

페이즈드 어레이 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자의 간격 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성 해석

최 상 우* · 이 준 현**
(1999년 7월 5일 접수)

Analysis of the Ultrasonic Beam Profile Due to Variation of the Inter-Element Spacing for the Phased Array Transducer

Sang-Woo Choi and Joon-Hyun Lee

Key Words: Ultrasonic wave(초음파), Phased Array Transducer(페이즈드 어레이 트랜스듀서), Pulse Delay Time(펄스 지연시간), Piezoelectric Element(압전소자), Main Lobe(메인 로브), Grating Lobe(그레이팅 로브), Side Lobe(사이드 로브)

Abstract

The phased array transducer has two distinct advantages. One is rapid scanning comparing with the conventional mechanical or manual scanning system. Therefore, output image is represented in real-time. The other is the dynamic focusing and the dynamic steering of ultrasonic beam. Only the delay times that are controlled electrically are used to focus and to steer beam without any lenses or wedges. In this study, the profile of the ultrasonic beam for the phased array transducer has been simulated in the Huygens principle with varying the inter-element spacing of the linear phased array transducer. From the result of this study, it was found that the ultrasonic beam spread wider as the inter-element spacing was decreased. However, the focusing effect was improved, even when the number of the element was not big. In addition, there was grating lobes that are constructed when the inter-element spacing is more than half wavelength. However, this grating lobe has lower amplitude than the main lobe.

1. 서론

구조물의 안전성 확보, 잔존수명 평가 및 효율적인 유지보수를 위하여 구조물 내부에 존재하는 결함 등의 정량적인 비파괴 평가가 필수적이다. 여러 가지 비파괴 평가 방법 중에서 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 재료 내부에 존재하는 결함의 신뢰성 있는 비파괴 평가 방법으로 널리

사용되고 있다.^(1~4) 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 현장에서 복잡한 절차 없이 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.

최근 초음파를 이용한 비파괴 평가에서 페이즈드 어레이(phased array)기법을 사용하는 방법이 주목받고 있다. 초음파에 있어서 페이즈드 어레이 기법은 다수의 압전소자(piezoelectric element)들을 배열하여 하나의 트랜스듀서로 만들고 Fig. 1과 같이 전자회로에 의하여 각각의 압전소자들에 대한 펄스(pulse)의 지연시간(delay time)을 조정함으로써 재료내부에 전파하는 초음파 빔의 동

* 부산대학교 대학원

** 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835

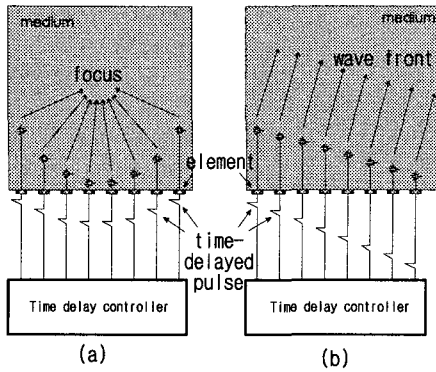


Fig. 1 Phased array transducer
(a) dynamic focusing (b) steering

적집속(dynamic focusing)과 조향(steering)을 가능하게 한다. 종래의 모터 구동에 의한 초음파 영상 장치는 B스캔(B-scan) 및 C스캔(C-scan) 이미지를 얻기 위하여 트랜스듀서의 기계적 구동에 많은 시간이 소요되는 반면 페이즈드 어레이 기법을 적용한 초음파 영상 장치는 트랜스듀서의 기계적 구동 없이 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 구성하는 각 압전소자에 대한 펄스의 지연시간을 전자회로에 의하여 제어하여 초음파 빔을 동적으로 집속 및 조향함으로써 재료의 단면부를 실시간, 고속으로 주사(scan)하고 영상화시켜 재료 내부에 존재하는 결함의 크기와 위치를 나타낼 수 있다. 특히 터빈 블레이드 등과 같이 탐상 구조물의 형상이 복잡한 경우 또는 구조물 내에 존재하는 결함위치부가 종래의 펄스에코법 등에 의하여 탐상하기 곤란한 경우에 있어서도 초음파의 적용이 가능하다.

한편 이와 같은 페이즈드 어레이 기법은 높은 비용 때문에 군사적 목적의 레이더(radar) 및 의료용 초음파 장비에 국한되어 적용되어 왔으나 극히 최근 일반 구조용 재료의 내부 결함 탐상에서 기존의 초음파 탐상법을 보완하기 위하여 기존의 초음파 탐상법으로 적용이 어려운 곳이나 고속 탐상이 요구되는 곳에서 페이즈드 어레이 기법의 적용이 시도되고 있다. 따라서 이에 대한 연구가 미국, 캐나다 등을 중심으로 시작되고 있으며,^(5~11) 특히 최근 국내에 있어서도 페이즈드 어레이 초음파 탐상용 장비를 외국으로부터 구입하여 원자력 발전설비에서의 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 이용한 비파괴 평가 기법 적용이 시도되고 있고 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 초음

파 빔의 특성 등에 대한 연구가 시작되었다.^(12~14) 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 조향 특성을 이해하여야 할 필요가 있다.

페이즈드 어레이 트랜스듀서의 설계조건은 주파수, 압전소자의 크기, 각 압전소자 사이 간격, 압전소자의 수 등 여러 가지 있으며, 본 연구자들은 이미 압전소자 수의 변화에 따른 초음파 빔의 조향 특성과 동적집속 특성을 연구하여 보고한바 있으며⁽¹³⁾ 이들 선행된 연구의 결과로부터 조향각 및 초점 거리의 증가는 집속효과 감소의 요인이고 초점거리가 증가한 경우에서 동일한 집속효과를 얻기 위해서는 압전소자의 수가 증대되어야 한다는 결론을 얻었다. 본 연구에서는 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 설계조건 중 한가지인 압전소자의 간격 변화에 따른 초음파 빔의 조향 특성과 동적집속 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 수평 횡파(SH-wave)로 가정하였다.

2. 페이즈드 어레이 기법의 원리

다수의 압전소자를 사용하는 어레이 트랜스듀서는 쐐기(wedge)의 사용없이 초음파 빔을 전자회로에 의한 각 압전소자에 입력되는 펄스의 지연시간을 제어하여 임의의 방향으로 조향하며, 임의의 지점에 집속시킬 수 있는 것으로 압전소자의 배열구조에 따라 선형(linear), 평면형(planar), 환형(annular)의 형태가 있고, 선형 어레이 트랜스듀서의 경우 주사방법에는 크게 두 가지 방법으로 선형주사(linear-scan)방식과 부채꼴주사(sector-scan)방식이 있다.⁽¹⁵⁾

선형주사방식은 Fig. 2의 (a)와 같이 어레이 트랜스듀서의 전체 압전소자 중에서 연속된 N 개만의 압전소자가 동작하여 주사하는 방법이며 전체

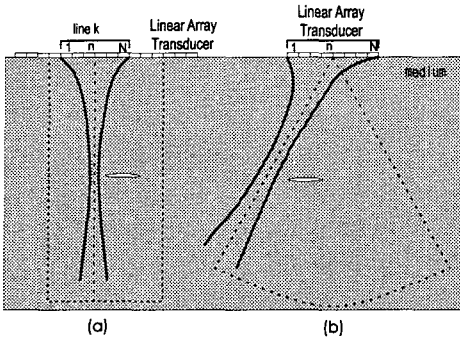


Fig. 2 (a) Linear scanning (b) Sector scanning

압전소자 중 N 개의 압전소자 구간은 압전소자를 한개씩 이동하여 선택되므로 점선으로 표시된 사각형 영역을 주사하는 방법이다. 부채꼴주사방법은 Fig. 2의 (b)와 같이 전체 N 개의 압전소자를 지연시간을 가진 펄스의 여기(excitation)에 의한 초음파 빔의 조향과 동적집속을 통하여 점선으로 표시된 부채꼴 영역을 주사하는 방법이다. 어레이 트랜스듀서의 압전소자들을 볼록한 원호 형태로 배열한 것을 리니어 컨벡스(linear convex)라고 부르며, Fig. 2의 (a)방식의 선형주사와 같은 방법으로 부채꼴 형태의 주사가 가능하다. 엄밀히 말할 때 페이즈드라 합은 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 구동 없이 임의의 방향으로 초음파 빔을 조향 및 집속 할 수 있다. 따라서 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 사용하여 기계적 구동 없이 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 시각에 초음파를 발생시킨다. 점원 형태의 각 압전소자에서 원형의 파면을 가진 각각의 초음파가 전파하게 되고 이들은 호이겐스 원리에 의해 하나의 파면으로 중첩되고 임의의 방향으로 전파하여 하나의 초점으로 집속된다. 즉, 일반적인 한 개의 압전소자를 사용하는 트랜스듀서는 굴절각이나 초점거리가 고정

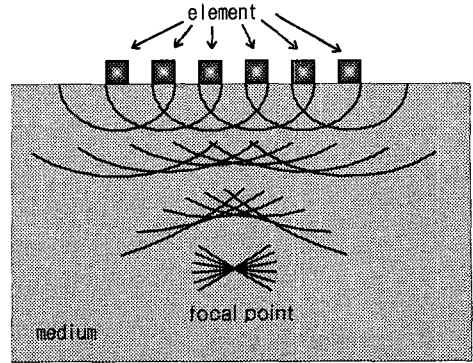


Fig. 3 Wavefront propagations and focusing from each element through delayed pulse

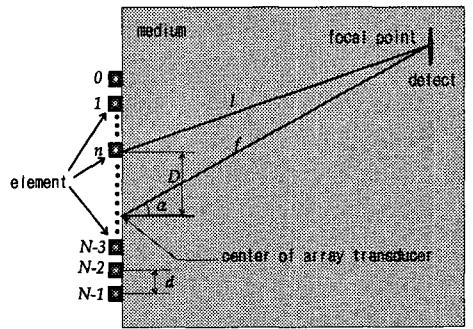


Fig. 4 Geometric lengths from elements of phased array transducer to focal point

되어 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 l 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.

$$D = \frac{2n - N + 1}{2} d \tag{1}$$

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

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.

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

3. 초음파 빔 전파 특성 해석 방법

3.1 단순화된 초음파 파형

일반적인 파동방정식은 다음 식 (4)와 같다.

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

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

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

페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자의 크기는 일반적으로 mm 단위 미만으로 상당히 폭이 좁다. 따라서, 각 압전소자는 점원이라고 가정하며 압전소자에서 발생된 초음파 펄스파는 각각의 압전소자를 중심으로 하는 원을 그리며 전파하게 된다. 이때 초음파 펄스 파는 다음 식 (7)과 같이 식 (6)의 Hanning 창(window)함수를 코사인 함수와 결합하여 단순화하였다. 여기서 A 는 진폭의 크기를 나타내고, k 는 파수(wave number), ω 는 주파수(frequency)이다.

$$\text{win}f(x, t) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{kx - \omega t}{5.0}\right) \quad (6)$$

$$u(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \text{win}f(x, t) \quad (7)$$

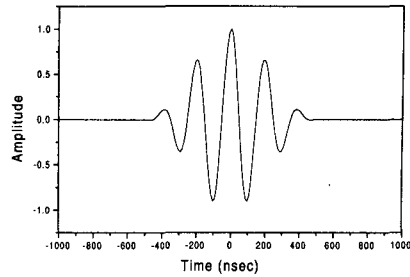


Fig. 5 Simplified waveform (5MHz)

Fig. 5는 식 (7)로 표현되는 단순화된 주파수 5MHz의 초음파 파형을 나타내며, 일반적인 한 펄스 입력에 대한 트랜스듀서에서 발생하는 초음파 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 압전소자 수가 적으면 빔의 형상이 넓게 퍼져서 집속 효과가 약하고, 압전소자의 수가 많으면 빔의 집속 효과는 향상되지만 실제 장비 구현시 회로가 복잡해지고 제작비가 증가하여 실용적이 못하게 된다. 본 연구에서는 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 압전소자 수에 대한 초음파 빔의 조향 및 집속 이해를 위하여 초음파 빔 전파의 수치적 계산을 수행하였다.

각 압전소자 사이의 간격은 넓을수록 빔의 지향성은 향상되지만 메인 로브(main lobe) 주위의 그레이팅 로브(grating lobe)의 영향이 강하게 나타나 정확한 탐상을 어렵게 한다. 이 간격을 지향성이 좋고 그레이팅 로브가 존재하지 않는 적당한 값으로 설정해야 하는데, Wooh등은 최근 그레이팅 로브의 영향을 억제하기 위해서는 초음파 파장의 반 이하의 값이 적절하다고 보고하고 있다.⁽¹⁶⁾

본 연구에서는 계산영역의 가로, 세로축인 X, Y축과 독립된 Z축으로 변위를 가지는 수평형파(SH-wave)를 이용하였고, 계산 조건으로 초음파의

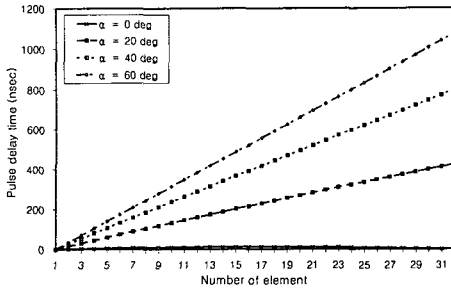


Fig. 6 Pulse delay time of phased array transducer at each element (32elements, $f=50\text{mm}$, $d=0.2 \lambda$)

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(center to center spacing) d 는 초음파 파장의 길이를 λ 라고 할 때 0.5λ 즉, 0.322mm 로 하였다. 이러한 조건을 기본으로 하고, 본 연구에서는 압전소자의 간격 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 비교하기 위하여 압전소자의 간격 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 진폭 값으로 초음파 빔의 형상을 나타내었다. 계산시의 해상도는 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ 영역을 1mm 단위로 나누었고, 시간은 5nsec 단위로 하여 한 파장을 시간역(time domain)에서 40개점으로 샘플링(sampling)한 효과가 있었다. 초음파 빔의 전파를 계산하는 것은 많은 처리 시간을 요구하므로 노드27개를 가지는 RS/6000 슈퍼컴을 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 앞의 식 (3)에 의해 계산된 32개의 압전소자를 사용한 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자들에서 초음파를 발생시키기 위해 트랜스듀서의 각 압전소자에 입력되는 펄스의 지연 시간을 나타낸 결과로서 각 압전소자 사이 간격은 초음파 파형의 파장길이(λ)의 0.2배인 거리인 $d=0.1288\text{mm}$ 이고, 초점 거리가 $f=50\text{mm}$ 일 때 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 인 경우의 결과이다. 조향각이 $\alpha=0^\circ$ 인 경우 16번 17번 압전

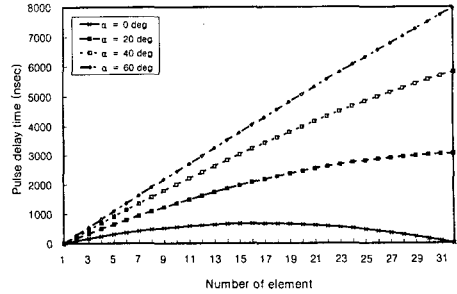


Fig. 7 Pulse delay time of phased array transducer at each element (32elements, $f=50\text{mm}$, $d=1.5 \lambda$)

소자는 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 지연시간 없이 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 각 압전소자 사이 간격이 초음파 파형의 파장길이의 1.5배 거리인 0.966mm 이고, 초점 거리가 $f=50\text{mm}$ 일 때 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ 인 경우 32개의 압전소자를 사용하는 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 각 압전소자에 입력되는 펄스의 지연시간을 나타낸 결과이다. Fig. 7의 결과에서는 Fig. 6의 결과에서와 같이 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=0^\circ$ 일때, 16번 17번 압전소자의 지연시간이 가장 길고, $\alpha=0^\circ$ 의 초음파 빔 조향각에서 1번과 32번의 압전소자의 지연시간은 가장 짧은 0이다. 그리고 초음파 빔의 조향각이 증가할수록 초점으로부터 1번, 32번 압전소자까지 거리의 차이가 증가하고, 1번 압전소자로부터 멀어지므로 32번 압전소자의 지연시간이 점차 증가하고 있다. 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 압전소자 간격이 초음파 파장길이의 0.2배인 경우의 펄스지연시간 결과인 Fig. 6과 파장길이의 1.5배인 경우의 펄스지연시간 결과인 Fig. 7의 결과를 비교해보면 Fig. 6의 결과에서 각 초음파 조향각에 대한 지연시간의 곡선은 곡률이 작

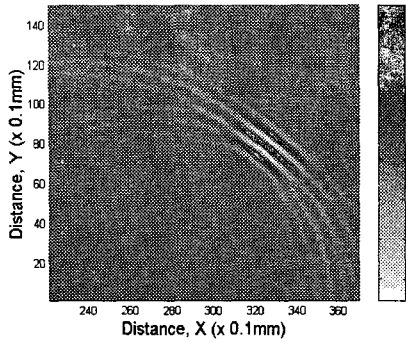


Fig. 8 Snapshot of ultrasonic wave propagation (32elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=40^\circ$, $d=0.2\lambda$, $\text{time}=4\mu\text{s}$)

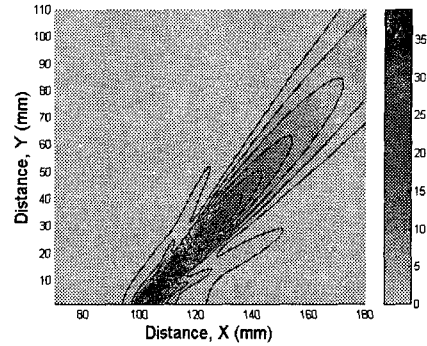


Fig. 9 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=40^\circ$, $d=0.2\lambda$)

고 거의 직선적이며, Fig. 7의 결과의 결과에서는 각 초음파 조향각에 대한 지연시간 곡선의 곡율이 크다. 이것은 페이즈드 어레이 트랜스듀서의 압전소자 간격이 넓어질수록 초음파 빔의 집속효과가 크게 나타나게 됨을 뜻한다. 그리고 각 곡선의 기울기는 초음파 빔의 조향각을 나타낸다.

Fig. 8은 Fig. 6의 펄스 지연시간 결과를 이용하여 압전소자의 수가 32개, 각 압전소자 사이 간격이 초음파 파장길이(λ)의 0.2배인 $d=0.1288\text{mm}$, 초점거리가 $f=50\text{mm}$, 빔의 조향각이 $\alpha=40^\circ$ 인 초음파의 파면 전파 순간을 나타낸 결과로 초음파가 최초로 전파되기 시작한 후 $4\mu\text{s}$ 되는 순간의 초음파 파면이다. X, Y축은 매질의 가로 및 세로를 나타내며 트랜스듀서의 중심위치는 X축에서 좌표값이 250되는 지점 즉, 25mm되는 지점이다. 어둡거나 밝을수록 진폭의 높은 절대값을 나타내며, 흑색은 깊은 음의 진폭을 가지는 골을 나타내며, 백색은 가장 높은 피크값을 나타내고 있다. 중간단계의 회색은 초음파 진폭값이 높지 않은 0부근의 값을 나타낸다. 본 결과에서 각 압전소자를 중심으로 하는 반원형의 초음파 파면은 호이겐스 원리에 의해 좌표값 (320,80)위치 부근에서 트랜스듀서 중심위치에서 40° 방향으로 전파하는 파면으로 중첩됨을 보여주었다. 이 파면에서 진폭값이 높은 중심부로 갈수록 곡율이 감소함을 나타내었다.

Fig. 9는 압전소자의 수가 32개이며 각 압전소자 사이 간격이 $d=0.1288\text{mm}(0.2\lambda)$ 이고 초점거리가 $f=50\text{mm}$ 인 앞의 Fig. 6의 펄스 지연시간중 초음파 빔의 조향각 $\alpha=40^\circ$ 인 경우의 초음파 빔 형

상의 특성을 나타낸 결과이다. X, Y축은 매질의 가로 및 세로를 나타내며 트랜스듀서의 중심위치는 X축에서 100mm지점이다. 이 결과는 앞의 Fig. 8과 같은 파면 전파 결과를 5nsec간격으로 계산하고 각 지점에서의 최대 진폭값을 추출한 것으로 각 지점에서 음압의 최대값을 나타내며 명도가 낮을수록 높은 음압을 나타낸다. 선행된 연구 결과에서 32개의 압전소자를 사용하는 페이즈드 어레이 트랜스듀서에서 각 압전소자 사이 간격이 $0.322\text{mm}(0.5\lambda)$ 인 경우 초음파 빔의 조향각 40° 의 결과에서 트랜스듀서 중심으로부터 메인 로브 방향의 반대 방향으로의 사이드 로브(side lobe)가 나타났지만⁽¹¹⁾ 압전소자 사이 간격이 0.1288mm 로 초음파 파장의 0.2배를 사용한 본 결과에서는 트랜스듀서 중심으로부터 메인 로브와 다른 방향의 사이드 로브는 나타나지 않았다. 그러나 메인 로브 중심축 좌우로 사이드 로브가 나타났고 이 사이드 로브의 폭은 좁고 음압은 낮았다. 메인 로브 빔은 근거리 음장에서 음압이 높게 나타났으며 초점으로 갈수록 빔이 넓게 분산(spreading)되며 음압이 감소하였다. 원거리 음장에서도 빔은 지속적으로 음압이 감소하고, 넓게 분산되었다. 즉, 압전소자 사이 간격이 초음파 파장의 0.2배로 좁을 때 $30^\circ\sim 40^\circ$ 이상의 큰 조향각의 경우에서 나타나는 트랜스듀서 중심으로부터 메인 로브 반대 방향인 사이드 로브의 영향은 감소시킬 수 있으나 초음파 빔의 분산이 심하여 낮은 집속효과를 나타내었다.

Fig. 10은 Fig. 7의 펄스 지연시간 결과 중에서 13번부터 20번까지의 압전소자에 대한 펄스지연

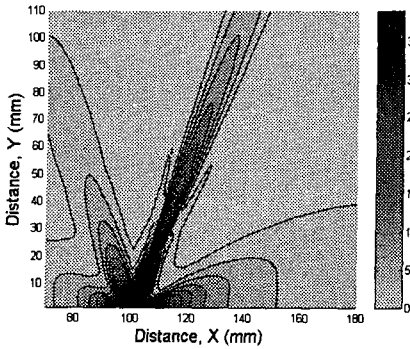


Fig. 10 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (8elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=1.5\lambda$)

시간을 이용하여 압전소자의 수가 8개, 각압전소자 사이 간격이 초음파 파장길이(λ)의 1.5배인 $d=0.966\text{mm}$, 초점거리가 $f=50\text{mm}$, 빔의 조향각이 $\alpha=20^\circ$ 인 초음파의 파면 전파 순간을 나타낸 결과로 초음파가 최초로 전파되기 시작한 후 $4\mu\text{s}$ 되는 순간의 초음파 파면이다. 좌표값 (290,110)부근의 영역은 진폭값이 가장 높고, 아래로 볼록한 파면을 나타낸다. 그리고 이 파면은 점차 초점으로 집속되어 메인 로브로 형성됨을 보여준다. 이 파면의 좌우로 다른 방향으로 전파되어 가는 파면을 볼수 있는데 이 파면은 메인 로브가 되는 파면에 비하여 그 음압이 낮았으며 메인 로브와 분리된 또 다른 로브를 형성한다.

Fig. 11은 압전소자의 수가 8개이며 각 압전소자 사이 간격이 $d=0.966\text{mm}(1.5\lambda)$, 초음파 빔의 조향각 $\alpha=40^\circ$ 이고 초점거리가 $f=50\text{mm}$ 인 앞의 Fig. 10과 같은 파면 전파 결과를 5nsec간격으로 계산하고 각 지점에서의 최대 진폭값을 추출하여 초음파 빔 형상으로 나타낸 결과이다. 트랜스듀서의 중심에서부터 20° 방향의 메인 로브가 나타났으며 앞의 Fig. 10에서와 같이 초음파 빔이 다른 방향으로 전파되는 로브 즉, 그레이팅 로브가 나타났다. 압전소자의 수가 적은 경우 초음파 빔은 넓게 분산되지만 본 결과에서는 각 압전소자 사이 간격이 초음파 파장의 1.5배로 넓기 때문에 8개의 적은 압전소자를 사용하여도 메인 로브에서의 초음파 빔의 분산은 넓지 않았다. 그러나 빔의 음압은 근거리 음장에서 원거리 음장으로 갈수록 음압의 세기가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 그레이팅 로브는 메인 로브에 비하여

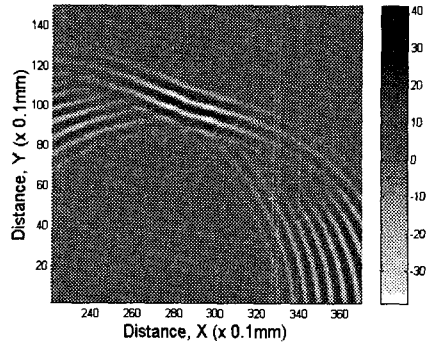


Fig. 11 Snapshot of ultrasonic wave propagation (8elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=1.5\lambda$, time= $4\mu\text{s}$)

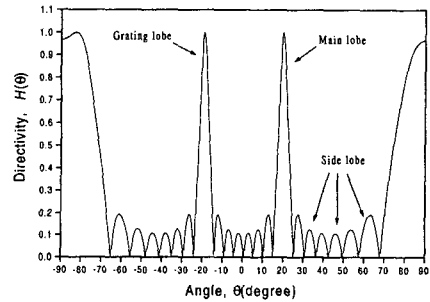


Fig. 12 Ultrasonic beam directivity (8elements, $f=50\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=1.5\lambda$)

음압이 낮았고, 넓게 분산되었다.

다음 식 (8)은 Woolh⁽¹⁶⁾의 논문에서 그레이팅 로브의 특성을 나타내기 위해 사용한 빔의 지향성 함수이다.

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin \left[\frac{\pi d (\sin \alpha - \sin \theta)}{\lambda} N \right]}{N \sin \left[\frac{\pi d (\sin \alpha - \sin \theta)}{\lambda} \right]} \right| \quad (8)$$

여기서 θ 는 트랜스듀서를 중심으로한 임의의 각도(angle)이고 $H(\theta)$ 는 임의의 각에서 지향성 함수값이다. 다음 Fig. 12는 압전소자의 수는 $N=8$, 초음파 빔의 조향각이 $\alpha=20^\circ$ 경우 식 (8)의 결과로 20° 에서 메인 로브가 나타나고 -20° 부근과 좌우로 -80° 그리고 90° 부근에서 그레이팅 로브가 나타남을 보여주었다. 이 결과와 앞의 Fig. 11과

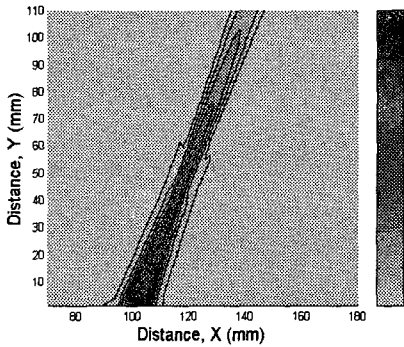


Fig. 13 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32elements, $f=100\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=0.5\lambda$)

비교해볼 때 그레이팅 로브가 나타나는 위치는 -20° 에서 동일한 결과를 나타내었지만, 그 이외의 그레이팅 로브의 각도에서는 본 연구의 결과와 오차가 있으며, 그레이팅 로브의 크기가 메인 로브의 크기와 동일하다는 것도 본 연구의 결과와 일치하지 않는 점이다. 이것은 식 (8)에서는 초점 거리에 대한 영향이 배제되어 있고 본 식의 유도를 위해서 이용된 파형은 연속파(continuous wave) 이나 본 연구에서는 초점거리가 적용되었고 초음파의 전파계산을 위하여 이용된 파형은 짧은 지속구간을 가지는 파형이기 때문이라고 사료된다.

Fig. 13은 압전소자의 수가 32개이며 각 압전소자 사이 간격이 $d=0.322\text{mm}(0.5\lambda)$, 초음파 빔의 조향각 $\alpha=20^\circ$ 이고 초점거리가 $f=100\text{mm}$ 인 경우의 초음파 빔 형상결과이다. 초음파 빔은 전체적으로 분산되지 않지만 초점에서 집속효과를 나타내지는 못하였다. 근거리 음장에서 초음파 빔의 음압이 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었지만 원거리 음장에서 음압은 지속적으로 감소하였다. 본 결과에서 초음파 빔이 집속효과를 나타내지 못하는 것은 앞선 연구 결과로부터 32개의 압전소자의 수에 비하여 초점거리가 멀기 때문이며 이와 같이 초점거리가 크게 증가한 경우 64개와 같이 보다 많은 수의 압전소자를 사용해야 하기 때문이다.

Fig. 14는 압전소자의 수가 32개이며 각 압전소자 사이 간격이 $d=0.966\text{mm}(1.5\lambda)$, 초음파 빔의 조향각 $a=20^\circ$ 이고 초점거리가 $f=100\text{mm}$ 인 경우의 초음파 빔 형상결과이다. 본 결과는 앞의 Fig. 13의 결과와는 달리 각 압전소자 사이 간격이 초

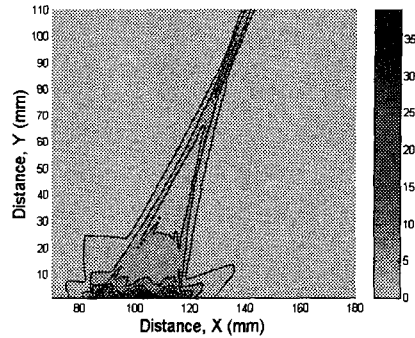


Fig. 14 Simulated ultrasound pressure field of phased array in medium (32elements, $f=100\text{mm}$, $\alpha=20^\circ$, $d=1.5\lambda$)

음파 파장의 1.5배로서 앞선 Fig. 11의 결과와 같이 메인 로브 주위에 그레이팅 로브가 나타났다. 그러나 Fig. 11의 결과와는 달리 그레이팅 로브의 크기는 작고 근거리 음장에서 넓게 분산되었으며 원거리 음장에서는 그 음압이 무시할 만큼 소실되었다. 특히 메인 로브는 Fig. 13의 결과와는 달리 근거리 음장에서 음압이 감소하였다가 초점위치에서 다시 음압이 증가하여 초점 이후에서 다시 감소하였다. 그리고 빔은 분산되지 않으며 초점까지 집속되는 경향을 나타내었으나, 초음파 빔의 음압은 전체적으로 낮았다. 따라서 압전소자의 수를 증대시키지 않고 각 압전소자 사이 간격이 넓은 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 사용하며 음압이 높게 발생되도록 하면 경제적으로 유리한 적은 수의 압전소자를 사용하는 초음파 페이즈드 어레이 시스템에서도 충분히 원거리 탐상이 수행되리라 기대된다.

5. 결론

본 연구에서 페이즈드 어레이 트랜스듀서에서의 초음파 빔의 방향성 및 동적집속 특성을 이해하기 위하여 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 구성하는 각 압전소자의 간격변화를 중심으로 그리고 초점거리와 조향각에 변화 및 압전소자 수의 변화에 따른 초음파 빔의 특성을 계산한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻게되었다.

압전소자 사이 간격이 초음파 파장의 0.2배인

경우 40°이상의 큰 조향각에서 나타나는 트랜스듀서 중심에서부터 메인 로브와 반대 방향의 사이드 로브의 영향은 감소시킬 수 있었으나 초음파 빔의 분산이 심하여 낮은 집속효과를 나타내었다. 즉, 각 압전소자 사이 간격이 반파장 보다 좁은 경우 메인 로브 주위의 사이드 로브의 영향은 적게 나타나지만 집속효과는 감소하였다.

압전소자 사이 간격이 초음파 파장의 1.5배로 증가한 경우 8개의 적은 압전소자를 사용하여도 높은 집속효과를 나타내었다. 그러나 메인 로브 좌우로 다른 방향의 그레이팅 로브가 나타났으며, 이 그레이팅 로브는 메인 로브에 비하여 음압이 낮았고, 넓게 분산되었다. 초점거리가 100mm로 증가되어 집속효과가 감소된 경우 압전소자 사이 간격을 초음파 파장의 1.5배로 증가시켜 집속효과를 향상시켰다. 이때 메인 로브는 초점에서 높은 집속효과를 나타내었고 그레이팅 로브는 근거리 음장에서 넓게 분산되었다. 즉, 각 압전소자 사이 간격이 반파장 보다 넓은 경우 집속효과는 증대되지만 그레이팅 로브가 발생하여 정확한 탐상을 어렵게 한다. 탐상 대상 지역이 원거리인 경우 그레이팅 로브가 나타나지 않는 각 압전소자 사이 간격이 반파장 정도의 페이즈드 어레이 트랜스듀서를 사용하는 경우 많은 수의 압전소자를 사용해야 하지만 각 압전소자 사이 간격이 넓은 트랜스듀서는 비교적 적은 수의 압전소자를 사용하여도 원거리에서는 그레이팅 로브의 음압이 무시할 만큼 감소하므로 원거리 탐상에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참고문헌

(1) Lee, Joon-Hyun, 1995, "Application of Ultrasonic Technique for Evaluation of JIC of High Manganese Steel at Low temperatures," *KSME Journal*, Vol 9, No. 1, pp. 1~7.
 (2) 이준현, 이진경, 조운호, 1998, "세라믹의 열충

격 손상거동 및 초음파 Lamb파를 이용한 비파괴적 손상평가," 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제12호, pp. 2278~2285.

- (3) 최상우, 이준현, 1997, "저면산란 초음파 신호 및 신경회로망을 이용한 균열크기 결정," 대한기계학회 1997년도 추계학술대회 논문집A, pp. 35~40.
 (4) 최상우, 이준현, 1998, "초음파 판파와 신경회로망을 이용한 리벳홀 부위 균열 크기 평가," 한국비파괴검사학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp. 117~127.
 (5) Deutsch, W.A.K., Cheng, A. and Achenbach, J.D., 1998, "Self-Focusing of Rayleigh Waves : Simulation and Experiment," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, pp. 1697~1704.
 (6) Ming Zhang and Achenbach, J.D., 1998, "Numerical Simulation of Self-Focusing of An Array on An Interior Crack," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, pp. 1705~1712.
 (7) Howard, B. D., 1994, "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.
 (8) Solomon. K., Luttrell, M. and Long, J., 1994, "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.
 (9) Bisbee, L. and Burns, S., 1994, "Enhanced Ultrasonic Examination of Feedwater Pipe-to-Nozzle Welds," *Nuclear Plant Journal*, pp.42~53.
 (10) McNab A. and Campbell, M. J., 1987, "Ultrasonic Phased Arrays for Nondestructive Testing," *NDT International*, Vol. 20(6), pp.333~337.
 (11) Schwartz, H. P., 1987, "Development of a Divided-Ring Array for Three-Dimensional Beam Steering in Ultrasonic Nondestructive Testing: Theoretical and Experimental Results of a

- Prototype," *Materials Evaluation*, pp.951~957.
- (12) 최상우, 이준현, 1998, "Phased Array 기법을 이용한 초음파 SH-Wave 빔 조향에 관한 연구," 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집 A, pp. 47~52.
- (13) 최상우, 이준현, 1998, "Phased Array 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자 수의 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성 해석 (제1보)," 한국비파괴검사학회 '98추계학술대회 논문집, pp. 70~79.
- (14) 최상우, 이준현, 1998, "Phased Array 트랜스듀서에 있어서 구성 압전소자의 간격 변화에 따른 초음파 빔 전파 특성 해석 (제2보)," 한국비파괴검사학회, '98추계학술대회 논문집, pp.80~89.
- (15) Birks, A.S. and Green, R.E. Jr, 1991, *Ultrasonic testing, Nondestructive testing handbook*, Vol. 7.
- (16) Shi-Chang Wooh, Yijun Shi, 1998, "Optimization of Ultrasonic Phased Arrays," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, pp. 883~890.