

# 유도초음파 위상배열을 이용한 판 구조물 검사

## Guided Wave Phased Array for Inspection of Plate Structures

권 휴 상\* · 박 성 철\* · 조 승 현\*\* · 이 승 석\*\* · 김 진 연\*\*\*

Hyu-Sang Kwon, Seong-Chol Park, Seung-Hyun Cho, Seung-Seok Lee and Jin-Yeon Kim

(2008년 10월 16일 접수 ; 2008년 12월 17일 심사완료)

**Key Words** : Guided Wave(유도초음파), Phased Array(위상배열), Lamb Wave(람파), Dispersion(분산)

### ABSTRACT

This paper describes a general approach for processing data from an omni-directional guided wave transducer array for the rapid inspection of large plate structures. A basic phased array algorithm is presented that can be applied to any array geometry. For guided waves on plate, beam steering algorithm is derived and the corresponding beam pattern is analyzed. The algorithms are applied to simulation and experimental data. The results show well its usefulness in structural applications.

### 1. 서 론

사회가 발달하고 생활수준이 향상됨에 따라 삶의 질에 대한 구성원의 관심은 더욱 높아진다. 특히 협소한 국토를 효율적으로 사용하기 위하여 기반 시설물들이 증가함에 따라 이를 운용하는데 필요한 안전과 사고방지에 대한 기술적 요구는 더욱 커지고 있다. 특히 건물이나 항공기, 원전, 혹은 배관이나 압력 용기 등과 같이 대형 사고의 가능성을 가지고 있어서 미연에 사고를 방지해야 하는 대상물에 그 적용의 필요성은 급격히 증가하고 있다. 이와 같은 구조물의 상태 감지를 위한 목적으로 SHM(structural health monitoring)이 여러 분야에서 활발히 연구되고 있으며 특히 최근 들어서 이에 대한 관심이 더욱 커지고 있다<sup>(1)</sup>. 재료의 특성을 시험하고 결함을 탐지하기 위한 목적으로 확립되고 발전해 온 비파괴검사(NDT&E) 분야가 가장 대표적이며 지금까지 많은

연구 결과들이 소개되었다.

구조물의 결함 탐지와 상시 감시를 통하여 먼저 안정성에 대한 신뢰를 확보할 수 있다. 오늘날 각종 구조물은 급속히 대형화, 고압화, 혹은 고속화되어 있어 안전성에 대한 신뢰도가 매우 중요한 문제이다. 그러므로 비파괴검사로 대상 구조물의 상태를 확인하여 위해하다고 판단되는 결함들을 미리 제거한다면 안전성을 높일 수 있고, 또한 수명을 연장시킬 수 있음으로 인하여 경제적인 이익을 얻을 수 있다. 더욱이 이를 바탕으로 수명예측이나 파손 방지, 가동조건 적용 등의 합리적이고 효율적인 관리를 운용할 수 있음으로 인하여 부가적인 많은 효과를 기대할 수 있다.

비파괴검사란 재료의 원형과 기능을 손상시키지 않으면서 재료에 광이나 열, 혹은 방사선, 초음파, 전기 등의 물리적 에너지를 가하여 조직의 이상이나 결함의 존재로 인하여 에너지의 성질이나 특성이 변화하는 것을 적절한 센서를 사용하여 이들 성질의 변화량을 측정함으로써 조직의 이상 여부나 결함의 정도를 알아내는 방법이다. 혹은 구조물 자체에서 결함에 의하여 발생하는 이상 신호를 수집하여 이를 탐지하는 수동적 방법도 포함된다.

이와 같은 여러 가지 방법 중에서 가장 대표적인

† 교신저자; 정회원, 한국표준과학연구원

E-mail : hyusang@kriss.re.kr

Tel : (042)868-5057, Fax : (042)868-5643

\* 동명대학교 메카트로닉스공학과

\*\* 한국표준과학연구원

\*\*\*School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology

방법으로 탄성파의 전파를 이용하는 방법을 들 수 있다. 이는 초음파 영역의 신호뿐만 아니라 넓은 의미로 낮은 주파수 대역의 진동도 포함한다고 볼 수 있다. 이러한 탄성파의 발생이나 측정을 위해서는 가장 대표적인 압전소자를 비롯하여 EMAT 혹은 MsT, 레이저 등이 사용된다.

전통적인 비파괴 검사 기법에서는 주로 재료의 두께나 재질, 혹은 구조 등의 기본 성질과 미소 결함의 유무를 탐지하는 목적으로 연구가 진행되었다. 그러므로 주로 사용된 트랜스듀서도 단일 채널로 짧은 펄스를 사용하여 전달 시간을 측정하거나 더 나아가 초음파 위상배열 트랜스듀서를 이용하여 초음파를 집속함으로써 초음파 세기를 증가하는 방법이 연구되었다. 그러나 최근 들어서 구조물의 건전성 평가가 중요한 목표가 되면서 보다 원거리의 결함을 손쉽게 빨리 찾을 수 있는 방법론에 대한 연구가 활발해졌다. 이에 따라 판재에서 적용되는 유도초음파(guided wave)에 대하여 연구되었다. 원거리까지 전파되는 유도초음파의 특성상 접근이 어려운 원거리의 결함도 측정이 가능하기 때문에 넓은 영역의 탐지 및 감시가 가능하며 측정영역의 제한이 감소하는 등의 장점이 있다. 그러나 이 방법에서는 제한된 신호정보로 너무 넓은 영역을 탐지하기 때문에 결함이 발생한다는 사실은 판단하더라도 어느 위치에서 발생하는지를 확인하기가 쉽지 않다. 그러므로 유도초음파를 이용하여 넓은 영역을 빠르게 검사하면서 결함위치의 분해능을 높일 수 있는 위상배열(phased array) 방법이 소개되기 시작하였다.

유도초음파의 위상배열 기법은 몇 년 전부터 Wilcox 등에 의하여 제안되고 연구되기 시작하였는데, 최근 들어서는 매우 많은 관심을 받고 있다<sup>(1-5)</sup>. 이는 원거리의 넓은 영역을 효과적으로 탐상하고자 하는 유도초음파의 원래 목적에 잘 부합하기 때문에 이를 구현하여 실용화하기 위하여 관심이 집중되고 있다. 그러나 아직까지 유도초음파 분야에서 위상배열은 익숙하지 않은 개념으로써 해석 및 신호처리 등에서 기초적인 단계의 연구가 진행되고 있다. 이에 이 연구에서는 유도초음파 위상배열 신호처리 기법을 확립하고 이를 개선하기 위한 방법론을 제안한다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통하여 평판에서의 탐상 결과를 해석하고 실제 적용 가능성을 확인한다.

## 2. 유도초음파 위상배열의 이해

### 2.1 유도초음파의 이해

유도초음파는 매질의 형상에 의한 탄성학적 경계 조건하에서 그 기하학적 형상을 따라 전파하는 모든 초음파 모드를 말한다. Fig. 1과 같이 매질의 종파 또는 횡파가 경사 입사하는 경우에 입사된 파는 매질의 경계면에서 모드 변환과 반사 및 굴절 등을 통하여 무수한 파들이 생성되며 어느 정도 거리가 멀어지게 되면 매질내의 파들은 각각의 구별 가능한 파로서 존재하는 것이 아니라 하나의 웨이브 패킷(wave packet)으로 전파하게 된다. 박판이나 관에서 주로 발생하는 유도 초음파는 입사각, 매질의 두께 및 주파수에 따라 서로 다른 입자 움직임을 갖는 다양한 모드로서 발생된다.

유도 초음파는 잘 알려진 압전소자나 EMAT (electromagnetic acoustic transducer), 혹은 레이저 등을 사용하여 초음파를 발생시키고 이 초음파가 진행하면서 매질의 두께와 같은 기하학적 조건에 따라 특정모드가 전파하게 된다. 특정모드를 선택적으로 발생시키기 위해서는 웨지(wedge)나 빗 탐촉자(comb transducer)를 이용하기도 한다. 이때 스넬의 법칙을 이용하여 웨지의 입사각 등을 결정한다.

유도초음파는 종파나 횡파와 같은 단일 파동이 아니라 기하학적 형상에 따른 모드로 분포하기 때문에 각 모드의 전파속도가 주파수에 따라 변하는 분산적인(dispersive) 특성을 갖는다. 그러므로 이 분산 특성을 파악하고 그 관계를 정확히 규명해야 각 주파수별 전파속도를 얻을 수 있다. 또한 이로부터 유도초음파를 원하는 위치까지 전파시키고 위상을 조정해서 더함으로써 보강간섭을 얻을 수 있다. 이 때문에 대상으로 하는 판재의 분산선도를 실험적, 혹은

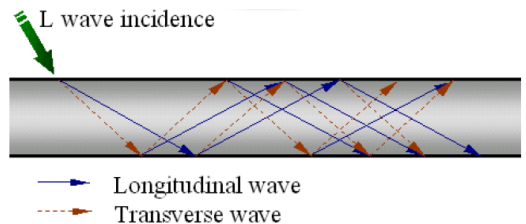


Fig. 1 Oblique incident waves for generation of guided wave

해석적으로 정확히 파악하는 것이 매우 중요한 선결 문제이다.

### 2.2 위상배열의 개념적 이해<sup>(6~7)</sup>

위상배열은 파동이 전파하는 파면, 즉 동 위상면에 동일한 특성을 가지는 센서를 배열하여 동일하게 측정된 신호를 보강 간섭함으로써 큰 신호를 얻는 방법이다. 대표적인 delay-and-sum 빔 형성기법 (beamforming)은 가장 오래되고 단순한 위상배열 기법이지만 현재까지 가장 널리 사용되는 유용한 방법이다. 이 방법은 파동의 파면에 센서들의 배열을 일치시키기 위하여 실제적인 위치를 이동하는 대신에 파면까지의 경로 차에 해당하는 계산된 시간지연을 줌으로써 가상으로 센서를 원하는 파면으로 이동시키는 방법이다. 그리고 이 신호를 모두 더함으로써 잡음이나 다른 방향의 신호에 대하여 보강 간섭된 신호를 얻는다. 여기에서 시간지연은 이 방법의 핵심적인 계산으로 음파가 각 센서에 전달되는 시간차를 의미한다.

임의의 위치,  $\mathbf{x}_S$ 에서 방사된 음원의 신호를  $q(t)$ 라 하고 M개의 센서 위치를  $\mathbf{x}_m, m=1,2,\dots,M$ 라 하면 m번째 센서에서의 신호를  $s(\mathbf{x}_m, t)$ , 혹은  $s_m(t)$ 로 표현할 수 있다. 센서는 각 위치에서 음장을 공간적으로 샘플링하는 것으로 생각할 수 있으며 여기에 적절한 지연 시간  $\tau_m$  과 크기 가중치  $w_m$ 를 적용하여 신호를 더하게 된다. 출력신호는 다음과 같이 얻어진다.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m s_m(t - \tau_m) \quad (1)$$

이 크기 가중치는 배열의 shading 혹은 taper를 나타내며 이 형상에 따라 배열의 빔 패턴이 결정된다. 즉 주엽(mainlobe)의 폭과 부엽(sidelobe)들의 높이가 이 가중치에 따라 다르게 나타난다.

기존의 연구 등에서 잘 알려진 바와 같이 음원에서 거리에 따라 나타나는 파면의 모양이 달라지며 이로부터 해석하는 음파의 모델과 배열의 형상 등이 다르게 된다. 음원이 가까운 곳에서는 파면이 곡면으로 표현되고 파면의 각 위치에서 파면에 수직한 법선 방향은 음원을 향하게 된다. 그러므로 파면에 위치한 센서의 합으로 음원의 위치를 추정할 수 있게 된다. 그러나 이러한 근거리 음장을 적용하는 구

면파 빔 형성 기법에서는 수학적 해석이 복잡하고 엄밀해를 계산하기 어려우며 음원의 위치에 따라서 편향된 추정오차 등이 발생하는 문제가 있다. 이에 반하여 음원이 멀리 떨어진 경우에는 파동이 평행하게 진행되며 배열의 크기에 비하여 파면의 곡률이 매우 크기 때문에 선형, 혹은 평면으로 나타낼 수 있다. 그리고 이러한 평면파 모델에서는 음원의 정확한 위치는 알 수 없으며 파동의 방향만을 추정할 수 있다. 즉 음원까지의 거리에 대한 정보는 원거리에서 정확히 추정하기 어려움을 확인할 수 있다.

### 2.3 평면파 모델 빔 형성 기법

평면파 이론으로부터 time-harmonic 신호를 고려하면 센서에서 측정되는 평면파 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$s(\mathbf{x}, t) = A(\omega) \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x})] \quad (2)$$

여기서  $A(\omega)$ 는 음파의 크기를 나타내는 값으로 관심 주파수  $\omega$ 에서의 음파의 크기를 나타내고 있다. 음파의 파수 벡터(wavenumber vector)  $\mathbf{k}$ 는 공간상의 음파의 주기를 의미하며 음파의 방향성을 나타내 주는 벡터이다. 그러므로 이 파수 벡터를 규명하는 것이 위상배열의 궁극적인 목표이다. 이 파수 벡터의 방향만을 표현하는 방법으로 이를 정규화하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{k} = -\frac{\omega}{c} \mathbf{u} = -\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{u}$ 는 배열이 향하는 방향을 나타내는 단위벡터로 음파의 방향과 반대가 된다.

M개의 센서에서 얻어진 신호를 다음과 같이 벡터식으로 표현하면

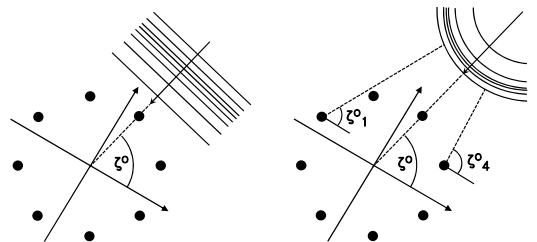


Fig. 2 Near-field and far-field wave geometries and the relevant angular difference

$$\begin{Bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{Bmatrix} = A(\omega) \exp(j\omega t) \begin{Bmatrix} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_1) \\ \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_2) \\ \vdots \\ \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_M) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

즉  $\mathbf{s}(t) = A(\omega) e^{j\omega t} \mathbf{v}_k$  과 같다.

여기에서  $\mathbf{v}_k$  벡터는 AMV(array manifold vector)라 부르며 배열과 음파의 공간적 정보를 포함하는 벡터로써 위상배열과 관련하여 배열의 성능과 특성 등을 결정하기 때문에 매우 중요하다. 그리고 이 AMV에 시간지연과 가중치로 구성된 가중벡터를 내적함으로써 결과 신호를 얻게 된다. 이와 같은 가중벡터는 결국 공간상의 필터와 같은 역할로 볼 수 있으며 이를 적절히 바꿈으로써 원하는 방향에 필터 특성을 얻을 수 있다. 또한 phasor를 이용하여 다음과 같은 관계식을 표현할 수 있으며,

$$\begin{aligned} \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) &= \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u} \cdot \mathbf{x}\right) \\ &= \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} (x \sin \theta \cos \phi \right. \\ &\quad \left. + y \sin \theta \sin \phi + z \cos \theta)\right) \end{aligned} \quad (5)$$

이로부터  $\mathbf{v}_k$  대신에  $\mathbf{v}_u$  혹은  $\mathbf{v}_\theta$  등으로 표현할 수 있다.

구성된 배열에서 원하는 임의의 방향으로 방향을 맞추면 각 센서에서의 지연시간은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_m = -\frac{\mathbf{k}' \cdot \mathbf{x}_m}{\omega} \quad (6)$$

그러므로 배열신호는

$$\begin{Bmatrix} s_1(t - \tau_1) \\ s_2(t - \tau_2) \\ \vdots \\ s_M(t - \tau_M) \end{Bmatrix} = A(\omega) \exp(j\omega t) \begin{Bmatrix} \exp(j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{x}_1) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_1) \\ \exp(j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{x}_2) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_2) \\ \vdots \\ \exp(j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{x}_M) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_M) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

같이 되며 이를 모두 더하면

$$\begin{aligned} y(t) &= A(\omega) e^{j\omega t} \sum_{m=1}^M \exp(j\mathbf{k}' \cdot \mathbf{x}_m) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_m) \\ &= A(\omega) e^{j\omega t} \mathbf{w}^H \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (8)$$

와 같다. 여기에서  $\mathbf{w}$ 는 복소 가중치 벡터로써 앞서 설명한 시간 지연, 혹은 이로 인한 위상 지연을 표현한다. 이 복소 가중치 벡터는 앞서 설명한 크기 가중치에 시간 지연을 포함하여 복소수로 표현한 것으로 이를 각각의 항으로 나누어 표현할 수 있다. 결국 이 식에서 확인할 수 있듯이 가중치 벡터와 AMV의 내적으로 출력 신호가 표현되므로 이를 배열의 빔 패턴으로 정의하여 사용한다.

$$B(\mathbf{k}) = \mathbf{w}^H \mathbf{v}_k \quad (9)$$

## 2.4 유도초음파 위상배열 이론

2차원 공간상에 음원으로부터 방사하는 음장은 다음과 같이 음원과 센서의 거리로부터 표현되고,

$$s(\mathbf{x}, t) = \frac{q(t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}_s|/c)}{\sqrt{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_s|}} \quad (10)$$

$m$  번째 센서의 음장은 다음과 같다.

$$s_m(t) = \frac{q(t - r_m/c)}{\sqrt{r_m}} \quad (11)$$

여기서

$$\tau_m = -\frac{r_m}{c} \quad (12)$$

와 같이 시간지연을 주고 각 센서를 모두 더하면 다음과 같이 보강 간섭된 출력을 얻을 수 있다.

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m s_m(t - \tau_m) = \sum_{m=1}^M w_m \frac{q(t)}{\sqrt{r_m}} \quad (13)$$

결국 앞서 고찰한 위상배열의 원리와 마찬가지로 출력신호는 음원신호를 보강하여 얻는 신호로 표현됨을 확인할 수 있다. 이때 거리에 따른 크기 감소 항이 존재하며 이는 음원의 위치에 따라서 결과를

왜곡하는 영향을 준다. 특히 근거리에서 특정하는 경우에는 이 거리감쇠에 의한 영향이 크게 나타나게 된다.

배열센서가 음원으로부터 멀어지면 이 거리감쇠는 각 센서에서 일정하다고 가정할 수 있으며 이를 배열의 중심에서의 값으로 모두 동일하게 가정할 수 있다( $r_m = r_o$ ). 결국 이러한 거리에 의한 영향을 상쇄하기 위하여 가중치를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$w_m = \frac{\sqrt{r_o}}{M} \quad (14)$$

이로부터 배열의 출력은 다음과 같이 얻어진다.

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sqrt{r_o}}{\sqrt{r_m}} q(t) \quad (15)$$

원거리에서는 센서에서 음원까지의 거리가 배열중심에서의 거리와 거의 같아지므로 결국  $y(t) = q(t)$ 와 같이 출력신호가 음원의 신호와 같게 얻어짐을 확인할 수 있다. 위상배열의 각 센서의 위상을 원래 음원의 위치에 정확히 일치하도록 조정하여 시간지연을 준다면 음원의 신호를 재구성할 수 있음을 보여준다.

후보음원의 위치가 실제 음원의 위치와 다른 경우에는 즉,

$$r'_m \neq r_m, \tau_m = -\frac{r'_m}{c} \quad (16)$$

이면

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m s_m(t - \tau_m) = \sum_{m=1}^M w_m \frac{q(t - r_m/c + r'_m/c)}{\sqrt{r_m}} \quad (17)$$

와 같이 표현되고 마찬가지로 원거리 음장에서는 다음과 같이 정리된다.

$$y(t) = \frac{\sqrt{r'_o}}{\sqrt{r_o}} \sum_{m=1}^M q\left(t - \frac{r_m}{c} + \frac{r'_m}{c}\right) \quad (18)$$

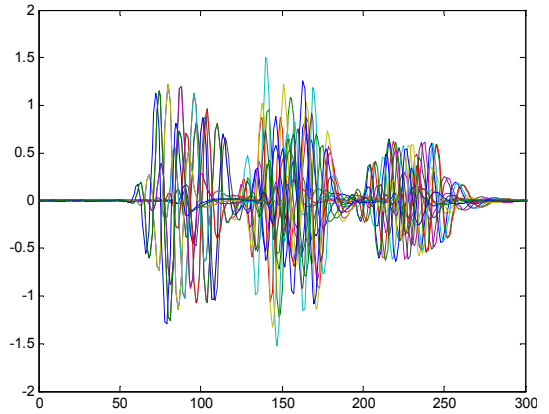
식(18)에서 알 수 있듯이 음원의 위치가 다른면 음원의 신호가 지연되어 더해지므로 실제 신호의 크

기는 음원신호에 비해서 작아지게 된다. 결국 얻어지는 출력신호의 크기는 작게 되며 이는 부엽으로 나타나게 된다.

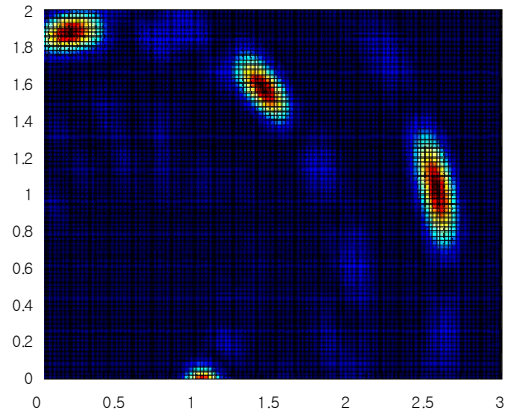
### 3. 시뮬레이션 및 실험

#### 3.1 시뮬레이션

유도초음파 위상배열 알고리즘을 검증하기 위하여 다음과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션에서는 Lamb파인  $A_0$ 파를 사용하였고 4개의 음원을 각각 (1.4, 1.5), (2.5, 1.0), (1.0, 0.0), (0.2, 1.8)에 두고 Hann 가중치를 가지는 3과장의 50 kHz tone-burst 신호를 입력으로 하였다. 그리고 5 mm의 steel 판을 가정하여 분산특성을 해석적으로 얻었으며, (0.5, 0.5)의 위치에 16개의 센서로 위상배열을 두었다.



(a) Simulated signals at 16 array sensors



(b) Estimated source locations

Fig. 3 Simulation and result for phased array

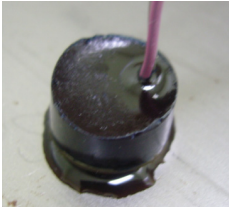
### 3.2 실험 구성

유도초음파 위상배열을 이용한 판 구조물에서의 결함탐지 성능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 사용된 탄소강판(SK5)은 두께 4 mm, 가로 1,400 mm, 세로 1,000 mm의 크기이며, 디스크형 PZT 압전소자를 이용하여 송신자와 수신자를 제작하였다. 송신자로는 지름 130의 압전소자에 백킹을 채웠으며 수신자는 2 MHz 공진주파수를 가지는 지름 8 mm의 소자에 설계한 전치증폭기를 달아서 배열로 만들었다.

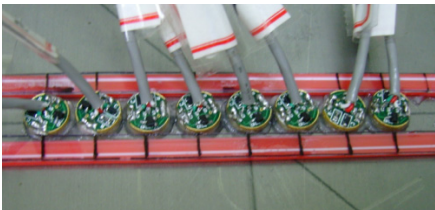
100 kHz의 tone-burst 신호를 사용하였으며 샘플링 주파수는 2 MHz, 샘플링 개수는 4,000개였다.

### 3.3 음원의 위치 탐지

음원과 센서를 판의 중앙에 설치하여 경계면에서



(a) Source



(b) Receiver

Fig. 4 Piezoelectric devices used in the experiments

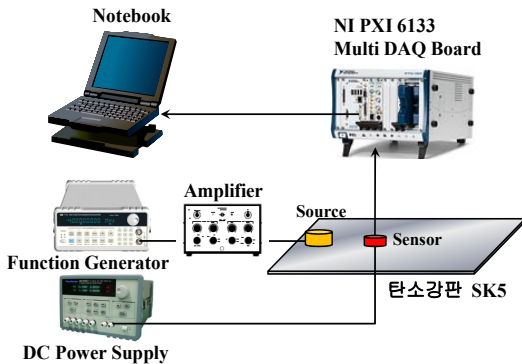


Fig. 5 Brief sketch of instrument set-up

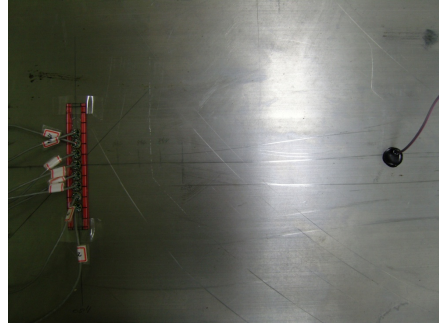
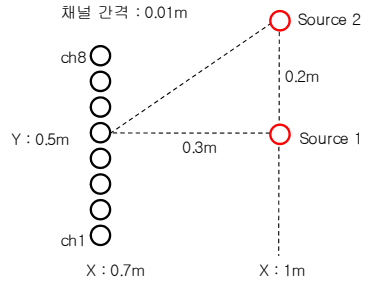
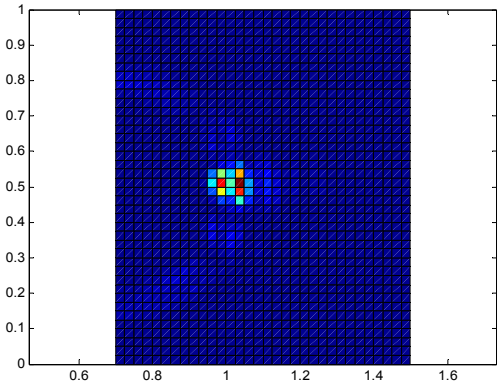
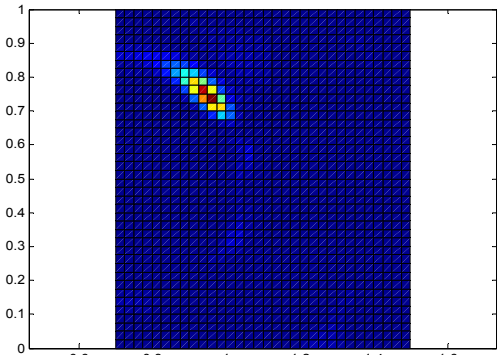


Fig. 6 Experimental configurations for source localization



(a) Estimated source 1 location



(b) Estimated source 2 location

Fig. 7 Results for source localization



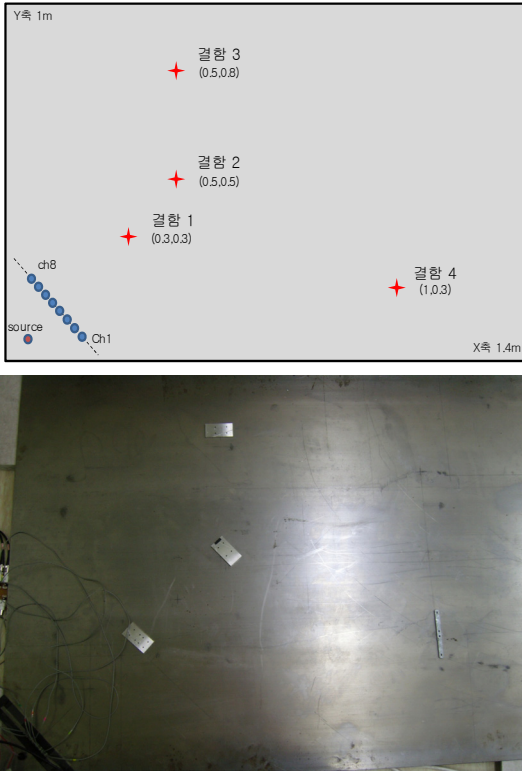


Fig. 8 Experimental setup for artificial defects

의 반사파를 고려하지 않고 음원의 위치를 탐지하는 실험을 수행하였다. Fig. 6과 같이 8개의 센서를 10 mm 간격으로 배열하고 각각 다른 음원의 위치에 대하여 실험을 수행하였다.

Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 음원의 위치를 정확히 찾음을 알 수 있다

### 3.4 인위결함의 탐지

실제 결함을 탐지하는 실험을 수행하기 위하여 알루미늄 조각을 이용하여 인위적인 결함을 만들었다. 알루미늄 조각을 접착제를 사용하여 접착시켜야 하지만 제거가 가능하도록 커플런트로 결합하였다. 그러므로 결함이 작게 나타남을 이해할 수 있다. Fig. 8과 같이 4개의 인위결함을 판재에 부착하고 측정을 하였다.

앞서 설명한 실험과 동일하게 100 kHz의 tone-burst 신호를 사용하였으며 결과는 다음과 같다.

Fig. 9의 결과에서 확인할 수 있듯이 비록 신호는 작지만 약 5 cm 이내의 오차로 결함의 위치를 잘 찾을 수 있음을 확인하였다. 그러나 경계면에 의한

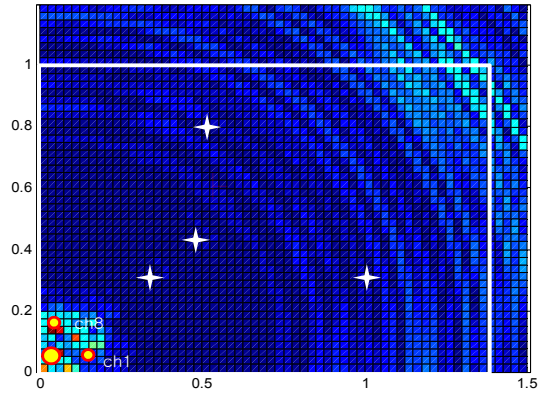


Fig. 9 Results for defect localization

Table 1 True and estimated locations of artificial defect (unit : m)

| Defect | True locations |      | Estimated locations |      | Differences |      |
|--------|----------------|------|---------------------|------|-------------|------|
|        | X              | Y    | X                   | Y    | X           | Y    |
| 1      | 0.30           | 0.30 | 0.34                | 0.33 | 0.04        | 0.03 |
| 2      | 0.50           | 0.50 | 0.50                | 0.47 | 0.00        | 0.03 |
| 3      | 0.50           | 0.80 | -                   | -    | -           | -    |
| 4      | 1.00           | 0.30 | -                   | -    | -           | -    |

반사파의 영향이 크기 때문에 반사면 근처의 두 개의 결함은 묻혀서 확인이 어려웠다(Table 1).

## 4. 결 론

구조물의 결함 탐지를 위한 유도초음파와 위상배열에 대한 연구를 수행하였다. 기존의 위상배열 이론을 바탕으로 결함 탐지를 위한 평판에서의 유도초음파와 위상배열의 신호처리 기법을 정리하였다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통하여 능동 음원과 결함의 위치를 실제로 탐지할 수 있음을 확인하였으며 이로부터 유도초음파와 위상배열의 가능성을 검증하였다. 실험결과에서 확인할 수 있듯이 이 기초연구를 바탕으로 실제 적용이 가능한 기술로 개발하기 위해서는 먼저 배열용 트랜스듀서와 앰프의 장비의 개선이 필요하다. 저주파 영역이면서 지름이 작고 신호의 왜곡을 줄이는 동일한 특성의 압전소자를 설계, 제작하고 이를 구동하기 위한 다채널 앰프가 제작되어야 한다. 이와 함께 경계면의 반사영향을 분리하고 유도초음파의 다중모드를 이용할 수 있는 방법과 위상

배열의 성능향상을 위한 신호처리 기법의 개발도 계속되어야 한다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467)

## 참 고 문 헌

(1) Rajagopalan, J., Balasubramaniam, K. and Krishnamurthy., 2006, "A Phase Reconstruction Algorithm for Lamb Wave Based Structural Health Monitoring of Anisotropic Multilayered Composite Plates," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 119, No. 2, pp. 872~878.

(2) Velichko, A. and Wilcox, P. D., 2008, "Guided Wave Arrays for High Resolution Inspection," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 124, No. 1, pp. 186~196.

(3) Wilcox, P., Lowe, M. and Cawley, P.,

2005, "Omnidirectional Guided Wave Inspection of Large Metallic Plate Structures Using an EMAT Array," IEEE Transactions on Ultraso. Ferroelect. Freq. Control, Vol. 52, No. 4, pp. 653~665.

(4) Fromme, P., Wilcox, P. D., Lowe, M. and Cawley, P., 2004, "On the Sensitivity of Corrosion and Fatigue Damage Detection Using Guided Ultrasonic Waves," 2004 IEEE International Ultraso. Ferroelect. Freq. Control Joint 50th Anniversary Conference, pp. 1203~1206.

(5) Li, J. and Rose, J. L., 2001, "Implementing Guided Wave Mode Control by Use of a Phased Transducer Array," IEEE Transactions on Ultraso. Ferroelect. Freq. Control, Vol. 48, No. 3, pp. 761~768.

(6) Harry, L. Van Trees., 2002, "Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory," A John Wiley & Sons, Inc., New York.

(7) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, "Array Signal Processing : Concepts and Techniques," PTR Prentice-Hall, Inc., New Jersey.