

Phased Array 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성의 수치 해석

Numerical Analysis of Ultrasonic Beam Profile Due to the Change of the Number of Piezoelectric Elements for Phased Array Transducer

최상우*, 이준현**

Sang-Woo Choi* and Joon-Hyun Lee**

초 록 일반적인 하나 또는 두개의 압전소자를 사용하는 트랜스듀서에 비하여 다수의 압전소자를 사용하는 어레이 트랜스듀서는 각 압전소자에 가해지는 펄스의 지연시간을 제어함으로써 초음파 빔을 임의의 지점에 집중시킬 수 있고 기계적 구동없이 임의의 방향으로 조향시켜 실시간 주사를 할 수 있는 장점이 있다. 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 설계조건은 압전소자의 수, 압전소자의 크기, 그리고 압전소자 사이 간격 등 여러가지가 있으며, 본 연구에서는 그 중에서 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 호이겐스의 원리를 이용한 수평회파의 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 그 결과 초음파 빔은 조향각이 증가할수록 음압이 감소하며, 초음파 빔 특성도 점차적으로 분산됨을 알 수 있었고 또한, 초점거리가 증가할수록 초점에서의 집중효과는 감소하고, 압전소자의 수가 증가되면 집중효과는 향상됨을 알 수 있었다.

주요용어 : 초음파, 페이즈드 어레이 트랜스듀서, 펄스 지연시간, 압전소자

Abstract A phased array is a multi-element piezoelectric device whose elements are individually excited by electric pulses at programmed delay time. One of the advantages of using phased array in nondestructive evaluation (NDE) application over conventional ultrasonic transducers is their great maneuverability of ultrasonic beam. There are some parameters such as the number and the size of the piezoelectric elements and the inter-element spacing of the elements to design phased array transducer. In this study, the characteristic of ultrasonic beam for phased array transducer due to the variation of the number of elements has been simulated for ultrasonic SH-wave on the basis of Huygen's principle. Ultrasonic beam directivity and focusing due to the change of time delay of each element were discussed due to the change of the number of piezoelectric elements. It was found that ultrasonic beam was much more spreaded and hence its sound pressure was decreased as steering angle of ultrasonic beam was increased. In addition, the ability of ultrasonic beam focusing decreased gradually with the increase of focal length at the same piezoelectric elements. However, the ability of beam focusing was improved as the number of consisting elements was increased.

Keywords : ultrasonic wave, phased array transducer, pulse delay time, piezoelectric element

1. 서 론

구조물의 안전성 확보, 잔존수명 평가 및 효율적인

유지보수를 위하여 구조물 내부에 존재하는 결함 등의 정량적인 비파괴 평가가 필수적이다. 여러가지 비파괴 평가 방법 중에서 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은

재료 내부에 존재하는 결함의 신뢰성있는 비파괴 평가 방법으로 널리 사용되고 있다[1-2]. 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 현장에서 복잡한 절차없이 실시간(real time)으로 즉시 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 초음파를 이용한 평가 방법은 구조용 재료에 존재하는 균열 탐상에 널리 사용되어 왔다.

그러나, 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법에서 재료 내부에 존재하는 결함을 탐상하기 위하여 일반적으로 사용되는 펄스에코(pulse-echo)법은 트랜스듀서를 이용하여 한 점에서 재료내부로 초음파를 입사시킨 후 재료내부의 결함 등으로부터 반사되어오는 초음파를 동일한 트랜스듀서로 수신하여 그 파형 즉, A스캔 신호를 이용하여 국부적인 영역만을 평가하게 된다. 따라서, 넓은 영역을 평가하기 위해서는 트랜스듀서를 한점, 한점 이동시키면서 A스캔 신호를 검출해야 한다. 이 과정에서 검사자의 오류에 의해 결함부위를 누락시킬 수도 있으며, 수작업으로는 많은 시간이 소요된다. 이를 보완하기 위하여 최근 자동화된 초음파 영상 장비를 이용하여 각 지점의 A스캔 신호를 종합한 B스캔 및 C스캔 이미지를 이용하기도 한다. C스캔 이미지는 재료 내부 결함 위치와 형상을 3차원 이미지로 나타낸 것이고, B스캔 이미지는 재료의 수직 단면을 2차원 이미지로 나타낸 것으로 이러한 초음파 영상 장비들은 자동화가 되어 수작업에 의한 경우에 비하여 결과의 재현성이 높으며 신속한 결과를 출력하지만, 기계적 구동에 많은 시간이 소요되므로 실시간으로 이미지를 나타내지는 못한다.

실시간 초음파 영상을 나타내는 방법으로는 최근 페이즈드 어레이(phased array)기법이 주목받고 있다. 페이즈드 어레이 기법은 다수의 압전소자(piezoelectric element)들을 배열하여 하나의 트랜스듀서로 만든 것으로서 Fig. 1과 같이 전자회로에 의하여 각각의 압전소자들에 대한 펄스(pulse)의 지연시간(delay time)을 조정함으로써 재료내부에 전파하는 초음파 빔의 동적집속(dynamic focusing)과 조향(steering)을 가능하게 한다. 이러한 페이즈드 어레이 기법을 적용한 초음파영상장비는 종래의 펄스에코 방법 등에서의와 같은 트랜스듀서의 기계적 구동없이 재료의 단면부를 실시간, 고속으로 영상화시켜 재료 내부에 존재하는 결함의 크기와 위치를 나타낼 수 있으며, 특히 터빈 블레이드 등과 같이 탐상 구조물의 형상이 복잡한 경우 또는 구조물내에 존재하는 결함위치가 종래의 펄스에코

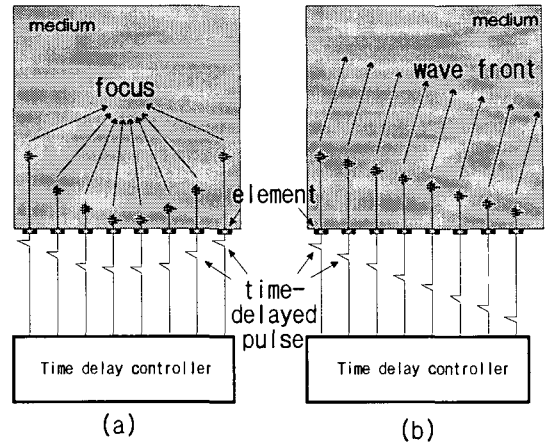


Fig. 1 Phased array transducer
(a) dynamic focusing, (b) steering

법 등에 의하여 탐상하기 곤란한 경우에 있어서도 초음파의 적용이 가능하다.

한편 이와 같은 페이즈드 어레이 기법의 적용은 레이더(radar) 및 의료용 초음파 장비에서 활발히 적용되어 왔으나 특히 최근 일반 구조용 재료의 내부 결함 탐상에서 페이즈드 어레이 기법의 적용이 시도되고 있다. 따라서 이에 대한 연구가 미국, 캐나다 등을 중심으로 시작되고 있으며[3-9], 특히 최근 국내에 있어서도 페이즈드 어레이 초음파 탐상장비를 외국에서 구입하여 원자력 발전설비에서의 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 이용한 비파괴 평가 기법 적용이 시도되고 있으며 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 초음파 빔의 특성 등에 대한 연구가 시작되었다[10-12]. 따라서 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 이용한 구조용 재료에 대한 결함 탐상의 효율성을 높이기 위하여는 먼저 페이즈드 어레이 초음파 탐상의 기본원리는 물론 이와 관련된 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 초음파 빔 방향성(directionality) 및 동적집속 등과 같은 초음파 빔의 조향특성을 이해하여야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 설계변수들 중의 중요한 변수인 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔의 동적 집속 특성과 조향 특성을 나타내기 위하여 컴퓨터를 이용한 수치계산을 수행하였다. 점원(point source)으로 가정된 각 압전소자에서 발생된 초음파를 호이겐스 원리(Huygen's principle)를 이용하여 중첩시켜 각 지점의 최대 진폭값을 구하는

방법으로 초음파 전파 특성을 출력하였다. 그리고 본 연구에서는 각 압전소자에서 발생하는 초음파를 단순화된 수평횡파(SH-wave)로 가정하였다.

2. 페이즈드 어레이 기법의 원리

다수의 압전소자를 사용하는 어레이 트랜스듀서는 압전소자의 배열구조에 따라 선형(linear), 평면형(planar), 환형(annular)의 형태가 있고, 선형 어레이 트랜스듀서의 경우 주사(scanning)방법에는 크게 두가지 방법으로 선형주사(linear-scan)방식과 부채꼴주사(sector-scan)방식이 있다[13].

선형주사방식은 Fig. 2의 (a)와 같이 어레이 트랜스듀서의 전체 압전소자중에서 연속된 N개만의 압전소자가 동작하여 주사하는 방법이며 전체 압전소자중 N개의 압전소자 구간은 압전소자가 한개씩 이동하여 선택되므로 점선으로 표시된 사각형 영역을 주사하는 방법이다. 부채꼴주사방법은 Fig. 2의 (b)와 같이 전체 N개의 압전소자를 지연시간을 가진 펄스의 여기(excitation)에 의한 초음파 빔의 동적 집속과 조향을 통하여 점선으로 표시된 부채꼴 영역을 주사하는 방법이다. 어레이 트랜스듀서의 압전소자들을 볼록한 원호 형태로 배열한 것을 리니어 컨벡스(linear convex)라고 부르며, Fig. 2(a)방식의 선형주사와 같은 방법으로 부채꼴 형태의 주사가 가능하다. 엄밀히 말할 때 페이즈드 어레이라 함은 Fig. 2의 (b)와 같은 부채꼴주사를 지칭한다. 페이즈드 어레이 기법을 사용하여 임의의 조향각과 임의의 초점에 대하여 계산된 지연시간만큼 지연된 펄스를 각 압전소자에 가함으로 트랜스듀서의 기계적 구동없이 임의의 방향으로 초음파 빔을 조향

및 집속할 수 있다. 따라서 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 사용하여 기계적 구동없이 초음파 빔을 조향하여 짧은 시간내 지정된 영역을 주사할 수 있다.

페이즈드 어레이 트랜스듀서에서의 초음파 빔의 동적 집속 및 조향의 원리는 Fig. 3과 같다. 즉, 임의의 조향각 및 임의의 초점을 가진 초음파 빔을 전파시키기 위하여 계산된 지연시간을 가진 각각의 압전소자에 대한 펄스는 각 압전소자에 입력되어 서로 다른 시간에 초음파를 발생시킨다. 점원형태의 각 압전소자에서 원형의 파면을 가진 각각의 초음파가 전파하게 되고 이들은 호이겐스 원리에 의해 하나의 파면으로 중첩되고 임의의 방향으로 전파하여 하나의 초점으로 집속된다. 즉, 일반적인 하나의 압전소자를 사용하는 트랜스듀서는 굴절각이나 초점거리가 고정되어 있는 반면, 페이즈드 어레이 트랜스듀서는 전자회로에 의한 펄스의 지연시간을 제어하여 초음파 빔을 임의의 지점에 집속 및 조향시킬 수 있다.

페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자에 입력되는 펄스의 지연시간을 구하는 방법은 다음과 같다. Fig. 4에서 페이즈드 어레이 트랜스듀서가 N 개의 압전소자로 구성되어 있을 때 트랜스듀서의 중심에서부터 초점까지 거리는 f 이고, 초음파 빔의 조향각은 α 이며, 각 압전소자의 중심에서 이웃하는 압전소자의 중심까지의 거리는 d 이다. N 개의 압전소자중 $n + 1$ 번째 압전소자에서 트랜스듀서 중심까지의 거리는 식 (1)과 같이 D 이고, 초점까지의 거리는 식 (2)와 같이 l 이다.

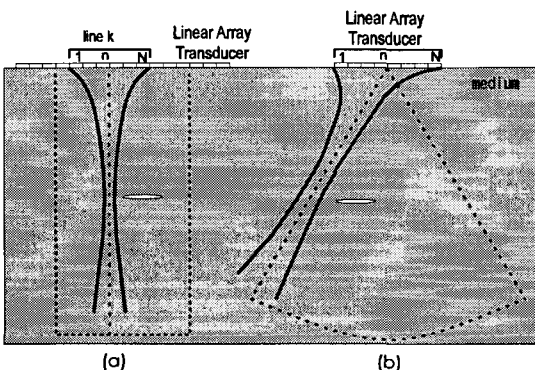


Fig. 2 (a) Linear scanning (b) Sector scanning

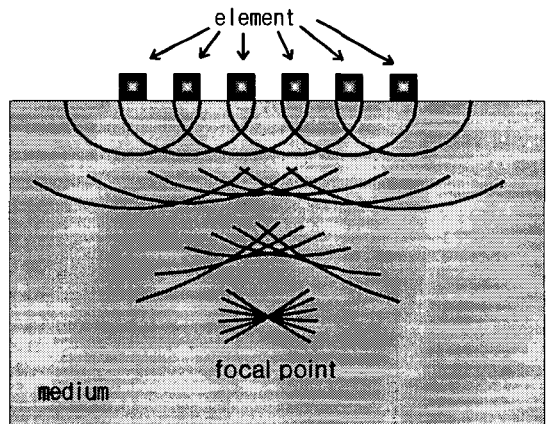


Fig. 3 Wavefront propagation and focusing from each element through delayed pulse

$$D = \frac{2n - N + 1}{2} d \dots\dots\dots (1)$$

$$l = \sqrt{f^2 + D^2} - 2 f D \sin\alpha \dots\dots\dots (2)$$

한편 초점거리 f 와 임의의 압전소자로부터 초점까지 거리 l 과의 차이를 음속 C 로 나눈 값이 아래의 식 (3) 과 같이 그 압전소자에 입력되는 펄스의 지연시간 $T[n]$ 이 된다. 여기서 t_0 는 지연시간이 음수가 되지 않기 위한 최소의 양의 상수이다.

$$T[n] = \frac{f - \sqrt{f^2 + D^2} - 2 f D \sin\alpha}{C} + t_0 \dots\dots\dots (3)$$

3. 초음파 빔 전파 특성 해석 방법

3. 1. 단순화된 초음파 파형

일반적인 파동방정식은 다음 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4)$$

다음의 식 (5)는 식 (4)의 파동방정식의 해가 되며, 삼각함수 형태로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$u = Ae^{i(kx - \omega t)} \dots\dots\dots (5)$$

페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자의 크기는 일반적으로 mm 단위 미만으로 상당히 폭이 좁다. 따

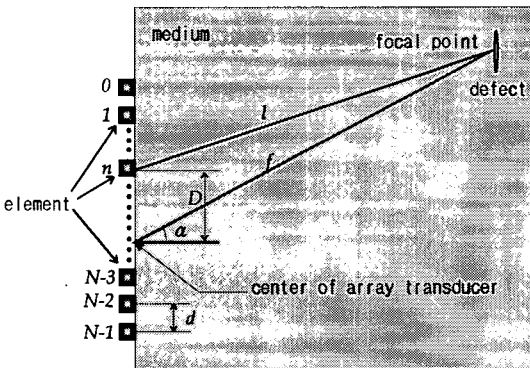


Fig. 4 Geometric lengths from elements of phased array transducer to focal point

라서, 각 압전소자는 점원이라고 가정하며 압전소자에서 발생된 초음파 펄스파는 각각의 압전소자를 중심으로하는 원을 그리며 전파하게 된다. 이때 초음파 펄스파는 다음 식 (7)과 같이 식 (6)의 Hanning 창(window)함수를 코사인함수와 결합하여 단순화하였다. 여기서 A 는 진폭의 크기를 나타내고, k 는 파수(wave number), ω 는 주파수(angular frequency)이다.

$$winf(x, t) = 0.5 + 0.5\cos\left(\frac{kx - \omega t}{5.0}\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$u(x, t) = A \cos(kx - \omega t) winf(x, t) \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 5는 식 (7)로 표현되는 단순화된 주파수 5MHz의 초음파 파형을 나타내며, 일반적인 한 펄스 입력에 대한 트랜스듀서에서 발생하는 초음파의 파형과 유사한 형태이다.

3. 2. 초음파 빔의 계산 조건

페이즈드 어레이 트랜스듀서의 설계조건은 주파수, 압전소자의 수, 각 압전소자 사이 간격, 압전소자의 크기 등이다. 본 연구에서는 각 압전소자를 점원으로 가정하였으므로 압전소자의 크기는 고려하지 않는다. 압전소자의 수는 일반적으로 n 이 정수일때 2^n 개를 사용하는데 압전소자수가 적으면 빔의 형상(beam shape)이 넓게 퍼져서 집속의 효과가 약하고, 압전소자의 수가 많으면 빔의 집속의 효과는 향상되지만 실제 장비 구현시 회로가 복잡해지고 제작비가 증가하여 실용적이지 못하게 된다. 본 연구에서는 페이즈드 어레이 트랜

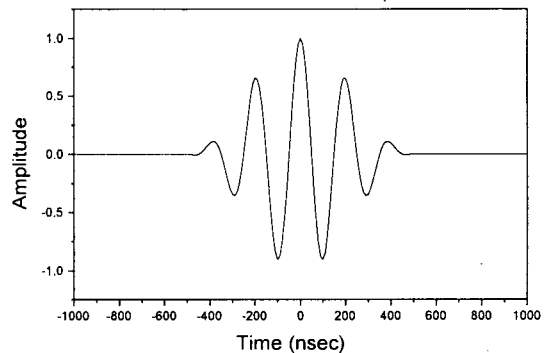


Fig. 5 Simplified waveform (5MHz)

스듀서의 압전소자수에 대한 초음파 빔의 조향 및 집중 특성 이해를 위하여 초음파 빔 전파의 수치적 계산을 수행하였다.

각 압전소자 사이의 간격은 넓을수록 빔의 지향성은 향상되지만 메인 로브(main lobe) 주위의 사이드 로브(side lobe)의 영향이 강하게 나타나 정확한 탐상을 어렵게 한다. 이 간격을 지향성이 좋고 사이드 로브의 영향이 적은 적당한 값으로 설정해야 하는데, Wooh 등은 최근 사이드 로브의 영향을 억제하기 위해서는 초음파 파장의 반 이하의 값이 적절하다고 보고하고 있다 [14].

본 연구에서는 계산영역의 가로, 세로축인 X, Y축과 독립된 Z축으로 변위를 가지는 수평횡파(SH-wave)를 이용하였고, 계산조건으로 초음파의 음속은 알루미늄의 횡파(shear wave)속도인 3,200m/s로 하였고, 주파수는 5MHz로 하였다. 따라서 파장의 길이는 $\lambda=0.644\text{mm}$ 가 된다. 각 압전소자 사이 간격(inter-element spacing) d 는 반파장 즉, 0.322mm 로 하였다. 이러한 조건을 기본으로 하고, 본 연구에서는 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 비교하기 위하여 압전소자수의 변화와 함께 초점거리, 조향각 등의 변화에 따른 초음파 빔의 전파를 계산하여 지향성을 나타내었다. 초음파 빔의 전파는 점원인 각 압전소자에서 발생된 파를 각 지점에서 중첩시켰고, 각 지점의 최대 진폭값으로 초음파 빔의 형상을 나타내었다. 계산시의 해상도는 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 영역을 1mm 단위로 나누었고, 시간은 5nsec 단위로 하여 한파장을 시간역(time domain)에서 40개점으로 샘플링(sampling)한 효과가 있었다. 초음파 빔의 전파를 계산하는 것은 많은 처리시간을 요구하므로 노드27개를 가지는 RS/6000 슈퍼컴을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지연시간에 따른 초음파 빔의 조향 특성

Fig. 6은 앞의 식 (3)에 의해 계산된 32개의 압전소자를 사용한 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자들에서 초음파를 발생시키기 위해 입력되는 펄스의 지연시간을 나타낸 결과로서 각 압전소자 사이 간격은 초음파 파형의 반파장 거리인 $d=0.322\text{mm}$ 이고, 초점거리가 $f=50\text{mm}$ 일때 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=0^\circ$, 20° , 40° , 60° 인 경우의 결과이다. 조향각이 $\alpha=0^\circ$ 인

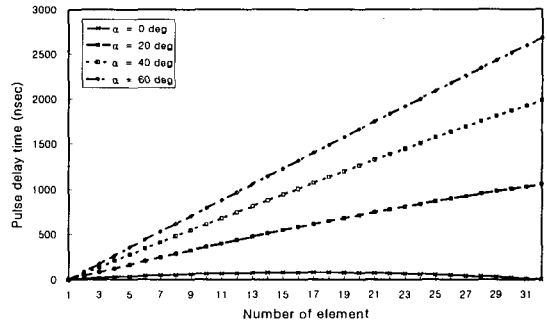


Fig. 6 Pulse delay time of phased array transducer at each element (32 elements, $f=50\text{mm}$)

경우 16번 17번 압전소자는 초점(focal point)과 가장 가까운 거리에 있으므로 가장 늦게 여기되어야 한다. 따라서 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=0^\circ$ 일때, 16번 17번 압전소자의 지연시간이 가장 길다. 반대로 같은 $\alpha=0^\circ$ 의 초음파 빔 조향각에서 1번과 32번의 압전소자는 초점과 가장 먼 거리에 위치하므로 지연시간없이 제일 먼저 여기되어야 하고, 따라서 이 두 압전소자의 지연시간은 가장 짧은 0이다. 초음파 빔의 조향각이 증가할수록 초점으로부터 1번, 32번 압전소자까지 거리의 차이가 증가하고, 1번 압전소자로부터 점차 멀어지므로 32번 압전소자의 지연시간이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 펄스 지연시간 결과를 이용하여 압전소자의 수가 32개, 초점거리가 $f=50\text{mm}$, 빔의 조

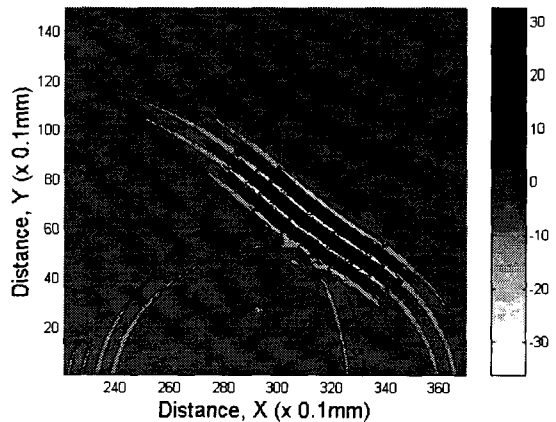


Fig. 7 Snapshot of ultrasonic wave propagation (32 elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$, $d=0.5\lambda$, $\text{time}=4\mu\text{s}$)

향각이 $\alpha=40^\circ$ 인 초음파의 파면 전파 순간을 나타낸 결과로 초음파가 최초로 전파되기 시작한 후 $4\mu s$ 되는 순간의 초음파 파면이며, 이 결과는 초음파 파형의 진폭값을 등고선그래프를 통해서 나타낸 결과이다. X, Y 축은 매질의 가로 및 세로를 나타내며 트랜스듀서의 중심위치는 X축에서 좌표값이 250되는 지점 즉, 25mm되는 지점이다. 어두운 검은색일수록 높은 진폭값을 나타내며, 백색은 골을 나타내며, 흑색은 가장 높은 피크값을 나타내고 있다. 중간단계의 회색은 초음파 진폭값이 높지 않은 0부근의 값을 나타낸다. 본 결과에서 각 압전소자를 중심으로 하는 반원형의 초음파 파면은 호이젠스 원리에 의해 트랜스듀서 중심위치에서 40° 방향의 파면 하나로 중첩되어 전파됨을 보여주었다. 하나로 중첩된 파면의 좌우에 부채꼴 형태의 파면이 나타나는데 이것은 하나의 압전소자에서 발생한 초음파 파면으로서 낮은 진폭값을 나타내고 있다. 그리고, 호이젠스의 원리에 의해 하나로 중첩된 진폭이 높은 파면은 초점을 중심으로하는 부채꼴 형상을 띄고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 압전소자의 수가 32개이며 초점거리가 $f=50mm$ 인 앞의 Fig. 6의 펄스지연시간중 초음파 빔의 조향각 $\alpha=0^\circ$ 그리고 $\alpha=40^\circ$ 인 경우의 초음파 빔 형상의 특성을 나타낸 결과이다. X, Y축은 매질의 가로 및 세로를 나타내며 트랜스듀서의 중심위치는 X축에서 100mm 지점이다. 이 결과는 앞의 Fig. 7과 같은 결과를 5nsec 간격으로 계산하고 각 지점에서의 최대값을 추출한 것으로 각 지점에서 음압의 최대값을

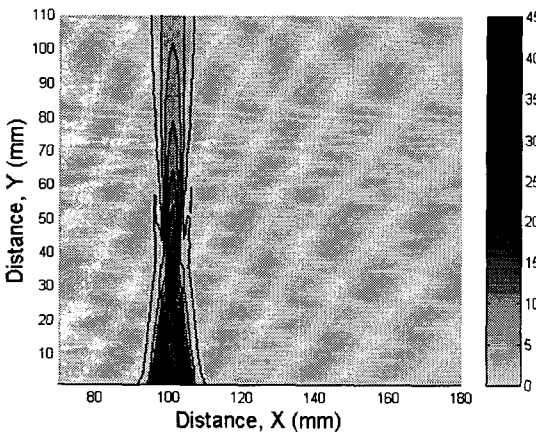


Fig. 8 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32 elements, $f=50mm$, $\alpha=0^\circ$, $d=0.5\lambda$)

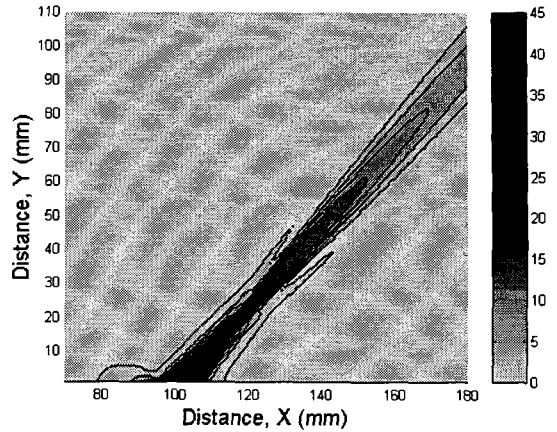


Fig. 9 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32 elements, $f=50mm$, $\alpha=40^\circ$, $d=0.5\lambda$)

나타내며 어두운 검은색일수록 높은 음압을 나타낸다. 이들 결과는 초음파 빔의 굴절을 위하여 쐐기(wedge)의 사용없이 각 압전소자에 가해지는 펄스의 지연시간만을 조절하여 임의의 방향으로 조향시킬 수 있음을 나타내고 있다. 그리고 조향각 α 의 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 비교할 때 다음과 같은 결과를 나타내었다. 즉, 초음파 빔은 초점거리 이후의 원거리 음장에서 빔의 분산(beam spreading)을 보이고 있으며 Fig. 9와 같이 조향각이 $\alpha=30\sim 40^\circ$ 로 증가하였을 때 조향각이 $\alpha=0^\circ$ 인 Fig. 8과 비교하면 트랜스듀서 중심위치로부터 메인 로브 조향각의 반대 방향으로의 사이드 로브가 나타나면서 메인 로브의 그 빔의 분산 정도가 증가하며 음압도 감소함을 나타내었다. 조향각 α 가 증가할수록 사이드 로브의 크기와 음압이 점차 증가하면서 메인 로브 빔의 분산 정도는 점차 증가하였고 원거리 음장에서 음압은 감소하였다. 또한 초점 부근 위치에서 메인 로브를 중심축으로 하는 메인 로브와 같은 방향의 사이드 로브가 좌우로 대칭적으로 나타났으며, 조향각이 증가할수록 메인 로브와 이 사이드 로브 사이의 각(angle)이 증가하였다. 그리고 이 사이드 로브는 메인 로브에 비하여 아주 낮은 음압을 보였다.

4. 2. 압전소자수의 변화에 따른 초음파 빔의 집속 특성

다음 Fig. 10과 11은 초점거리가 $f=30mm$, 조향각이 $\alpha=20^\circ$ 이며 압전소자의 수가 16개와 32개인 경우의

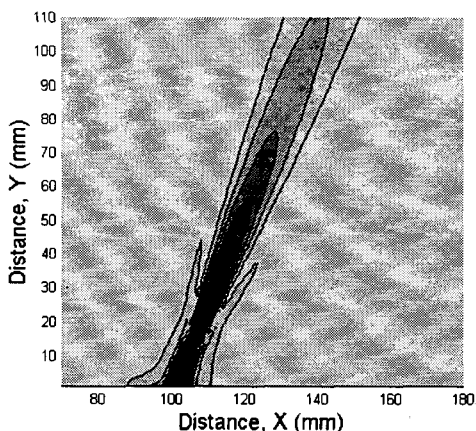


Fig. 10 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (16 elements, $f=30\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=0.5\lambda$)

초음파 빔 형상의 특성을 나타낸 결과이다. 조향각이 $\alpha=20^\circ$ 에서 압전소자의 수가 16개인 Fig. 10과 압전소자의 수가 32개인 Fig. 11의 두 결과에서 트랜스듀서 중심으로부터 메인 로브와 반대 방향으로 향하는 사이드 로브는 나타나지 않았다. 압전소자의 수가 16개인 Fig. 10의 초음파 빔 특성은 근거리 음장에서 높은 음압을 보이고 있으며 초점이전의 근거리뿐만 아니라 초점위치에서도 초음파 빔이 넓게 퍼지는 빔의 분산을 보이고 있다. 그리고 원거리에서도 넓은 빔의 분산을 보이고 있다. 또한 앞의 Fig. 8, 9의 결과와 유사하게 초점 부근 위치에서 음압이 낮은 사이드 로브가 좌우 대칭적으로 나타났으나 압전소자의 수가 32개에서 16개로 감소한 본 결과에서는 이 사이드 로브의 크기는 증가하였으며, 메인 로브와의 사이각은 앞의 결과보다 크게 나타났다.

압전소자의 수가 32개로 증가한 Fig. 11의 초음파 빔 특성은 앞의 압전소자의 수가 16개인 Fig. 10의 결과와 비교하여 다음과 같은 결과를 나타내었다. 초음파 빔의 근거리 음장에서 빔의 분산은 약하였으며, 원거리 음장에서의 초음파 빔은 초점거리에서부터 분산되면서 음압이 감소하였다. 압전소자의 수가 32개인 Fig. 11에서 원거리 음장의 초음파 빔은 압전소자의 수가 16개인 Fig. 10에서의 원거리 음장의 초음파 빔보다 낮은 음압값을 나타내었다. 특히 초점 부근의 음장에서 앞의 결과에서 나타났던 메인 로브와 같은 방향의 사이드 로브는 본 결과에서는 나타나지 않았다. 같은 수의

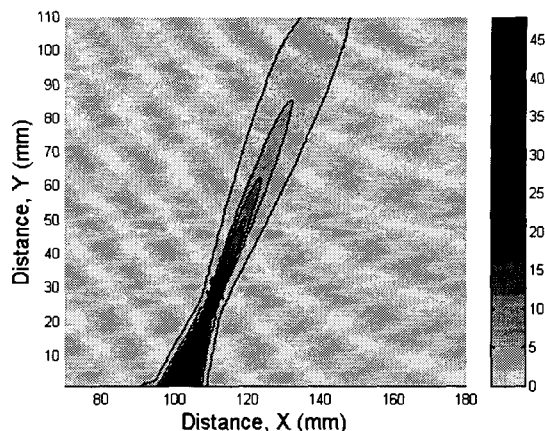


Fig. 11 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32 elements, $f=30\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=0.5\lambda$)

압전소자를 사용한 Fig. 8과 9의 결과에서 나타나던 이 사이드 로브는 Fig. 11의 본 결과에서는 초점거리가 50mm에서 30mm로 감소하여 집중효과가 높아졌기 때문에 나타나지 않았다.

Fig. 10과 Fig. 11을 비교해 볼 때 16개의 적은 수의 압전소자를 사용하는 경우에는 32개의 압전소자를 사용하는 경우에 비하여 초음파 빔의 근거리 음장에서 빔은 넓게 분산되었고, 32개의 많은 수의 압전소자를 사용하는 경우에는 16개의 압전소자를 사용하는 경우에 비하여 원거리 음장에서의 음압이 급격히 감소하였다. Fig. 12는 압전소자의 수가 32개, 초점거리 $f=100\text{mm}$, 조향각이 $\alpha=40^\circ$ 인 경우의 초음파 빔 특성 결과를 나타낸 결과이다. 본 결과에서 트랜스듀서 중심위치로부터 메인 로브 조향각의 반대방향으로 크기와 음압이 적은 사이드 로브가 나타났으며 이것은 조향각이 $\alpha=40^\circ$ 로 크게 증가하였기 때문이다. 초음파 빔의 근거리 음장에서 빔의 음압은 트랜스듀서의 중심으로부터 거리가 증가할수록 점차 감소하고 있으며 빔의 분산 정도는 빔의 폭이 일정함을 보이고 있다. 그리고 초음파 빔의 원거리 음장에서 빔은 점차 넓게 분산됨을 나타내었다. 즉, 앞의 Fig. 11과 동일한 32개의 압전소자를 사용한 결과이지만 초점거리가 $f=100\text{mm}$ 로 증가하였으므로 초점에서의 집중효과가 미소함을 나타내고 있다. 또한 앞의 Fig. 11의 결과에서 나타나지 않았던 메인 로브에서 좌우 대칭적으로 뻗어나온 사이드 로브가 Fig. 8과 9처럼 본 결과에서도 나타났다. 그러나 앞의

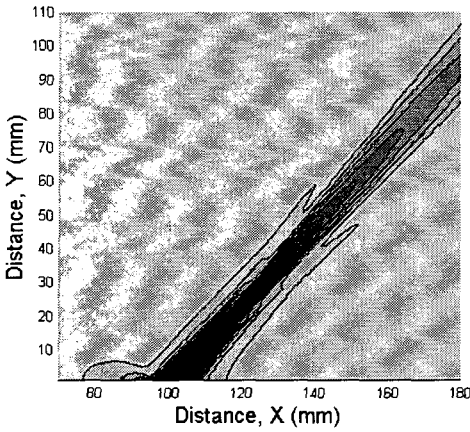


Fig. 12 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32 elements, $f=100\text{mm}$, $\alpha=40^\circ$, $d=0.5\lambda$)

Fig. 8과 9에서는 그 위치가 초점에서 나타났지만 본 결과에서는 초점 이전의 위치에서 나타났다.

Fig. 13은 압전소자의 수가 64개, 초점거리 $f=100\text{mm}$, 조향각 $\alpha=40^\circ$ 인 경우의 초음파 빔 특성 결과를 나타낸 결과이다. 조향각이 $\alpha=40^\circ$ 이므로 Fig. 12의 결과에서 처럼 트랜스듀서 중심위치로부터 메인 로브 조향각의 반대방향으로의 사이드 로브가 나타났으나 본 결과에서는 Fig. 12에서의 사이드 로브보다 그 크기가 작았다. 초음파 빔의 근거리 음장에서 빔의 음압은 트랜스듀서 중심위치에서부터 점차 감소하다가 초점위치 근처로 갈수록 다시 음압이 증가하였다. 그리고 초음파 빔은 넓게 분산되지 않으며 그 폭은 초점위치까지 좁게 집중되었다. 원거리 음장에서 초음파 빔은 넓게 분산되기 시작하였지만 Fig. 12처럼 넓지 않았고, 초점위치에서부터 음압은 점차 감소하였다. 특히 Fig. 8, 9, 10 및 12등의 결과에서 나타났던 메인 로브의 초점 부근위치에서 메인 로브방향의 좌우대칭으로 뻗어나온 사이드 로브는 Fig. 11의 결과와 동일하게 본 결과에서도 나타나지 않았다.

Fig. 10과 Fig. 11에 비하여 초점거리가 $f=30\text{mm}$ 에서 $f=100\text{mm}$ 로 증가한 Fig. 12와 Fig. 13을 비교하면 앞의 Fig. 11과 동일한 수의 압전소자를 사용하는 Fig. 12의 결과에서는 초점거리가 $f=100\text{mm}$ 로 증가하여 근거리 음장에서 빔이 분산되어 초점에서의 집중 효과가 약하였다. 64개의 압전소자를 사용한 Fig. 13의 결과에서는 근거리 음장에서 초음파

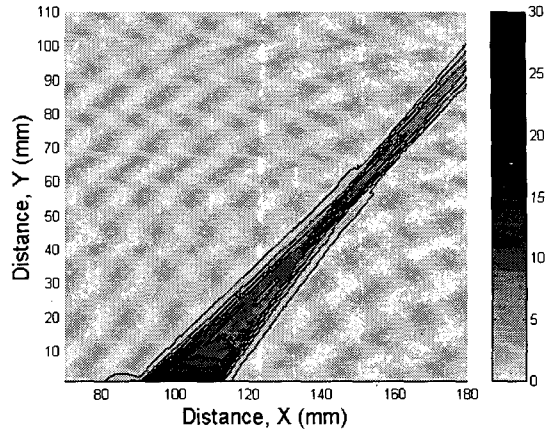


Fig. 13 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (64 elements, $f=100\text{mm}$, $\alpha=40^\circ$, $d=0.5\lambda$)

빔은 Fig. 12의 결과에 비교하여 빔은 넓게 분산되지 않았으며 트랜스듀서로부터 거리가 증가할수록 음압이 감소하다가 초점으로 근접할수록 다시 음압이 증가하였고, 원거리 음장에서 빔의 분산은 32개의 압전소자를 사용한 Fig. 12의 결과에 비교하여 넓지 않았다. 즉, 초점거리가 증가할수록 집중효과는 감소하고 이를 보완하기 위하여 압전소자의 수는 증대되어야 함을 보여주고 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 압전소자수의 증가는 장비 제작시 구성 회로의 복잡함과 제작비의 상승과 직결되므로 경제적 측면을 고려하여 적절한 압전소자의 수가 선택되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 초음파 빔 방향성 및 동적집속 특성을 이해하기 위하여 여러가지 초점거리 및 조향각에 대하여 압전소자의 수의 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 계산한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 초음파 빔의 조향각이 증가할수록 메인 로브의 빔 분산이 증가하며 음압도 감소하였다. 특히 조향각이 $30^\circ \sim 40^\circ$ 로 증가한 경우 근거리 음장에서 트랜스듀서 중심위치로부터 메인 로브의 반대 방향의 사이드 로브가 나타나며 조향각 증가에 따라 이 사이드 로브의 크기와 음압이 증가하였다.

- 2) 16개의 압전소자를 사용한 경우에 비하여 집속효과가 높은 32개의 압전소자를 사용한 경우의 초음파 빔 특성은 초점거리 이후의 원거리 음장에서 음압은 급격하게 감소하였다.
- 3) 32개의 압전소자를 사용한 경우의 초음파 빔은 초점거리가 $f=100\text{mm}$ 로 증가하였을 때 근거리 음장에서 폭이 일정한 빔의 분산을 나타내었고, 원거리 음장에서 빔은 점차 넓게 분산되었다.
- 4) 압전소자의 수가 64개로 증가된 경우에 큰 조향각에서 발생하는 트랜스듀서 중심위치로부터 메인 로브의 반대 방향으로 향한 사이드 로브의 크기가 감소하였고 근거리 음장에서 초점($f=100\text{mm}$)으로 갈수록 음압이 다시 증가하였다. 그리고 원거리 음장에서 음압이 감소하면서 약한 빔 분산을 나타내었다.
- 5) 초음파 빔의 집속효과가 높은 경우 즉, 32개의 압전소자를 사용한 경우에서 초점거리가 $f=30\text{mm}$ 로 짧거나, 또는 64개의 압전소자를 사용한 경우에는 메인 로브의 초점 위치 부근에서 나타나는 음압이 낮은 사이드 로브는 나타나지 않았다.
따라서 조향각 및 초점거리의 증가는 집속효과 감소의 요인이며 동일한 집속효과를 얻기 위해서는 초점거리가 증가할수록 압전소자의 수는 증대되어야 한다. 그러나 실제 장비구현시 구성회로의 복잡함과 경제적인 면을 고려하여 적절한 압전소자의 수가 선택되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 최상우, 이준현, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정", 대한기계학회 1997년도 추계학술대회 논문집A, pp. 35-40, (1997)
- [2] 최상우, 이준현, "초음파 판파와 신경회로망을 이용한 리벳홀 부위 균열 크기 평가", 한국비파괴검사학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp. 117-127, (1998)
- [3] W. A. K. Deutsch, A. Cheng and J. D. Achenbach, "Self-focusing of Rayleigh waves: simulation and experiment", Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, Vol. 17, pp. 1697-1704, (1998)
- [4] Ming Zhang and J. D. Achenbach, "Numerical simulation of self-focusing of an array on an interior crack", Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, Vol. 17, pp. 1705-1712, (1998)
- [5] B. D. Howard, "Focused array transducer system (FATS): ultrasonic testing applications at the department of energy's savannah river site", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13, pp. 1053-1059, (1994)
- [6] K. Solomon, M. Luttrell and J. Long, "The use of focused array transducers for improved titanium and other billet inspections", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 13, pp. 1069-1074, (1994)
- [7] L. Bisbee and S. Burns, "Enhanced ultrasonic examination of feedwater pipe-to-nozzle welds", Nuclear Plant Journal, pp. 42-53, March-April (1994)
- [8] McNab A. and M. J. Campbell, "Ultrasonic phased arrays for non-destructive testing", NDT International, Vol. 20(6), pp. 333-337, (1987)
- [9] H. P. Schwartz, "Development of a divided-ring array for three-dimensional beam steering in ultrasonic non-destructive testing: Theoretical and experimental results of a prototype", Materials Evaluation, pp. 951-957, August (1987)
- [10] 최상우, 이준현, "Phased Array 기법을 이용한 초음파 SH-wave 빔 조향에 관한 연구", 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집 A,

- pp. 47-52, (1998)
- [11] 최상우, 이준현, "Phased array 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자 수의 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성 해석 (제1보)", 한국비파괴검사학회 '98 추계학술대회 논문집, pp. 70-79, (1998)
- [12] 최상우, 이준현, 1998, "Phased array 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자의 간격 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성 해석 (제2보)", 한국비파괴검사학회 '98 추계학술대회 논문집, pp. 80-89
- [13] A. S. Birks and R. E. Green. Jr, Ultrasonic Testing, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7, (1991)
- [14] Shi-Chang Wooh and Yijun Shi, "Optimization of ultrasonic phased arrays", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 17, pp. 883-890, (1998)