속차에 의해 렌즈 표면에서 굴절 현상이 일어나게 된다. 만약 점 PF에 초점을 맺기 위해 배열 소자가 그림 3의 점선과 같은 직선 경로에 해당하는 위상분포를 지니면, 렌즈 표면에서의 굴절로 인해 실제 초점이 이동하고 왜곡된 빔 패턴이 형성된다. 따라서, 배열 소자의 위상은 점 PF에 초점이 생기도록 그림 3의 실선과 같이 굴절을 고려한 경로를 택해 결정해야 한다.

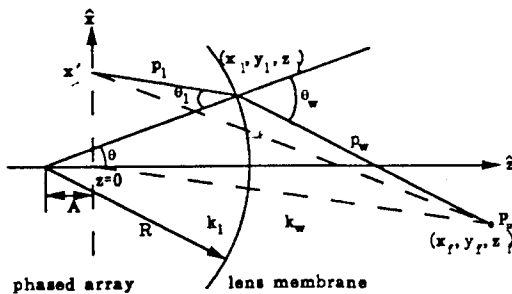


그림 3. 렌즈표면에서의 빔의 굴절 현상
Fig. 3. Beam refraction effect on the lens surface.

따라서 n번째 소자의 수정된 위상은

$$\phi_n = k_l d_n + k_w d_{wn} \tag{7}$$

이 되며, k_l 과 k_w 는 각각 렌즈와 물에서의 파수이다. 굴절을 고려한 경로, $d_l + d_{wn}$ 를 구하기 위해서는 그림 3과 Snell의 법칙으로 부터 유도한 다음 식들을 사용하 면 된다.

$$\phi_w = \theta - \tan^{-1}\left(\frac{x_l - x_l'}{z_l - z_l'}\right) \tag{8}$$

$$\phi_l = \sin^{-1}\left(\frac{c_l}{c_w} \sin \phi_w\right) \tag{9}$$

$$x_l = x' + z_l \tan(\theta - \phi_l) \tag{10}$$

$$z_l = \sqrt{R^2 - x_l'^2} - A \tag{11}$$

여기서 $\theta = \tan^{-1}(x_l/(A+z_l))$, ϕ_l 과 ϕ_w 는 각각 입사 각, 굴절각이고, (x_l, z_l) 는 초점좌표, 그리고 (x_l, z_l) 은 굴절경로에 대한 렌즈 표면상의 점이다. 위의 관계식은 $y=0$ 면상에서 구한 것이며, modified simple iteration method¹¹³⁾를 이용하여 수치적으로 계산 했다. 초기치는 점선을 따라 빔이 직접 점 PF로 전파 하는 경우의 값을 택했다.

4. 초음파 장의 계산

초음파 장은 Rayleigh-Sommerfeld 이론에 의해 구할 수 있다. 초음파 변환기 앞에 두꺼운 초음파 렌즈 가 부착된 경우 장에서의 음압의 분포를 구하기 위해 서, Huygens의 원리에 의거해서 렌즈 표면을 2차 음 원의 분포로 간주하였다. 따라서 장에서의 음압의 분포 는 먼저, 1차 음원인 초음파 변환기에 의한 렌즈 표면 에서의 음속 포텐셜 분포를 구한 뒤, 2차 음원인 렌즈 표면으로부터의 방사에 의한 음압의 분포를 구한다. 이 때 계산의 효율을 높이기 위해 변환기와 렌즈 표면을 각각 여러개의 작은 사각형 소자로 나눠 각 소자로부터의 음압의 총합으로 전체 음압의 분포를 구하는 사 각형 방사체 방법을 사용하였다.¹¹⁴⁾

III. 실험 및 결과고찰

1. 제작 및 실험

프로토타입으로 실험 제작된 구면 액체렌즈가 부착 된 위상배열 변환기는 76mm x 76mm x 2.06mm 크 기의 압전 세라믹(Channel Industries, C5800)에

$\lambda/4$ 두께의 알루미늄 판을 conductive epoxy로 부착한 뒤, 다이아몬드 톱을 이용하여 폭 2.7mm, 소자간의 간격 3mm가 되도록 25개의 소자로 절단하였다. 이중 제작상의 실수로 양 끝단의 소자에 결함이 생겨 실제 사용된 소자수는 21개이다. 구면렌즈의 개구면은 array의 개구면을 모두 포함해야 하므로 직경 108mm의 렌즈 개구면을 갖도록 제작하였으며, 사용된 고무막은 0.5mm의 얇은 latex을 사용하여 고무막에서의 손실을 최소화하였다. 팽창되지 않은 상태에서의 렌즈 부피는 약 228ml이며, 이는 렌즈내에서의 감쇠를 최소화하도록 설계된 것이다. 음압은 직경 1mm의 PVDF 수중 청음기 (Medisonics, ME101)로 측정했으며, 측정된 출력은 전치 증폭기를 통해 디지털 오실로스코프 (Hewlette Packard, HP5341A)에 입력된다. IBM-PC로는 3축 스텝 모터 제어를 통해 수중 청음기의 좌표 및 경로를 조정하고, 측정된 자료를 입력 처리한다. 모든 실험은 가스를 제거한 물을 담은 58cm x 58cm x 37cm 크기의 수조내에서 수행되었으며, 실험 구성도는 그림 4에 나타난 것과 같다.

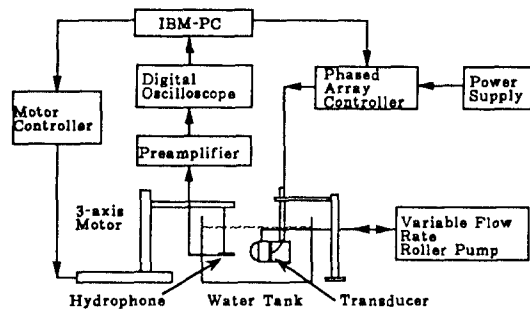


그림 4. 실험장치 구성도
Fig. 4. Block diagram of the experimental setup.

압전세라믹의 공진 주파수는 세라믹의 두께에 대한 폭의 비로 결정되며 이 비가 1에 가까울수록 낮은 값을 나타낸다. 제작에 사용된 자르기 전의 압전세라믹은 원래 1MHz의 공진주파수를 지나나, 이를 두께에 대한 폭의 비가 1.31이 되도록 잘랐으므로 각 소자의 공진 주파수는 1MHz보다 훨씬 낮은 530kHz로 측정되었다. 또한, 절단시의 부정확성과 알루미늄 기판 부착시 conductive epoxy의 불균일한 분포등의 이유로 인하여 각 소자가 불균일한 특성을 나타내게 된다. 이를 보

상하기 위하여 소자가 부착된 알루미늄 판 전면에 수중 청음기를 설치하여 각 소자의 상대적인 출력을 공진주파수에서 측정하고, 각 소자간의 임피던스를 Vector Impedance Meter로 측정하였다. 측정된 불균일한 특성은 각 소자에 가해지는 구동신호의 진폭과 위상을 상대적으로 조절하여 동위상의 균일한 진폭을 나타내도록 하여 변환기의 효율을 최대화 시켰다. 그림 5에 배열 소자의 불균일성을 보상한 경우와 보상하지 않은 경우에 대한 빔패턴을 나타냈으며, 이때의 초점은 $z=140\text{mm}$ 에 맞춰도록 하였다. 이 그림에서 특히 빔 폭 및 부엽특성이 개선됨을 알 수 있다.

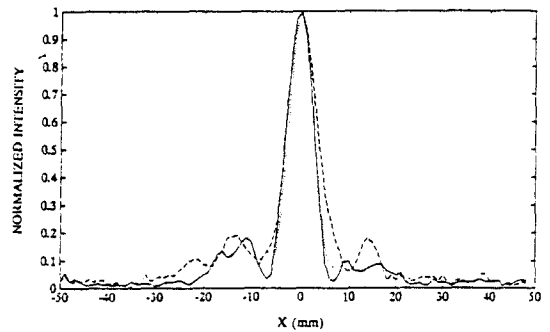


그림 5. 소자의 불균일특성에 따른 x축 빔패턴 비교: (—) 보상한 경우 측정치, (---) 보상되지 않은 경우 측정치, (···) 보상한 경우 이론치

Fig. 5. Comparisons of x-axis intensity patterns with (—) and without (---)compensation of element ununiformity and (···) compensated simulation.

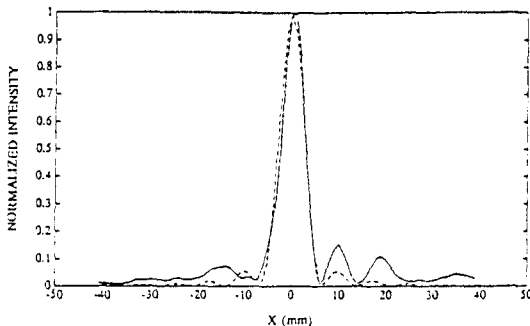
또한 배열 소자가 모두 한개의 알루미늄 판에 부착되어 있으므로 이 판에 의한 소자간의 음향적 결합과 각 소자에 연결된 전자 회로에 의한 전기적 결합에 의한 효과를 측정하기 위하여 한 개의 소자를 구동시킨 뒤 주변 소자에서의 상호 결합량을 측정하였다. 이 결과 바로 옆의 소자에서는 -15dB, 그 외의 소자에서는 -20~30dB 정도의 상호결합이 측정되어 빔 특성에 큰 영향을 미치지 않으므로 이의 영향은 무시하였다.

위상배열 변환기의 전자적인 초점을 맺기 위해 별도로 설계된 각 소자의 위상과 진폭을 조절할 수 있는 위상배열 조절기를 사용하였다.^[15] 이 조절기는 16개의 양자화된 위상값과 8개의 진폭값을 나타낼 수 있으므로 각 소자의 불균일성을 보상하고 원하는 빔 패턴을 만들기 위해 계산된 각 소자의 상대적인 진폭 및

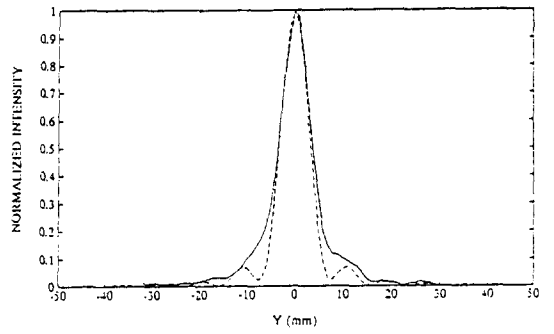
위상을 해당 소자에 공급하게 된다. 기하학적인 초점은 렌즈내의 액체량으로 조절하며 이는 변속 롤러 펌프 (Masterflex, 7520-25)를 통해 빠르게 렌즈내로 액체를 입출력시켜 원하는 곡률 반경을 유지하도록 하였다.¹⁴⁾ 따라서 액체 렌즈와 위상배열 조절기를 사용하여 초점을 실시간으로 변화시킬 수 있으며, 이것은 빠른 시간내에 치료 부위의 균일한 온도 상승을 시키는데 매우 효과적이다.

2. 결과고찰

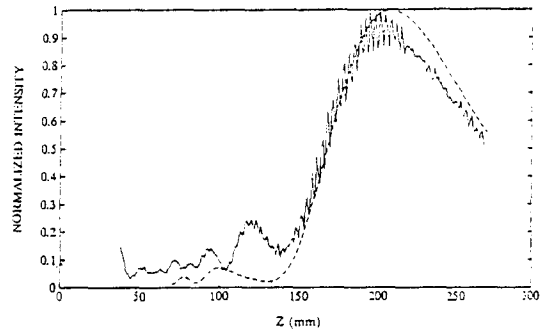
프로토타입으로 제작된 구면액체렌즈가 부착된 위상 배열 변환기로 액체 렌즈를 이용한 기하학적인 빔의 집속과 전자적인 집속의 효과를 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 빔의 초점은 전자적으로 $x=0$ 와 $x=30\text{mm}$ 에 각각 맺도록 하였고, 이때 z 축상의 초점 거리는 200mm 이다. 액체 렌즈막의 곡률반경은 90mm 이고, 이에 의한 기하학적인 초점은 185mm 이다. 이에 따른 실험 측정 결과를 이론치와 비교하여 그림 6과 7에 각각 나타냈다. z 축 패턴에 나타난 떨림은 프라스틱 수조내에서 생기는 정재파에 의한 것이다. 측정된 패턴이 이론치보다 약간 넓은을 알 수 있으며, 그림 7에서는 초점이 축으로부터 벗어나 있으므로 z 축상에는 더 좁은 빔폭이 나타남을 알 수 있다. 이는 좌표계의 중심 축으로부터 $x=30\text{mm}$, $z=200\text{mm}$ 의 방사방향 축상으로 빔패턴을 측정하면 더 정확한 패턴을 얻을 수 있다. 결과상의 오차는 위상 수차의 원인이 되는 렌즈의 곡률반경 측정에 대한 오차와 렌즈내에서의 온도상승에 따른 음속의 변화, 배열 소자의 종축방향으로의 불균일한 여기 특성 등에 기인한 것으로 생각되며, 이는 렌즈내의 온도 안정장치와 정확한 측정 시스템으로 개선될 수 있으며, 온도변화에 둔하며, 손실이 적은 최적의 액체 선택도 중요한 과제이다.



(a)



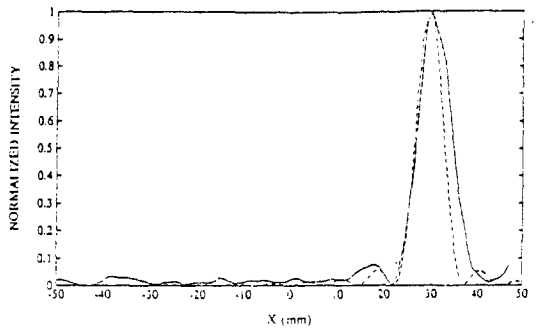
(b)



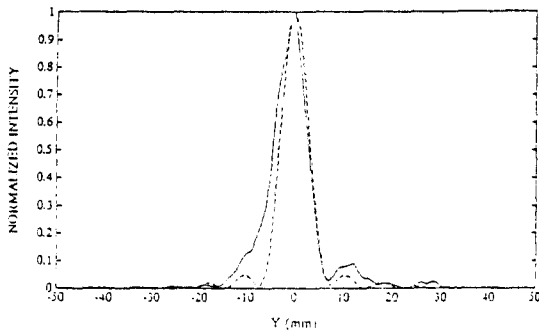
(c)

그림 6. 구면 액체렌즈 초음파 위상배열 변환기의 음의 강도 분포: 초점(0,0,200mm)
(a) x축 패턴 (b) y축 패턴 (c) z축 패턴; (—) 실험치, (---) 이론치

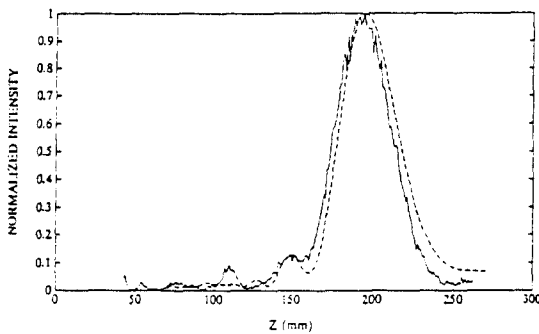
Fig. 6. Intensity pattern for spherical liquid lens phased array transducer with focus at (0,0,200mm).
(a) x-axis (b) y-axis (c) z-axis; experimental(—) and simulated (---) results



(a)



(b)



(c)

그림 7. 구면 액체렌즈 초음파 위상배열 변환기의 음의 강도 분포: 초점(30.0,200mm)
(a) x축 패턴 (b) y축 패턴 (c) z축 패턴: (—) 실험치, (---) 이론치

Fig. 7. Intensity pattern for spherical liquid lens phased array transducer with focus at (30.0,200mm).
(a) x-axis (b) y-axis (c) z-axis: experimental (—) and simulated (---) results

IV. 결론

본 연구에서는 위상배열기를 이용한 횡축방향으로의 전자적 빔의 집속과 초음파 액체 렌즈를 이용한 기하학적인 2차원의 집속효과를 결합하여 2차원적으로 좁은 빔폭을 지닌 구면 액체 렌즈가 부착된 위상 배열 변환기를 설계 및 제작하여 그 특성을 실험하였다. 연구된 위상 배열기를 이용하여 횡축 방향으로의 원하는 곳에 빠르게 빔을 주사시킬 수가 있으며, 다중 초점과 같은 다양한 빔 패턴을 구사할 수도 있다. 또한, 액체 렌즈로는 1차원 위상 배열기의 단점인 종축 방향의 넓은 빔폭에 대한 집속과 더불어 실시간내에 액체의 양

으로 렌즈의 곡률반경을 조절하여 초점을 능동적으로 가변시킬 수 있으며, 위상 배열기에 의한 전자적인 집속과의 적절한 조합으로 원하는 형태의 빔패턴을 다양하게 형성할 수 있다. 따라서 이러한 구면 액체 렌즈가 부착된 초음파 위상배열 변환기는 좁은 빔폭으로 종양 주변을 따라 빠르게 주사 시킴으로써 종양 내부의 균일한 온도 상승 효과를 얻는 온열 치료기 등에 사용이 가능하며, 이 치료기에 종축 방향으로 기계적인 주사를 더할 경우, 종양의 주변을 3 차원 경로를 따라 단일 또는 다중 초점 패턴을 만들며 이동시킬 수 있으므로, 깊게 위치한 큰 심부 종양을 치료하는데 더욱 효과적이다.

참고 문헌

- [1] P.P.Lele, "Scanned, focused ultrasound for controlled localized heating of deep tumors", *Hyperthermia in Cancer Treatment*, vol.III, L.J.Anghiler and J. Robert, Eds., CRC Press, Boca Raton, FL., pp.75-98, 1986.
- [2] E.S.Ebbini and C.A.Cain, "Multiple-focus ultrasound phased array pattern synthesis: Optimal driving-signal distributions for hyperthermia", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, vol. UFFC-36, no.5., pp.540-548, 1989.
- [3] L.A.Frizzel, P.J.Benkese, K.B. Ocheltree, and C.A.Cain, "Ultrasound phased arrays for hyperthermia treatment", in *Proc. 1985 IEEE Ultrason. Symp.*, pp.930-935.
- [4] P.J.Benkese, L.A.Frizzel, K.B. Ocheltree, and C.A.Cain, "A tapered phased array ultrasound transducer for hyperthermia treatment", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, vol. UFFC-34, no.4, pp.446-453, 1987.
- [5] E.S.Ebbini, C.A.Cain, M.Ibbini, and S. I.Umemura, "A cylindrical-section ultrasound phased array applicator for hyperthermia cancer therapy", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, vol.UFFC-35, no.5, pp.561-572, 1988.

- [6] E.S.Ebbini and C.A.Cain, "A spherical-section ultrasound phased array applicator for deep localized hyperthermia", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.38, pp.634-643, 1991.
- [7] S.Umemura and C.A.Cain, "The sector-vortex phased array: Acoustic field synthesis for hyperthermia", *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, vol.UFFC-36, pp.249-257, 1989.
- [8] G.C.Knollman, J.Bellin, and L.Weaver, "Variable-focus liquid-filled hydroacoustic lens", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.49, no.1, pp.253-261, 1971.
- [9] F.S.Foster and J.W.Hunt, "Transmission of ultrasound beams through human tissue -focusing and attenuation studies", *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol.5, pp.257-268, 1979.
- [10] O.T.von Ramm and S.W. Smith, "Beam steering with linear arrays", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.BME-30, no.8, pp.438-452, 1983.
- [11] T.Tarnoczy, "Sound focusing lenses and waveguides", *Ultrasonics*, pp.115-127, 1965.
- [12] A.R.Selfridge, "Approximate material properties in isotropic materials", *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol.SU-32, no.3, pp.381-394, 1985.
- [13] J.L.Morris, *Computational Methods in Elementary Numerical Analysis*, Wiley, New York, Ch.9, 1983.
- [14] 윤영중, 박한규, "초음파 구면 액체 렌즈 변환기에 관한 해석", *전자공학회지*, 제30권, A편, 제2호, pp.22-28, 1993년 2월
- [15] P.J.Benkeser, T.L.Pao, and Y.J.Yoon, "Ultrasonic phased array controller for hyperthermia applications", *Ultrasonics*, vol.29, pp.85-88, Jan., 1991.

 저 자 소 개



尹 怡 重(正會員)

1959년 3월 9일생. 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1986년 9월 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991년 12월

Georgia Institute of Technology 졸업(Ph.D.). 1992년 3월~1993년 2월 한국전자통신연구소 위성통신기술연구단 선임연구원. 현재 연세대학교 전파공학과 조교수. 주관심분야는 전파전파, 위상배열안테나 등임.

朴 漢 奎(正會員)

第31卷 A編 12號 參照

현재 연세대학교 전파공학과 교수