

유도초음파 위상 배열 탐상 연구

Guided wave phased array inspection

권휴상† · 박성철* · 조승현* · 이승석* · 김진연**

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

1. 서 론

최근 들어서 구조물의 건전성 평가에 대한 사회적 관심이 높아지면서 구조물의 상태 감지를 위한 목적으로 SHM (Structural Health Monitoring)이 활발히 연구되고 있다. 특히 비파괴 검사기법으로 판이나 배관 구조물의 원거리 결함을 손쉽게, 빨리 찾을 수 있는 방법론에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 유도초음파는 구조물을 벽을 따라 전파하는 파로 신속하게 광범위한 비파괴 검사에 사용되며 특히 배관과 관재의 비파괴검사에 유용하게 사용된다. 또한 두께가 얇은 판, 파이프, 봉 등과 같은 구조물의 결함 검출, 두께측정, 위치추적, 스마트스킨 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 판 구조물에서는 원거리까지 전파되는 유도초음파의 특성상 접근이 어려운 원거리의 결함도 측정이 가능하기 때문에 넓은 영역의 탐지 및 감사가 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 최근 들어 활발히 연구되기 시작했다. 위상배열은 파동이 전파하는 파면, 즉 동 위상면에 동일한 특성을 가지는 센서를 배열하여 동일하게 측정된 신호를 보강 간섭함으로써 큰 신호를 얻는 방법이다.

유도초음파의 위상배열 기법은 Wilcox 등에 의하여 제안되었는데 최근 들어서 많은 관심을 받고 있다. 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 이에 본 연구에서는 유도초음파 위상배열 신호처리 기법을 확립하고

이를 개선하기 위한 방법론을 제안한다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통하여 평판에서의 탐상 결과를 해석하고 측정 및 해석 시스템을 구축하여 실험으로 검증함으로써 실제 적용 가능성을 확인한다.

2. 유도초음파 위상배열 이론

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

$$s(x,t) = \frac{q(t - |x - x_s|/c)}{\sqrt{|x - x_s|}} \quad (1)$$

m번째 센서의 음장은 다음과 같다.

$$s_m(t) = \frac{q(t - r_m/c)}{\sqrt{r_m}} \quad (2)$$

여기서

$$\tau_m = -\frac{r_m}{c} \quad (3)$$

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

$$y(t) = \sum_{m=1}^M w_m s_m(t - \tau_m) = \sum_{m=1}^M w_m \frac{q(t)}{\sqrt{r_m}} \quad (4)$$

결국 출력신호는 음원신호를 보강하여 얻는 신호로 표현된다. 이때 거리에 따른 크기 감소 항이 존재하며 이는 음원의 위치에 따라서 결과를 왜곡하는 영향을 준다. 특히 근거리에서 측정하는 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.

$$w_m = \frac{\sqrt{r_o}}{M} \quad (5)$$

이로부터 배열의 출력은 다음과 같이 얻어진다.

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sqrt{r_o}}{\sqrt{r_m}} q(t) \quad (6)$$

† 교신저자; 정회원, 한국표준과학연구원
E-mail : hyusang@kriss.re.kr
Tel : (042) 868-5057, Fax : (042) 868-5643

* 한국표준과학연구원

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

원거리에서는 센서에서 음원까지의 거리가 배열중심에서의 거리와 거의 같아지므로 결국 $y(t) \approx q(t)$ 와 같이 출력 신호가 음원의 신호와 같게 얻어진다. 이는 위상배열의 각 센서의 위상을 조정하여 시간지연을 준다면 음원의 신호를 재구성할 수 있음을 보여준다.

3. 실험 및 결과

유도초음파 위상배열을 이용한 판 구조물에서의 결함탐지 성능을 확인하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 탄소강 판(SK5)의 크기는 두께 4mm, 가로 1400mm, 세로 1000mm이다. 송신자는 상용제품으로 500 kHz의 공진 주파수를 가지며 수신자로는 지름 8mm, 두께 4.3mm의 PZT 압전소자에 자체적으로 제작한 전치증폭기를 연결하여 배열하여 사용하였다. (Fig. 1)

Fig.1과 같이 소형 알루미늄 조각을 밀착시키고, 혹은 드릴을 사용하여 인위적인 결함을 만들었다. 함수 발생기로부터 100 kHz의 tone-burst 신호를 송신자에 보내고, 16채널의 원형 수신자 배열에서 측정된 신호를 NI-PXI 시스템으로 수집하였다. 샘플링 주파수는 2MHz, 샘플링 개수는 4000개였다.

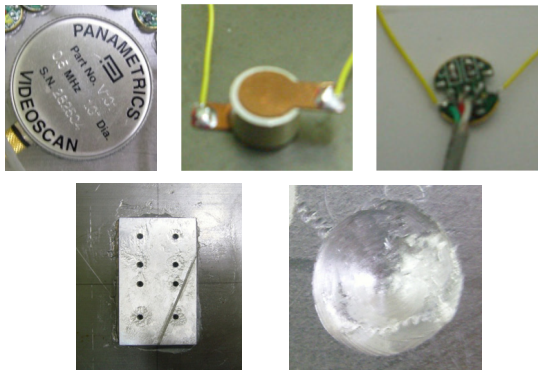


Fig.1 실험에 사용한 송,수신자와 인위결함 사진

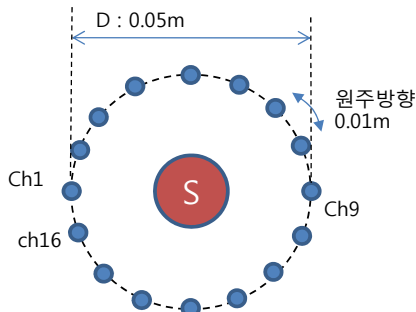


Fig.2 16채널 원형배열

3개의 인위결함을 판재에 부착하고 측정을 하고 해석한 결과는 다음과 같다.

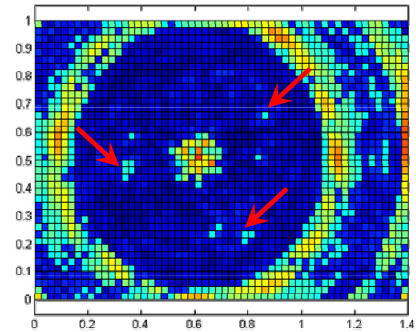
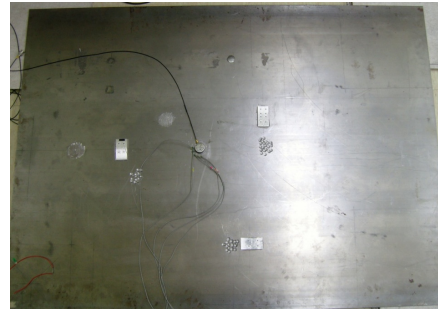


Fig.3 결함 위치 탐지 실험 결과

Fig.3의 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 조각 결함은 비록 신호는 작지만 결함의 위치를 잘 찾을 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

구조물의 결함 탐지를 위한 유도초음파 위상배열에 대한 연구를 수행하였으며 기존의 위상배열 이론을 바탕으로 유도초음파 위상배열의 알고리즘을 정리하였다. 그리고 시뮬레이션과 인위적인 결함을 발생시켜 실험을 통하여 음원과 결함을 실제로 탐지할 수 있음을 확인하였으며 이로부터 유도초음파 위상배열의 가능성을 검증하였다. 실험결과에서 확인한 바와 같이 반사파의 영향을 줄이기 위한 신호처리 연구와 좋은 신호를 얻기 위한 음원과 센서의 설계 및 제작에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467)