

2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 설계 및 제작

Design and Fabrication of a 2D Array Ultrasonic Transducer

이원석, 우정동, 노용래[†]

(Wonseok Lee, Jeongdong Woo, and Yongrae Roh[†])

경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2013년 4월 11일; 수정일자: 2013년 6월 5일; 채택일자: 2013년 6월 17일)

초 록: 본 논문에서는 48×64 채널로 이루어진 압전단결정 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 설계, 제작 및 평가를 하였다. 전기적 연결이 용이한 평면배열 구조를 선정한 후, 그에 맞게 구성소자를 제작하였다. 유한요소 해석을 통하여 트랜스듀서의 세부 구조를 설계하였다. 트랜스듀서의 성능을 향상시키기 위해 칩폭의 너비와 재료를 조절하여 소자간 상호간섭을 저감하고, 압전단결정 및 정합층의 최적 두께를 설계하여 목표 주파수 대역폭을 구현하였다. 설계에 따라 트랜스듀서의 시작품을 제작하고 그 특성을 측정한 후, 측정된 결과를 유한요소 해석 결과와 비교하여 개발된 트랜스듀서의 성능을 평가하였다.

핵심용어: 초음파 트랜스듀서, 2차원 배열형 트랜스듀서, 압전단결정

ABSTRACT: In this paper, a 48×64 channel 2D array ultrasonic transducer with piezoelectric single crystals was designed, fabricated, and evaluated. Structure of the transducer was chosen to facilitate the electric connection on the planar array, and then components were fabricated in accordance with the structure. Detailed structure of the transducer was designed through finite element analyses. In order to improve the performance of the transducer, the crosstalk between adjacent elements was reduced through the control of kerf width and material, and the target frequency bandwidth was achieved through optimal design of the thickness of the single crystal and matching layers. After fabricating a prototype of the transducer according to the design and measuring its characteristics, the results were compared with those of finite element analyses to evaluate the performance of the developed transducer.

Keywords: Ultrasonic transducer, 2D array transducer, Piezoelectric single crystal

PACS numbers: 43.38. Fx

1. 서 론

현재 의료용 영상진단 장치인 CT(Computed Tomography), MRI(Magnetic Resonance Imaging) 및 PET(Positron Emission Tomography)는 입체영상을 제공한다. 하지만 현재 널리 사용되고 있는 대부분의 초음파 영상장치는 단면영상만 제공하는데, 이 단면영상

은 독립소자가 선형으로 배열된 1D 초음파 트랜스듀서를 통해 획득된다. 1D 초음파 트랜스듀서의 경우 초점 거리가 일정하여 영상의 구간에 제한이 있으며, 다른 방향의 단면영상을 얻기 위해서는 트랜스듀서의 위치를 변경하여야 한다. 이러한 문제를 해결하여 입체영상을 획득하기 위한 초음파 트랜스듀서에는 크게 두 가지 종류가 있다. 먼저 1차원으로 배열된 독립소자를 기계적으로 위치 제어하여 획득한 여러 층의 단면영상을 입체영상으로 합성하는 기계적 3차원 초음파 트랜스듀서가 있다.^[1-3] 다음으로

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

는 독립소자를 2차원으로 배열한 후 각 소자를 전기적으로 개별 구동하여 입체영상을 획득하는 2D 배열형(2D array) 초음파 트랜스듀서가 있다.^[4,8] 기계적 3차원 초음파 트랜스듀서의 경우 1D 트랜스듀서를 기계적으로 회전시키기 때문에 입체영상 획득 속도에 제한이 있으며, 오랜 기간 사용하게 되면 기계적 부품에 손상이 발생하고 영상의 질이 떨어지게 된다. 반면에 2D 배열형 초음파 트랜스듀서는 독립소자들이 평면 배열된 구조이며, 각 독립소자들을 전기적으로 제어하여 동적 집속(dynamic focusing)과 빔스티어링(beam steering)이 가능한 구조이다. 따라서 2D 배열형 트랜스듀서는 이동 없이도 여러 위치에서의 단면영상 뿐만 아니라 입체영상의 제공이 가능하다. 또한 신호처리 기술의 향상에 의해 실시간 입체영상의 획득이 가능해졌다. 하지만 많은 수의 독립소자들이 일정한 면적 내에 존재하기 때문에 소자간 상호간섭(crosstalk)이 크며, 상호간섭에 의해 각 독립소자의 대역폭 및 수신감도가 불균일하고 낮으며 방사패턴이 왜곡되기 쉽다.^[9] 또한 독립소자의 크기가 작아서 입력 임피던스가 높기 때문에 음향부와 전자회로간의 정합이 어렵고, 트랜스듀서의 수신감도가 낮은 문제점이 있다. 그리고 각 소자의 개별적 구동을 위하여 소자들을 기계적으로 분리시킨 후 전자회로와 연결하여야 하는데, 소자의 수가 많아서 연결이 매우 어렵다는 문제가 있다. 따라서 각 독립소자와 전자회로간의 전기적 연결이 가능하며, 소자간 상호간섭을 줄여 향상된 음향특성을 가지며 모든 채널의 음향특성이 균일한 트랜스듀서의 개발이 필요하다.

2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 경우 트랜스듀서의 길이(azimuth) 방향과 같이 다수의 독립소자가 폭(elevation) 방향으로도 배열된 구조인데, 이에 앞서 폭 방향으로 배열된 독립소자의 수가 8개로 적은 1.75D 배열형 초음파 트랜스듀서를 선행 연구하였다.^[10] 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 채널수보다 적지만 다수의 채널이 좁은 면적에 존재하는 1.75D 배열형 초음파 트랜스듀서를 유한요소 해석을 통해 소자간 상호간섭을 저감하여 트랜스듀서의 음향특성을 향상시켰다. 본 연구에서는 Ref. [10]을 바탕으로 채널수가 월등히 많은 2차원 배열형 트랜스듀서

에서 음향특성에 영향을 미치는 인자를 분석 및 조절하여 트랜스듀서의 전체 채널이 균일하고 향상된 음향특성을 가질 수 있는 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 구조설계를 진행하였다.

본 연구에서는 폭 방향으로 48개 및 길이 방향으로 64개의 독립 채널을 가지며, 이들 총 3,072개의 채널에 걸쳐 균일한 음향특성을 가지는 압전단결정형 2D 배열형 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하였다. 먼저 모든 소자들의 개별적 전기연결이 가능하도록 트랜스듀서의 구조를 선정하였다. 선정된 구조에 맞게 구성소자를 제작한 다음, 상용 해석도구인 PZFlex(Weidlinger Associates, NY)를 이용한 유한요소 해석을 통하여 트랜스듀서의 세부 구조를 설계하였다. 트랜스듀서의 설계목표는 -6 dB 중심주파수가 $3.5 \text{ MHz} \pm 7.5 \%$ 이며, -6 dB 비대역폭(fractional bandwidth)이 60 % 이상이며, 모든 채널의 수신감도 표준편차가 1 dB 이하가 되도록 설정하였다. 또한 2D 배열형 트랜스듀서 전체에 걸쳐 균일한 특성을 구현하기 위한 구조를 도출하였다. 나아가 설계에 맞게 트랜스듀서의 시작품을 제작하고 음향특성을 측정 한 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여, 개발된 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 성능을 평가하였다.

II. 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 설계

2D 배열형 초음파 트랜스듀서에는 일반적으로 비교적 좁은 면적 내에 다수의 독립소자들이 존재하여 집적도가 높으며 전기적 간섭이 높아 전기적 연결이 어렵다. 이러한 용도의 전기적 연결을 위한 기술에는 다층형 유연 인쇄회로 기판(FPCB: Flexible Printed Circuit Board)을 사용하는 방법과 전도성 후면층(conductive backer)을 이용하는 방법들이 있다.^[11-12] 다층형 유연 인쇄회로 기판은 각 신호선의 전기적 간섭이 적으며 개별 채널의 전기적 특성이 균일하다는 장점이 있기 때문에, 본 연구에서는 이 FPCB를 이용한 결선 방법을 사용하였다. 다층형 유연 인쇄회로 기판을 이용하여 Fig. 1과 같이 8×64개의 채널로 구성된 모듈을 구성한 후, 모듈 6개를 배열하여 48×64개의 채널을 가지도록 2D 배열형 트랜스듀서의 구조를 선정하였다. 먼저 모듈은 압전단결정 PMN-PT를

능동소자로 사용하였으며, 수동소자는 후면층(backer), 정합층(matching layer) 및 치폭(kerf)으로 구성된다. PZFlex를 이용하여 치폭의 물성과 너비가 소자간 상호간섭에 미치는 영향을 분석한 후, 압전단결정과 정합층의 두께에 따른 중심주파수와 비대역폭의 음향특성을 분석하고 설계변수에 따른 음향특성을 함수화하여 유전알고리즘을 이용하여 비대역폭이 최대가 되도록 최적설계를 하였다. 이 때 사용된 수동소자의 물성은 Table 1과 같으며 설계된 모듈의 음향특성은 3.7MHz의 중심주파수를 가지며 비대역폭은 80.2%, 수신감도는 -62.6 dB, 상호간섭은 -30.6 dB, 수광각(acceptance angle)은 40.9°로 Table 2와 같다.^[10] 모듈의 구체적인 설계 및 제작 절차는 Ref.[10]에 자세히 나타나 있다.

이들 모듈들을 배열하여 2D 배열형 트랜스듀서 구조를 구성하는 본 연구에서는 모듈내 소자들의 전기적 연결을 위한 GRS(GRound Sheet)와 유연 인쇄회로 기판이 압전단결정의 윗면과 아랫면에 위치하는데, 이 유연기판들은 각 모듈의 폭 방향 양쪽으로 나와서 후면층 밑으로 빠져나온다. 즉, 6개의 모듈이 결합된 2D 트랜스듀서 전체의 3,072개의 신호선들은 각 모듈들이 접하는 면 사이로 빠져나와 트랜스

듀서 후면층 뒷단에 존재하는 구동용 전기회로와 연결되는 구조이다. 각 모듈들의 폭 방향 경계면에 위치한 소자들은 모듈의 중심에 있는 소자들에 비해 경계조건이 다르고 인접한 모듈의 영향을 받기 때문에, 모서리 소자들은 모듈간 간격에 큰 영향을 받는다. 따라서 이들 모듈들을 배열하여 균일한 음향특성을 가지는 2D 배열형 초음파 트랜스듀서를 만들기 위하여, 모듈간 간격(gap)에 따른 빔 패턴, 수신감도, 중심주파수 및 비대역폭의 변화를 분석하여 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 전체 채널이 균일한 음향특성을 가지는 최적 모듈간 간격을 결정하였다.

모듈간 간격에 따른 음향특성을 분석하기 위하여 Fig. 1에 나타난 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. Fig. 1의 모델에서 음향렌즈와 물은 모듈의 전체를 덮고 있는 구조인데, 트랜스듀서의 구조에 대한 이해를 돕기 위하여 음향렌즈 및 물 층을 길이 방향으로 반만 형성시켜 나타내었다. 음향렌즈는 모듈들을 감싸서 외부의 충격에 대해 모듈들을 보호할 수 있는 기계적 강성을 가져야 한다. 음향렌즈에 의한 음향에너지의 감쇠가 지나치게 크지 않고 모듈이 어느 정도의 기계적 강성을 가질 수 있도록 음향렌즈의 두께를 통상적으로 널리 이용되는 1 mm로 정하였다. 유한요소 모델을 구성함에 있어서 해석시간을 줄이기 위하여 후면층의 두께를 1 mm로 고정하고

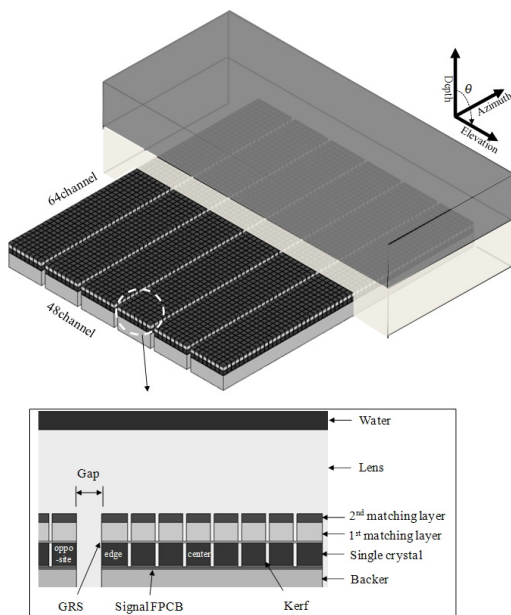


Fig. 1. Schematic structure of the 2D array ultrasonic transducer.

Table 1. Properties of the acoustic materials for the module.

Material	Impedance [Mrayl]	Density [kg/m ³]	Longitudinal velocity [m/s]
Backer	5.5	3,230	1,710
1st matching layer	7.4	2,430	3,020
2nd matching layer	2.0	1,030	1,960
Kerf	1.3	1,430	960

Table 2. Design performance of the module.

Description	Value
center frequency [MHz]	3.7
fractional bandwidth [%]	80.2
Sensitivity [dB]	-62.6
crosstalk level [dB]	-30.6
acceptance angle [°]	40.9

후면층의 바닥면에 흡수경계조건을 두어 반사파의 영향을 제거하였으며, 1개의 대칭면을 폭 방향과 수평한 방향으로 두어 유한요소 모델의 크기를 줄였다. 모듈들 사이에는 음향렌즈와 같은 재료가 채워져 있는 구조이며, 음향렌즈와 치폭의 재료는 같다.

2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 경우 길이 방향과 동일하게 폭 방향으로도 빔 포밍(*beam forming*)을 하여야 하는데, 여러 개의 소자들이 동작하여 각 소자에 의해 형성된 빔은 Fig. 2와 같이 지향성을 가지게 된다. 따라서 Table 2에서 모듈 가운데 위치한 소자 1개를 동작시켜 발생된 빔 패턴의 수광각보다 폭 방향으로 48개를 구동시켜 발생된 빔 패턴의 수광각이 작다. 여기서 모듈간 간격에 따른 빔 패턴을 분석하기 위하여, 폭 방향으로 48개의 소자에 동일한 임펄스 형태의 전압을 동시에 인가하여 깊이(*depth*) 방향에서 폭 방향으로 각도 θ 에 따른 빔 패턴을 Fig. 2와 같이 구하였다. 이를 위한 과도해석에서 압전단결정에 임펄스 형태의 전압을 인가하여 음파를 발생시킨 후, 물 층에 위치한 노드들에 음파가 전파되면 각 노드들에 입력된 음압의 정보를 이용하여 외삽법(*extrapolation*)으로 단결정으로부터 일정한 거리에서의 빔 패턴을 구하였다.^[13] Fig. 2는 모듈간 간격이 300 μm 일 때의 빔 패턴을 나타낸 것이다. 나아가 모듈간 간격을 100~500 μm 의 범위에서 100 μm 간격으로 변경한 결과, 모듈간 간격에 따른 빔 패턴은 큰 차이를 보이지 않았다. 빔 패턴의 주엽은 뾰족하며 모듈 간격에 상관없이 유사한 모양을 가지고 있었으며, 부엽들의 음압레벨이 모두 -15 dB 이하로 모듈간 간격은 빔 패턴에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나

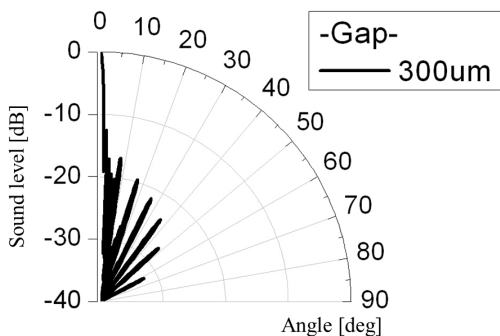


Fig. 2. Beam pattern of the 2D transducer.

타났다.

Fig. 2와 같은 결과로부터 모듈간 간격에 따른 수광각의 변화경향을 Fig. 3에 나타내었는데, 모듈간 간격이 증가할수록 수광각이 미세하지만 작아지는 결과가 나타났다. 이것은 간격이 증가할수록 방사되는 음원의 유효길이가 길어져 지향성이 증가하기 때문이다. 하지만 모듈간 간격의 변화 범위 내에서 수광각의 변화정도가 매우 작기 때문에 모듈간 간격은 빔 패턴에 미치는 영향이 적다고 판단할 수 있다. 따라서 모듈간 간격을 정하기 위한 트랜스듀서의 음향 특성에서 빔 패턴은 고려하지 않기로 하였으며, 모듈간 간격에 따른 트랜스듀서의 소자간 수신감도, 중심주파수 및 비대역폭만 고려하였다.

2D 배열형 초음파 트랜스듀서를 구성하는 모듈의 모서리 지점과 중심 지점에 위치한 독립소자들은 경계조건을 받아 미세하지만 음향특성에서 차이를 가진다. 균일한 음향특성을 가지는 트랜스듀서의 설계를 위하여 모듈의 중심에 위치한 독립소자와 모듈의 모서리 지점에 위치한 독립소자의 음향특성을 비교 분석하였다. 먼저 모듈간 간격에 따라 소자간 상호간섭, 모듈 중심지점의 소자와 모서리지점의 소자간의 중심주파수 차이, 비대역폭 차이, 수신감도 차이를 유한요소 해석을 통해 분석하였다. 이 때 해석은 과도해석으로 수행되었으며, 빔 패턴 해석과 동일한 방법으로 외삽법을 이용하여 원거리 음장에 위치한 가상의 반사체에서 반사되어 돌아온 음압을 물 층의 노드들에 인가한 후, 각 노드들로부터 발생된 음파를 트랜스듀서에서 전기신호로 변환하여 필

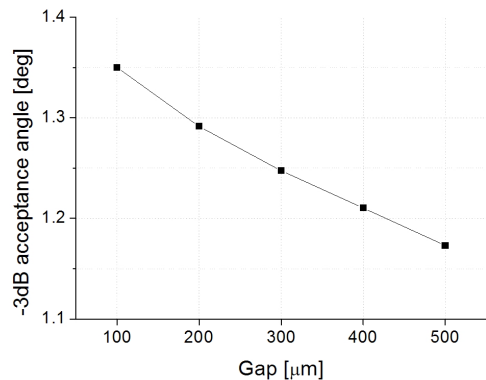


Fig. 3. Acceptance angle according to the gap between modules.

스 반사 신호를 구하였다.^[13] 먼저 Fig. 1의 가운데 위치한 모듈의 중심에 있는 소자에만 전압을 인가하여 중심 소자에 입력되는 펄스 반사 신호의 수신감도, 중심주파수, 비대역폭을 구하였다. 수신감도는 식(1)과 같이 구하였으며, $V_{center-input}$ 은 송신 시 중심 소자에 인가되는 구동전압이며, $V_{center-output}$ 는 수신 시 중심소자에서 발생하는 출력전압이다. 시간 영역의 펄스 반사 신호를 푸리에변환을 통해 스펙트럼을 구한 후 중심주파수와 비대역폭을 구하였다.

$$Sensitivity = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{center-output}}{V_{center-input}} \right). \quad (1)$$

다음으로 Fig. 1의 가운데 위치한 모듈의 모서리(edge)에 있는 소자의 음향특성을 중심 소자와 동일한 방법으로 구하였다. 이 때 모서리 소자의 펄스 반사 신호의 수신감도는 식(2)와 같이 구하였고, $V_{edge-input}$ 는 송신 시 모서리 소자에 입력되는 구동전압이고 $V_{edge-output}$ 는 수신 시 모서리 소자의 출력전압이다. 또한 모듈간 간격에 따른 소자간 상호간섭도(crosstalk level)를 식(3)과 같이 구하였는데, $V_{opposite-output}$ 는 송신 시 인접한 모듈의 모서리에 위치한 소자(opposite)의 출력전압이다.

$$Sensitivity = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{edge-output}}{V_{edge-input}} \right), \quad (2)$$

$$Crosstalk\ level = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{opposite-output}}{V_{edge-input}} \right). \quad (3)$$

모듈간 간격을 100~500 μm의 범위에서 100 μm단위로 변경하여 해석하였으며, 모듈간 간격에 따른 소자간 상호간섭도와 중심 소자와 모서리 소자간의 수신감도 차이, 중심주파수 차이 및 비대역폭 차이를 식(4)-(6)를 통하여 구하였다. 식(4)에서 S_{center} 는 모듈의 중심에 있는 소자의 수신감도이고 S_{edge} 는 모듈의 모서리에 있는 소자의 수신감도이다. 식(5)에서 f_{center} 는 모듈의 중심에 위치한 소자의 중심주파수이고 f_{edge} 는 모듈의 모서리에 있는 소자의 중심주파수이며, 식(6)에서 FBW_{center} 는 모듈의 중심에 있

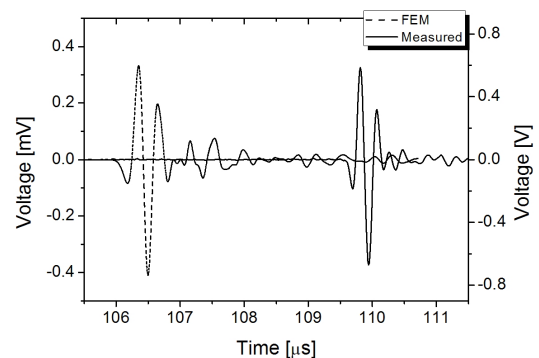
는 소자의 비대역폭, FBW_{edge} 는 모듈의 모서리에 있는 소자의 비대역폭이다.

$$Difference\ of\ sensitivity = |S_{center} - S_{edge}|, \quad (4)$$

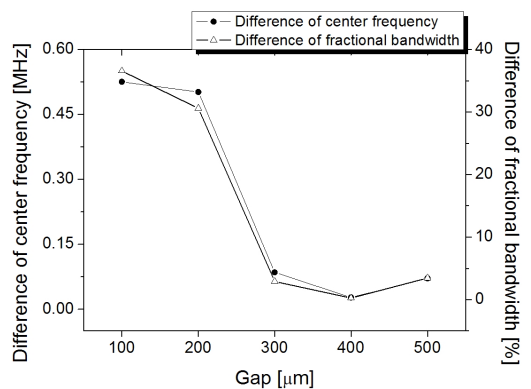
$$Difference\ of\ center\ frequency = |f_{center} - f_{edge}|, \quad (5)$$

$$Difference\ of\ fractional\ bandwidth = |FBW_{center} - FBW_{edge}|. \quad (6)$$

Fig. 4와 같이 모듈간 간격이 늘어날수록 소자간 상호간섭도가 줄어들고 모듈의 중심지점에 있는 소자와 모서리지점에 있는 소자간의 음향특성 차이가 줄어든다. 즉, 모듈간 거리가 멀어질수록 소자간 상호간섭이 줄어들기 때문에, 상호간섭의 영향이 감소되어 모듈 중심지점의 소자와 모서리지점의 소자간



(a) difference of crosstalk level and difference of sensitivity



(b) difference of center frequency and fractional bandwidth

Fig. 4. Acoustic performance variation according to the gap between modules.

음향특성의 차이가 작아진다. 이상의 결과로부터 모듈간 간격을 트랜스듀서가 균일한 음향특성을 가지는 최소 간격인 300 μm 로 정하였다.

모듈간 간섭도는 모듈간 간격 충전 재료의 물성에도 영향을 받기 때문에, 충전재료 상호간섭을 저감시킬 수 있는 재료를 선정하여야 한다. 선행연구인 Ref. [10]에 따라 모듈 내 치폭의 충전 재료로 사용된 고분자재료를 모듈간 충전 재료로 선정하였다. 나아가 이 충전재료는 2D 배열형 트랜스듀서의 음향렌즈로도 사용되었다. 만약 모듈간 간격 충전 재료와 음향렌즈의 재료가 다를 경우 트랜스듀서의 제작이 매우 어려워지며, 선행연구인 Ref. [10]에서 음향렌즈를 모듈의 치폭 재료와 동일하게 사용하여도 음향특성에 문제가 없는 것을 확인하였기 때문에 모듈간 충전 재료와 동일하게 선정하였다.

폭 방향으로 고정된 빔 패턴을 가지는 1D 배열형 초음파 트랜스듀서의 경우 음향 렌즈의 곡률을 조절하여 빔 포밍을 하기 때문에 음향렌즈의 모양을 설계하여야 한다. 하지만 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 경우 폭 방향으로 배열된 소자들을 동작시켜 빔 포밍을 하기 때문에 음향렌즈의 모양은 평면으로 정하였다.

III. 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 제작 및 성능 평가

II장에 설명한 설계 구조와 동일하게 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 시작품을 제작하여 Fig. 5에 나타내었다. 시작품은 6개의 음향모듈, 음향렌즈, 보호용 덮개(nose piece) 및 다층형 유연 인쇄회로 기판들로 구성되어 있다. 모듈의 폭 방향 양쪽으로 각 256개의 신호선들이 포함된 다층형 유연 인쇄회로 기판 12장이 각 모듈의 사이를 통해 후면층 뒤편으로 빠져나와 총 3,072개의 채널이 전기회로와 연결이 된다. 2D 배열형 초음파 트랜스듀서의 제작공정은 모듈제작과 모듈결합 공정으로 나누어진다. 먼저 모듈의 제작공정은 소자제작 및 접착, 정밀 절삭, 치폭 충전으로 이루어져 있으며, 모듈 제작에 사용된 소자의 물성은 Table 1과 같다. 다음으로 선행연구인 Ref. [10]에 따라 제작한 모듈들을 결합하는 공정은 모듈 배

열, 모듈간 간격 충전 및 음향렌즈 주조로 이루어진다. 2D 배열을 이루는 모든 모듈들은 간격 및 높이가 균일하여야 하고 모듈 사이에 끼워져 있는 다층형 유연 인쇄회로 기판의 손상이 없어야 하므로, 각 모듈들의 위치를 정밀하게 제어할 수 있는 취구와 높은 배율의 현미경을 이용하여 모듈을 배열하였다. 모듈의 배열이 완료된 후 모듈간 간격에 모듈의 치폭과 동일한 재료를 충전하였다. 충전 공정은 모듈들의 배열 간격이 바뀌지 않도록 취구를 이용하여 모듈과 유연기판들을 고정된 후 충전재를 삽입하는데, 충전 과정에서 간격내에 기포가 발생하지 않도록 진공 탈포 공정을 동시에 수행하였다. 다음으로 음향렌즈 주조 공정은 정합층 위에 균일한 두께를 가지며 기포 및 충전이 되지 않은 부분이 없는 음향렌즈 층을 형성하는 것으로, 배열 및 간격 충전이 완료된 모듈들을 취구를 이용하여 고정된 후, 음향렌즈 재료를 정합층 상부에 도포하고 탈포하면서 경화시켜 음향렌즈 층을 형성하였다. 이 때 모듈간 충전 재료와 음향렌즈 재료가 동일하기 때문에, 이들 사이에 경계면이 생성되지 않아 트랜스듀서의 내부 구조가 균질하게 형성될 수 있었다.

측정된 2D 배열형 트랜스듀서의 각 채널별 음향특성을 Fig. 6과 같이 펄스 반사 신호의 측정을 통해 확인하였다. 총 3,072개 채널의 펄스 반사 신호를 개

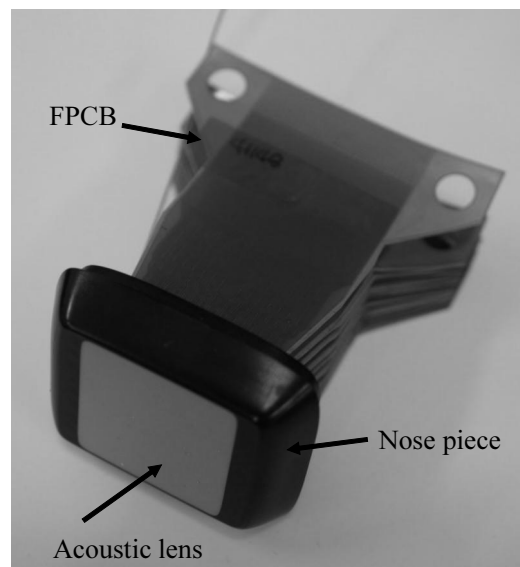


Fig. 5. Photograph of the fabricated 2D array ultrasonic transducer.

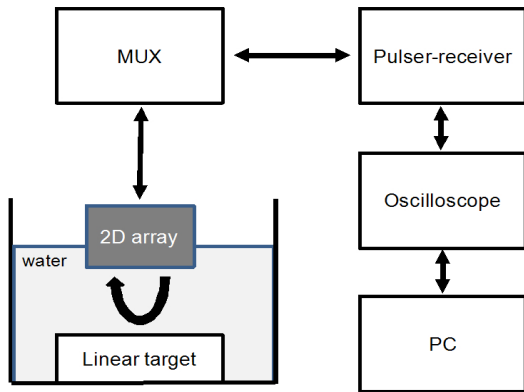


Fig. 6. Equipment setup for the pulse-echo measurement.

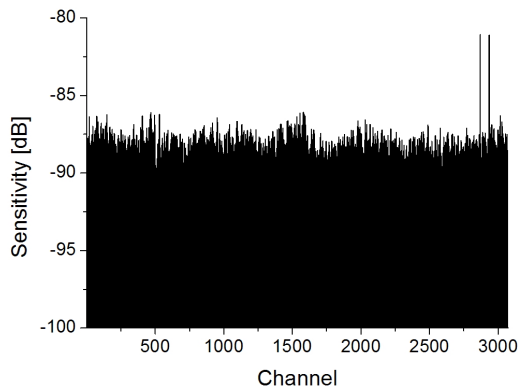


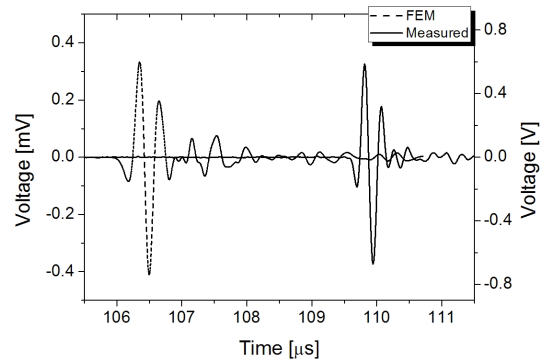
Fig. 7. Acoustic sensitivity distribution over the transducer channels.

별적으로 측정하기 위해 후면층의 뒤쪽으로 나와 있는 256개의 신호선이 연결된 다층형 유연 인쇄회로 기판 12장을 순차적으로 MUX(National instruments PXI-2575)에 연결하였다. 이 때 MUX는 256개의 채널을 가지고 있으며, pulser-receiver(Olympus 5800PR)와 오실로스코프(Agilent DSO6012A)에 연결하였다.

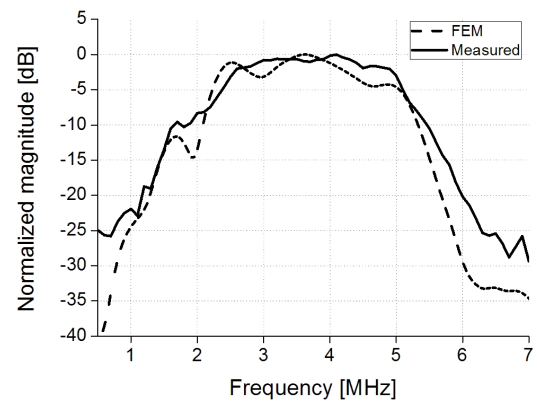
측정된 펄스 반사 신호의 채널별 수신감도분포는 Fig. 7과 같다. 평균 수신감도는 -88.6 dB이고 표준편차는 0.8 dB이며, 평균 수신감도에서 ± 2.5 dB를 벗어나는 채널의 수가 13 개로 전체 채널 수 대비 1%이하인 것으로 측정되었다. 이 때 채널별 수신감도는 식 (1)과 같이 구하였으며, 평균수신감도는 전체 채널의 수신감도의 평균이다. 불량채널은 제작오차에 의해 발생한 것으로서, 각 소자의 크기가 매우 작기 때문에 불량채널의 일부분에서는 GRS와 압전단결정 간 접촉층의 두께 조절이 제대로 이루어지지 않아 수신감도가 떨어진 것으로 확인되었다. 또 다른 부

분에서는 후면층을 구성하는 텅스텐 입자가 덩어리 형태로 뭉쳐진 부분이 발생하였는데, 텅스텐은 전도성이 있어서 입자 덩어리가 유연 인쇄회로 기판과 접촉될 경우에 채널간의 합선을 일으키기 때문에 이 부분에서 감도가 높게 나타나기도 하였다. 하지만 본 연구에서 개발된 2D 배열형 초음파 트랜스듀서는 통상의 초음파 트랜스듀서의 수신감도 균일도를 판단하는 기준인 표준편차가 1.0 dB이하이고 불량채널 비율이 1%이하여야 한다는 조건을 만족시켰으므로 제작된 2D 배열형 초음파 트랜스듀서는 균일한 음향특성을 가지는 것으로 판단할 수 있다.

각 채널의 특성을 Fig. 8에 나타내었는데, 펄스 반사 신호의 중심주파수는 3.7 MHz이고 비대역폭은 76.4%으로 측정되었다. 이는 목표사양인 $3.5 \text{ MHz} \pm 7.5\%$ 및 60% 이상을 각각 만족시키는 값이다. 이 때 펄스 반사 신호의 해석결과는 II절에서 Fig. 1의 해석 모델에서 중심에 위치한 모듈의 가운데 있는 소자에

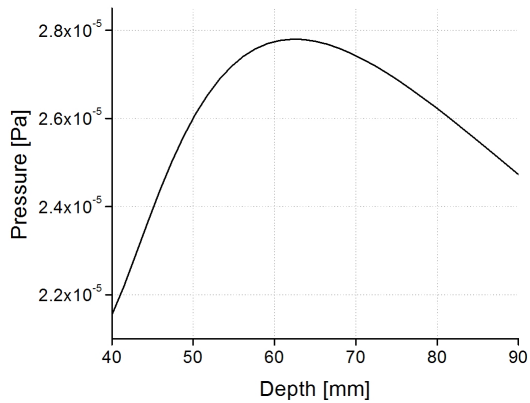


(a) wave form in time domain

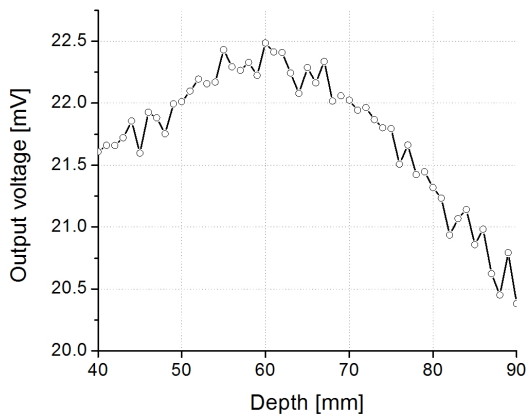


(b) frequency spectrum

Fig. 8. Comparison between measured and calculated pulse-echo responses.



(a) finite element analysis



(b) measured (from the hydrophone)

Fig. 9. Comparison between the measured and calculated beam patterns.

임펄스 전압을 인가하여 외삽법을 통하여 구한 것이다. 시간영역의 펄스 반사 신호의 유한요소 해석결과가 실험결과에 비해 약간 길게 나타난 것은 외삽법을 이용하여 원거리 음장에 위치한 가상의 반사체에 반사되어 들어온 음압을 구할 때 물에 의한 음압의 감쇠가 정확히 고려되지 않았기 때문이다. 비대역폭이 소자간 상호간섭으로 인해 유한요소 해석결과보다 약간 작게 나타났지만, 펄스 반사 신호의 파형과 주파수 스펙트럼은 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

다음으로 Fig. 6의 장치에서 선형 반사체의 위치에 하이드로폰(ONDA HNR-0500)을 장착하여 트랜스듀서의 방사 빔 패턴을 측정하였다. 트랜스듀서의 폭 방향으로 28개 채널에 임펄스 신호를 동시에 인가하여 초음파를 발생시키면서, 그에 따라 발생한 음장을 하이드로폰을 1 mm간격으로 이동시키며 측

Table 3. Result of the 2D array transducer design and measurement.

Description	Designed	Measured
center frequency [MHz]	3.7	3.7
fractional bandwidth [%]	80.2	76.4
focal depth [mm]	60	62

정하였다. 음원 기준으로 폭 방향의 중심에서 집속 깊이(focal depth)를 Fig. 9에 나타내었는데, 유한요소 해석결과와 집속 깊이는 60 mm이고, 측정된 집속 깊이는 62 mm로 나타났다. 이 때 Fig. 9에서 빔 패턴의 유한요소 해석결과는 음압의 형태로 구할 수 있지만, 실제 측정에서는 음압의 크기가 출력전압의 형태로 나타나는 하이드로폰을 이용하였기 때문에 측정결과와 그래프에서 세로축은 출력전압으로 나타내었다. 깊이가상과 같이 측정된 시작품의 특성들을 Table 3에 정리하여 설계된 트랜스듀서 특성들과 비교하였는데, 제작된 트랜스듀서는 설계 결과와 음향 특성이 비교적 잘 일치하고, Fig. 7에 나타난 바와 같이 균일한 특성을 가지는 것으로 확인되었다.

IV. 결론

본 논문에서는 압전단결정으로 구성된 48×64 채널의 2D 배열형 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하고, 제작된 시작품의 특성을 평가하였다. 8×64 채널의 모듈 6개를 결합하여 48×64 채널을 가지는 구조를 선정하였는데, 선행연구에서 개발된 모듈을 이용하여 모듈간 간격에 따른 음향특성을 분석하여 트랜스듀서의 전체 채널이 균일한 음향특성을 가지는 구조를 설정하였다. 그 후 설계된 구조에 따라 트랜스듀서의 시작품을 제작하여 성능을 측정하였고, 측정된 결과와 유한요소 해석 결과를 비교하여 본 연구에서 개발한 트랜스듀서의 성능을 평가하였다. 펄스 반사 신호를 측정한 결과 총 3,072개 채널의 평균 수신감도는 -88.6 dB이고 표준편차는 0.8 dB로 균일하였으며, 중심주파수와 비대역폭은 각각 3.7 MHz와 76.4%로 유한요소 해석결과와 비교적 잘 일치하며 목표사양을 만족시켰다. 또한 폭 방향으로 28개의 채널을 동시에 구동시켜 측정된 집속도도 해석결

과와 잘 일치한 것으로 나타나, 제작된 2D 배열형 초음파 트랜스듀서 시작품은 설계 결과를 잘 반영한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (No. 10035282)과 국방과학연구소(No. UD130007DD)의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.

References

1. A. Nguyen-Dinh, P. Mauchap, N. Felx, R. Dufait, P. Auclair, and A. Flesch, "Integrated mechanism based multiplaned/3D ultrasonic imaging probes," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1147-1150 (2001).
2. R. Canals, G. Lamarque, and P. Chatain, "Volumetric ultrasound system for left ventricle motion imaging," IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect., Freq. Contr. **46**, 1527-1538 (1999).
3. H. Eun, S. Lee, and Y. Roh, "Design and fabrication of a 3-dimensional diagnostic ultrasonic probe" (in Korean), J. Acous. Soc. Kr. **21**, 766-771 (2002).
4. S. W. Smith, G. E. Trahey, and O. T. von Ramm, "Two-dimensional arrays for medical ultrasound," in Proc. IEEE Ultrason. Symp. 628-628 (1991).
5. R. L. Goldberg and S. W. Smith, "Multilayer piezoelectric ceramics for two-dimensional array transducers," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **41**, 761-771 (1994).
6. S. S. Brunke and G. R. Lockwood, "Broad-bandwidth radiation pattern of sparse two-dimensional vernier arrays," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **44**, 1101-1109 (1997).
7. P. K. Weber, R. M. Schmitt, B. D. Tylkowsi, and J. Steck, "Optimization of random sparse 2-D transducer arrays for 3-D electronic beam steering and focusing," in Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1503-1506 (1994).
8. D. F. Lemmerhirt, X. Cheng, R. D. White, C. A. Rich, M. Zhang, J. B. Fowlkes, and O. D. Kripfgans, "A 32 X 32 capacitive micromachined ultrasonic transducer arrays manufactured in standard CMOS," IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect., Freq. Contr. **59**, 1266-1271 (2012).
9. W. Lee and Y. Roh, "New design of the kerfs of an ultrasonic two-dimensional array transducer to minimize cross-talk," Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 07HD06, 2010.
10. W. Lee and Y. Roh, "Design and fabrication of a 1.75D ultrasonic transducer" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 199-207 (2013).
11. R. E. Davidsen and S. W. Smith, "Two-dimensional arrays for medical ultrasound using multilayer flexible circuit interconnection," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **45**, 338-348 (1998).
12. L. Daane and M. Greenstein, "A demountable interconnect system for a 50 X 50 ultrasonic imaging transducer array," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr. **44**, 978-982 (1997).
13. N. N. Abboud, G. L. Wojcik, D. K. Vaughan, J. Mould, D. J. Powell, and L. Nikodym, "Finite element modeling for ultrasonic transducers," in Proc. SPIE Int. Symp. Medical Imaging, (1998).

저자 약력

▶ 이 원 석(Wonseok Lee)



2004년 2월: 단국대학교 기계공학과, 학사
2007년 8월: 경북대학교 기계공학과, 석사
2008년 2월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과, 박사과정

▶ 우 정 동(Jeongdong Woo)

2003년 8월: 경북대학교 기계공학과, 학사
2006년 8월: 경북대학교 기계공학과, 석사
2006년 9월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학과, 박사과정

▶ 노 용 래(Yongrae Roh)

1984년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학석사)
1990년 5월: 미국 펜실베이니아주립대학교 (공학박사)
1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학연구원 선임연구원
1994년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부 교수
(관심분야) 음향/초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석