

초음파 음장해석 및 가시화를 통한 선형 위상차배열 트랜스듀서의 결함요소 검출 가능성 연구

Feasibility Study on Detection of Defective Elements in a Linear Phased Array Transducer through Ultrasonic Field Analysis and Visualization

최 광 윤*, 양 정 원*, 하 강 렬**, 김 무 준**, 김 정 순***, 이 채 봉****
(Kwang-Yoon Choi*, Jeong-Won Yang*, Kang-Lyeol Ha**, Moo-Joon Kim**,
Jung-Soon Kim***, Chae-Bong Lee****)

*부경대학교 대학원 음향진동공학과, **부경대학교 물리학과,
동명대학교 멀티미디어공학과, *동서대학교 전자공학과
(접수일자: 2009년 4월 15일; 수정일자: 2009년 5월 20일; 채택일자: 2009년 6월 8일)

16개 압전요소로 구성된 3 MHz의 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서를 대상으로, 모든 압전요소가 정상일 때와 임의의 요소 하나가 결함으로 인해 동작하지 않을 때의 음장을 이론적으로 시뮬레이션하고, 슈리렌법에 따라 구축한 음장가시화장치 이용하여 실험적으로 측정하였다. 조향각 0°와 30°일 때 각각에 대한 시뮬레이션의 결과, 임의의 압전요소가 결함으로 인해 동작하지 않을 때의 음장은 모든 요소가 정상적으로 동작할 때의 음장에 비해 부엽 패턴이 크게 다르게 나타나며, 그 형태는 가시화에 의한 측정결과와 잘 일치하였다. 따라서, 가시화 장치에 의해 측정된 2차원 음장에서의 부엽패턴을 시뮬레이션 결과와 비교 분석함으로써 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서의 결함요소 검출이 가능함을 알았다.

핵심용어: 음장가시화, 슈리렌법, 선형위상차배열, 초음파 트랜스듀서, 부엽패턴

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.3)

The ultrasonic pressure fields for the 3 MHz linear phased array transducer with sixteen piezoelectric elements of which one may not be operated by defect were simulated theoretically and measured experimentally using a visualization system of the Schlieren method. The simulation results for steering angles of 0° and 30° show that the side-lobe patterns of the transducer including a defective element is quite different from the transducer with all normal elements, and those patterns are in good agreement with the results of visualization. It is shown that the defective elements in a linear array transducer can be detected by comparison of the simulated and the visualized side-lobe patterns in two dimensional acoustic fields.

Keywords: Acoustic field visualization, Schlieren method, Linear phased array, Ultrasonic transducer, Side-lobe pattern

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.3)

I. 서론

비파괴평가 (NDE) 또는 의료용으로 사용되는 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서는 수십 내지 수백 개의 작은 압전요소로 구성되며, 구동 시에는 인가되는 전기신호가 각 요소 간에 특정의 위상차를 가지도록 함으로써

인정 방향을 지향하는 초음파 빔을 만든 후, 그 위상차를 변화시킴에 의해 전자적으로 조향 (steering)하도록 하고 있다. 임의의 배열형 초음파 트랜스듀서가 우수한 성능을 발휘하기 위해서는 그 배열을 이루는 압전요소 각각의 전기/음향 변환특성이 우수해야 함은 물론, 그 요소들의 집단에 의해 형성되는 초음파 빔이 최적의 공간분해능을 가져야 한다.

압전요소의 전기/음향 변환특성은 전기인피던스 및 펄스에코응답 측정 등에 의하여 평가되나, 초음파 빔은

책임저자: 하 강 렬 (hakl@pknu.ac.kr)
608-737 부산시 남구 대연3동 599-1 부경대학교 물리학과
(전화: 051-629-5570; 팩스: 051-611-6357)

주로 수중에서 측정된 음장에 의해 평가된다. 일반적으로, 수중음장은 잘 교정된 극소형 수중청음기를 기계적으로 스캐닝하면서 측정하고 있다. 그러한 음장측정법을 이용할 경우 절대음압 분포를 직접 얻을 수는 있으나, 측정에 많은 시간이 소요되며 고가의 정밀 스캐너시스템이 필요한 단점이 있다. 초음파 음장을 측정하는 다른 한 방법으로는 슈리렌 (Schlieren) 장치 등 광학적 수단을 이용한 음장가시화 기법이 있다 [1-4]. 그러한 음장가시화 기법에 의해서는 절대음압의 직접적인 측정은 곤란하나 단시간에 전체 음장분포의 파악이 가능하다는 장점이 있다.

위상차배열을 포함하는 선형배열 초음파 트랜스듀서가 매질 중에 만드는 음장에 대해서는 이미 많은 연구가 수행되어져왔다 [5-9]. 그러나 그러한 연구의 대부분은 규칙적으로 배열된 모든 압전요소가 정상적으로 동작하는 일반적인 트랜스듀서를 대상으로 한 것으로서, 배열을 이루는 압전요소 중 특성의 요소가 고장으로 인하여 작동하지 아니할 경우의 음장변화에 대한 연구는 그다지 많지 않다. 특히, 원거리와 근거리를 포함하는 영역에서의 음장변화를 측정할 결과에 대한 연구보고는 찾아보기가 힘들다.

한편, 전자기파를 송수신하는 안테나 분야에 있어서는 위상차배열에 결합요소가 존재할 경우 발생하는 전자기장 변화로부터 그 요소의 검출 또는 진단을 위한 연구가 오래전부터 활발히 수행되고 있다 [10-12]. 그러나 전자기장은 근본적으로 음장과 달라, 전자기파의 전파속도 및 파장을 고려할 때 전체 장 (full-field)의 공간적인 분포의 해석은 가능하나 그 측정은 곤란하다. 특히 전파방향에 대한 이차원적인 장 분포의 정밀한 측정은 어렵다. 따라서 주로 근거리장 내에서 전파방향에 수직인 임의 단면이나 그 단면상의 한 선분에 대한 일차원적인 빔 패턴의 측정치를 유전알고리즘 등에 적용하는 등에 의해 결합을 진단하고 있다 [13][14].

본 연구에서는 비파괴평가용 또는 의료용으로 실제 사용가능한 16개 압전요소로 구성된 3 MHz의 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서를 대상으로, 조향각 0°와 30°에 대해 모든 요소가 정상적으로 동작할 때와 일부 요소가 결합으로 인해 동작하지 않을 때에 대한 근거리 및 원거리의 전체음장을 이론적으로 시뮬레이션하고, 슈리렌법에 따라 자체 구축한 가시화장치를 이용하여 실험적으로 측정하였다. 그리고 실험적으로 얻어진 결과를 시뮬레이션 결과와 직접 비교함으로써 일반적인 선형배열 초음파 트랜스듀서의 이차원 음장에서의 부엽패턴 (side-lobe pattern) 변화 관찰에 의해 그 내부 결합 존재 여부의 평가 및 결합

요소의 위치 추정이 가능함을 보인다.

II. 음향해석 이론

근거리 및 원거리를 모두 포함하는 전체 영역에 대한 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서가 만드는 음장은 각 압전요소를 미소 점음원의 집합으로 생각하여 호이겐스의 중첩원리를 적용시킴으로써 수치 해석적으로 구할 수 있다. 그림 1과 같이 길이 L 이 폭 W 에 비해 충분히 큰 직사각형의 압전요소가 일정간격 d 로 N 개 나열되어 있는 트랜스듀서가 강체 배플인 배면체에 부착되어 z 방향으로 음파를 방사하는 경우를 생각한다. 모든 압전요소가 정상적으로 동작할 경우 트랜스듀서의 중심인 $\frac{N}{2}$ 번째와 $\frac{N}{2}+1$ 번째 요소의 중간으로부터 θ 방향으로 임의 거리 r 떨어져 있는 yz 평면상의 한 점 P 의 음압은 각 압전요소를 원통파를 방사하는 M 개의 단순음원의 집합으로 생각하여 다음과 같이 나타낼 수 있다 [15][16].

$$p(r, \theta, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left(\frac{p_0}{r_{nm}} \right)^2 \exp[j(\omega t_{nm} - kr_{nm})] \quad (1)$$

여기서 p_0 는 음원에서의 음압, ω 는 각주파수, k 는 파수이며, n 번째 요소의 m 번째 단순음원으로부터 p 점까지의 거리 r_{nm} 과 그 음원요소가 가지게 되는 시간지연 t_{nm} 은 다음의 식 (2) 및 식 (3)과 같이 주어진다.

$$r_{nm}^2 = r^2 + \left\{ (n-1)d + (m-1) \frac{W}{M-1} - \frac{(N-1)d + W}{2} \right\}^2 - 2r \left\{ (n-1)d + (m-1) \frac{W}{M-1} - \frac{(N-1)d + W}{2} \right\} \sin \theta \quad (2)$$

$$t_{nm} = \Delta t_n = -(n-1) \frac{d}{c} \sin \theta, \quad (3)$$

여기서, c 는 매질에서의 음속, θ_n 는 형성되는 초음파 빔의 조향각이다. (3)식은 n 번째 요소 내의 모든 음원요소에는 동일한 시간지연이 가해지며, 각 요소간의 지연시간은 일정하고, 그 지연시간 및 요소간의 간격과 매질의 음속에 따라 조향각이 정해짐을 나타낸다.

한편, 임의의 n' 번째 요소가 결합으로 인해 동작하지 않을 경우의 음장은 위의 (1)식에서 그 결합요소에 해당하는 $n = n'$ 만을 제외한 나머지 요소에 대해 계산해야하므로 그 요소에 대해 $p_0 = 0$ 로 두면 간단히 구해진다.

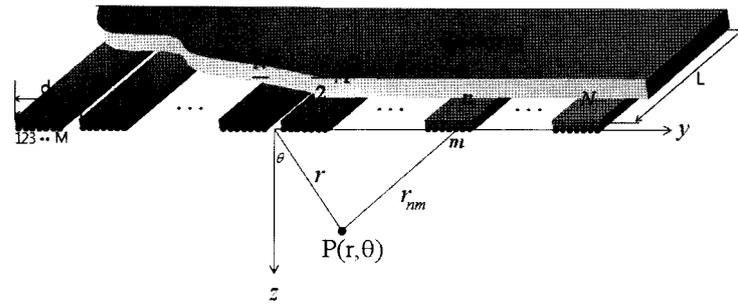


그림 1. 음장계산을 위한 선형배열 트랜스듀서의 도식화
 Fig. 1. Schematics of a linear phased array transducer for acoustic field calculation.

III. 실험장치

3.1. 초음파 트랜스듀서

본 연구에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 폭 $W=0.25\text{ mm}$, 높이 $L=14\text{ mm}$ 인 16개의 PZT 압전요소가 $d=0.3\text{ mm}$ 간격으로 선형 배열된 것이다. 이 트랜스듀서의 방사면에는 두께를 무시할 수 있는 음향정합층과 전극, 그리고 절연 및 방수를 위한 고분자막이 코팅되어 있으며, 배면에는 Al_2O_3 분말을 혼합하여 만든 음향임피던스 $Z_0 \approx 3.75\text{ Mrayls}$ 인 흡음층이 형성되어 있다. 그리고 16개의 모든 압전요소에 대한 개별적 임피던스분석에 의해 얻어진 -3 dB 기준 공진 주파수는 3.0 MHz 를 중심으로 $\pm 15\text{ kHz}$ 범위 내에서 일정하였으며, 전기기계결합계수는 $54.8 \pm 0.4\%$ 이었다.

3.2. 트랜스듀서 구동 및 음장가시화 장치

그림 3은 그림 2에 나타낸 트랜스듀서를 구동하기 위한 초음파 송신장치와 음장가시화를 위한 슈리렌장치를 포함하는 전체 측정시스템의 구성을 나타낸다. 그림 3에

서 알 수 있는 바와 같이 함수발생기 (Agilent 33250A)에서 나온 펄스는 자체 제작한 16채널의 시간지연 및 미분 기능이 부가된 전력증폭회로를 거쳐 트랜스듀서에 입력된다. 조향각 $\theta_s = 30^\circ$ 를 위한 지연시간 $\Delta t = 100\text{ nS}$ 를 얻기 위한 시간지연회로 소자로서는 10-Tap Si delay line (DS1010)을 사용하였으며, 전력증폭을 위해서는 FET (IRF 830)을 사용하였는데, 그 FET의 구동을 위해 최대 60V가 출력되는 직류전원 (Agilent E3649A)을 이용하였다.

슈리렌장치를 구성하는 각 부품의 규격은 표 1에 나타낸 바와 같다. 이 장치에서는 초음파가 지나가는 영역에서의 광 빔이 초음파 파면에 수직인 평행광이 되도록 하는 것과 0차파 성분의 효율적 차단이 중요하다. 그림 3에서 광원에서 나온 빛이 빔 확대용 렌즈 (expander)에 도달하면 그 가상초점에서 나온 것처럼 확산되어 전방에 설치된 Collimating 렌즈에 입사되는데, 그 초점을 확대용 렌즈의 가상초점과 일치하도록 맞추면, Collimating 렌즈를 통과한 빛은 평행광이 되며, 그 평행광은 집속렌즈를 통하여 초점에 집속되어진다. 이 때 그 초점 위치에 스톱퍼를 설치하면 0차파 성분에 해당하는 평행광은 모

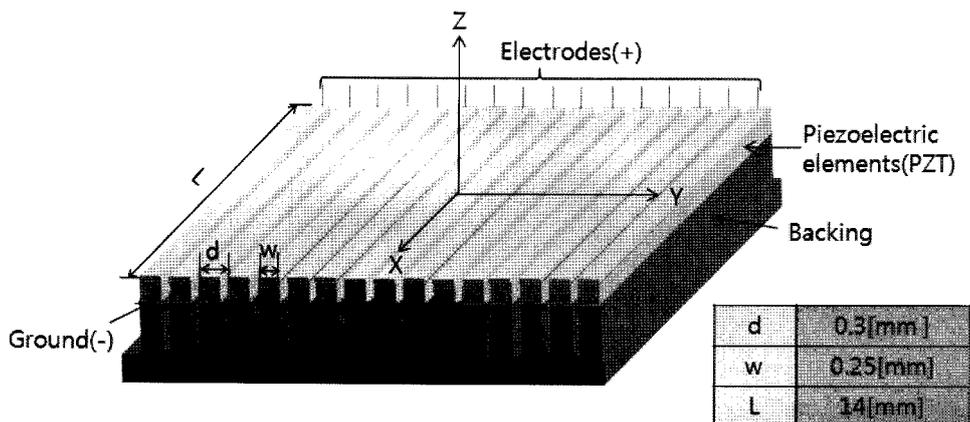


그림 2. 사용한 선형 위상배열 초음파 트랜스듀서의 구조
 Fig. 2. Structure of the employed linear phased array transducer.

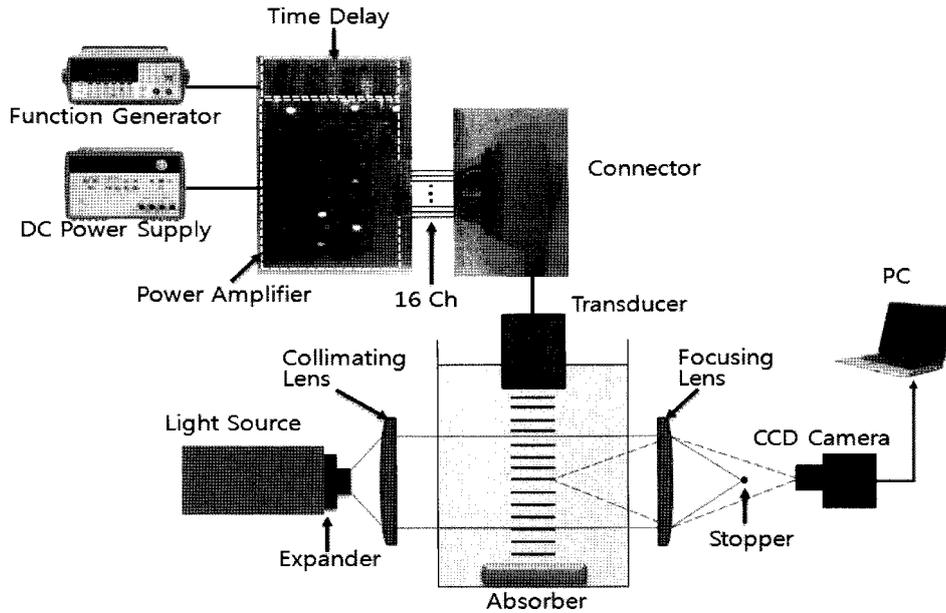


그림 3. 초음파 송신 및 음장가시화 장치 구성도
 Fig. 3. Experimental setup for ultrasound transmitting and acoustic field visualization.

표 1. 슈리렌장치 부품의 규격
 Table 1. Specifications of the parts for Schlieren system.

Parts	Specifications
Light Source	He-Ne Laser: Wavelength = 632 nm, Power = 1.5 mW Metrologic Instruments, Inc.
Expanding Lens	Rear accessory attachment type 20X Expansion power NT55-582, Edmund Optics, Inc.
Collimating Lens	Plane-Convex type: D = 95 mm, f = 600 mm Melles Griot Co.
Focusing Lens	Plane-Convex type: D = 95 mm, f = 300 mm Melles Griot Co.
CCD Camera	1280 × 1024 pixel KP-120, Hitachi Co.

두 차단되며, 초음파가 있을 경우에 회절 때문에 생기는 1차파 이상의 고차 성분이 초점을 지나 CCD 카메라에 도달하게 된다. 본 연구에서는 스토퍼로서 나이프 에지 (knife-edge)를 사용하였다. 그리고, 수조는 가로 260 mm×세로 145 mm×높이 300 mm의 직육면체 형상으로서 파이렉스유리로 제작하였으며, 물에서의 초음파 및 광 범의 산란을 줄이기 위해 증류수 사용하였고, 저면에는 흡음을 위하여 두께 약 2 cm의 표면이 거친 실리콘 고무판을 설치하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 시뮬레이션

조향각 $\theta_s = 0^\circ$ 및 30° 인 상태에서 16개의 압전요소가 모두 정상적으로 동작하고 있을 때의 초음파 음장 시뮬레이션 결과를 그림 4 및 그림 5에 그레이스케일과 등고선도로서 각각 나타내었다. 시뮬레이션에 있어서는 방사면

에 부착된 음향정합층과 전극 및 코팅막의 영향은 무시하였고, $L \gg W$ 이므로 x 방향에 대해서는 무한하다는 가정 하에 yz 평면의 음장을 구하였다. 이 결과로부터 $\theta_s = 0^\circ$ 의 경우, 모든 압전요소가 정상적으로 동작할 때는 부엽이 규칙성 있게 대칭적으로 형성되는 것을 알 수 있으며, $\theta_s = 30^\circ$ 일 때는 좌엽이 우엽에 비해 그 수가 많으며 형태가 복잡해짐을 알 수 있다.

그림 6은 $\theta_s = 0^\circ$ 에서 16개의 압전요소 중 임의의 1개가 고장으로 인해 동작하지 아니할 경우의 음장에 대한 등고선도이다. 그림에서 첫 번째 소자가 동작하지 않는 $n - 1$ 의 경우는 15개의 정상적인 압전요소를 갖는 트랜스듀서가 형성하는 음장에 해당하되, 그림 4에 나타난 음장과 유사한 좌우대칭의 부엽패턴을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 부엽패턴은 $n = 16$ 의 경우에도 동일하다. 그러나 고장 요소가 제일 바깥쪽 소자가 아닐 때는 그림 6에서 나타난 바와 같이 비대칭적이며 복잡하면서 특이한 형태를 나타내어, 고장요소가 없을 때와 분명히 식별되어진다. 총 16개의 요소를 갖는 이 트랜스듀서는

8번과 9번 소자 사이에 중심축이 있으므로 그 축을 중심으로 대칭적 위치에 있는 소자가 고장일 경우 음장 또한 대

칭되게 나타나는바, $n=9 \sim 16$ 에 대한 고장은 $n=8 \sim 1$ 에 대한 결과의 좌우대칭이다.

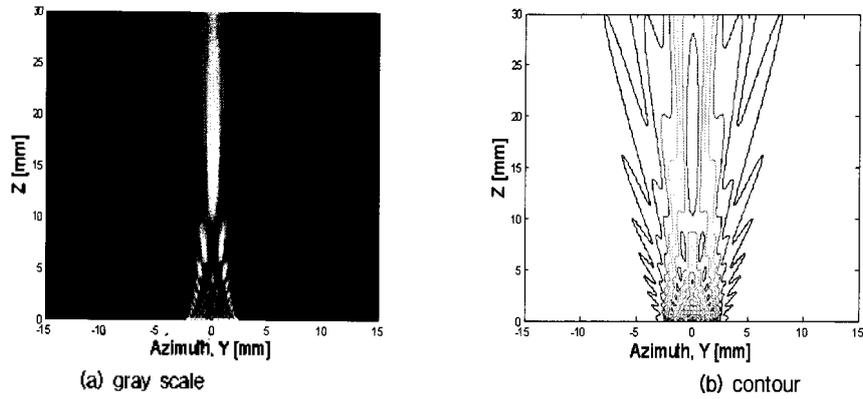


그림 4. 정상인 트랜스듀서의 초음파 음장 시뮬레이션 결과 ($\theta_s = 0^\circ$)
 Fig. 4. Simulated acoustic field for the normal transducer ($\theta_s = 0^\circ$).

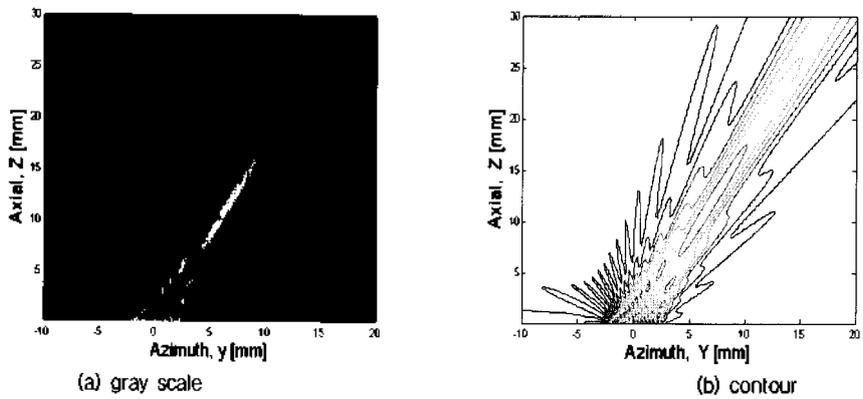


그림 5. 정상인 트랜스듀서의 초음파 음장 시뮬레이션 결과 ($\theta_s = 30^\circ$)
 Fig. 5. Simulated acoustic field for the normal transducer ($\theta_s = 30^\circ$).

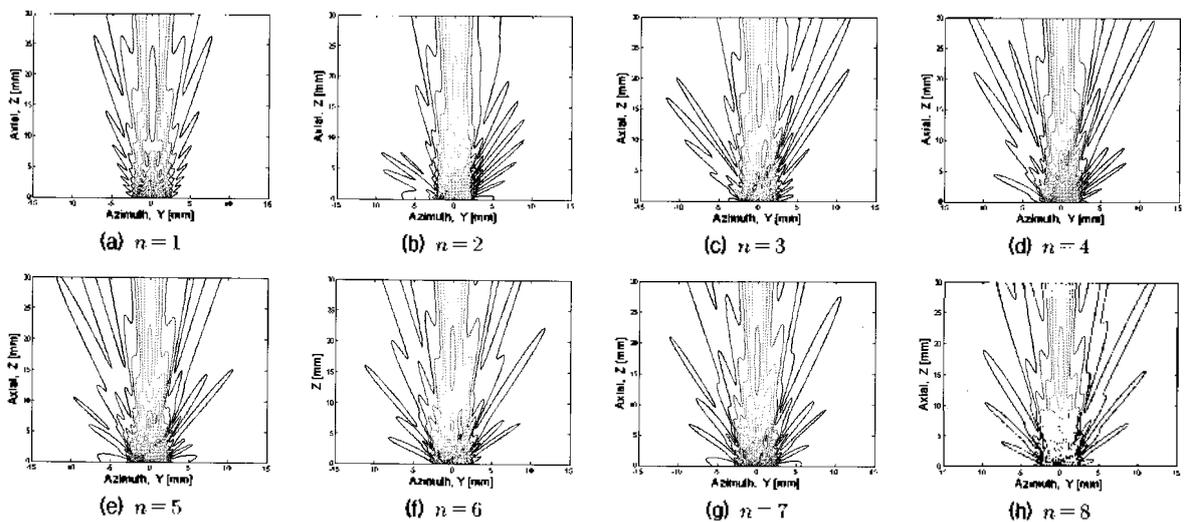


그림 6. 임의 압전요소 고장시의 초음파 음장 시뮬레이션 결과 ($\theta_s = 0^\circ$, n 은 고장요소 번호)
 Fig. 6. Simulated acoustic field for the transducer with a defective piezoelectric element ($\theta_s = 0^\circ$, n = number of the defective element).

그림 7은 조향각 $\theta_s = 30^\circ$ 일 때 고장 요소를 갖는 트랜스듀서가 만드는 음장에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 경우에도 첫 번째 소자 ($n=1$)가 동작하지 않을 때는 그림 5에 나타난 정상음장과 유사한 부엽패턴을 가지는 것을 알 수 있다. 그러한 음장분포는 $n=16$ 의 경우와 완전히 일치하지는 않으나 거의 동일하다. 제일 바깥쪽 소자 이외의 다른 소자가 고장인 경우에는 그림에 나타난 바와 같은 고장요소가 없는 정상 트랜스듀서와 분명이 식별이

가능한 특이한 음장을 형성함을 알 수 있다. $\theta_s = 30^\circ$ 의 경우에는 $\theta_s = 0^\circ$ 와는 달리 중심축을 중심으로 대칭적 위치에 있는 소자가 고장일 경우에도 음장이 완전한 대칭이 되지 않는다.

4.2. 가시화음장

그림 8과 그림 9는 그림 3에 나타난 슈리켄장치에 의해 음장을 가시화하여 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비

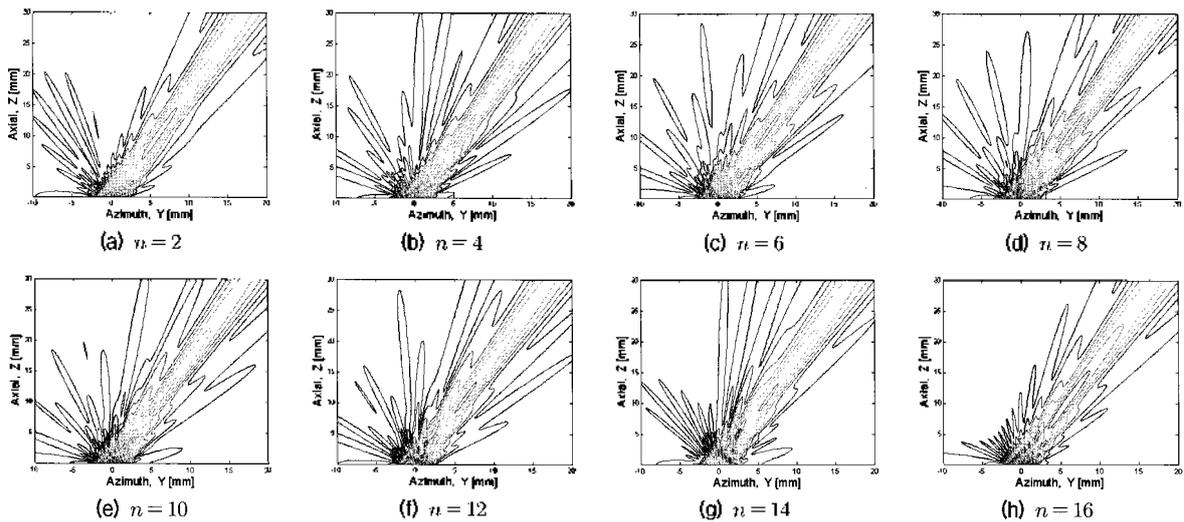


그림 7. 임의 압전요소 고장시의 초음파 음장 시뮬레이션 결과 ($\theta_s = 30^\circ$, n 은 고장요소 번호)

Fig. 7. Simulated acoustic field for the transducer with a defective piezoelectric element ($\theta_s = 30^\circ$, n = number of the defective element).

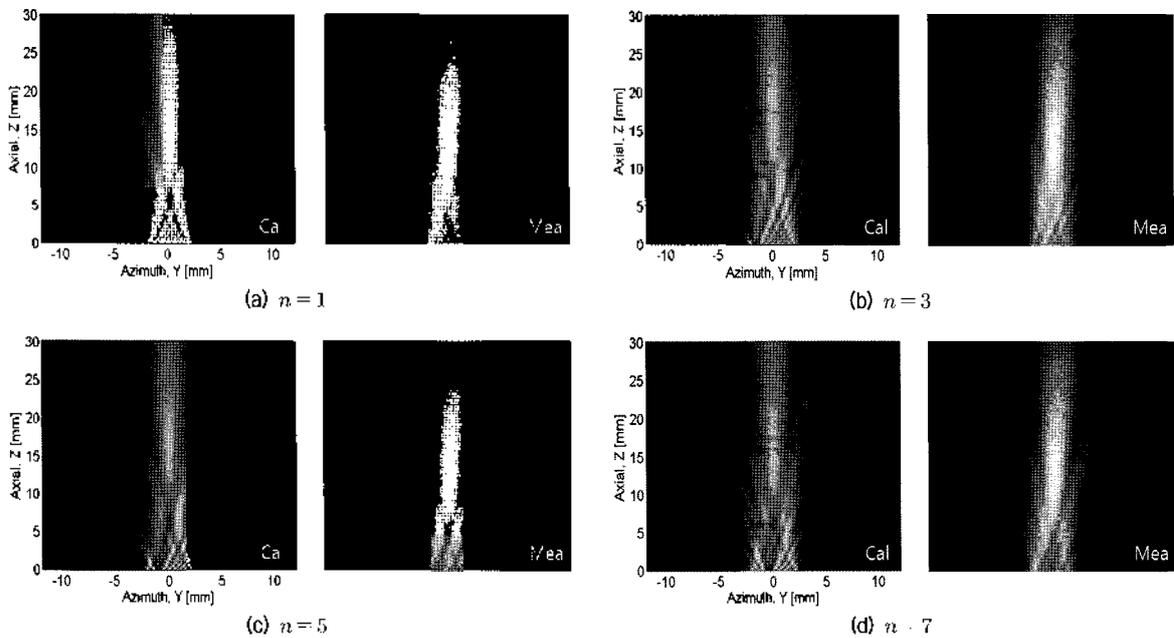


그림 8. 임의 압전요소 고장시 초음파 음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교 ($\theta_s = 0^\circ$, n 은 고장요소 번호)

Fig. 8. Comparison of simulation and measurement results of the acoustic field for the transducer with a defective piezoelectric element ($\theta_s = 0^\circ$, n = number of the defective element).

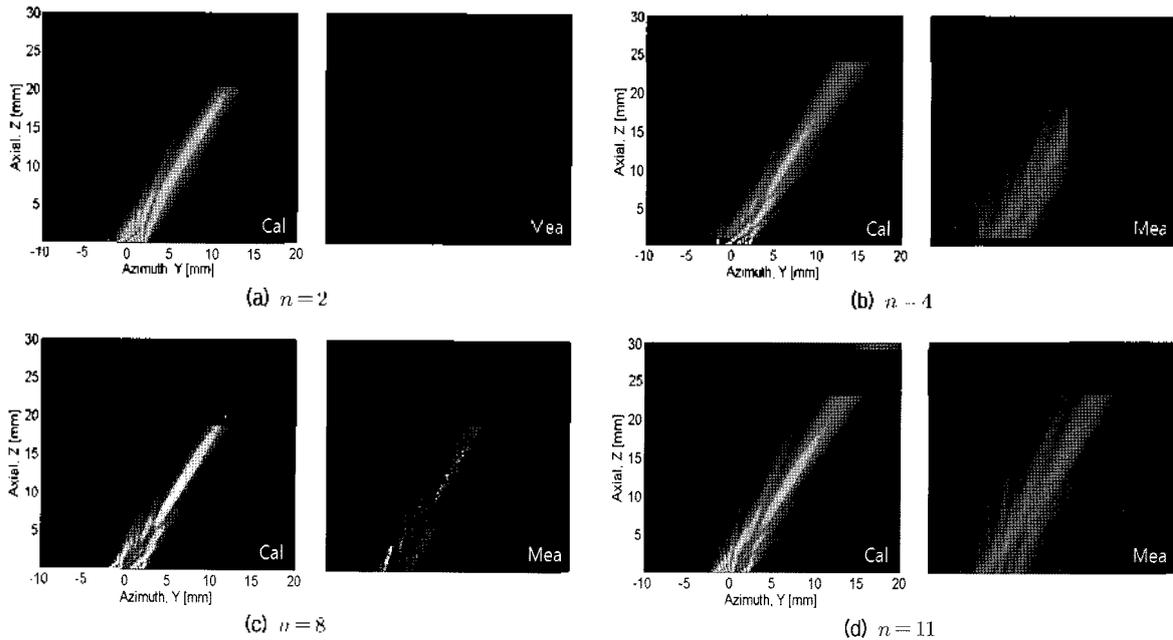


그림 9. 임의 압전요소 고장시 초음파 음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교 ($\theta_s = 30^\circ$, n 은 고장요소 번호)

Fig. 9. Comparison of simulation and measurement results of the acoustic field for the transducer with a defective piezoelectric element ($\theta_s = 30^\circ$, $n =$ number of the defective element).

교하여 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 가시화에 의한 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있는데, 그림 8(a)에 나타낸 $\theta_s = 0^\circ$ 에 있어서 $n = 1$ 일 때의 음장은 그림 4(a)에 나타낸 정상적인 트랜스듀서와 패턴이 비슷하여 고장여부의 판단이 어렵다. 전술한 바와 같이 그것은 $n = 16$ 일 때도 동일하다. 그러나 그 외의 경우는 음장의 형태가 비대칭으로 특이하므로 측정된 음장으로부터 결함요소 존재여부의 판단은 대단히 쉽다. 특히, 그림 9에 나타낸 바와 같이 $\theta_s = 30^\circ$ 에 있어서는 더욱 분명히 알 수 있다. 그리고, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가시화 장치에 의해 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하면 결함 요소의 위치추정이 가능하다.

IV. 결론

본 연구에서는 비파괴평가용 또는 의료용으로 실제 사용가능한 16개 압전요소로 구성된 3 MHz의 선형 위상차 배열 초음파 트랜스듀서를 대상으로, 모든 압전요소가 정상일 때와 임의의 요소 하나가 결함으로 인해 동작하지 않을 때의 음장을 조향각 0° 와 30° 에 대해 이론적으로 시뮬레이션하고, 슈리렌법에 따라 구축한 음장가시화장치를 이용하여 실험적으로 측정하였다. 그 결과, 임의의 압전요소가 결함으로 인해 동작하지 않을 때의 음장은

모든 요소가 정상적으로 동작할 때의 음장에 비해 부엽 패턴이 크게 다르게 나타나며, 그 형태는 가시화에 의한 측정결과와 잘 일치하였다. 따라서, 가시화 장치에 의해 측정된 음장에서의 부엽패턴의 특징을 시뮬레이션 결과와 비교 분석함으로써 선형 위상차배열 초음파 트랜스듀서에서의 결함요소 존재여부는 물론, 그 결함요소의 위치 추정이 가능함을 알았다.

감사의 글

본 논문은 2007년도 산학협동재단 지원 학술연구비에 의해 수행되었는바, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. T. Neumann and H. Ermert, "A new designed Schlieren system for the visualization of ultrasonic pulsed wave fields with high spatial resolution and temporal resolution", *2006 IEEE Ultrason. Symposium Proceedings*, vol. 1, pp. 244-247, 2006.
2. 江連 朝寬, "光学的手法による二次元投影像から取得する音場分布計測に関する研究", *博士学位論文*, 筑波大学, 2004.
3. B. Schneider and K. K. Shung, "Quantitative analysis of pulsed ultrasonic beam patterns using a Schlieren system",

IEEE Trans. on UFFC, vol. 43, no. 6, pp. 1181-1186, 1996.

4. 実吉 純一, 菊池 喜充, 能本 乙彦, "超音波技術便覧", 日刊工業新聞社, 東京, pp. 491-614, 1960.
5. N. Denisenko, M. Pappalardo, E. D'Ottavi, and M. Matteucci, "An approximate closed form of the transient acoustic pressure distribution generated by a linear source", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, no. 6, pp. 1896-1899, 1984.
6. P. Conrmbie, A. Bascom, and S. Cobbold, "Calculating the pulsed response of linear arrays: Accuracy vs. computational efficiency", *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 44, no. 5, pp. 997-1009, 1997.
7. D. H. Turnbull and F. S. Foster, "Beam steering with pulsed lwo-dimensional transducer arrays", *IEEE Trans. on UFFC*, vol. 38, no. 4, pp. 320-333, 1991.
8. 조영환, "초음파 영상 진단기용 변환기의 설계 및 과도음장 해석", 박사학위논문, 서울대학교, 1995.
9. 박은주, 송행용, 하강렬, 김무준, 김동현, 이수성, "과도음장 해석을 통한 초음파 진단 탐촉자의 성능 개선", *한국음향학회지*, 제21권 제8호, 744-756쪽, 2002.
10. J. J. Lee, E. M. Ferren, D. P. Woollen and K. M. Lee, "Near-field probe used as a diagnostic tool to locate defective elements in an array antenna", *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 36, no. 6, pp. 884-889, 1988.
11. O. M. Bucci, M. D. Migliore, G. Panariello and P. Sgambato, "Accurate diagnosis of conformal array from near-field data using the matrix method", *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 53, no. 3, pp. 1114-1120, 2005.
12. A. Buonanno, M. D'Urso, M. Cicolani and S. Mosca, "Large phased arrays diagnosis via distributional approach", *PIER*, vol. 92, pp. 153-166, 2009.
13. B. K. Yeo and Y. Lu, "Array failure correction with a genetic algorithm", *IEEE Trans. on Antennas Propag.*, vol. 47, no. 5, pp. 823-828, 1999.
14. J. A. Rodriguez, F. Ares, H. Palacios and J. Vassallo, "Finding defective elements in planar arrays using genetic algorithms", *PIER*, vol. 29, pp. 25-37, 2000.
15. Shi-Chang Woo and Yijun Shi, "A simulation study of the beam steering characteristics for linear phased arrays", *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 18, no. 2, pp. 39-57, 1999.
16. Shi-Chang Woo and Yijun Shi, "Optimum beam steering of linear phased arrays", *Wave Motion*, vol. 29, pp. 245-265, 1999.

저자 약력

•최 광 윤 (Kwang-Yoon Choi)

2008년 : 동서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
2008년~ 현재 : 부경대학교 음향진동공학(합) 석사 과정



•양 정 원 (Jeong-Won Yang)

한국음향학회지 Vol.26, No.1E 참조

•하 강 렬 (Kang-Lyeol Ha)

한국음향학회지 Vol.25, No.3E 참조

•김 무 준 (Moo-Joon Kim)

한국음향학회지 Vol.25, No.3E 참조

•김 정 순 (Jung-Soon Kim)

한국음향학회지 Vol.25, No.3E 참조

•이 채 봉 (Chae-Bong Lee)

1985년 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
1988년 : 일본 도후쿠(東北)대학 공학연구과 졸업 (공학 석사)
1992년 : 일본 도후쿠(東北)대학 공학연구과 졸업 (공학 박사)
1997년 : 쓰꾸바 대학 객원연구원
2004년 : 일본 아카다 현립대학 겸임교수
1993년~ 현재 : 동서대학교 전자공학과 교수

