

# 강 구조물의 비파괴검사를 위한 위상배열 초음파 기술

송성진 · 신현재 · 장유현

(성균관대학교 기계공학부 및 산업설비 안전성평가 연구센터)

## 1. 머리말

강 구조물에 내재한 결함을 찾기 위한 초음파 탐상 시험(ultrasonic testing : UT)은 결함에 민감하고 방사선 방출이 없어 인체에 무해하며, 결함의 분류와 크기산정을 위해서 필요한 다양한 정보를 제공하기 때문에 널리 사용되는 비파괴 평가(nondestructive evaluation : NDE) 기술 중에 하나이다. 그러나 재래식 초음파 검사는 검사 장비에 나타난 초음파 신호를 숙련된 검사자의 경험과 지식에 의존하여 분석하기 때문에 검사자에 따라 검사결과가 달라진다. 또한, 재래식 초음파 탐상은 검사 결과가 검사 수행 당시의 제반 조건에 따라 달라지므로 향후 더욱 자세한 분석을 위해 검사 결과를 기록, 보관하는 일이 용이하지 않다.

이러한 재래식 초음파 탐상 기법의 단점을 극복하고 보다 신뢰성 높은 검사를 수행하기 위한 매우 효율적인 대안으로 인식되어 최근 활발한 연구가 수행되고 있는 기법이 바로 위상배열 초음파 탐상(phased array ultrasonic inspection : PAULI) 기법이다. 위상배열 초음파 탐상 기법은 여러개의 미소 발진자로 구성된 배열 탐촉자를 사용하여 시편내부로 진행하는 초음파를 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 디지털화 된 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,<sup>(1-4)</sup> 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 최근에서야 위상배열 기법에 대한 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구는 용접부의 검사를 위한 위상배열 시스템의 시험 적용<sup>(5)</sup>과 결함 영상 품질 향상을 위한 동적 수신 집속 기법(dynamic receiving focusing method)의 개발<sup>(6)</sup> 등이 있다. 물론, 위상배열 기법에 대한 기본 원리는 Kino 등에 의해 오래 전에 정리되었으나,<sup>(7,8)</sup> 최근에서야 비파괴 탐상을 위한 위상배열 탐촉자 설계에 대한 연구<sup>(9-12)</sup>를 중심으로 위상배열 초음파탐상 기법의 산업 적용을 위한 연구가 시도되고 있다.

현재 저자들은 강 구조물의 비파괴 평가에 적용하기 위한 위상배열 초음파 탐상(phased array ultrasonic inspection PAULI) 시스템을 개발하기 위해 의료용 초음파 진단 장비를 개조하는 연구를 수행하고 있다. 개조 개발의 목표는 결함의 영상뿐만 아니라 신경회로망을 이용해서 결함의 종류와 크기에 대한 정보도 실시간으로 제공하는 지능형 위상배열 초음파 탐상 시스템의 개발에 있는데, 이 시스템에 사용될 위상배열 탐촉자도 함께 개발하고 있다.

본 논문에서는 현재 개조 개발 중인 위상배열

초음파 탐상 시스템과 배열 탐촉자의 방사 음장을 모델링에 대해 논의하고, 개발된 시스템을 이용하여 인공 결함이 내재된 시험편 내부를 영상화한 결과를 제시하고자 한다. 저자들의 연구에서 개조를 위해 채택된 의료용 시스템은 SA-8800으로 (주) 메디슨에서 최근 개발한 디지털 초음파 영상진단 장치인데, 저자들은 강 구조물에 적용하는데 적합하도록 필요한 하드웨어와 소프트웨어를 개발하여, 개조된 시스템이 시험편 내부의 영상과 함께 RF 파형 형태의 결함 신호도 동시에 제공하도록 하였다. 또한, 위상배열 탐촉자로부터 나오는 방사음장 시뮬레이션을 위해, 수치계산에 매우 효율적인 경계 회절과 모델(boundary diffraction wave model: BDWM)을 기초로 한 3차원 방사음장 모델을 확립하고, 이를 이용하여 위상배열 탐촉자의 방사 음장을 시뮬레이션 하였다. 이러한 모델링 연구를 기초로 위상 배열 탐촉자를 설계, 제작하고 인공결함을 가진 시편에서의 결함검출 실험을 수행하였다

## 2. 위상배열 초음파탐상 기법

초음파 탐상에서 민감도는 결함으로부터 반사되어 돌아오는 초음파의 에너지에 의존한다. 반사되는 초음파의 신호를 증가시키는 방법은 첫째, 탐촉자로부터 발진하는 초음파의 에너지 자체를 증가시키는 방법이 있고, 둘째는 발진 초음파의 에너지를 증가시키지 않고 결함부위에 초음파를 집중함으로써 집중부위에서 반사되는 초음파 에너지만을 증가시키는 것이다. 첫번째 방법은 잡음(noise)를 함께 증폭되는 반면 두 번째 방법은 결함신호만 증폭됨으로 신호 대 잡음 비 면에서 두 번째 방법이 효과적이다.

위상배열 기법은 초음파를 원하는 부위에 전자적으로 집중 시키는 데, 그림 1은 위상배열 기법을 이용한 초음파 빔의 조향 및 집속을 보여주는 개념도이다. 각각의 배열 소자(array element)는 서로 다른 시간에 전기 펄스에 의해 초음파를 발진하는데, 각 소자의 발진시간을 적절히 조절함으로써 배열 탐촉자에서 나오는 초음파 빔의 집속 위치나 전파 각도를 변화시킬 수 있다. 이러한 전자적 조향과 집속 기능은 시편의 내부를 여러 가지 입사각으로 검사할 경우 매우 유용하다. 그리고 전자적으로 집속 위치를 신속히 변화시킬 수 있기 때문에 여러 점에서 돌아오는 신호를 조합

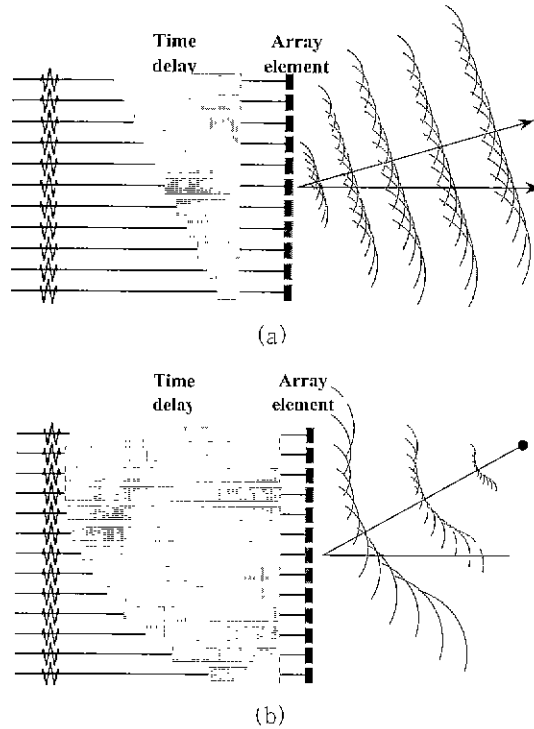


그림 1 위상배열 기법을 이용한 초음파 빔의 (a) 집속 및 (b) 조향 원리.

하여 시험편 내부의 2차원 영상을 실시간으로 획득할 수 있다.

초음파 영상의 구축에서 해상도를 향상시키는 것이 중요한 과제 중의 하나인데, 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, 축방향 해상도는 수신집속 방법과 송신시의 초음파 빔의 폭에 의해 결정된다. 그림 2는 송신시에 적용하는 (a) 고정점 집속(one point fixed focusing)과 (b) 동적구경을 이용한 분할영역집속(zone based focusing with dynamic aperture)의 개념도이다. 분할영역 집속 기법은 탐상하는 시편의 깊이를 여러 개의 영역으로 나누고 각 분할영역에 대해 송신 집속을 실시한 후 이를 조합하여 내부 영상을 만드는 기법으로서, 송신초음파의 빔 폭을 고정된 한 점에 집중하는 고정점 집속에 비하여 위치 변화에 따른 집속점 크기의 변화를 작게 만들 수 있다. 또한, 탐촉자에 가까운 영역에서는 활성화되는 배열소자의 수를 줄이고 탐촉자에서 멀리 떨어진 곳에서는 활성 소자의 수를 늘이는, 이른바 동적구경(dynamic aperture) 크기 조정 기법을 채택

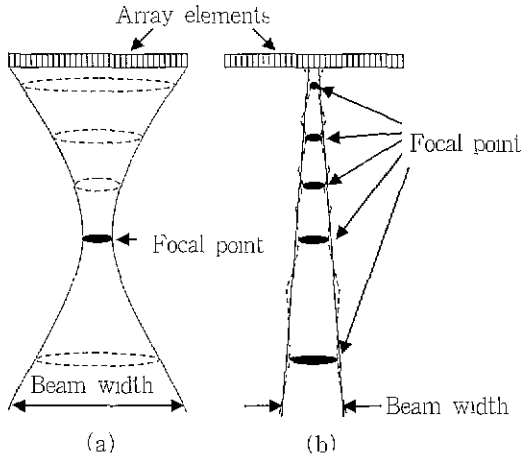


그림 2 송신 초음파와 빔의 비교 (a) 고정된 한 점에 집속할 경우 (b) 영역에 따라 여러 번 집속한 경우

함으로써 위치 변화에 따른 초음파와 빔의 방사 세기의 변화를 줄인다.

이상과 같이 위상배열기법을 이용하면 발생되는 초음파의 빔을 자유롭게 조절할 수 있어 제레식 방법으로는 얻을 수 없는 결합의 영상을 획득할 수 있을 뿐만 아니라, 검사자의 주관적 판단이 개입될 수 있는 여지를 줄여 검사의 객관적 신뢰도를 크게 높일 수 있다. 또한, 제레식 초음파 탐상 검사할 경우 그 결과 해석이 매우 까다로운, 형상이 복잡한 구조물의 검사도 가능하게 된다.

### 3. 위상배열 초음파 탐상 시스템의 개발

그림 3은 본 연구에서 의료용 초음파 진단장비를 개조하여 개발된 위상배열 초음파 탐상 시스템을 보여 주고 있다. 이 시스템에는 실시간 영상 제공과 지능형 결함 분석을 위해 2대의 PC가 내장되어 있는데, 각 PC는 LAN을 통하여 필요한 정보를 공유하고 있다. 첫 번째 PC는 영상의 획득과 출력을 것으로서 독립적인 64채널의 초음파 송수신기를 가지고 있으며, 사용주파수는 2~8 MHz이다. 영상을 구성하기 위한 PAULI 시스템의 전자 장치는 고속 디지털 신호처리를 통해 초당 수천 점에 집속이 가능하며, 송신 시는 동적구경을 이용한 분할영역집속(zone based focusing)을 수행하고, 수신 시에는 동적 수신집속(dynamic receive focusing)을 수행한다. 그리고 두 번째 PC는 임의의 각도의 주사선에 대한 RF-data 형태의 결합 신호를 획득하고 출력하기 위한 것인데, 이

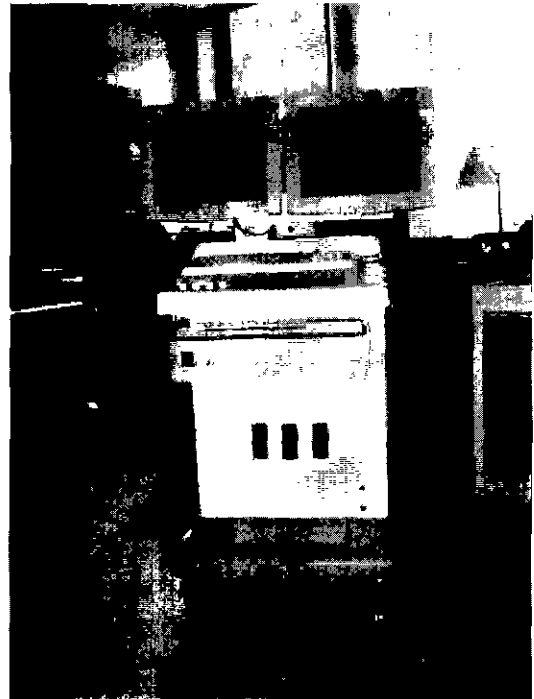


그림 3 개발된 위상배열 초음파 탐상시스템

RF 결합 신호는 제레식 방식에 의한 신호 해석에 이용될 뿐 아니라, 향후 지능형 결함분류 및 크기 산정을 위한 입력 자료로서 이용된다.

### 4. 위상배열 초음파 탐촉자의 방사음장 모델링

#### 4.1 경계 회절파 모델(Boundary Diffraction Wave Model : BDWM)

단일 평면 피스톤 형태의 탐촉자 면으로부터 방사되는 음장의 계산은 탐촉자 면을 크기가 충분히 작은 미소요소로 분할하고, 각각의 미소요소로부터 발전되는 구면파를 중첩 시킴으로써 계산할 수 있다는 Rayleigh-Sommerfeld 적분법으로부터 시작한다.<sup>(13)</sup> 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.<sup>(14)</sup> 그런데 이러한 면적분을 Stoke's theorem을 이용하면 식 (1)에 나타난 1차원 선적분으로 변환시킬 수 있는데, 이렇게 변환시켜 수치 계산 시간을 획기적으로 줄인 모델이 바로 경계 회절파 모델(boundary diffraction wave model, BDWM)이다.<sup>(15)</sup>

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

$$\Theta = \begin{cases} 1 & \text{for } y_0 \text{ in } S \\ 1/2 & \text{for } y_0 \text{ on } C \\ 0 & \text{for } y_0 \text{ outside } S \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에 나타난 여러 기호들의 정의를 그림 4에 도식적으로 나타 내었는데,  $x$ 는 매질내의 임의의 점으로서 방사음장을 측정하는 지점이며,  $y_0$ 는  $x$ 에서 탐촉자 면이 포함된 평면에 내린 수선이 그 평면과 만나는 점이며,  $\rho_e$ 는  $y_0$ 에서 탐촉자 가장자리의 한 점까지를 연결하는 벡터이며,  $\phi$ 는  $\rho_e$ 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,  $\theta$ 는  $r_e$ 와  $\mathbf{n}$ 과의 각도,  $k$ 는 파수,  $c$ 는 매질 내 파의 전파 속도,  $\phi$ 는 매질의 밀도  $v_0$ 는 초음파를 방사하는 탐촉자 면의 속도이다.

식 (1)에 의해 표현되는 경계 회절과 모델은 초음파 탐촉자의 원거리 뿐만 아니라 근거리 음장을 포함한 전체 음장을 3차원적으로 정확히 계산해 준다는 점에서, 기존 연구자들이 채택한 모델<sup>(12)</sup>의 한계를 크게 극복한 모델이다. 또한, 경계 회절과 모델은 원형 탐촉자 뿐만 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 시킴

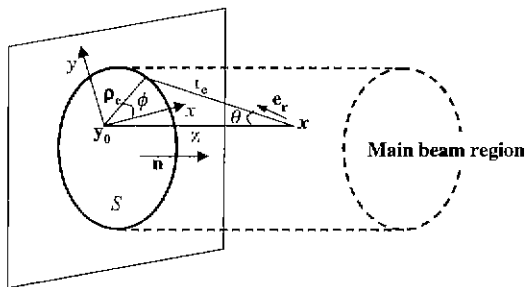


그림 4 점  $x$ 에서 BDWM을 적용하여 계산할 경우 기하학적으로 나타난 변수들

으로써, 위상배열 탐촉자로부터 나오는 초음파 범의 전체 음장을 계산하였다. 이때, 각 미소 발진자에 적용하는 지연 시간을 적절히 조절함으로써, 전체 음장을 원하는 대로 조향 또는 집속 시켰다.

#### 4.2 시뮬레이션

위상배열 초음파 탐촉자의 방사 음장 시뮬레이션을 위해 필요한 위상배열 초음파 탐촉자의 설계 인자들에 대한 사양을 그림 5에 나타내었다. 위상배열 탐촉자의 미소 요소 수는 총 64개이며, 각 소자의 크기는  $0.2\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 이고, 소자 중심간의 거리는  $0.3\text{ mm}$ 이다. 중심주파수는  $7.5\text{ MHz}$ 이고, 따라서 강 구조물 속에서 종파의 파장은 약  $0.79\text{ mm}$ 가 된다. 각 소자간의 틈새(inter element gap)를  $0.1\text{ mm}$ 로 하여 주변 발진자와의 전기적 상호 작용(cross-talk)을 줄일 수 있도록 하였다. 이 탐촉자의 근거리 음장의 길이는 약  $115\text{ mm}$ 가 된다.

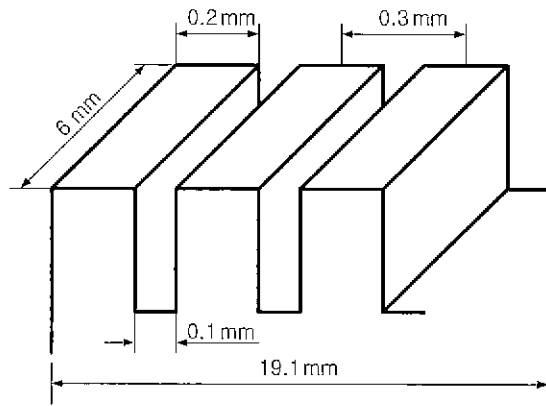


그림 5 위상배열 탐촉자의 사양

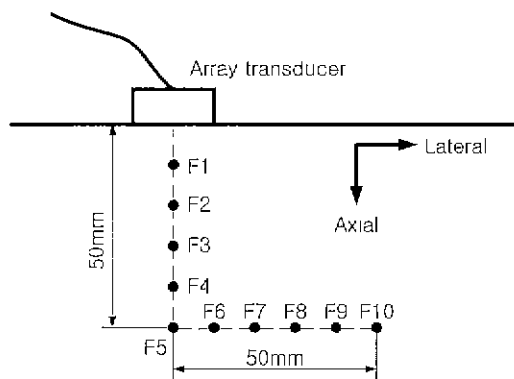


그림 6 시뮬레이션을 위한 시편내부의 집속점

그림 6은 시뮬레이션 연구에서 위상배열 탐촉자 빔을 조향 집속시킨 10개 위치를 나타내고 있다. 이 점들은 탐촉자의 중양을 지나는 수직면 상에 위치하고 있으며, 탐촉면에서 깊이 방향으로 10mm 간격으로 5개(F1-F5), 그리고 깊이 50mm 위치에서 측방향으로 10mm 간격으로 5개(F6-F10)로 총 10개이다. 이 점들은 모두 선정된 탐촉자의 근거리 음장 영역 내에 포함되어 있다. 시뮬레이션 연구에서는 초음파 빔이 각 지점에 집속 되도록 적절한 시간 지연을 각 미소 발진자에 적용하였는데, 예를 들어, 그림 6의 F10 지점의 경우, 집속 깊이 50mm, 조향 각도 45도가 되도록 조향 집속한 것이다.

그림 7은 시간지연 없이 방사된 음장과 F2, F5, F10에 조향 집속하여 방사한 음장을 모사한 결과를 보여준다. 빔이 조향된 경우(그림 (d))에도 근거리 음장에서 허상 신호를 생성하는 그레이팅 로브(grating lobe)의 발생 없이 집속이 잘 되는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 5에 나타난 위상배열 탐촉자의 설계 변수들이 적절히 설정되었음을 의미하는 하는데, 이러한 설계 변수들은 여러 가지 다양한 조건으로 방사음장을 모사한 연구 결과를 기초로 설정된 것이다. 그림 7에 나타난 음장을 자세히 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, 집속점의 측방향 크기가 커짐도 알 수 있다.

그림 8(a)와 (b)는 F3과 F5에 집속했을 때의 탐촉자 중심축 상의 음장을 보여준다. 실제로

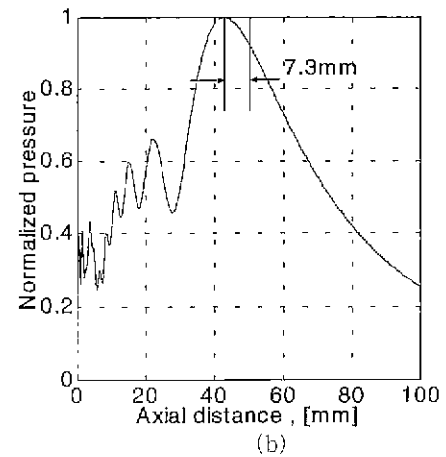
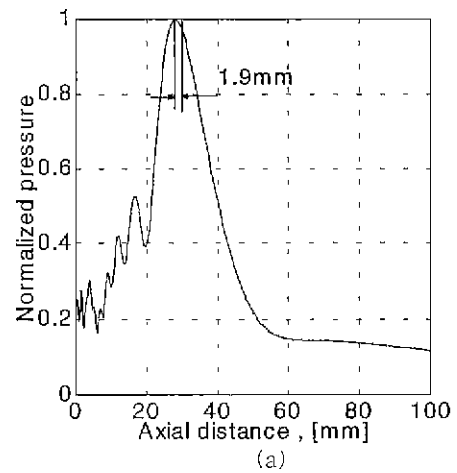


그림 8 집속점의 위치가 (a) F3 그리고 (b) F5인 경우 On-axis pressure fields

음압이 최고가 되는 지점은 시간 지연을 통해 집속을 유도한 지점에 정확히 집속되지 않고, 그림

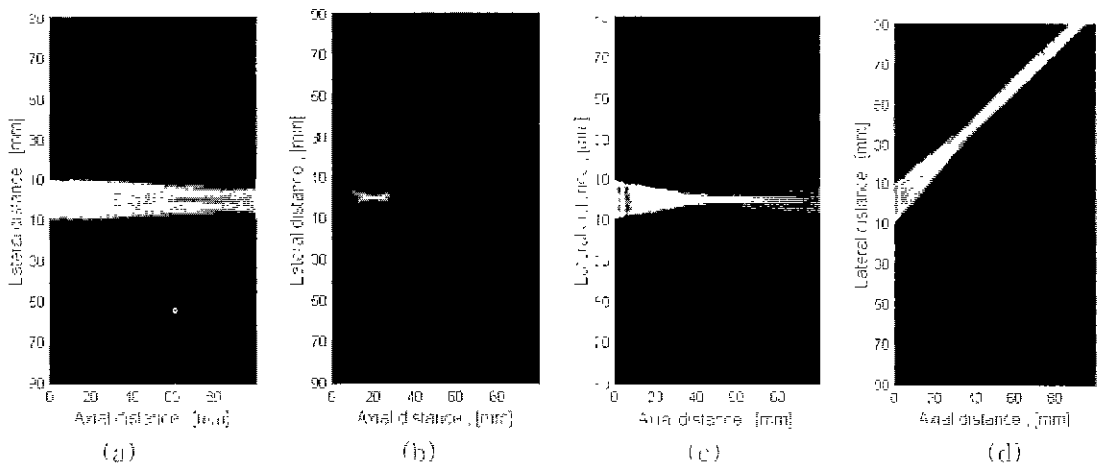


그림 7 위상배열 탐촉자로부터 방사된 음장 지나적인 지연시간의 조절을 통해 집속점의 위치가 (a) 무한대인 경우와 (b) F2, (c) F5, 그리고 (d) F10인 경우

8의 그림 속에 표시한 바와 같이, 그보다 더 앞쪽에 위치함을 알 수가 있다. 그리고, 이러한 치우침은 집속깊이가 깊어질수록 이러한 점점 증가하는 경향을 보인다. 그림 9는 이러한 실제 빔이 집속되는 지점(actual focal depth)과 집속을 원하는 지점(aimed focal depth) 그리고 집속점의 측방향 크기(size of the lateral focal points)의 변화를 나타낸 도표이다. 여기에서, 집속점의 크기(focal size)는 최고 음압을 나타내는 위치에서 6 dB 떨어진 지점의 빔폭으로 결정하였다.

그림 10에서는 F10 지점에 집속했을 경우 측방향으로의 음장을 나타내며, 최고 음압에서 -6 dB

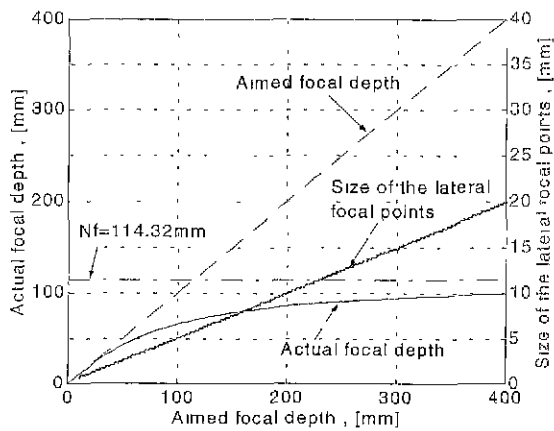


그림 9 실제 빔이 집속되는 지점(actual focal depth)과 집속을 원하는 지점(Aimed focal depth) 그리고 집속점의 측방향 크기(Size of the lateral focal points)의 변화

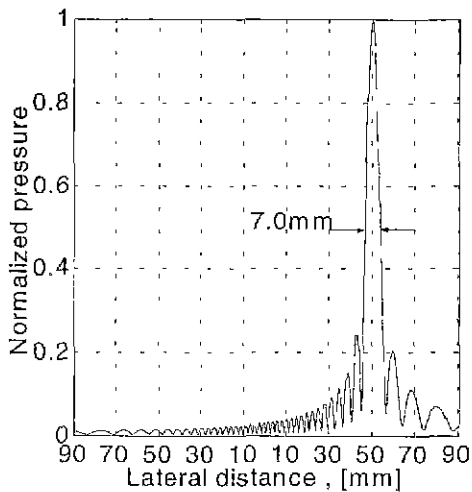
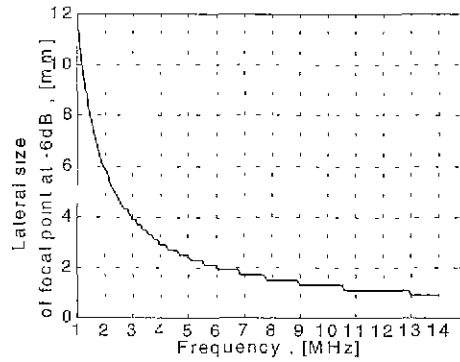
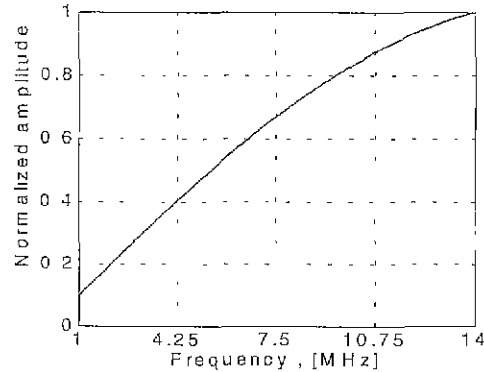


그림 10 집속점의 위치가 F10인 경우에 대한 Off-axis pressure field

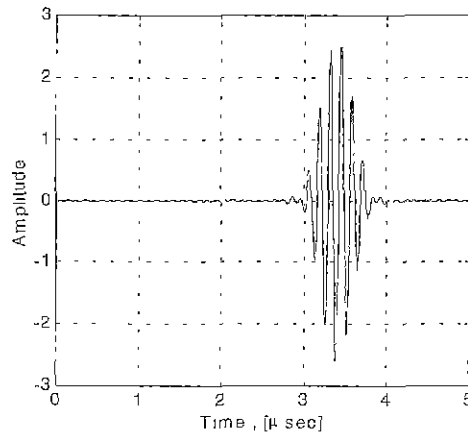
되는 지점의 집속점 크기는 7mm가 됨을 보인다. 그림 11(a)는 초음파가 F3에 집속되었을 때 중심주파수에 따른 집속점의 측방향 크기변화를 보여주는 도표이다. 이 도표에서 알 수 있는 바와 같이, 집속점의 크기는 주파수가 높아질수록 작아지는데, 이것은 고주파를 사용할수록 더 질이 좋



(a)



(b)



(c)

그림 11 (a) 진동수에 따른 집속점의 측방향 크기 변화, (b) 집속점이 F인 경우 진동수에 따른 음압의 변화 그리고 (c) 집속점이 F2인 경우 시간영역의 신호예측결과

은 결함 영상을 얻을 수 있다는 점을 말해준다. 그림 11(b)는 똑같은 집속조건에서 중심주파수 변화에 따른 집속점의 음압 변화를 나타낸 것으로서, 주파수가 증가할수록 집속점이 작아지고 이에 따라 집속점에서의 최대 음압이 증가함을 알 수 있다. 이는 고주파를 사용하면 결함 탐상의 민감도가 증가함을 의미한다. 그림 11(c)는 F2 지점에서 획득이 예상되는 시간영역에서의 RF 파형을 나타내고 있다. 시간영역 신호는 F2 지점의 주파수 응답을 역푸리에변환을 통해 구한 것이다. 이 경우 중심주파수는 7.5 MHz이고, 주파수 성분은 중심주파수를 7.5 MHz로 하고 Hanning Window 분포한다고 가정하였으며, 주파수 대역은 1~14 MHz로 설정하였다. 이렇게 계산된 시간 영역 신호를 이용하면 집속점의 축방향 해상도를 예측할 수 있다. 최적 성능을 지닌 축방향 해상도를 가진 탐촉자 디자인을 위해서는 다양한 중심주파수와 주파수 영역에 대한 시간영역 신호의 예측과 이에 대한 정밀 분석이 필요하다.

### 5. 위상배열 탐촉자의 제작 및 실험

그림 12는 그림 5에 나타난 사양에 따라 제작된 위상배열 초음파 탐촉자를 보여 주고 있다. 이 탐촉자는 중심 주파수가 7.5 MHz이고, 64개의 미소 발진자로 구성되어 있다. 그림 13은 제작된 탐촉자를 이용한 결함 검출 실험의 결과를 보여준다. 그림 13 (a)에 나타난 드릴 구멍(side drilled hole)이 허상 신호 없이 그림 13 (b)에 영상으로 나타난다. 그러나, 획득한 결함 영상은 실제 결함 형상과 다소 다른 형태를 보여 주고 있다. 이것은, 초음파탐상 시험에서는 초음파 빔이 도달하는 표면에서만 신호가 생성되기 때문에, 초음파 빔이 도달하지 않는 반대편 표면에 대해서는 정확한 영상을 얻을 수 없다는 초음파 탐상 시험의 특성에 기인한 면이 많지만, 한편으로는 결함 영상 구축을 위한 신호처리가 아직까지는 최적화 되지 못한 때문이기도 하다. 따라서, 결함 영상의 질을 높이기 위해서는 신호처리 기법과 동적구경의 정밀한 조정이 필요한 상태이다. 그림 13(c)는 드릴 구멍으로부터 획득된 RF 파형을 보여 주고 있는데, 이 파형은 제레식 신호 분석 방식에 의한 결함 평가와 함께 향후 지능형 결함 분석을 위한 입력 자료로 활용될 것이다.

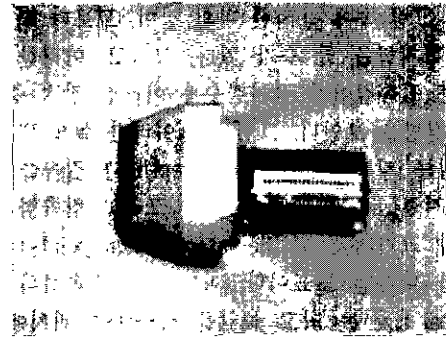
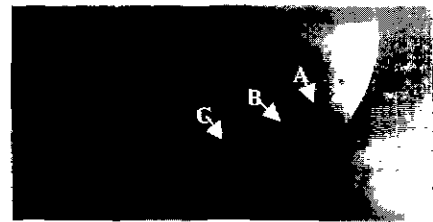
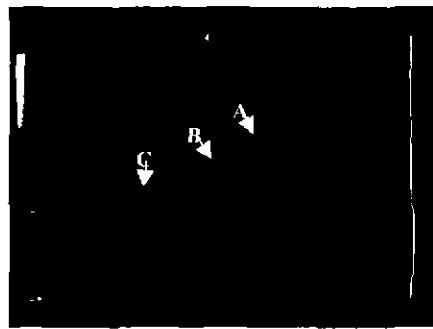


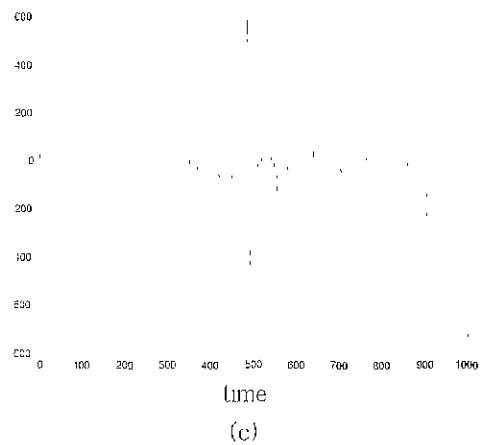
그림 12 제작된 위상배열초음파 탐촉자



(a)



(b)



(c)

그림 13 (a) 인위결함(side drilled holes) 시험편, 직경의 크기: A=1.2, B=2.4, C=3.6, 4.8, and 7.5mm. (b) 결함 A, B, C 를보인 S-scan 영상. (c) 결함 C 에서 반사된 A-scan 신호

## 6. 맺 음 말

본 연구에서는 의료용 진단장비를 산업용 비파괴 탐상 장치로 개조하여 개발하였는데, 개발된 위상배열 초음파 탐상 장치는 결함의 영상뿐만 아니라 임의 각도의 초음파 결함 신호를 RF 파형 형태로 제공한다. 본 연구에서는 또한, 개발 시스템에 사용할 위상배열 초음파 탐촉자를 설계하고 제작 하였는데, 이를 위해 경계 회절과 모델을 기초로 위상배열 탐촉자의 3 차원 방사음장을 계산할 수 있는 모델링 기법을 확립하였다. 그리고, 이 모델을 이용하여 결함 영상의 해상도와 밀접한 관계가 있는 초음파 빔의 집속점의 위치와 크기, 그리고 주파수에 대해 집중적으로 분석하였으며, 시간영역에의 결함 신호를 모사하였다. 이러한 시뮬레이션 연구를 통해 위상배열 탐촉자의 설계 인자를 직절히 설정하고, 그 조건으로 실제 탐촉자를 제작하였다. 제작된 탐촉자와 개발된 위상배열 초음파탐상 시스템을 이용하여 드릴 구멍을 가진 시편에서 결함 검출 실험을 수행하여, 결함의 영상과 RF 파형을 성공적으로 획득하였다. 현재 이들로부터 결함의 종류와 정확한 크기를 결정하는 기법 개발에 대한 연구가 현재 진행 중이다.

## 후 기

본 원고는 과학기술부 국가중점연구개발사업의 하나인 인위재해방재기술개발사업의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Gehlbach, S. M. and Alvarez, R. E., 1981, "Digital Ultrasound Imaging Techniques using Vector Sampling and Raster Line Reconstruction", *Ultrasonic Imaging*, Vol. 3, pp. 83~107.

(2) Mucci, R. A., 1984, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms", *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Processing*, ASSP-32, pp. 548-558.

(3) Peterson, D. K. and Kino, G. S., 1984,

"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.

(4) Kim, J. H., Song, T. K., and Park, S. B., 1987, "A Pipelined Sampled Delay Focusing in Ultrasound Imaging Systems", *Ultrasonic Imaging* 9, pp. 75~91.

(5) Lamarre, A., Moles, M., Lupien, V., 1999, "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

(6) Hwang, J. S., Shin, H. J., Song, S. J., Song, T. K., 1999, "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.

(7) Kino, G. S., 1987, "Acoustic waves : devices, imaging, and analog signal processing", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

(8) Macovski, A., 1979, "Ultrasonic Imaging using Arrays", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 4, pp. 484~495.

(9) Azar, L., Wooh, S. C., 1999, "Experimental Characterization of Ultrasonic Phased Arrays for the Nondestructive Evaluation of Concrete Structures", *Materials evaluations*, Vol. 75, No. 2, pp. 134-140.

(10) Clay, A. C., Wooh, S. C., Azar, L., Wang, J., 1999, "Experimental study of Phased Array Beam Steering Characteristics", *Journal of NDE*, Vol. 18, No. 2, pp. 59~71

(11) Song, S. J., Shin, H. J., Jang, Y. H., 1999, "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.

(12) Wooh, S. C., Shi, Y., 1999, "A Simulation of the Beam Steering Characteristics for Linear Phased Arrays", *Journal of NDE*, Vol. 18, No. 2, pp. 39~57.



(13) Schmerr, L. W. Jr., 1998, "of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, a Modeling Approach", Plenum Press, New York, pp 167-181.

(14) 송성진, 김학준, 2000, "단일 매체에서의 평면 초음파 탐촉자의 방사 음장 모델링 기법", 비파괴검사학회지, 제 20권 제 2호, pp. 91~101.

(15) Schmerr, L. W. Jr., Sedov, A., Lerch, T. P., 1997, "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.