

의료용 초음파 트랜스듀서의 방사 빔 형상 개선

Improvement of the Radiation Beam Profile of a Medical Ultrasonic Transducer

박연수, 이원석,* 노용래†

(Yeonsue Park, Wonseok Lee,* and Yongrae Roh†)

경북대학교 기계공학과, *알피니언메디칼시스템(주)

(Received May 4, 2015; revised June 15, 2015; accepted June 23, 2015)

초 록: 본 논문에서는 의료용 초음파 트랜스듀서의 방사 빔 형상의 개선에 관하여 연구하였다. 빔 형상의 개선을 위하여 분할전극과 다초점 렌즈를 포함하는 새로운 트랜스듀서 구조를 고안하였다. 먼저 선형 음원에 대해 유한요소 해석을 통해 빔 형상을 분석한 후, 부엽의 크기, 집속구간 및 빔폭 등의 성능들을 동시에 고려하여 고안된 구조의 최적설계를 수행하였다. 이때 집속구간과 최소 빔폭의 비율을 성능지수로 사용하여 고안된 구조의 최적치수를 도출하였다. 그 결과 부엽의 크기가 -20.2 dB로 작고, 최소 빔폭이 2.04 mm이고 깊이 30 mm부터 160 mm까지 좁고 일정한 빔폭을 가지도록 빔 형상이 개선되었다. 나아가, 고안된 구조를 가지도록 트랜스듀서 시편을 제작하고 빔 패턴을 측정하여 해석 결과와 비교함으로써, 고안된 트랜스듀서 구조의 타당성을 검증하였다.

핵심용어: 초음파 트랜스듀서, 빔 형상, 분할전극, 다초점 렌즈

ABSTRACT: Improvement of the radiation beam profile of a medical ultrasonic transducer has been researched in this paper. In order to improve the beam profile, a new transducer structure has been devised that includes both a shaded electrode and a multi-focus lens. For a linear sound source, the beam profile was investigated through finite element analysis, and then the optimal design of the devised structure was carried out by considering such performances as sidelobe level, focal range and beamwidth simultaneously. In the process, the optimal dimension of the devised structure was derived by using the ratio of the focal range to the minimum beamwidth as a performance index. As a result, the beam profile has been improved to have a lower sidelobe level at -20.2 dB and a consistent narrow beamwidth from 30 mm to 160 mm depth with the minimum beamwidth at 2.04 mm. Further, a prototype transducer was fabricated to have the devised structure, and its performance was measured and compared with the analysis results to confirm the validity of the devised transducer structure.

Keywords: Ultrasonic transducer, Beam profile, Shaded electrode, Multi-focus acoustic lens

PACS numbers: 43.38.Fx

1. 서 론

초음파 트랜스듀서는 의료용 진단장치 또는 산업용 비파괴 검사 장비분야에서 음향신호를 송수신하기 위한 중요한 구성요소이다.^[1,2] 트랜스듀서는 용도에 맞게 적절한 형태의 음향 빔을 생성할 수 있어야 한다. 방사된 빔 형상에 따라 폭 방향의 해상도가

결정되는데, 깊이에 따라 일정하고 높은 해상도를 얻기 위해서는 방사 깊이에 따라 좁고 일정한 폭을 가지는 빔 형상이 요구된다. 트랜스듀서의 길이 방향으로서는 다수의 소자를 배열한 후, 이들 간에 시간차를 두어 음파를 발생시켜 빔 형상을 조절하는 빔포밍 기법이 널리 사용되고 있다.^[3,4] 그러나 통상의 1차원 배열 트랜스듀서의 경우 폭 방향으로서는 한 개의 소자밖에 없기 때문에 이러한 기법을 사용하는 것이 불가능하고, 대신에 음향렌즈를 사용해 방사 패턴을 조절하고 있다. 그러나, 통상의 단일 초점 렌

†Corresponding author: Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 1370 Sankyuk-Dong, Buk-Gu, Daegu 702-701, Republic of Korea
(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)

즈의 경우 음파가 집중되는 부분만 빔폭이 좁으며 집중구간이 짧은 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 1차원 배열 트랜스듀서의 폭 방향에 대해 혹은 단일 소자 트랜스듀서에 대해 방사 빔 형상을 개선시키는 방안에 관하여 연구하였다.

단일소자 트랜스듀서의 경우 음원 형태를 변경하여 빔 형상을 조절할 수 있는데, 압전소자의 상부에 형성된 전극의 크기를 조절하는 방법과 음파의 방사면을 기하학적으로 조절하는 방법이 있다. 먼저 다각형의 전극들을 압전소자에 생성하여 빔 형상을 개선하는 것에 관하여 연구가 이루어졌다.^[5,6] 하지만 부엽의 크기는 고려하지 않고 빔폭만을 개선하였으며, 정확한 치수로 다각형의 전극을 형성하기 어려운 단점이 있다. 또한 환형 트랜스듀서에 직경이 다른 환형 전극을 배열하는 방법도 있는데, 환형 전극의 배열이 어긋나면 빔 형상이 크게 변하는 문제가 있다.^[7,8] 그리고 음파의 방사면을 기하학적으로 조절하는 방법에 대한 선행연구로는 여러 개의 곡률을 가지는 Fresnel 렌즈를 사용하여 여러 개의 초점을 형성시켜 빔 형상을 개선하는 연구가 이루어졌다.^[9-11] Fresnel 렌즈의 경우 렌즈의 형상이 복잡하여 제작이 어렵고, 렌즈의 두께가 얇아서 외부의 충격에 취약하다. 다음으로 Fresnel 렌즈의 상부에 다른 재료를 주조하여 형성한 음향렌즈도 연구되었다.^[12] 다른 재료로 음향렌즈를 구성하였기 때문에 음파가 각 경계면을 투과할 때 반사에 의한 음향에너지 손실이 발생하며, 이로 인해 감도가 약한 문제가 있다. 그 외에 상이한 곡률의 곡면을 압전소자, 정합층 및 음향렌즈에 적용한 Hanafy 구조가 있다.^[13,14] 압전소자의 두께가 폭 방향으로 다르기 때문에 다양한 주파수의 음파가 생성되고 음원의 방사면이 조절되어 있어, 얇고 균일한 빔 형상을 가지는 구조이다. 하지만 압전소자에 곡면을 생성시키는 것이 어려운 문제가 있다.

본 논문에서는 부엽의 크기가 작고, 빔폭이 깊이에 따라 좁고 일정한 빔 형상을 가지는 초음파 트랜스듀서의 구조에 관하여 연구하였다. 선행연구처럼 형상이 복잡하여 구현하기 어려운 구조 대신에, 간단한 구조의 분할전극(shaded electrode)과 다초점 렌즈를 트랜스듀서에 적용하였다. 상용 유한요소 해석 코드인 PZFlex를 이용하여 트랜스듀서의 구조에 따

른 빔 형상을 해석하였는데, 우선 선형 음원의 형태를 기본구조로 정하고 그에 따른 성능변수를 선정하였다. 이후 빔 형상의 개선을 위해 선정된 성능변수를 고려하여 고안된 트랜스듀서 구조의 최적구조를 설계하였다. 나아가 설계 결과를 따라 트랜스듀서 시편을 제작하고 특성을 평가함으로써, 설계 결과의 타당성을 확인하였다.

II. 초음파 트랜스듀서의 빔 형상 해석

먼저 트랜스듀서의 기본구조를 정하였는데, 그 구조는 Fig. 1과 같이 단일소자 형태이다. 1차원 배열 트랜스듀서를 폭 방향으로 본 그림인데, 폭 방향으로 한 개만의 소자만 있으므로, 선형음원의 형태를 가진다. 능동소자로는 압전체를 사용하였고, 후면층과 2개의 정합층(ML1, ML2)이 압전체의 아랫면과 윗면에 형성되어 있으며, 음향렌즈가 이를 감싸는 구조이다. 구성요소의 물성은 Table 1과 같다. 트랜스듀서를 선형음원의 형태로 만들기 위해 압전체의 상부에는 전체전극이 형성되어 있고, 렌즈와 물간의 음속차에 의한 음파의 굴절을 막기 위해 평면 렌즈를 적용하였다.

트랜스듀서의 구조에 따른 빔 형상을 유한요소 해석을 통해 구하였는데, 해석에 사용된 모델은 Fig. 1과 같이 음향렌즈 상부에 물이 형성되어 있고, 후면층의 바닥면에서 발생하는 반사파의 영향과 해석모

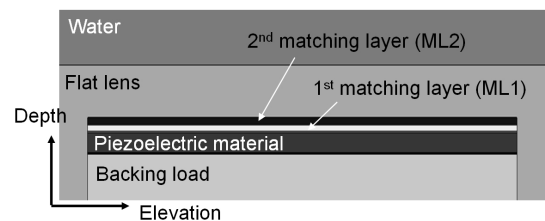


Fig. 1. Basic structure of the transducer.

Table 1. Material property of each layer.

Material	Density	Sound velocity	Damping constant @3.5 MHz
Backing	2,120 kg/m ³	1,490 m/s	11.0 dB/mm
ML1	4,910 kg/m ³	1,840 m/s	0.80 dB/mm
ML2	1,170 kg/m ³	2,000 m/s	1.30 dB/mm
Acoustic lens	1,300 kg/m ³	960 m/s	1.90 dB/mm

델의 크기를 줄이고자 모델의 외곽에 흡수경계조건을 적용하였다. 압전소자의 폭은 13.5 mm이고, 이 트랜스듀서의 각 채널당 길이 방향 두께는 0.2 mm이다. 트랜스듀서는 압전소자에 1V의 임펄스 전압을 인가하여 구동하였다. 과도해석 조건으로 압전소자에서 발생된 음파가 물의 외곽에 있는 절점으로 전달되어 시간에 따른 음압의 정보가 입력되면, 보간법을 통해 빔 형상을 해석하였다.^[17] 이때 파형의 중심 주파수는 4 MHz이다. 반경 1 m를 기준으로 방사 각도에 따른 빔 패턴을 Fig. 2(a)와 같이 구하였는데, 부엽의 크기는 -13.0 dB로 해석되었다. 다음으로 트랜스듀서 폭 방향의 중심에서 깊이에 따른 음압을 1 μ Pa 기준으로 상대음압크기로 구한 결과를 Fig. 2(b)에 나타내었는데, 집속구간은 189 mm인 것으로 계산되었다. 이때 집속구간은 트랜스듀서로부터 가장 먼 변

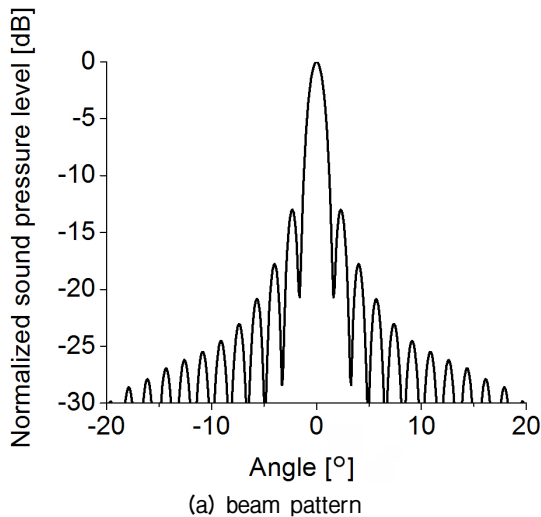
곡점에서의 상대음압크기를 기준으로 ± 3 dB이내에 드는 구간으로 정하였다. 그리고 빔폭은 각 깊이에서 최고음압을 기준으로 정규화한 후, 깊이별 최고음압의 절반인 -3 dB에 해당되는 유효 빔폭을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 이때 집속구간 내에서 가장 좁은 빔폭은 4.94 mm로 확인되었다.

트랜스듀서에서 발생하는 음향에너지가 일정하고 음파의 집속 정도에 따라 집속구간, 빔폭, 부엽의 크기가 서로 연관되어 있으므로, 기본구조의 빔 형상에서 집속구간은 길지만 부엽과 빔폭이 큰 것으로 나타났다. 따라서 깊이에 따라 좁고 일정한 빔폭을 얻기 위하여 Eq.(1)과 같이 집속구간(Focal range)을 최소 빔폭(Minimum beamwidth)으로 나눈 집속구간 비(Focal range ratio)라는 성능지수를 새롭게 설정하여 트랜스듀서의 구조를 설계하였다.

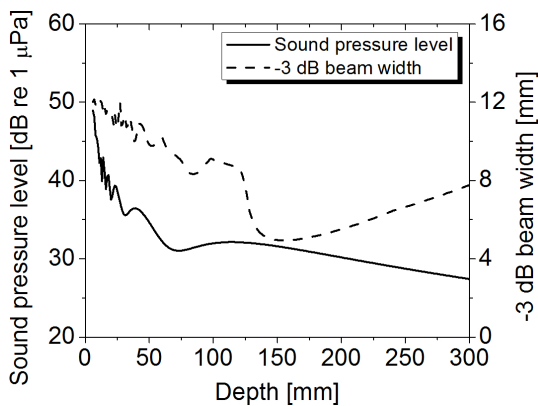
$$Focal\ range\ ratio = \frac{Focal\ range}{Minimum\ beamwidth}. \quad (1)$$

III. 분할전극 구조

먼저 빔 형상을 개선하기 위해 음원의 유효길이를 조절하는 방법인 분할전극 구조를 Fig. 3과 같이 트랜스듀서에 적용하였다. 정밀연삭기를 이용하여 압전체의 상부전극을 일정 부분 제거하면, 전극이 남은 부분만 전기장이 형성되어 음파가 발생하는 부분의 크기를 간단하게 조절할 수 있다. 하지만 간섭에 의해 전극이 제거된 부분에서도 음파가 발생되므로, 음원의 크기를 효과적으로 조절하기 위해서 정합층도 분할전극의 크기와 동일하게 제거하였다. 이것은 음향렌즈와 압전체 간의 음향 임피던스 차이를 이용하여 분할전극 부분에서 음파가 음향렌즈로 전파되는 것을 저감하기 위해서이다.



(a) beam pattern



(b) axial pressure level and -3 dB beam width variation along the depth

Fig. 2. Beam profile of the basic model.

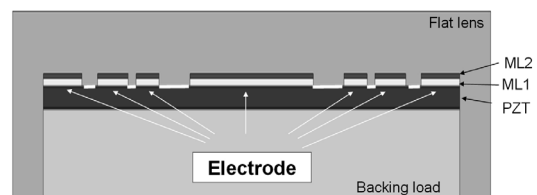


Fig. 3. Structure of the shaded electrode.

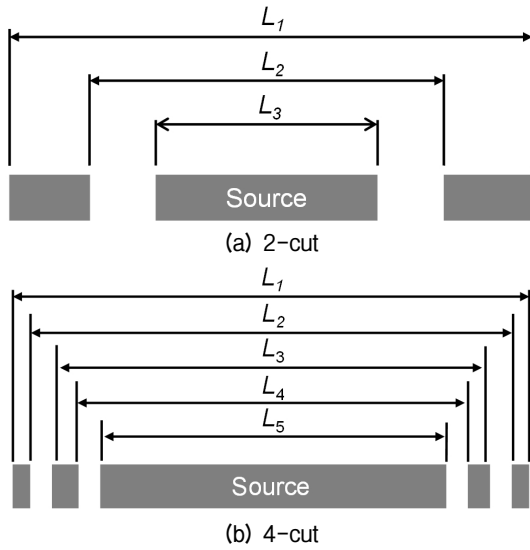


Fig. 4. Types of the shaded electrode.

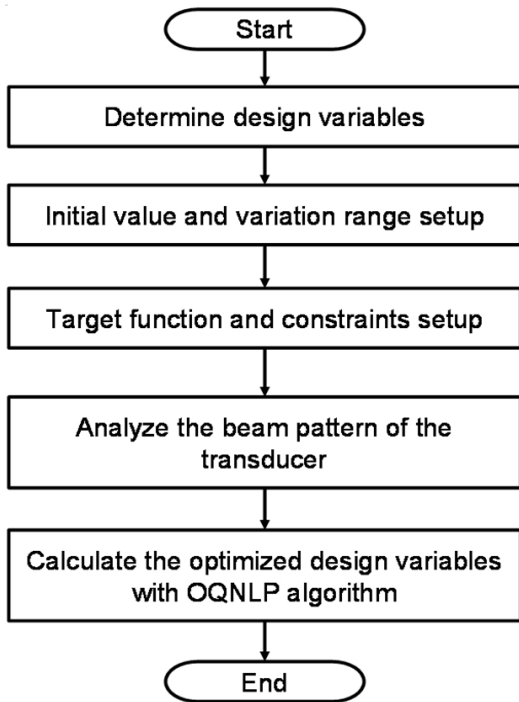


Fig. 5. Optimization process for the design of the beam profile.

위와 같이 압전체 상부의 전극과 정합층을 제거함으로써 간단하게 음원의 유효길이를 조절할 수 있다. 음원의 유효길이를 다양하게 변화시키기 위하여 분할전극의 구간을 Fig. 4와 같이 절단횟수 2-cut, 4-cut으로 구분하여 설계를 진행하였다. 이때 $L_1 \sim L_5$ 는 전극의 길이를 의미하며, 분할전극은 대칭 형태

Table 2. Initial value and variation range of the design variables of the shaded electrode pattern.

Design variable	Condition	2-cut	4-cut
L_2	Initial value	9.0 mm	10.0 mm
	Variation range	0.20~13.4 mm	0.40~13.4 mm
L_3	Initial value	6.0 mm	9.0 mm
	Variation range	0.10~13.3 mm	0.30~13.3 mm
L_4	Initial value	N/A	8.0 mm
	Variation range		0.20~13.2 mm
L_5	Initial value	N/A	7.0 mm
	Variation range		0.10~13.1 mm

Table 3. Optimization of the design variables for the shaded electrode pattern.

Design variable	Optimized value	
	2-cut	4-cut
L_2	6.45 mm	11.4 mm
L_3	5.87 mm	11.3 mm
L_4	N/A	3.24 mm
L_5		3.19 mm

로 압전체상부에 형성되어 있고, L_1 은 13.5 mm로 압전체의 폭 방향 길이와 같다.

Fig. 5는 분할전극 구조의 최적 치수를 도출하기 위한 절차를 나타내고 있다. 먼저 분할전극의 종류에 따라 설계변수를 정한 후, 설계변수의 초기값과 변화범위를 Table 2와 같이 정하였다.

좁고 균일한 빔 형상을 만들기 위해, 성능지수인 집속구간 비를 최대화하는 것을 목적함수로 설정하였다. 이때 제한조건으로는 Eq.(2)와 같이 부엽의 크기가 기본조건 이하가 되도록 설정하였다.

- Target function : Maximize (Focal range ratio) (2)
- Constraints : Sidelobe level \leq -13 dB (Flat lens & whole electrode)

설정된 설계변수를 트랜스듀서에 적용하여 성능을 해석하고, OQNLP(OptQuest-Nonlinear Problem) 알고리즘을 통해 설계변수의 최적치수를 Table 3과 같이 도출하였다.^[18] 이때 분할전극 구조에서 절단횟수가 증가할수록의 전극과 정합층이 제거된 길이가 길어지는데, 간섭에 의해 제거된 구간에서도 음파가

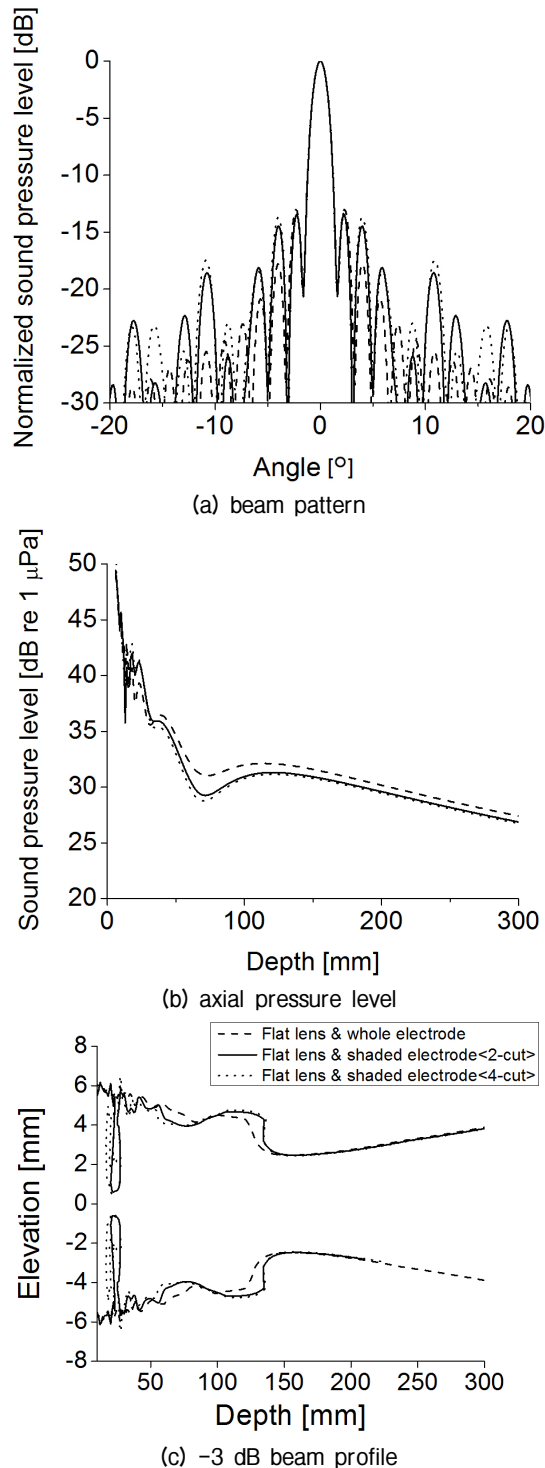


Fig. 6. Results of the optimization of the shaded electrode pattern.

발생되어 부엽의 크기가 증가되는 경향이 나타났다.

도출된 최적치수를 트랜스듀서에 적용하여 빔 형상을 해석한 결과, 제한조건을 만족시키고 집속구간

Table 4. Results of the optimization of the shaded electrode pattern.

Condition	Flat lens & whole electrode	Flat lens & shaded electrode	
		2-cut	4-cut
Sidelobe level	-13.0 dB	-13.5 dB	-13.4 dB
Focal range	189 mm	198 mm	201 mm
Min. beamwidth	4.94 mm	4.94 mm	4.88 mm
Focal range ratio	38.3	40.2	41.2

비가 증가되었으나 최소 빔폭과 부엽의 크기는 미미하게 감소한 것으로 나타났다. 빔 패턴은 Fig. 6(a)와 같이 기본구조와 유사한 형태로 나타났으며, 부엽의 크기가 Table 4와 같이 -13.5 dB로 기본구조의 -13 dB와 유사하였다. 그리고 집속구간은 Fig. 6(b)와 같이 198 mm로 증가하였는데, -3 dB 빔 형상이 Fig. 6(c)와 같이 기본구조와 거의 같다. 이것은 각 성능변수들이 서로 연관되어 있기 때문에, 특정 성능이 변하면서 다른 성능에도 영향을 미치기 때문이다. 따라서 음원의 유효길이를 조절하는 방법만으로는 복합적으로 성능을 높이기 어려운 것으로 판단되어, 음파의 방사면을 기하학적으로 조절하는 방법인 다초점 렌즈를 트랜스듀서에 추가로 적용하였다.

IV. 다초점 렌즈 구조

경계면을 투과하는 음파의 경우 각 매질의 음속에 따라 입사각과 투과각이 달라진다.^[15] 이 현상을 이용하여 빔 형상을 개선하고자 다초점 렌즈를 앞 절의 트랜스듀서에 적용하였으며, 성능비교를 위하여 일반적으로 널리 사용되는 단일곡률을 가진 단일초점 렌즈도 적용하였다. 먼저 한 개의 곡률을 가지는 단일초점 렌즈는 Fig. 7(a)와 같고, 세 개의 곡률을 가지는 다초점 렌즈는 Fig. 7(b)와 같다. 다초점 렌즈 구조에서 설계변수는 음향렌즈의 개구 폭과 음향렌즈의 곡률반경이다. 적용된 다초점 렌즈는 세 개의 곡률을 가지므로 세 개의 초점을 가지는 반면, 단일초점 렌즈는 단일 곡률이므로 한 개의 초점을 가진다. 세 개의 초점거리를 5~300 mm 사이로 설정하면 Eqs. (3)와 (4)에 따라 음향렌즈의 유효직경과 곡률반경의 변화범위가 도출된다.^[16] 이때 D 는 음향렌즈의 개구 폭이고, R 은 음향렌즈의 곡률반경, T 는 원거리음장

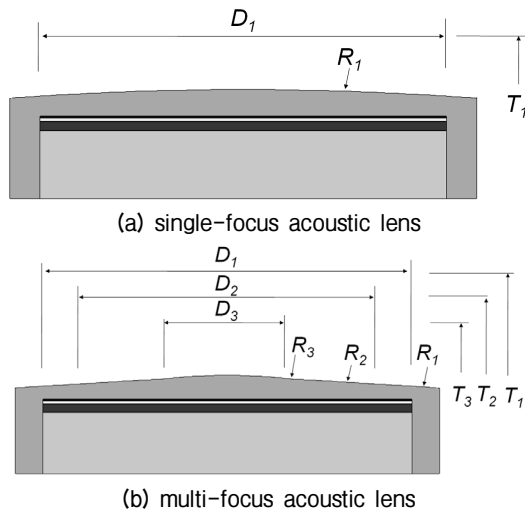


Fig. 7. Types of the acoustic lenses.

Table 5. Initial value and variation range of the design variables for the acoustic lenses.

Design variable	Initial value	Variation range	Design variable	Initial value	Variation range
R_1	67.7 mm	45.7~180 mm	D_2	11.0 mm	7.84~13.4 mm
R_2	45.1 mm	23.1~67.1 mm	D_3	7.75 mm	2.74~10.9 mm
R_3	22.6 mm	2.82~44.6 mm	N/A		

Table 6. Optimization values of the design variables of the acoustic lens.

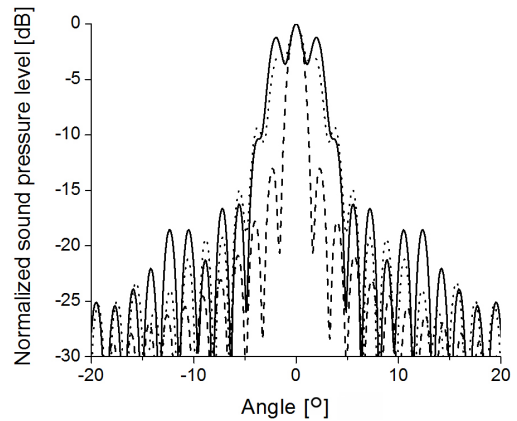
Design variable	Optimized value	
	Single-focus lens & whole electrode	Multi-focus lens & whole electrode
R_1	65.7 mm	90.2 mm
R_2	N/A	59.8 mm
R_3		20.7 mm
D_2		8.31 mm
D_3		4.01 mm

까지의 길이이며 빔의 초점거리와 같다.

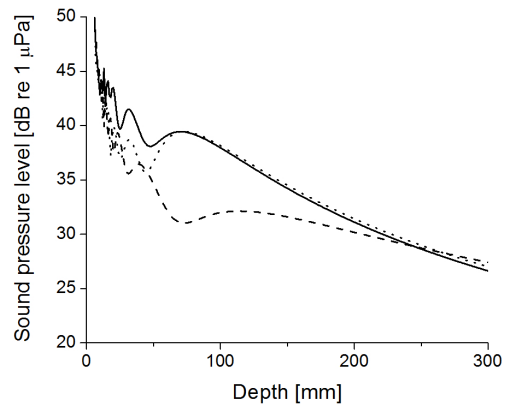
$$D = 2\sqrt{\lambda T}, \tag{3}$$

$$R = T \left(\frac{c_{water} - c_{lens}}{c_{lens}} \right). \tag{4}$$

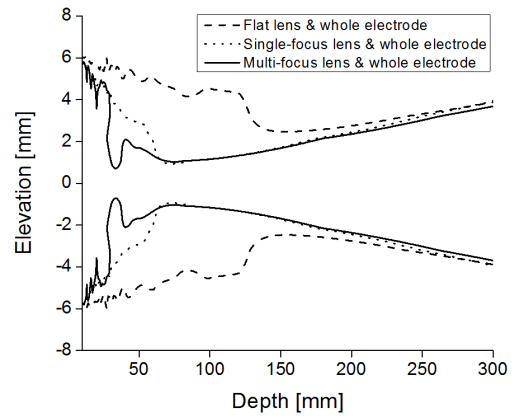
음향렌즈는 일반적으로 주조를 통해 정합층 상부에 형성되며, 주조 틀을 곡률에 맞게 가공하면 다초



(a) beam pattern



(b) axial pressure level



(c) -3 dB beam profile

Fig. 8. Results of the optimization for each type of the acoustic lens.

점 렌즈는 용이하게 구현될 수 있다. 각 성능변수들을 고려하기 위하여, Eq.(3)와 같이 목적함수와 제한 조건을 이용하여 Fig. 5와 같은 최적화 절차를 통해 설계를 진행하였다. 이때 성능변수의 초기값과 변화 범위는 Table 5와 같이 적용하였다.

Table 7. Results of the optimization according to the type of the acoustic lens.

Condition	Single-focus lens & whole electrode	Multi-focus lens & whole electrode
Sidelobe level	-9.29 dB	-16.3 dB
Focal range	75.5 mm	114 mm
Min. beamwidth	1.86 mm	1.43 mm
Focal range ratio	40.4	80.4

설계변수의 최적치수는 Table 6과 같이 도출되었다. 먼저 한 개의 초점을 가지는 단일초점 렌즈는 Fig. 8(c)와 Table 7과 같이 깊이 60mm에서 빔폭이 최소가 되고, 부엽의 크기가 Fig. 8(a)와 같이 -9.29 dB로 높으며, 집속구간이 Fig. 8(b)와 같이 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 세 개의 초점을 가지는 다초점 렌즈는 집속구간 비가 크게 증가하고 부엽의 크기가 -16.3 dB로 감소되어 단일초점 렌즈에 비해 빔 형상이 확연히 개선된 것을 확인할 수 있었다. 하지만 근거리 음장부터 좁고 일정한 빔폭을 가지지는 못하여, 음파의 방사면을 기하학적으로 조절하는 방법만으로는 복합적으로 성능을 높이기 어려운 것으로 확인되었다. 따라서 부엽의 크기도 줄이면서 빔폭을 균일하게 개선하기 위해서 새로운 구조를 적용하고자 하였다.

V. 빔 형상 개선 구조

본 연구에서는 각 성능변수들을 복합적으로 개선하기 위하여 분할전극과 다초점 렌즈를 동시에 적용한 구조를 도출하였다. 이때 트랜스듀서의 구조를 단순화하기 위하여 분할전극 구조는 2-cut 형태로 한정하였다. 각 성능변수들을 고려하기 위하여, Eq.(4)의 목적함수와 제한조건을 이용하여 Fig. 5의 최적화 절차를 통해 구조를 설계하였다. 이때 각 설계변수의 초기값과 변화범위는 각각 Table 2와 5와 같이 적용하였다. 성능의 비교를 위하여 단일초점 렌즈와 2-cut 분할전극 구조가 적용된 구조에도 최적화를 수행하였으며, 구조에 따른 설계변수의 최적치수는 Table 8과 같다.

분할전극과 다초점 렌즈가 적용된 새로운 구조에

Table 8. Optimization of the design variables for the structure of the 2-cut shaded electrode and the multi-focus acoustic lens.

Design variable	Optimized value	
	Single-focus lens & shaded electrode	Multi-focus lens & shaded electrode
R_1	162 mm	86.9 mm
R_2	N/A	43.7 mm
R_3		34.8 mm
D_2		7.84 mm
D_3		5.95 mm
L_2	9.30 mm	11.9 mm
L_3	8.39 mm	11.4 mm

Table 9. Results of the optimization of the structure of the 2-cut shaded electrode and the multi-focus acoustic lens.

Condition	Single-focus lens & shaded electrode	Multi-focus lens & shaded electrode
Sidelobe level	-13.4 dB	-20.2 dB
Focal range	124 mm	93.2 mm
Min. beamwidth	3.22 mm	2.04 mm
Focal range ratio	38.5	45.7

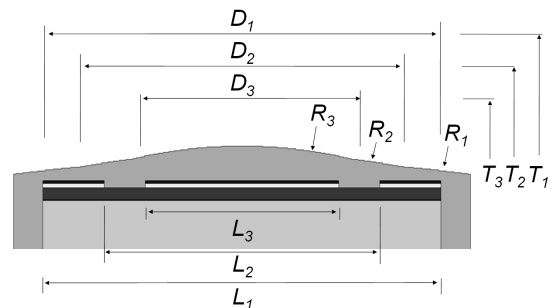
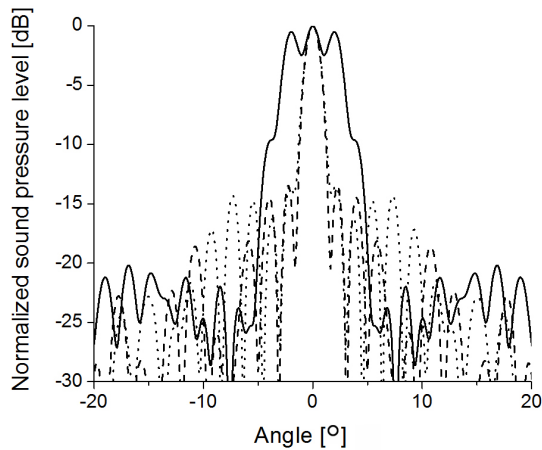


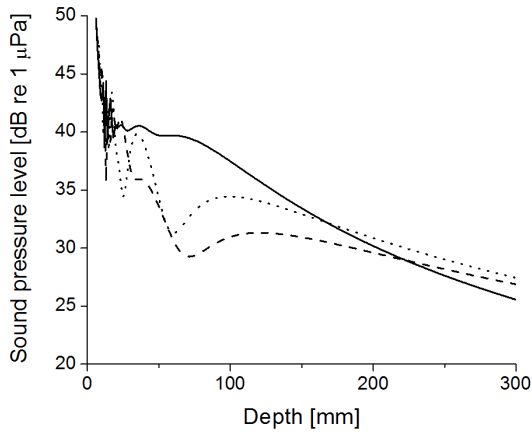
Fig. 9. Geometry of the 2-cut shaded electrode and multi-focus acoustic lens.

최적치수를 적용하면 Table 9와 같이 다른 구조들에 비해 부엽의 크기가 작고 빔폭이 근거리음장부터 좁고 일정하였다. 먼저 빔 패턴에서 Fig. 10(a)와 같이 부엽의 크기가 -20.2 dB로 크게 감소하였고, 집속구간은 Fig. 10(b)와 같이 93.2 mm로 감소하였으나 약 200 mm 깊이까지 음압이 기본구조보다 높았다. 그리고 -3 dB 빔 형상은 Fig. 10(c)와 같이 깊이 30 mm부터 160 mm까지 얇고 일정하였으며, 최소 빔폭은 2.04 mm로 크게 감소하였다.

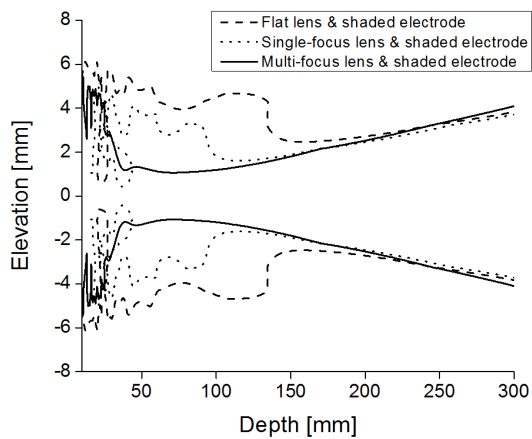
위와 같이 최적화를 통해 도출된 빔 형상의 타당



(a) beam pattern



(b) axial pressure level



(c) -3 dB beam profile

Fig. 10. Results of the optimization for the 2-cut shaded electrode and multi-focus lens.

성을 검증하고자, Fig. 9와 같은 구조의 트랜스듀서 시제품을 제작하였다. 제작된 트랜스듀서는 Fig. 11에 나타나 있다. 이때 빔 형상의 개선 여부를 실험적

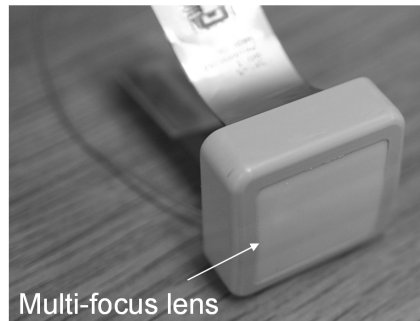


Fig. 11. Photograph of the transducer fabricated to have the electrode and lens structure in Fig. 9.

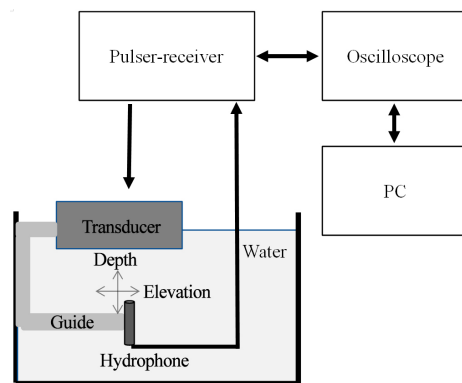


Fig. 12. Experimental setup to characterize the beam profile of the transducer.

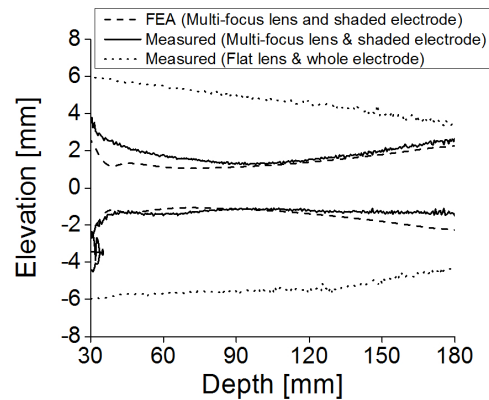


Fig. 13. Validation of the beam profile.

으로 확인하기 위하여 Fig. 1과 같은 기본 구조의 트랜스듀서도 같이 제작하였다. 빔 형상은 Fig. 12에 보인 장치를 사용하여 측정하였는데, 펄스 송수신기 (Panametrics, 5800PR)를 이용하여 제작된 트랜스듀서에 1V의 임펄스 전압을 인가한 후, 위치제어장치 (ONDA, AIMS)를 이용하여 수중 청음기(ONDA, HNR-0500)를 트랜스듀서를 기준으로 폭 방향과 깊이 방

향에 따라 이동시키며 음압을 측정하였다. 이때 측정된 신호는 시간에 따른 음압의 크기이고, 음압의 최대값과 최소값의 차이를 이용하여 길이 방향과 깊이 방향 간의 빔 형상을 Fig. 13과 같이 구하였다. 측정된 빔 형상은 해석결과와 잘 일치하며, 기본구조에 비해 근거리음장부터 좁고 균일한 빔 형상을 가지는 것으로 나타났다.

VI. 결 론

본 연구에서는 초음파 트랜스듀서의 폭 방향의 빔 형상을 개선하기 위하여 분할전극과 다초점 렌즈가 동시에 적용된 구조를 고안하였다. 먼저 선형음원 형태를 트랜스듀서의 기본구조로 선정한 후 유한요소 해석을 통해 빔 형상을 확인하였다. 이후 빔 형상을 복합적으로 개선하기 위하여 부엽의 크기, 집속구간, 최소 빔폭을 성능변수로 선정하였고, 고안된 구조의 최적치수를 도출하였다. 부엽의 크기가 작고 빔폭은 깊이에 따라 좁고 일정하도록, 집속구간과 최소 빔폭 간의 비율을 성능지수로 사용하여 최적설계를 수행하였다. 하지만 각 성능변수들이 서로 연관되어 있기 때문에 분할전극과 다초점 렌즈를 개별적으로 적용하여서는 빔 형상을 개선하기는 어려웠다. 따라서 분할전극과 다초점 렌즈를 동시에 적용한 후, 최적화를 통해 빔 형상을 개선하였다. 그 결과 부엽의 크기 -20.2 dB, 집속구간 93.2 mm, 최소 빔폭 2.04 mm로 빔 형상을 개선하였다. 개선된 빔 형상은 기본구조에 비해 깊이 30 mm부터 160 mm까지 좁고 일정한 빔폭을 가지며, 깊이 200 mm까지 음압이 기본구조에 비해 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 설계 구조의 타당성은 트랜스듀서 시편을 제작하고 측정하여 해석결과와 비교함으로써 검증하였다.

본 연구에서 고안된 방법은 사용처에 따라 요구되는 집속깊이 및 구간, 빔폭 및 부엽의 크기를 만족하는 다양한 형태의 초음파 트랜스듀서를 설계하는데 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2013R1A2A2A01015248).

References

1. D. G. Wildes and L. S. Smith, "Advanced ultrasound probes for medical imaging," AIP Conf. Proc. **1430**, 801-808 (2012).
2. S. Advani, J. V. Velsor, and J. L. Rose, "Beam divergence calculation of an electromagnetic acoustic transducer for the non-destructive evaluation of plate-like structures," in Proc. IEEE Int. Sens. Appl. Symp., 277-282 (2011).
3. A. T. Fernandez, K. L. Gammelmark, J. J. Dahl, C. G. Keen, R. C. Gauss, and G. E. Trahey, "Synthetic elevation beamforming and image acquisition capabilities using an 8x128 1.75D array," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **50**, 40-57 (2003).
4. B. D. Lindsey, E. D. Light, H. A. Nichletto, E. R. Bennett, D. T. Laskowitz, and S. W. Smith, "The ultrasound brain helmet: new transducers and volume registration for in vivo simultaneous multi-transducer 3-D transcranial imaging," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **58**, 1189-1202 (2011).
5. L. S. Smith and A. F. Briskin, *Ultrasonic transducer shading*, US Patent No. 4460841, (1984).
6. K. Kawabe, Y. Hara, K. Watanabe, and T. Shimura, "An ultrasonic transducer apodized by polarization," in Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symp., 809-813 (1990).
7. J. A. Ketterling, O. Aristizabal, D. H. Turnbull, and F. L. Lizzi, "Design and fabrication of a 40-MHz annular array transducer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **52**, 672-681 (2005).
8. E. J. Gottlieb, J. M. Cannata, C. Hu, and K. K. Shung, "Development of a high-frequency (> 50 MHz) copolymer annular-array, ultrasound transducer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **53**, 1037-1045 (2006).
9. S. C. Chan, M. Mina, S. S. Udpa, L. Udpa, and W. Lord, "Finite element analysis of multilevel acoustic Fresnel lenses," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **43**, 670-677 (1996).
10. T. D. Mast, "Fresnel approximations for acoustic fields of rectangularly symmetric sources," J. Acoust. Soc. Am. **121**, 3311-3322 (2007).
11. Y. Sato, K. Mizutani, N. Wakatsuki, and T. Nakamura, "Design for an aspherical acoustic Fresnel lens with phase continuity," Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 4354-4359 (2008).
12. D. Kim, K. Ha, M. Kim, and J. Kim, "Fabrication and characteristics of multilevel acoustic fresnel lens for ultrasonic transducer for diagnostic imaging" (in Korean), J. Kor. Sens. Soc. **18**, 33-41 (2009).
13. A. M. Hanafy, *Broadband phased array transducer design with frequency controlled two dimension capability and*

methods for manufacture thereof, US Patent No. 5438998, (1995).

14. M. S. Seyed-Bolorforosh, M. Greenstein, and H. E. Melton, *Elevation aperture control of an ultrasonic transducer*, US Patent No. 5396143, (1995).
15. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders *Fundamentals of Acoustics, Fourth Edition* (John Wiley & Sons, New York, 2002), pp. 176-179.
16. R. E. McKeighen, "Design guidelines for medical ultrasonic arrays," in Proc. SPIE Int. Symp. Medi. Imag. **3341**, 2-18 (1998).
17. R. McKeighen, "Finite element simulation and modeling of 2-D arrays for 3-D ultrasonic imaging," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. **48**, 1395-1405 (2001).
18. Z. Ugray, L. Lasdon, J. Plummer, F. Glover, J. Kelly, and R. Marti, "Scatter search and local NLP solvers: a multistart framework for global optimization," INFORMS J. Comput. **19**, 328-340 (2007).

저자 약력

▶ 박 연 수 (Yeonsue Park)



2014년 2월: 안동대학교 기계자동차공학과 학사
2014년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과 석사과정

▶ 이 원 석 (Wonseok Lee)



2004년 2월: 단국대학교 기계공학과 학사
2007년 8월: 경북대학교 기계공학과 석사
2014년 2월: 경북대학교 기계공학과 박사
2014년 3월 ~ 현재: 알파니언메디칼시스템 (주) 책임연구원

▶ 노 용 래 (Yongrae Roh)



1984년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학사)
1986년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학 석사)
1990년 5월: 미국 펜실베이니아주립대학교 (공학박사)
1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학 연구원 선임연구원
1994년 3월~현재: 경북대학교 기계공학부 교수
<관심분야> 음향초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석