

위상배열 초음파기법을 이용한 강구조물의 비파괴 탐상

Nondestructive Inspection of Steel Structures Using Phased Array Ultrasonic Technique

신현재, 송성진, 장유현

Hyeon Jae Shin, Sung-Jin Song and You Hyun Jang

초 록 강구조물의 내부를 영상화 하여 비파괴 평가를 할 수 있는 위상배열 초음파 탐상 시스템을 의료용 영상진단기를 개조함으로써 개발하였다. 선택된 의료용 시스템은 64개의 독립된 송수신채널로 이루어져있으며 최고 128개의 배열초음파 탐촉자를 구동하여 초음파영상을 획득할 수 있도록 되어있다. 개조를 위해 주되게 고려된 사항은 속도의 변화로 인한 시스템의 개조와 강구조물에 적합한 탐촉자의 제작 그리고 비파괴 탐상에서 필요한 A-scan 신호를 획득하는 것이었다. 강구조물에 적합한 배열탐촉자를 설계하고 제작하기위해 경계회절파모델(Boundary Diffraction Wave Model)을 이용하여 초음파의 방사되는 음장을 시뮬레이션 하였다. 그리고 A-scan신호를 획득하기위한 장치를 제작하여 주어진 영상에서 선택된 주사선(scan line)의 RF신호를 획득하도록 하였다. 또한 강구조물에서 적절하게 송수신집속이 될 수 있도록 지연시간을 조절하였다. 개발된 시스템과 제작된 배열 탐촉자의 성능평가를 위해 인위결함 시험편에서 실험한 결과, 시험편의 내부의 영상과 선택된 주사선에 대한 A-scan신호를 실시간으로 획득할 수 있었다.

주요용어: 위상배열, 영상, 방사음장, 경계 회절파 모델

Abstract A phased array ultrasonic nondestructive inspection system is being developed to obtain images of the interior of steel structures by modifying a medical ultrasound imaging system. The medical system consists of 64 individual transceiver channels that can drive 128 array elements. Several modifications of the system were required mainly due to the change of sound speed. It was necessary to fabricate array transducers for steel structure and to obtain A-scan signal that is necessary for the nondestructive testing. Boundary diffraction wave model was used for the prediction of radiation beam field from array transducers, which provided guidelines to design array transducers. And a RF data acquisition board was fabricated for the A-scan signal acquisition along a selected scan line within an image. For the proper beam forming in the transmission and reception for steel structure, delay time was controlled. To demonstrate the performance of the developed system and fabricated transducers, images of artificial specimens and A-scan signals for selected scan lines were obtained in a real time fashion.

Keywords: phased array, image, radiation field, boundary diffraction wave model

1. 서 론

초음파탐상 시험은 결함에 민감하고 인체에 무해하며, 결함의 분류와 크기산정을 위해서 필요한 다양한 정보를

제공하기 때문에 널리 사용되는 비파괴 평가기술 중 하나이다. 그러나 A-scan 신호의 분석에 의존하는 기존의 초음파 검사는 숙련된 검사자의 경험과 지식에 의존하기 때문에, 검사자에 따라 검사결과가 달라진다. 그리고 또한,

이러한 초음파 탐상은 검사 결과가 검사 수행 당시의 제반 조건에 따라 달라지므로 향후 더욱 자세한 분석을 위해 검사 결과를 기록하고 보관하는 일이 용이하지 않다.

이러한 기존의 초음파 탐상 기법의 단점을 극복하고 보다 신뢰성 높은 검사를 수행하기 위한 대안으로 인식되어 최근 활발한 연구가 수행되고 있는 기법은 위상배열 초음파 탐상 기법이다. 위상배열 초음파 탐상 기법은 여러 개의 미소 발진자로 구성된 배열 탐촉자를 사용하여 시편내부로 진행하는 초음파의 전파 각도와 집속 위치를 전자적으로 조절한다. 그리고, 초음파 신호의 수신 시 각각의 미소 발진자가 받아들이는 신호를 전자적으로 처리하여 시험편 내부의 영상도 실시간으로 획득할 수 있다. 그래서 재래식 초음파탐상 시험으로는 검사가 어려운 복잡한 형상의 시험편도 위상배열 초음파 기법을 이용하면 쉽게 검사를 할 수 있을 뿐만 아니라 디지털화된 영상을 저장할 수 있으므로 향후 보다 정밀한 분석을 위한 자료도 제공할 수 있다.

위상배열 초음파탐상 기법은 인체 내부를 영상화 하기 위해 많은 연구와 개발이 진행되어[1-4], 현재 이 기술을 적용한 초음파 영상 진단 시스템이 일반 병원에도 많이 보급되어 있다. 그러나 장비의 가격이 고가일 뿐 아니라 강 구조물 내에서는 초음파의 전파양상이 인체에 비교하여 복잡하므로, 산업용 비파괴평가를 위해서는 극히 최근 에야 위상배열 기법에 대한 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구는 용접부의 검사를 위한 위상배열 시스템의 시험 적용[5]과 결함 영상의 품질 향상을 위한 동적 수신 집속 기법(dynamic receiving focusing method)의 개발 [6] 등이 있다. 위상배열 기법에 대한 기본 원리는 Kino 등에 의해 오래 전에 정리되었으나[7-8], 최근에는 비파괴 탐상을 위한 위상배열 탐촉자 설계에 대한 연구[9-12]를 중심으로 위상배열 초음파탐상 기법을 산업체에 적용하기 위한 연구가 시도되고 있다.

사실 위상배열 기법을 적용한 시스템을 처음부터 개발하기 위해서는 많은 노력과 비용을 필요로 한다. 그러나 이미 의료계에서 개발된 위상배열시스템의 구조를 파악하고 이를 적절히 개조하여 강구조물의 비파괴탐상을 위한 위상배열시스템을 개발하는 것은 개발에 필요한 시간을 단축시킬 뿐 아니라 이미 이루어놓은 기술을 다시 답습하는 필요 없는 수고를 하지 아니해도 된다.

본 논문에서는 강구조물의 내부를 영상화 하여 비파괴 평가를 할 수 있는 위상배열 초음파 탐상 시스템을 개발하기 위해 의료용 초음파 영상진단기를 개조하였다. 개조를 위해 주되게 고려된 사항은 속도의 변화로 인한 시스템의 개조와 강구조물에 적합한 탐촉자의 제작 그리고 비파괴 탐상에서 필요한 A-scan 신호를 획득하는 것이었다. 강구조물에 적합한 배열탐촉자를 설계하고 제작하기 위해 경계회절파모델(Boundary Diffraction Wave Model)을 이용하여 초음파의 방사되는 음장을 시뮬레이션 하였다. 그리고 A-scan신호를 획득하기 위한 장치를 제작하여 주어진 영상에서 선택된 주사선(scan line)의 RF신호를 획득하도록 하였다. 또한 강구조물에서 적절하게 송수신집속이 될 수 있도록 지연시간을 조절하였다. 끝으로 개발된 시스템과 제작된 배열 탐촉자의 성능평가를 위해 인위결함 시험편에서 실험한 결과, 시험편의 내부의 영상과 선택된 주사선에 대한 A-scan신호를 실시간으로 획득할 수 있음을 보였다.

2. 위상배열기법을 이용한 초음파 빔 조절

위상배열기법을 이용함으로써 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 배열탐촉자로부터 발생하는 초음파의 방사음장을 전자적으로 조절하여 초음파 빔을 원하는 방향과 위치로 조향(steering)하고 집속(focusing)하게 할 수 있다는 것이다. Fig. 1은 위상배열 기법을 이용한 초음파 빔의 조

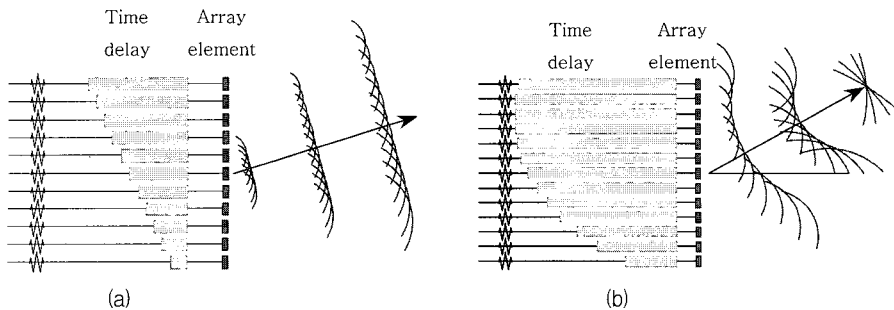


Fig. 1 Schematic diagrams of ultrasonic beam (a) steering, and (b) steering and focusing by phased array system

향 및 집속을 보여주는 개념도이다. 각각의 배열 소자(array element)는 서로 다른 시간에 가하여진 전기 펄스에 의해 초음파를 발진하는데, 각 소자의 발진시간을 적절히 조절함으로써 배열 탐촉자에서 나오는 초음파 빔의 집속 위치나 전파 각도를 변화시킬 수 있다. 이는 초음파 탐상에서 필수적으로 행하여지는 입사각의 변환을 자유롭게 함으로 검사시간을 단축시킬 뿐 아니라 여러 가지 입사각으로 탐상하게 함으로 검사의 신뢰도도 향상되게 한다. 또한 초음파를 원하는 부위에 집속하게 함으로 초음파의 발진에너지나 수신증폭을 높이지 아니하고 원하는 영역에 대한 민감도를 높일 수 있어 잡음(noise)을 최소화할 수 있다.

위상배열기법은 전자적으로 조향 방향과 집속 위치를 신속히 변화시킬 수 있도록 하기 때문에 초음파를 시편 내부에서 순차적으로 주사(scan)할 수 있게 한다. 이때 각 주사 방향에서 반사된 초음파 신호의 세기를 명암 또는 칼라로 나타내는 주사선(scan line)을 만들어 조합하면 시험편 내부의 2차원 영상을 획득할 수 있다. 초음파 영상의 구축에서 해상도를 향상시키는 것은 중요한 과제 중의 하나인데 해상도는 크게 축방향 해상도(axial resolution)와 측방향 해상도(lateral resolution)로 구별할 수 있다. 측방향 해상도는 기본적으로 배열 탐촉자로부터 발생하는 펄스(pulse)의 길이에 의해 결정되며, 측방향 해상도는 수신집속 방법과 송신시의 초음파 빔의 폭에 의해 결정된다. Fig. 2는 송신시에 적용하는 (a) 고정점 집속(one point fixed focusing)과 (b) 분할영역집속(zone based focusing)의 개념도이다. 분할영역집속 기법은 탐상하는 시편의 깊이를 여러 개의 분할영역으로 나누고 각 분할영역에 대해 송신 집속을 하는 기법으로서 하나의 주사선을 만들기 위해 여러 번 송신집속을 하여야 하지만 고정점 집속에 비해 초음파 빔의 크기를 줄일 수 있어 해상도가 높아진다. 또한, 탐촉자에 가까운 영역에서는 발진 되는 배열소자의 수를 줄이고 탐촉자에서 멀리 떨어진 곳에서는 발진 소자의 수를 늘이는, 이른바 동적 구경(dynamic aperture) 기법을 채택함으로써 위치 변화에 따른 초음파 빔의 방사 세기를 동적으로 조절할 수 있다.

이상과 같이 위상배열기법을 이용하면 발생하는 초음파의 빔을 자유롭게 조절할 수 있어 재래식 방법으로는 얻을 수 없는 결함의 영상을 획득할 수 있을 뿐만 아니라, 결함의 위치를 직관적으로 파악할 수 있게 하고 정밀하게 측정하게도 하여 비파괴탐상의 객관적 신뢰도를 크게 높일 수 있다. 또한, 재래식 초음파 검사를 적용할 경

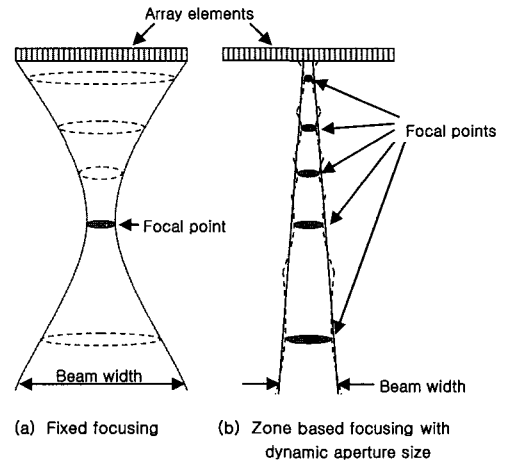


Fig. 2 Schematic representation of transmitted beam widths in cases of (a) one point fixed focusing and (b) zone based focusing with dynamic aperture size

우 결과의 해석이 까다로운 형상이 복잡한 구조물의 검사도 가능하게 된다.

3. 위상배열 초음파 비파괴 탐상 시스템의 개발

강구조물의 비파괴 탐상용 위상배열 초음파 탐상기를 개발하기 위해 채택한 전략은 의료용 초음파 영상진단기를 개조하는 것이었다. 사실 의료용 초음파 영상진단기는 위상배열 기법을 적용한 시스템으로 현재 많은 병원에 보급되어 매우 유용하게 사용되고 있다. 그래서 강구조물의 비파괴탐상용으로 개조하기에 적합한 의료용 초음파 영상진단기를 선택하여 그 하드웨어(H/W)시스템을 이용하면 수십 개의 초음파송수신자와 A/D변환기 등의 기본적인 H/W를 만드는 노력과 비용을 절감할 수 있다. 본 연구에서 선택한 의료용 초음파 영상진단기는 (주메디슨에서 개발한 SA8800으로 64개의 독립된 초음파 송수신자와 A/D변환기를 가지고있으며 진동수의범위가 1MHz에서 10MHz 사이에서 작동하는 것으로 강구조물의 비파괴 탐상용으로 개조하기에 적합한 것이었다.

초음파의 속도가 인체에서는 1540m/s 이고 강구조물에서는 5920m/s 이기 때문에 의료용 초음파 영상진단기를 산업용으로 개조하는 작업은 소프트웨어(S/W)의 여러 부분에서 수행되어야만 된다. 그리고 의료용에서는 필요 없는 RF 신호가 강구조물의 비파괴탐상에는 유용하게 사용됨으로 RF신호의 획득을 위한 H/W가 추가되어

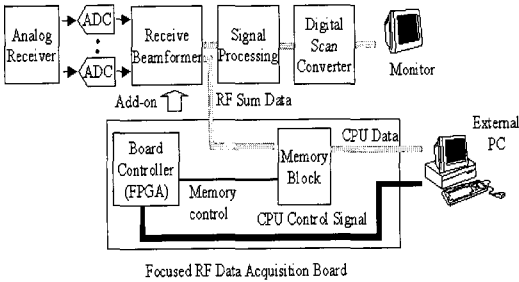


Fig. 3 Block diagram of RF data acquisition board attached on beamforming board

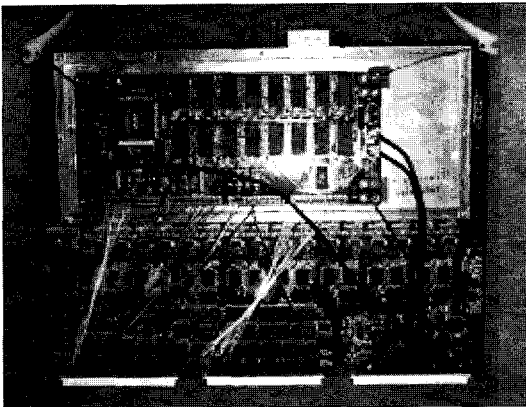


Fig. 4 RF board attached on beamforming board

야 한다. 또한 위상배열 탐촉자는 강구조물에 적합하게 새롭게 설계되어 제작되어야 한다.

Fig. 3은 SA8800의 H/W에 추가된 RF신호 획득 장치(RF board)의 개념도를 보여주고 있다. 배열탐촉자에서 수신된 신호는 A/D 변환기를 거쳐 수신집속(receive beamformer)과정에서 선택한 방향에 대한 초음파 신호를 만들게 되는데 이 신호가 바로 비파괴탐상에 사용되는 RF신호 즉 A-scan 신호이다. 그래서 RF board를 수신집속을 하는 beamformer board 에 장착하여 RF 신호를 PC의 기억장치에 전송하게 하였고 PC에서 A-scan 신호를 재생하게 하였다. Fig. 4는 실제로 제작된 RF board 가 beamforming board에 장착된 것을 보여주고 있다.

S/W에서 주되게 추가된 것은 A-scan 신호를 재생하는 프로그램이었는데, 이는 선택한 주사선에 대한 A-scan신호를 RF board에서 받아 실시간으로 재생하게 하였다. 그리고 강구조물의 속도에 적합하게 송수신집속을 할 수 있도록 하는 지연시간을 계산하여 기존의 프로그램을 변경하였다.

4. 위상배열 초음파 탐촉자의 방사음장 모델링

4.1. 방사음장 모델링

위상배열탐촉자는 방사되는 초음파 빔을 결정하는 중요한 부품으로 피검체내에서 진행되는 초음파의 속도에 따라 설계를 하고 제작하여야 한다. 강구조물에 적합한 탐촉자를 제작하기 위하여 초음파의 방사음장을 효율적으로 계산할 수 있는 경계 회절파 모델(Boundary Diffraction Wave Model)을 선택하였다.

단일 평면 피스톤 형태의 탐촉자 면으로부터 방사되는 음장의 계산은 탐촉자 면을 크기가 충분히 작은 미소요소로 분할하고, 각각의 미소요소로부터 발진되는 구면파를 중첩 시킴으로써 계산할 수 있다는 Rayleigh-Sommerfeld 적분법으로부터 시작한다[13]. 그러나, 이러한 Rayleigh-Sommerfeld 적분법은 2차원 면적분을 수행해야 하므로 계산의 정확성을 위해서 미소요소를 충분히 작게 해야 하며, 그 경우 계산 시간이 너무 많이 소요된다는 단점이 있다[14]. 그런데 이러한 면적분을 Stoke's theorem을 이용하면 식 (1)에 나타난 1차원 선적분으로 변환시킬 수 있는데, 이렇게 변환시켜 수치 계산 시간을 획기적으로 줄인 모델이 경계 회절파 모델(Boundary Diffraction Wave Model:BDWM)이다[15].

$$p(\mathbf{x}, \omega) = \rho c v_0 \left[\Theta \exp(ikz) - \frac{1}{2\pi} \int_C \frac{\exp(ikr_e)}{r_e} \frac{(\mathbf{n} \times \mathbf{e}_r) \cdot d\mathbf{s}}{1 - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_r)^2} \right] \quad (1)$$

$$\Theta = \begin{cases} 1 & \text{for } \mathbf{y}_0 \text{ in } S \\ 1/2 & \text{for } \mathbf{y}_0 \text{ on } C \\ 0 & \text{for } \mathbf{y}_0 \text{ outside } S \end{cases}$$

식 (1)에 나타난 여러 기호들의 정의를 Fig. 5에 도식적으로 나타내었는데, \mathbf{x} 는 매질내의 임의의 점으로서 방사음장을 측정하는 지점이며, \mathbf{y}_0 는 \mathbf{x} 에서 탐촉자 면

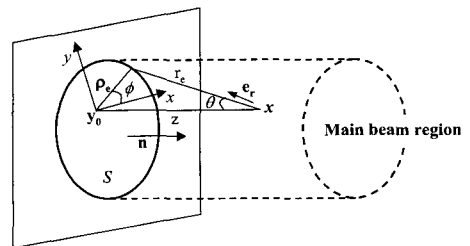


Fig. 5 Geometrical terms when pressure is evaluated at a point \mathbf{x}

이 포함된 평면에 내린 수선이 그 평면과 만나는 점이며, ρ_e 는 y_0 에서 탐촉자 가장자리의 한 점까지를 연결하는 벡터이며, ϕ 는 ρ_e 와 x 축이 이루는 각도이며, r_e 는 x 에서 탐촉자 가장자리의 한 점을 연결하는 직선의 거리이다. 그리고, \mathbf{n} 은 탐촉자 면에 수직인 방향(z 방향)의 단위 벡터, θ 는 r_e 와 \mathbf{n} 과의 각도, k 는 파수, c 는 매질 내 파의 전파 속도, ρ 는 매질의 밀도 v_0 는 초음파를 방사하는 탐촉자 면의 속도이다.

식 (1)에 의해 표현되는 경계 회절파 모델은 초음파 탐촉자의 원거리 뿐만 아니라 근거리 음장을 포함한 전체 음장을 3차원적으로 정확히 계산해 준다는 점에서, 기존 연구자들이 채택한 모델[12]의 한계를 크게 극복한 모델이다. 또한, 경계 회절파 모델은 원형 탐촉자 뿐만이 아니라 폐곡선으로 닫힌 임의의 단면 형상을 갖는 탐촉자의 가장자리를 따라 선적분을 수행함으로써, 임의 단면을 가진 탐촉자에 대한 방사음장의 계산을 매우 빠르게 수행할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 장점을 이용하여, 먼저 위상배열 초음파 탐촉자를 구성하는 사각형 단면의 미소 발진자에서 나오는 방사음장을 계산한 뒤, 각 미소 발진자에서 나온 음장에 적절한 시간 지연을 적용하여 중첩 시킴으로써, 위상배열 탐촉자로부터 나오는 초음파 빔의 전체 음장을 계산하였다. 이때, 각 미소 발진자에 적용하는 지연 시간을 적절히 조절함으로써, 전체 음장을 원하는 대로 조향 또는 집속시켰다.

4.2. 시뮬레이션

위상배열 초음파 탐촉자의 방사 음장 시뮬레이션을 위해 필요한 위상배열 초음파 탐촉자의 설계 인자들에 대한 사양을 Fig. 6에 나타내었다. 위상배열 탐촉자의 미소 요소 수는 총 64 개이며, 각 소자의 크기는 $0.2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 이고, 소자 중심간의 거리는 0.3 mm 이다. 중심주파수는 7.5 MHz 이다. 따라서 강 구조물 속에서 종파의 파장은 약 0.79 mm 가 된다. 각 소자간의 틈새(Inter element gap)를 0.1 mm 로 하여 주변 발진자와의 전기적 상호 작용(cross-talk)을 줄일 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 시뮬레이션 연구에서 위상배열 탐촉자 빔을 조향 집속시킨 10 개 위치를 나타내고 있다. 이 점들은 탐촉자의 중앙을 지나는 수직면 상에 위치하고 있으며, 탐촉면에서 깊이 방향으로 10 mm 간격으로 5 개(F1-F5), 그리고 깊이 50 mm 위치에서 측방향으로 10 mm 간격으로 5 개(F6-F10)로 총 10 개이다. 이 점들은 모두 선

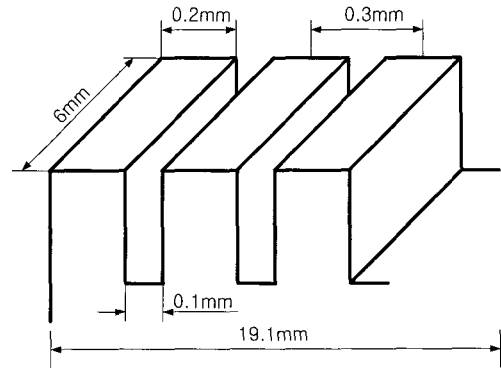


Fig. 6 Geometry of an array transducer

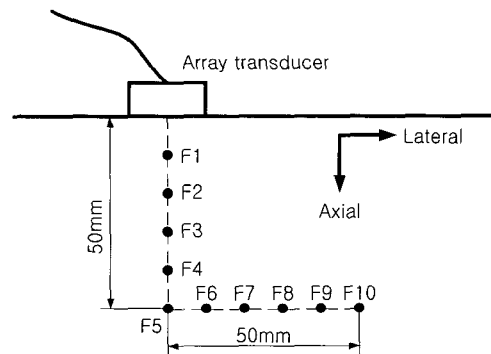


Fig. 7 Focal points in a steel specimen

정된 탐촉자의 근거리 음장 영역 내에 포함되어 있다. 시뮬레이션 연구에서는 초음파 빔이 각 집속에 집속 되도록 적절한 시간 지연을 각 미소 발진자에 적용하였는데, 예를 들어, Fig. 7의 F10 지점의 경우, 집속 깊이 50 mm , 조향 각도 45° 가 되도록 조향 집속한 것이다.

Fig. 8은 시간지연 없이 방사된 음장과 F2, F5, F10에 조향 집속하여 방사한 음장을 모사한 결과를 보여준다. 빔이 45° 로 조향 된 경우에도 근거리 음장에서 허상 신호를 생성하는 그레이팅 로브(grating lobe)의 발생 없이 집속이 잘 되는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6에 나타난 위상배열 탐촉자의 설계 변수들이 적절히 설정되었음을 의미하는데, 이러한 설계 변수들은 여러 가지 다양한 조건으로 방사음장을 모사한 연구 결과를 기초로 설정된 것이다. 또한 Fig. 8에 나타난 음장을 살펴보면, 집속점이 탐촉면에 가까울수록 집속점 이후에서 빔이 좌우로 빨리 퍼지는 것을 알 수 있다. 또한 집속 깊이가 깊어질수록, 그리고 같은 집속 깊이에서는 조향 각이 커질수록, 집속 점의 측방향 크기가 커짐도 알 수 있다.

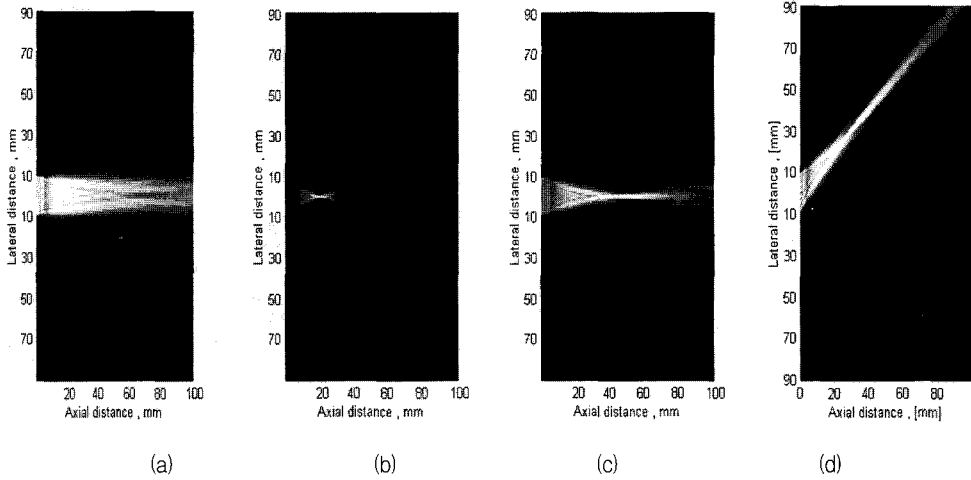


Fig. 8 Radiation fields from the array transducer when the beam is focused at (a) infinity without steering, (b) F2, (c) F5, and (d) F10 by electronic delay time

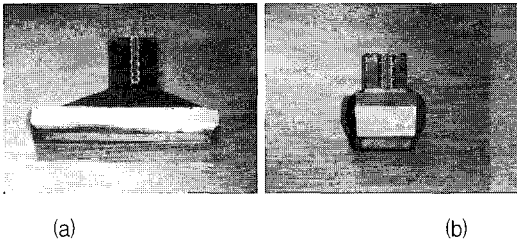


Fig. 9 The array transducers having the center frequency of 7.5 MHz. (a) Array transducer having 128 elements for linear scan (b) Array transducer having 64 elements for sectorial scan

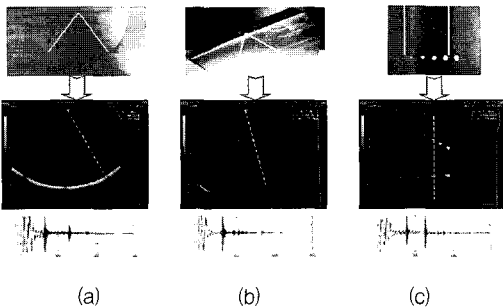


Fig. 10 Experimental results of phased array ultrasonic techniques showing images and A-scan data for the selected scan lines

5. 위상배열 탐촉자의 제작 및 성능평가실험

Fig. 9는 모델링을 기초로 제작된 위상배열 초음파 탐촉자 들이다. 이 탐촉자들의 중심 주파수는 7.5MHz이고, Fig. 9(a) 의 경우에는 128개의 미소 발진자로 구성되어 linear scan을 하도록 제작되었고, (b) 의 경우에는 64개의 미소 발진자로 구성되어 sectorial scan을 하도록 제작되었다.

Fig. 10은 제작된 탐촉자를 이용한 결합 검출 실험의 결과를 보여준다. 인위적으로 제작된 드릴 구멍을 가지고 있는 각 시험편의 단면영상을 보여준 결과와 선택한 주사선에 대한 A-scan 신호를 보여주고 있다. Fig. 10(a) 와(b)는 Fig. 9(b)에 보인 탐촉자를 이용하여 sectorial scan을 한 결과이고 Fig. 10(c)는 Fig. 9(a)에 보인 탐촉자를 이용하여 linear scan을 한 결과이다. 각 영상과 A-scan신호는 실시간으로 획득될 수 있었다. 그리고 영상을 이용하여 결합의 위치를 직관적으로 파악할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 의료용 초음파 영상진단기를 산업용 비파괴 탐상 장치로 개조하여 개발하였다. 경계 회절과 모델을 기초로 위상배열 탐촉자의 3 차원 방사음장을 계산할 수 있는 모델링 기법을 확립하였고 이를 바탕으로 위

상배열 초음파 탐촉자를 설계하고 제작 하였다. 제작된 탐촉자와 개발된 위상배열 초음파탐상 시스템을 이용하여 드릴 구멍을 가진 시편에서 결함 검출 실험을 수행하여 결함의 영상과 A-scan 신호를 실시간으로 획득하였다. 향후 영상과 A-scan 신호의 분석으로 결함의 종류와 정확한 크기를 결정하는 기법을 개발할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가중점연구개발사업의 하나인 인위재해방재기술개발사업과 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Gehlbach, S. M. and Alvarez, R. E., "Digital Ultrasound Imaging Techniques using Vector Sampling and Raster Line Reconstruction", *Ultrasonic Imaging*, Vol. 3, pp. 83-107, (1981)
- [2] Mucci, R. A., "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms", *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing*, ASSP-32, pp. 548-558, (1984)
- [3] Perterson, D. K. and Kino, G. S., "Real-time Digital Image Reconstruction: A Description of Imaging Hardware and an Analysis of Quantization Errors", *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* SU-31, pp. 337-351, (1984)
- [4] Kim, J. H., Song, T. K., and Park, S. B., "A Pipelined Sampled Delay Focusing in Ultrasound Imaging Systems", *Ultrasonic Imaging* 9, pp. 75-91, (1987)
- [5] Lamarre, A., Moles, M., Lupien, V., "Phased Array Ultrasonic Inspection of Friction Stir Weldments", *26th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, eds., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 19B, pp. 1333-1348, (1999)
- [6] Hwang, J. S., Shin, H. J., Song, S. J., Song, T. K., "Digital Phased Array Ultrasonic Inspection system with Dynamic Focusing", *26th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, eds., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 19A, pp. 1087-1093, (1999)
- [7] Kino, G. S., *Acoustic waves : devices, imaging, and analog signal processing*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1987)
- [8] Macovski, A., "Ultrasonic Imaging using Arrays", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 4, pp. 484-495, (1979)
- [9] Azar, L., Wooh, S. C., "Experimental Characterization of Ultrasonic Phased Arrays for the Nondestructive Evaluation of Concrete Structures", *Materials evaluations*, Vol. 75, No. 2, pp. 134-140, (1999)
- [10] Clay, A. C., Wooh, S. C., Azar, L., Wang, J., "Experimental study of Phased Array Beam Steering Characteristics", *Journal of NDE*, Vol. 18, No. 2, pp. 59-71, (1999)
- [11] Song, S. J., Shin, H. J., Jang, Y. H., "Ultrasonic Phased Array Transducers for Nondestructive Evaluation of Steel Structures", *26th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, eds., D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Vol. 19A, pp. 1079-1086, (1999)
- [12] Wooh, S. C., Shi, Y., "A Simulation of the Beam Steering Characteristics for Linear Phased Arrays", *Journal of NDE*, Vol. 18, No. 2, pp. 39-57, (1999)
- [13] Schmerr, L. W. Jr., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, a Modeling Approach*, Plenum Press, New York, pp. 167-181, (1998)
- [14] 송성진, 김학준, "단일 매체에서의 평면 초음파 탐촉자의 방사 음장 모델링 기법", *비파괴검사학회지*, 제 20권 제2호, pp. 91-101, (2000)
- [15] Schmerr, L. W. Jr., Sedov, A., Lerch, T. P., "A Boundary Diffraction Wave Model for a Spherically Focused Ultrasonic Transducer", *The Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 101, No. 3, pp. 1269-1277, (1997)