

전도성 후면층을 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서의 설계 및 제작

Design and Fabrication of 2D Array Ultrasonic Transducers with a Conductive Backer

우정동, 노용래[†]

(Jeongdong Woo and Yongrae Roh[†])

경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2013년 7월 9일; 수정일자: 2013년 8월 28일; 채택일자: 2013년 8월 29일)

초 록: 본 논문에서는 1-3 복합체 형태의 전도성 후면층을 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하고 그 특성을 평가하였다. 1-3 복합체 형태의 전도성 후면층은 일반적인 재료를 사용해 널리 쓰이는 1-3 복합체 공정을 통하여 제작되었다. 본 연구의 대상이 되는 2D 배열 트랜스듀서는 4,096개의 구동 소자로 이루어져 있고, 각 소자의 중심주파수 및 비대역폭은 각각 3.5 MHz 및 60 % 이상을 목표로 설계하였다. 제작된 트랜스듀서는 중심주파수 및 비대역폭 목표치를 만족하였으며, 전체 구동 소자간의 특성도 0.81 dB 이내로 균일하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 전도성 후면층의 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대한 적용 가능성이 검증되었다.

핵심용어: 입체영상, 초음파 트랜스듀서, 1-3 복합체, 전도성 후면층

ABSTRACT: In this paper, 2D array transducers using a conductive backer similar to 1-3 composites have been designed, fabricated, and evaluated. The conductive backer was based on well known manufacturing process of 1-3 composites with affordable ingredients. The 2D array transducer had 4,096 elements designed to have 3.5 MHz center frequency and a fractional bandwidth over 60 %. Fabricated prototype of the transducer satisfied the specifications in the center frequency and bandwidth. Performance over the entire elements was so uniform that the standard deviation was less than 0.81 dB. Thus applicability of the conductive backer proposed in this work to 2D array transducers was verified.

Keywords: Volumetric imaging, Ultrasonic array transducer, 1-3 composite, Conductive backer

PACS numbers: 43.38.Fx

1. 서 론

인체에 무해하다는 장점을 가지는 초음파 영상진단 장치에 초음파 배열 트랜스듀서는 널리 이용되고 있다. 종래에는 1차원으로 배열된 압전소자들을 이용하여 단면영상을 획득하는 1D 배열 트랜스듀서를 이용하였으나, 인체의 다양한 해부학적 정보를 쉽게 확인하기 위해 근래에는 입체영상을 획득할 수 있는 트랜스듀서에 대한 관심이 늘고 있다.^[1]

입체영상을 획득하기 위한 트랜스듀서에는 크게 1D 배열 트랜스듀서를 기구적으로 왕복회전운동시켜 여러 개의 단면영상을 획득한 후 이들을 렌더링 기법을 통해 입체영상을 획득하는 와블러(wobbler) 트랜스듀서와,^[2] 압전소자들을 2차원 배열하여 입체영상을 바로 획득하는 2D 배열 초음파 트랜스듀서로 나뉜다.^[3] 와블러 트랜스듀서는 기구적으로 입체영상을 획득하기 때문에 분해능에 한계가 있는 반면, 2D 배열 초음파 트랜스듀서는 전기적 신호 송수신만으로 입체영상을 획득하기 때문에 와블러 트랜스듀서에 비해 실시간으로 선명한 영상을 획득할 수

[†]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)

있다는 장점이 있다.^[4] 본 연구의 목적은 전기적 빔 조향을 통해 정밀한 입체영상 획득이 가능한 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 개발하는 것이다.

2D 배열 초음파 트랜스듀서의 선행 연구는 결선 방법에 따라 크게 다층 FPCB(Flexible Printed Circuit Board, 연성 회로 기판)를 이용한 방법, PCB를 이용한 방법, 전도성 후면층을 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 우선 다층 FPCB를 이용한 방법에 대한 연구에는 256 소자 또는 288 소자의 단층 FPCB 두 개를 십자 형태로 적층한 후, 이들 FPCB 신호를 조합하여 평면 배열된 소자를 구동시키는 2D 배열 트랜스듀서에 대한 연구 결과가 있다.^[5] 2층 FPCB로 512개의 구동 소자를 지니는 1.75D 모듈을 제작한 뒤, 이들 8개를 결합하여 4,096개의 구동소자를 지니는 2D 배열 트랜스듀서를 제작한 사례도 있다.^[6] 그러나 선행연구의 다층 FPCB를 이용한 2D 배열 트랜스듀서는 단층 FPCB 또는 모듈들을 정확하게 배열을 해야 하는 어려움이 있고, 구동소자와 후면층 사이에 위치한 다층 FPCB가 후면층 방향의 음파 전달을 방해하여 2D 배열 트랜스듀서의 특성을 저하시키는 단점이 있다. 또 다른 방법인 PCB를 이용한 방법에 대한 사례로 전선 가이드에 256개의 구멍을 뚫고 전도성 물질을 채워 PCB 형태로 제작 후, 이를 압전소자 하부에 장착한 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대해 연구된 사례가 있다.^[7] 3,600개의 평면 배열된 미세 구멍에 전도성 물질을 채운 PCB를 제작한 후, 이를 압전소자 하부에 장착한 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대해 연구된 바도 있다.^[8,9] 그러나 수백 μm 의 작은 구멍을 소자의 수만큼 정확한 위치에 일일이 뚫어야 하기 때문에, 구동 소자의 수가 수천 개로 많을 경우 제작하기 힘들다는 단점이 있다. 또한 PCB 자체의 흡음 특성이 좋지 않기 때문에 PCB를 이용한 2D 배열 트랜스듀서의 비대역폭이 극히 좁다는 문제가 있었다. 마지막으로 전도성 후면층을 이용한 방법에 대한 사례로 전선 틀과 간격 틀을 적층한 후 흡음물질을 채워 전도성 후면층을 제작하고, 이를 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대해 연구된 바 있다.^[10-11] 2D 배열 초음파 트랜스듀서에서 전도성 후면층을 압전 소자의 하부에 배치하면 후면층과 압전소자 사이에 전기적 연결을 위한 신호선을 직접 연결하지 않아도

되기 때문에 트랜스듀서의 성능과 제작성을 동시에 향상시킬 수 있다. 그러나 선행 연구의 전도성 후면층은 금속재질의 전선 틀과 간격 틀을 각각 별도로 정밀하게 제작하여야 하고 전선 틀을 정확하게 다시 배열해야 하기 때문에 제작하기 어려운 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 FPCB를 이용한 기술의 문제를 해결할 수 있는 전도성 후면층을 이용해 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 개발하되, 앞서 언급한 선행 연구의 한계를 극복하기 위해 1-3 복합체 제작 공정을 활용한 전도성 후면층 제작 방법을 제시하였다. 나아가, 이를 이용한 64×64 소자의 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 설계 및 제작하여, 본 연구에서 제시한 전도성 후면층의 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대한 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

II. 전도성 후면층

2D 배열 초음파 트랜스듀서의 개략적인 구조는 Fig. 1과 같이 전도성 후면층, 초음파 소자, 정합층 그리고 렌즈로 이루어져 있으며, 일반적인 1D 배열 트랜스듀서의 구조와 유사하다. 초음파 소자 하부에 위치한 전도성 후면층은 일반적인 후면층 내에 전선 혹은 전도성 물질이 초음파 소자의 개수만큼 삽입되어 있어서 별도의 FPCB를 초음파 소자에 연결할 필요 없이 전도성 후면층 내부의 전선을 통해 후면층의 하부로 전기적 연결을 하게 된다. 따라서 전도성 후면층은 음향 후면층의 흡음재로서 음향 감쇠도가 높아야 할 뿐만 아니라 초음파 소자의 입출력 전기 신호 전달을 위한 신호 매개체로서 전기 저항도 낮아야 한다.

본 연구에서는 사각기둥 형태의 전도성 봉을 이용하여 흡음물질이 에워싼 형태의 전도성 후면층을 제작하였다. 전도성 후면층은 압전소자에서 전파되는

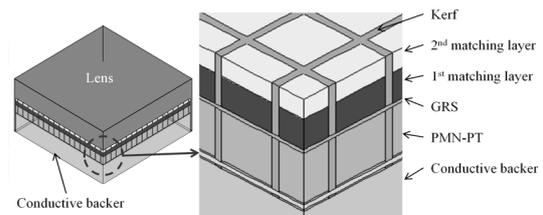


Fig. 1. Structure of a typical 2D array transducer with a conductive backer.

초음파를 감쇠시키는 흡음물질과 압전소자의 전기적 결선을 위한 전기전도성 물질로 이루어져 있으며 구조는 Fig. 2와 같다.

전도성 후면층 제작에서 주된 공정은 전도성 물질을 절단하여 봉들을 배열하는 것과 이 사이를 흡음물질로 채우는 것으로, 일반적인 1-3 복합체를 제작하는 공정과 유사하다. 이는 널리 쓰이는 공정이고 쉽게 구할 수 있는 물질을 사용하므로,^[12] 별도의 정밀한 부품을 제작한 후 정확한 배열 공정을 거쳐야 하는 선행 연구에 비해 쉽게 제작이 가능하다. 본 연

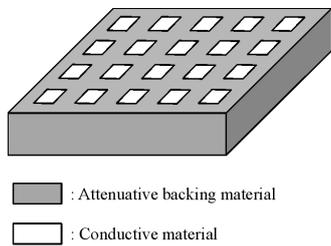


Fig. 2. Structure of the conductive backer.

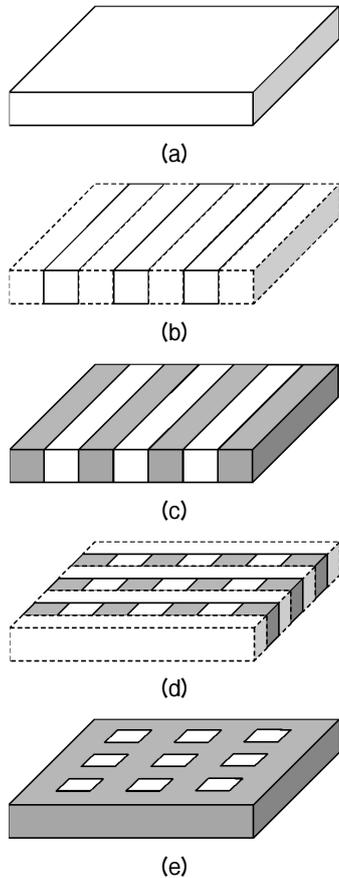


Fig. 3. Fabrication process of the conductive backer.

구에서는 전도성 물질로 흑연을 이용하였는데, 흑연은 구리 등의 금속물질에 비해 가공이 용이하고 가공 중 기울어지는 등의 소재 변형이 없다. 가공된 흑연 봉들 사이를 채우는 흡음 물질로는 에폭시와 텅스텐 분말 혼합물을 이용하였다.

전도성 후면층을 제작하는 공정을 Fig. 3에 순차적으로 도시하였다. 우선 Fig 3(a)와 같이 전도성 물질을 준비한다. Fig 3(b)는 1차 절단을 통해 64개의 전도성 바를 형성하는 공정이다. 1차 절단이 끝나면 Fig. 3(c)와 같이 흡음물질을 채우고 경화시킨다. 이후 채워진 흡음물질과 전도성물질이 균일한 높이를 갖도록 윗면을 연마한다. Fig. 3(d)는 수직방향으로 2차 절단을 하여 전도성 봉을 형성하는 공정이다. 전도성 봉과 흡음물질의 봉으로 이루어진 바 사이의 공간에 흡음물질을 충전하고, 흡음물질과 전도성물질이 균일한 높이를 갖도록 윗면을 연마한다. 마지막으로 후면층의 아랫면을 연마하여 최종 두께를 맞추면 전도성 후면층이 완성된다.

전술한 공정을 통해 제작된 전도성 후면층은 Fig. 4에서 나타내었으며, 두께는 3 mm이고, 삽입된 전도성 봉의 크기는 $130 \mu\text{m} \times 130 \mu\text{m}$ 이며, pitch는 $330 \mu\text{m}$ 이다.

제작된 전도성 후면층의 음향특성은 2개의 3.5 MHz의 종파 프로브를 이용하여 투과법으로 측정하였다. 전도성 후면층에 사용된 흡음물질과 제작된 전도성 후면층의 음향특성을 Table 1에 나타냈다. 전도성 후면층은 전도성 물질이 포함되어 있어 흡음물질 자체

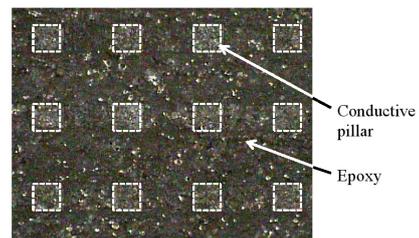


Fig. 4. Photograph of the manufactured conductive backer.

Table 1. Acoustic properties of the backing material and conductive backer.

	Attenuative material	Conductive backer
Density [kg/m^3]	3,230	3,070
Longitudinal velocity [m/s]	1,702	1,473

보다 종파 감쇠도가 낮다. 하지만 압전소자에서 전파되는 초음파를 흡수하기에 충분하리라 예상되며, 2D 배열 초음파 트랜스듀서의 설계, 제작 및 측정을 통해 본 연구에서 제시한 전도성 후면층의 전기적 연결성 및 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대한 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

III. 트랜스듀서의 설계 및 제작

유한요소 해석 상용코드인 PZFlex를 이용하여 본 연구에서 개발된 전도성 후면층을 사용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 설계하였다. Fig. 5에 나타난 유한요소 모델은 압전소자와 전도성 후면층 그리고 수동소자인 2개의 정합층과 음향렌즈 및 커프로 구성된다. 본 연구에서의 2D 배열 트랜스듀서 해석 모델은 계산 시간 단축을 위해 64×64 소자 대신 21×21 소자로 제작하였다. 앞 절에서 제작한 전도성 후면층을 2D 배열 트랜스듀서에 적용하기 위해 압전소자간 간격을 330 μm로 설정하고 해석하였다. 압전소자는 일반적인 PZT 계열보다 압전 특성이 우수한 단결정(PMN-PT)을 이용하였고, 소자 사이의 간섭을 줄이기 위해서 주 커프 사이에 부 커프를 추가하였다.^[13] 수동소자들은 고분자물질을 이용하여 제작한 후, Table 2와 같이 측정된 물성을 유한요소 해석에 적용하였다. 수동소자들 중 정합층은 비스페놀 계열의 고분자 물질을, 음향렌즈 및 커프는 실리콘 계열의 고분자 물질을 이용하였다. 유한요소 해석을 통하여 중심주파수 3.5 MHz 및 비대역폭 60% 이상의 특성을 가진 2D 배열 초음파 트랜스듀서의 1, 2차 정합층 및 압전소자의 최종 두께를 Table 3과 같이 결정하였다.

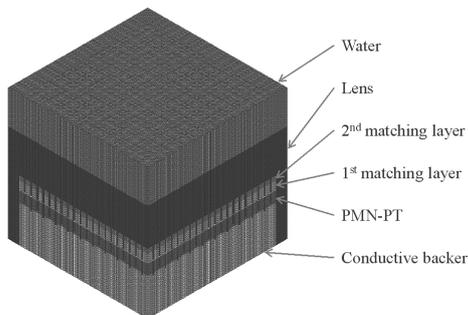


Fig. 5. FEM model of the transducer.

유한요소 해석을 통하여 결정된 최종 두께와 같이 능동소자 및 수동소자를 각각 제작한 후, 2D 배열 초음파 트랜스듀서 시편을 제작하였다. 본 연구에서의 2차원 배열 트랜스듀서는 압전소자와 정합층 사이에 위치한 GRS(GRound Sheet)가 분리되지 않고 연결되어 있어야 하기 때문에, 일반적인 1D 어레이 트랜스듀서 제작과는 달리 접착과정과 절단 과정이 2회에 걸쳐 진행되었다. 우선 압전소자와 전도성 후면층을 접착한 후 1차 절단하여 64×64개의 개별 압전소자들로 분리하였다. 분리된 압전소자들 사이에 커프를 충전하고, GRS를 접착한 후, GRS 위에 2개의 정합층을 접착하였다. 이후 GRS는 전기적 접지로서의 역할을 위해 절단되지 않아야 하기 때문에, 고정밀 가공기술을 이용해 1차 절단과 동일한 위치에 정합층만 2차 절단하였다. 제작된 음향모듈의 특성을 평가하기 위해 전도성 후면층의 하부에 FPCB를 접착하여 측정 장치와 전기적 결선을 하였다. 사용된 FPCB는 64×8 소자의 다층 구조로 이루어져 있으며, Fig. 6과 같이 8장의 FPCB를 장착하여 64×64의 평면 배열된 압전소자에 개별 전기신호를 인가할 수 있도록

Table 2. Acoustic properties of the passive components.

	1 st matching layer	2 nd matching layer	Lens & Kerf
Density [kg/m ³]	2,430	1,030	1,310
Longitudinal Velocity [m/s]	3,024	1,962	956

Table 3. Thicknesses of the active and passive materials.

	Thickness [μm]
PMN-PT	280
1 st matching layer	240
2 nd matching layer	110

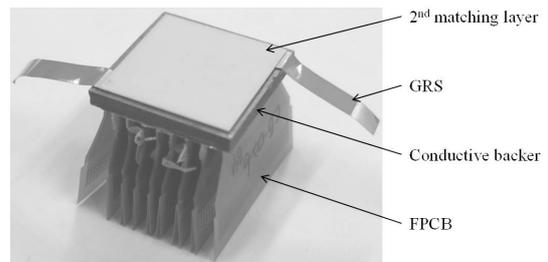


Fig. 6. Fabricated prototype with 8 FPCB's before lens casting.

록 하였다. 마지막으로 음향렌즈 물질을 정합층 윗면에 채운 후 경화하여 2D 배열 트랜스듀서 시편 제작을 마무리하였고, 제작된 2D 배열 트랜스듀서 시편의 음향특성 측정을 통하여 본 연구에서 제시한 전도성 후면층의 전기적 연결성 및 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 대한 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

IV. 2D 배열 트랜스듀서 시편의 특성 평가

제작된 2D 배열 초음파 트랜스듀서의 음향특성은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 선형 반사체가 잠겨있는 수조를 이용하여 펄스반사법으로 측정하였다. 구동 신호는 초음파 송수신기(5800PR, Panametrics, USA)를 이용하여 인가하였고, 오실로스코프(DSO6102A, Agilent, USA)를 이용하여 제작된 2D 배열 초음파 트

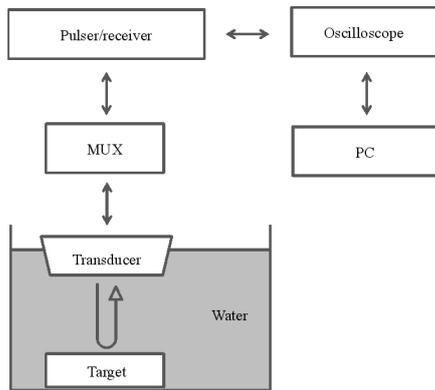


Fig. 7. Schematic diagram of the test setup to characterize the 2D array transducer.

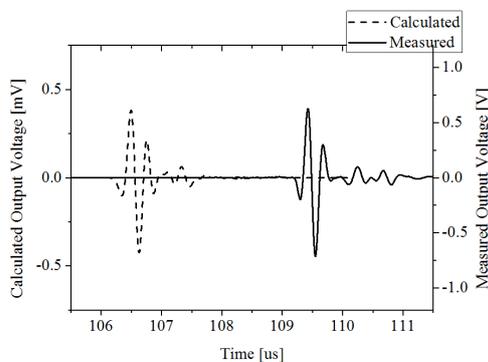


Fig. 8. Comparison between the calculated and the measured signals at time domain.

랜스듀서에서 발생하는 반사신호를 측정하였다. Fig. 8에서는 시간영역에서 반사파의 측정결과와 유한요소해석 결과를 나타내었다. 측정결과와 해석결과를 명확하게 구분하기 위해, 원래 측정결과에 3 μ s의 시간을 더하여 비교하였다. Fig. 9는 시간영역의 결과를 주파수영역으로 변환한 결과이다. -6 dB 중심주파수의 유한요소해석 결과는 3.56 MHz이고 측정결과는 3.58 MHz이다. -6 dB 비대역폭은 유한요소해석 결과는 78.1%이고 측정결과는 84.9%이다. 중심주파수가 설계치의 $\pm 7.5\%$ 범위 이내이고 비대역폭이 설계치 이상이면 된다는 통상적인 초음파 트랜스듀서 품질 판정 기준을 여기에 적용하면, 본 트랜스듀서는 중심주파수가 설계치의 0.6% 범위 안에 들고 비대역폭이 설계치 이상이므로 2D 배열 트랜스듀서 시편은 설계대로 제작되었다고 할 수 있다. FEM 해석 결과와 시편 측정 결과가 약간의 차이를 보이는 것은 제작된 2D 배열 트랜스듀서 시편의 하부에 장착된 FPCB의 전기적 간섭에 의한 영향이 유한요소 해석에는 고려되지 않았기 때문으로 파악되었다.

2D 배열 초음파 트랜스듀서에서는 소자들이 조밀하게 평면 배열되어 있기 때문에, 소자간 간섭도 (crosstalk level)가 낮을수록 정확한 빔 조향 및 빔 집속이 가능하다. 본 연구에서는 네트워크분석기(8752C, HP, USA)를 이용하여, 대기 중에서 특정소자와 행 방향으로 인접한 9개 소자들 사이의 간섭도를 측정하였다. 측정대상은 전도성 후면층 시편, 전도성 후면층을 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서에 GRS가 없는 시편, 전도성 후면층을 이용한 2D 배열

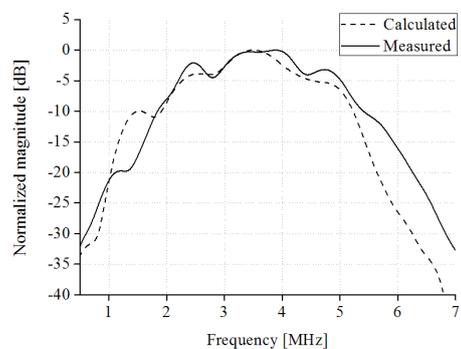


Fig. 9. Comparison between the calculated and the measured signals at frequency domain.

초음파 트랜스듀서 시편, 그리고 비교 대상으로 모듈 형태의 2D 배열 초음파 트랜스듀서 시편으로 정하였다. 측정 결과는 Fig. 10에 보였는데, 수평축은 구동소자에 인접한 소자들의 번호를 거리에 따라 순차적으로 나타낸다. 즉, 소자 1은 구동소자 바로 옆의 소자이고, 소자 9는 구동소자 옆의 아홉 번째 소자로서 거리가 가장 먼 것을 나타낸다. 전도성 후면층을 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서들의 경우 소자간의 거리가 멀어질수록 간섭도가 감소하는 경향을 나타내었고, GRS가 없는 경우와 GRS가 있는 경우 비교하였을 때 GRS의 영향으로 인해 간섭도가 전체적으로 5 dB 정도 높아지는 경향을 보였다. 그리고 전도성 후면층을 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서 시편이 모듈형의 2D 배열 초음파 트랜스듀서 시편에 비해 간섭도가 전체적으로 5 dB 정도 낮은 경향을 보였다. 따라서 2D 배열 초음파 트랜스듀서 제작

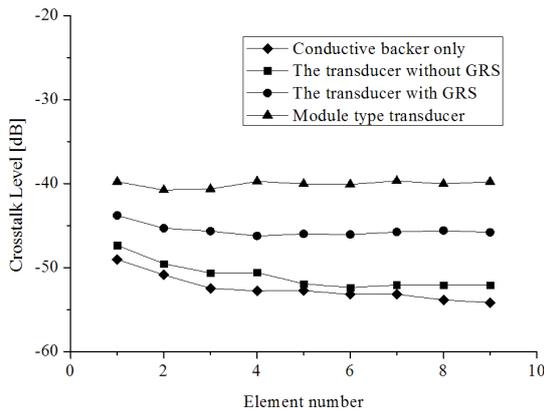


Fig. 10. Comparison of crosstalk levels among 4 different transducers.

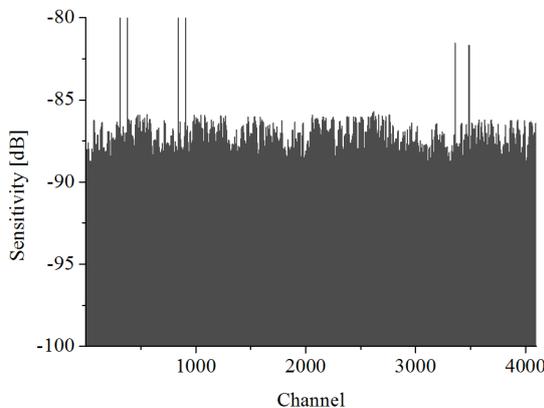


Fig. 11. Sensitivity variation of the transducer.

시 본 연구에서 제시한 전도성 후면층을 이용하면 더욱 정확한 빔 조향 및 빔 집속이 가능한 것으로 검증되었다.

선명한 3D 영상을 구현하기 위해서는 2D 배열 트랜스듀서는 배열된 모든 소자에 전기적 연결이 되어 있어야 하며, 소자간의 특성도 균일하여야 한다. 측정된 전체 신호의 감도 분포를 확인한 결과 Fig. 11과 같이 표준편차 0.81 dB 이내에서 균일한 감도를 나타내었고, 전체 4,096개 소자 중 4,052개의 소자가 감도 평균의 ± 2.5 dB 범위 내에 분포하였으며, 1개의 전기적 개로 및 6개의 전기적 단락이 있는 것으로 확인되었다. 전기적 개로 및 단락의 원인은 트랜스듀서 시편의 음향특성 측정의 편의를 위해 전도성 후면층 바닥면에 장착한 FPCB의 결선 불량 때문인 것으로 확인되었다. 통상적인 1D 초음파 트랜스듀서에 적용되는 품질판정 기준은 감도 표준편차가 1 dB 이내이고, 감도 평균의 ± 2.5 dB 이내의 소자의 수가 99% 이상이면 된다는 것이다. 따라서 그 기준을 여기에 적용한다면 본 연구에서 제작된 2D 배열 트랜스듀서 시편은 양품의 기준을 만족시키며, 전기적 연결성이 우수하고 특성이 균일하다고 할 수 있다. 나아가 이 결과로부터 본 연구에서 제안한 전도성 후면층은 2D 배열 트랜스듀서에 적용 가능한 것으로 검증되었다.

V. 결 론

본 연구에서는 새로운 전도성 후면층의 제작 공정을 제시하였고, 이를 이용한 2D 배열 초음파 트랜스듀서를 제작 및 평가하였다. 전도성 후면층 제작에서 주된 공정은 전도성 물질을 절단하여 봉들을 배열하는 것과 이 사이를 흡음물질을 채우는 것으로서, 일반적인 1-3 복합체를 제작하는 공정과 유사하다. 이는 널리 쓰이는 공정이고 쉽게 구할 수 있는 물질을 사용하므로, 전도성 후면층 관련 선행 연구에 비해 쉽게 제작이 가능하다. 전도성 후면층과 2개의 정합층, 커프 및 음향렌즈로 구성된 64×64 소자 2D 배열 초음파 트랜스듀서 시편을 제작하고 평가해 본 결과, 제작된 시편은 3.58 MHz 중심주파수에 84.9% 비대역폭의 음향특성을 보였다. 특히 전체 4,096개

의 구동소자 중 감도 평균의 ± 2.5 dB 이내에 포함된 소자의 수가 99%로 확인되어, 본 연구에서 제시한 전도성 후면층의 전기적 연결성 및 2D 배열 트랜스듀서에 대한 적용 가능성이 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제시한 전도성 후면층 제조 공정을 이용하면 다양한 형태의 2D 배열 초음파 트랜스듀서 제작에 충분히 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원(No. UD110027DD)과 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 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. J. Blancher, C. Leger, and L. D. Nguyen, "Time-varying, 3D echocardiography using a fast-rotation probe," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **51**, 634-639 (2004).
3. S. Tezuka, S. Hashimoto, T. Togasaki, Y. Miyajima, and Y. Seo, "A two-dimensional array probe that has a huge number of active channels," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 960-963 (2003).
4. T. R. Nelson, "Three-dimensional ultrasound imaging," in Proc. UIA Annu. Meet., 1-5 (2006).
5. C. E. M. Demore, A. W. Joyce, K. Wall, and G. R. Lockwood, "Real-time volume imaging using a crossed electrode array," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **56**, 1252-1261 (2009).
6. J. Woo and Y. Roh, "Ultrasonic 2D matrix array transducer for volumetric imaging in real time," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1568-1571 (2012).
7. S. W. Smith, G. E. Trahey, and O. T. von Ramm, "Two-dimensional arrays for medical ultrasound," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 625-628 (1991).
8. M. Eames, S. Zhou, and J. Hossack, "High element count (3600), fully sampled, two dimensional transducer array," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2243-2246 (2005).
9. M. D. C. Eames and J. A. Hossack, "Fabrication and evaluation of fully-sampled, two-dimensional transducer array for "sonic window" imaging system," Ultrasonics **48**, 376-383 (2008).
10. M. Greenstein, P. Lum, H. Yoshida, and M. S. S. Bolorforosh, "A 2.5 MHz 2D array with Z-axis electrically conductive backing," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control **44**, 970-977 (1997).
11. L. Ratsimandresy, N. Felix, D. Dinet, and R. Dufait, "2D arrays performances optimization to address high quality volumetric imaging," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 657-660 (2005).
12. D. Pei and Y. Roh, "Design of an underwater Tonpizl transducer with 1-3 piezocomposite materials," Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 4003-4006 (2008).
13. W. Lee, S. Lee, and Y. Roh, "Optimal design of a piezoelectric 2D array transducer to minimize the cross talk between active elements," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., 2738-2741 (2009).

저자 약력

▶ 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