

## 배관 원거리 진단을 위한 원주방향 배열 유도초음파 집속기술 개발

### A Study on Techniques for Focusing Circumferential Array Guided Waves for Long Range Inspection of Pipes

강도\*, 김학준\*, 송성진\*<sup>†</sup>, 조영도\*\*, 이동훈\*\*, 조현준\*\*\*

To Kang\*, Hak-Joon Kim\*, Sung-Jin Song\*<sup>†</sup>, Young-Do Cho\*\*, Dong-Hoon Lee\*\*  
 and Hyun-Joon Cho\*\*\*

**초 록** 유도초음파는 현재 산업설비의 배관 등 장거리 탐상에 널리 사용되고 있으며, 특히, 길이가 수백 미터에서 수 km에 달하는 가스 배관의 검사를 위하여 다수의 탐촉자를 이용한 배열 유도초음파 기술의 개발 및 적용이 확대되고 있다. 따라서, 본 연구에서는, 배관의 원거리 검사능 및 정밀도 향상을 위하여 배열 유도초음파의 집속 알고리즘을 개발하였으며, 개발 알고리즘의 성능을 개발 배열 초음파 시스템을 이용한 실험을 통하여 검증하였다. 그 결과 집속 알고리즘을 적용한 배열 유도초음파의 신호대 잡음비(SNR : signal to noise ratio)가 집속 알고리즘을 적용하지 않은 경우에 비해 향상됨을 알 수 있었다.

**주요어:** 배열 유도초음파, 집속 기술, 분산선도, 산업설비 배관, 신호대 잡음비

**Abstract** Ultrasonic guided waves have been widely utilized for long range inspection of structures. Especially, development of array guided waves techniques and its application for long range gas pipe lines (length of from hundreds meters to few km) were getting increased. In this study, focusing algorithm for array guided waves was developed in order to improve long range inspectability and accuracy of the array guided waves techniques for long range inspection of gas pipes, and performance of the developed techniques was verified by experiments using the developed array guided wave system. As a result, S/N ratio of array guided wave signals obtained with the focusing algorithm was increased higher than that of signals without focusing algorithm.

**Keywords:** Ultrasonic Array Guided Wave, Focusing Technique, Dispersion Curve, Pipes, S/N Ratio

#### 1. 서 론

국내 기간산업 설비의 대부분은 1970년대 후반부터 송유관, 가스, 난방 등의 배관 시설이 설치되기 시작하여 30여년이 지난 오늘날 대부분 노후화 되어 부식 및 결함 등이 나타나고 있다. 특히, 현재 국내에 건설되어 있는 대형 건물, 석유화학 플랜트, 발전설비, 지하매설물 등의 배관 라인은 지난 급속

한 경제 성장기에 단기간에 많은 양이 한꺼번에 시공되어 이들 각종 구조물의 배관 및 배관 라인의 안전성에 직·간접적으로 문제가 되고 있다.

산업설비 배관의 건전성 평가를 위하여 일반적인 비파괴 탐상 기법인 초음파탐상(UT), 방사선투과시험(RT), 와전류탐상(ECT), 자속누설탐상(MFL)들이 수행되어 왔으나, 시간의 제약과 경비의 문제로 인하여 대두된 효과적인 방법이 유도초음파 검사방법

이다. 유도초음파 탐상기법은 배관내 고정된 지점으로부터 원거리의 위치를 탐상할 수 있는 장점 때문에 전세계 각국에서 유도초음파 탐상기법에 대한 연구가 활발히 진행되었다[1-4]. 또한, 국내에서도 산업설비 배관 시설의 노후화 문제를 해결하기 위하여 가스배관의 결함 탐지에 대한 연구가 수행된 바 있다[5].

그러나 유도초음파는 일반적인 종파와 횡파와는 달리 각 파동모드의 속도가 주파수에 따라 변화하는 분산적(dispersive)특성을 가지고 있기 때문에, 유도초음파의 신호를 정확하게 발생시키고 이를 수신하여 판독하기 위해서는 피검체의 형상, 두께, 재질, 입사각 및 주파수 등의 탐상조건에 따라 유도초음파의 모드를 예측하고 이에 따라 신호 해석이 가능해야 한다.

이러한 어려움을 극복하기 위하여 배열형 탐촉자를 축방향으로 배치하여 모드를 선택적으로 발생시키는 연구가 이루어졌다[6]. 하지만, 배열형 탐촉자를 축방향으로 배치하여 모드를 선택적으로 발생시키는 것은 단일 탐촉자의 쉐트 각도를 조정하여 모드를 선택적으로 발생시키는 것과 동일하다. 즉, 모드를 알고 있다면, 배열형 탐촉자를 축방향으로 배치하는 것은 효율성이 떨어지게 된다. 또한, 원거리 탐상시 유도초음파의 수신되는 신호의 신호대 잡음비(SNR)가 떨어지는 현상이 발생한다.

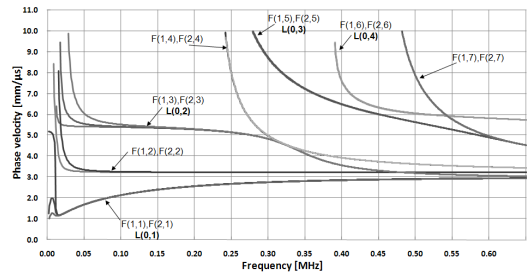
이에 따라, 국외에서는 원거리 탐상시, 원주방향 배열형 탐촉자를 이용한 위상배열 시스템을 개발하여 컨볼루션 알고리즘 기반의 집속기법을 이용하여 유도초음파의 신호대 잡음비(SNR)를 향상시키는 연구를 수행하였다[7]. 본 연구에서는 원주방향 배열형 탐촉자를 이용하여 송·수신 집속 알고리즘을 개발 및 적용하여 배열 유도초음파의 집속을 통한 결함 검출능을 향상시켰다.

2. 이론

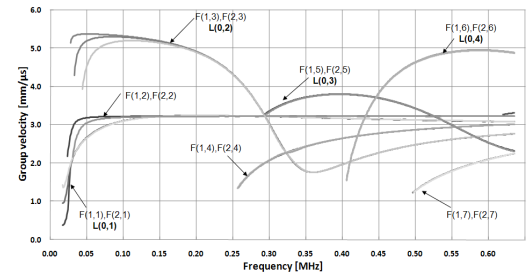
2.1. 분산선도 및 파의 구조

탄성관에 대한 유도초음파 특성방정식으로부터 배관의 분산선도를 얻을 수 있다. 실제로 에너지 전파 속도와 같은 군속도(group velocity)를 구하기 위해 위상속도(phase velocity)를 구하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 1은 ASTM A106 내에서 발생 가능한



(a)



(b)

Fig. 1 Dispersion curve for steel pipe with thickness of 7.1 mm, outer diameter of 82.6 mm and inner diameter of 75.5 mm. The longitudinal and shear wave velocity are 5.92 mm/μs and 3.23 mm/μs, respectively, (a) phase velocity, (b) group velocity

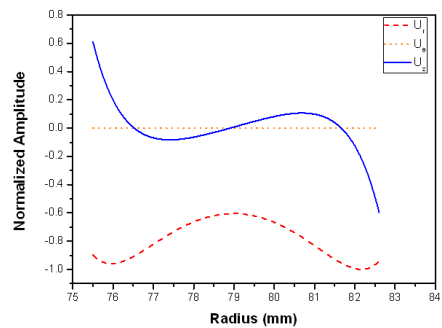


Fig. 2 Wave structure of L(0,1) mode

longitudinal, flexural mode의 위상속도, 군속도의 분산선도를 보여주고 있다. 여기서 같은 모드수(n)를 가지는 각각의 모드들은 서로 비슷한 분산 양상을 가짐을 알 수 있다.

여기서 각각의 모드들이 가지는 위상속도로부터 Snell의 법칙을 이용하여 해당 모드의 입사각을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{V_{\text{아크릴}}}{\sin \theta_{\text{입사}}} = \frac{V_{ph}}{\sin 90} \tag{1}$$

Fig. 2는 ASTM A106 배관의  $L(0,1)$ 모드의 파의 구조를 나타낸다.  $L(0,1)$  모드의 에너지는  $U_z$ 에 의해 가장 큰 영향을 받는데, 외경과 내경근처에  $U_z$ 의 normalized amplitude가 크므로 외경과 내경근처에 발생하는 변화를 측정하는데 용이하다[9].

## 2.2. Guided Waves Focusing Algorithm

탐촉자로부터 거리가  $L$ 인 지점에서의 angular profile tuning을 한다고 하면, 첫 번째 요소의 angular profile은  $H(\theta)$ 이며,  $i$ 번째 요소의 angular profile은  $H(\theta - \theta_i)$ 로 나타낼 수 있다. 총 angular profile  $G(\theta)$ 는 다음과 같다[7,8].

$$G(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} A(\theta_i) H(\theta - \theta_i) = A \otimes H \quad (2)$$

$A(\theta_i)$ 는 각각의 요소에 의해 수집되는 신호인 크기와 위상에 의해 결정된다. 또한, 시간지연은  $A(\theta_i)$ 에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$t_i = -\phi_i / (2\pi f) \quad (3)$$

$f$ 는 주파수이고,  $\phi_i$ 는  $A(\theta_i)$ 의 위상이다. 식 (2)는  $G$ 와  $H$ 의 디컨볼루션으로 표현이 가능하며 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(\theta) &= 1 \otimes^{-1} H \\ A(\theta) &= FFT^{-1}(1/H(w)) \end{aligned} \quad (4)$$

$A(\theta)$ 에 의해 거리  $L$ 에 따른 원주방향으로의 집속위치 조정이 가능하다.

## 3. 배열 유도 초음파 시스템

Fig. 3은 (주)품질안전기술원(AIQS)에서 개발된 원주방향 배열 유도초음파를 발생시키는 GUT-8300T 시스템을 내타내고 있다. 총 8개의 탐촉자를 사용하였고, 각 요소 탐촉자의 크기는  $0.5' \times 1'$ 이며 중심주파수는  $0.6 \text{ MHz}$ 이다. 각각의 배열 탐촉자를 구동하기 위해서 8채널의 초음파 펄서/리시버가 제작되었다. 이 펄서/리시버는 일정한 시간지연을 가지고 각각의 요소 탐촉자를 구동하여 유도초음파를 집속해야 하기 때문에, Fig. 4와 같은 순차적 트리거 회로를 개발하고, 수신된 신호를 주어진 시간지연을 적용하여 통합하는 프로그램을 개발하였다.

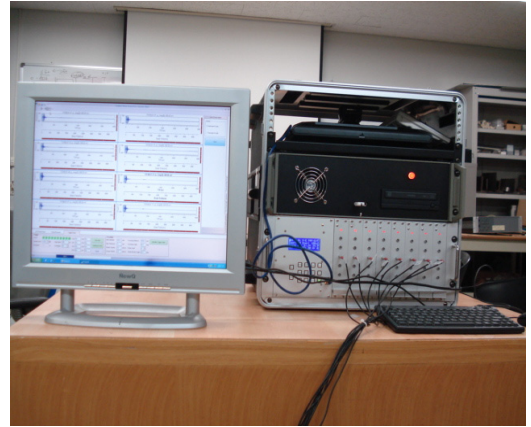


Fig. 3 Photo of developed array guided wave system (GUT-8300T developed by AIQS)

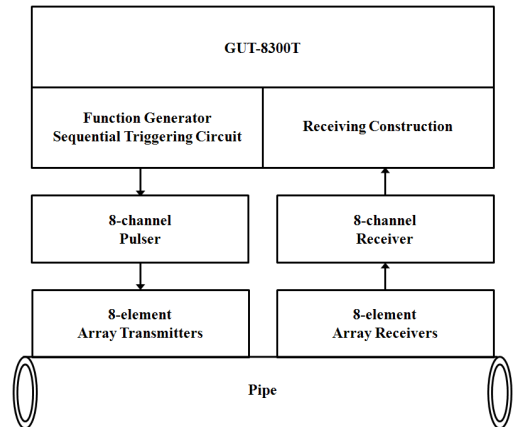


Fig. 4 Schematic diagram of guided waves focusing system using array transducers

## 4. 배열 유도초음파를 이용한 ASTM A106 배관 탐상 실험

### 4.1. 건전한 배관내의 단일탐촉자를 이용한 유도초음파 탐상 실험

유도초음파는 입사각에 따라 모드가 변화하게 되는데,  $L(0,1)$  모드를 발생시키기 위해서 입사각이  $67^\circ$ 인 웨지를 설계, 제작하였다. 재질은 아크릴이며, 종파속도는  $2720 \text{ m/s}$ 이다. Fig. 5는 수신거리가  $1 \text{ m}$ , 탐촉자의 원주방향 위치는  $0^\circ$ 이며 원주방향 ( $0^\circ \sim 315^\circ$ )에 따라 수신된 신호를 보여주고 있다. 원주방향의 위치가  $0^\circ$ 이기 때문에, Fig. 5 (a)와 (i)의 신호의 세기가 큰 것을 알 수 있다.

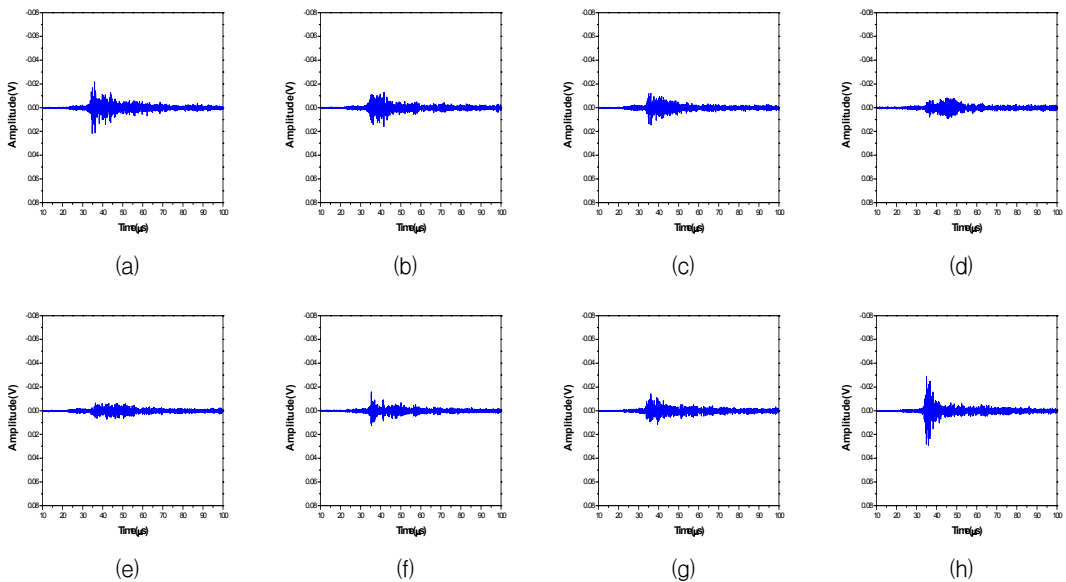
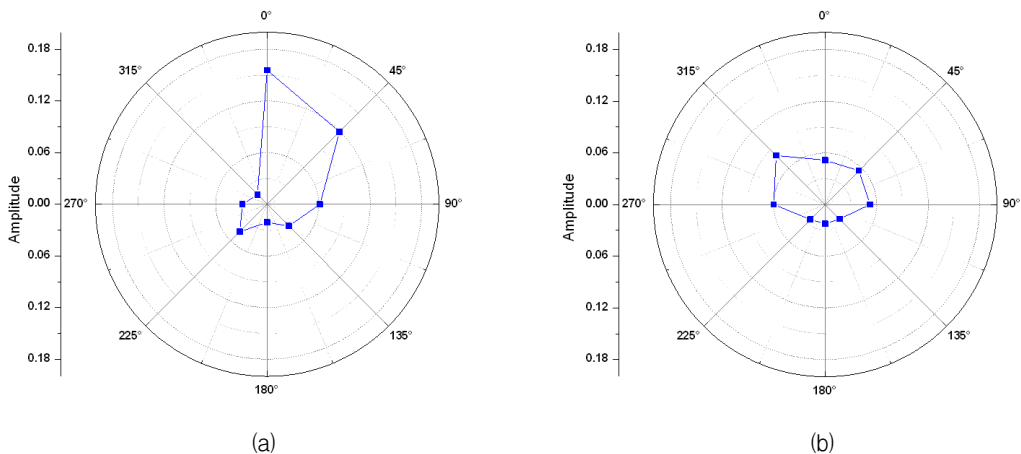


Fig. 5 The signals of L(0,1) mode with variation of circumferential angle of receiving transducer: (a) 0° (b) 45° (c) 90° (d) 135° (e) 180° (f) 225° (g)270° (h) 315° at 1 m distance between the transmitter and the receiver

4.2. 원주방향 입사위치에 따른 단일탐촉자를 이용한 유도초음파 탐상 실험

배열 유도초음파를 이용하여 검속 성능을 수행하기 전에 각각의 탐촉자의 원주방향 각도에 따른 진폭의 분포를 파악하기 위하여 단일탐촉자를 이용하여 원주방향 각도에 따른 진폭 변화 실험을 수행하였다. Fig. 6은 송·수신자의 거리를 3 m로 고정하고 송신자의 원주방향 위치를 0°~315°까지 45°간격으로 변경하면서 발생된 유도초음파 신호를 수신자를

이용하여 0°~315°까지 45°간격으로 수신한 진폭을 극좌표계로 나타낸 것이다. Fig. 6에 보인바와 같이 유도초음파의 원주방향 발생 위치에 따라서 배관내의 유도 초음파 전파 특성이 변함을 알 수 있다. 또한, 유도초음파의 원주방향 입사 위치와 일치하는 원주각에서의 유도 초음파가 그렇지 않은 경우에 비해 진폭이 큼을 알 수 있으며, 특히, 단일 탐촉자를 이용하여 배관내 유도초음파를 발생 시켰을 경우 배관의 원주방향 전 영역을 검사하는데 어려움이 있음을 알 수 있다.



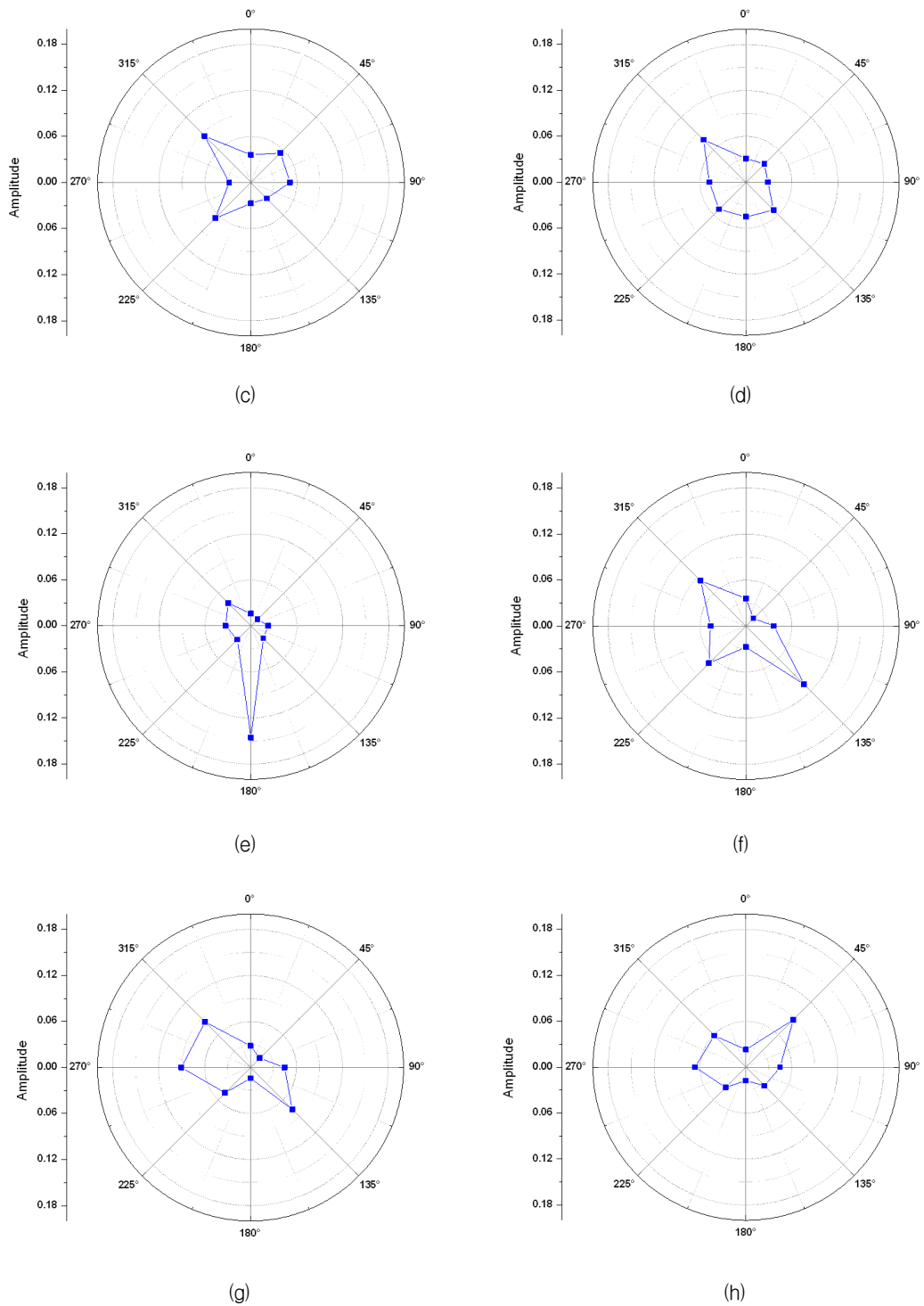


Fig. 6 Polar plots of obtained signals radiated from single transmitter with various circumferential angular position: 0° (b) 45° (c) 90°(d) 135° (e) 180° (f) 225° (g) 270° (h) 315°. Distance of transmitter and receiver is 3 m

Table 1 Calculated time delay for array guided waves focusing point at 1 m and 0°

각도(°)	0	45	90	135	180	225	270	315
시간								
시간지연( $\mu s$ )	11.805	11.055	8.816	5.116	0	5.116	8.816	11.055



Fig. 7 Experimental setup for array guide waves testing for a pipe

4.3. 배열 유도초음파를 이용한 배관 유도초음파 탐상 시험

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 8개의 탐촉자를 원주방향으로 45° 간격으로 배치하기 위한 지그를 제작하고, 제작한 지그를 세가지 형태의 결함 (관통홀, 노치, 자연 결함)이 내재된 시험 배관에 장착하여 실험을 수행 하였다. 또한, 배열 유도초음파를 결함의 위치 (원주방향 및 길이 방향 위치) 짐속하기 위한 시간 지연을 2.2절에 언급한 시간지연 알고리즘을 이용하여 구하였다. Table 1은 ASTM A106 배관에 길이 1m, 원주방향 각도는 0° 위치에 배열 유도 초음파를 짐속하기 위한 시간 지연을 계산한 결과를 나타내고 있다. Table 1에 보인바와 같이, 배열 유도초음파를 짐속하기 위해서는 모든 배열탐촉자에서 발생한 유도초음파의 위상이 짐속 위치에서 일치되어야 하므로, 유도 초음파의 전파 거리가 가장 먼 원주방향의 각도가 180°인 지점의 배열 초음파 탐촉자에서 가장 먼저 유도 초음파를 발생 시켜야 한다.

배열 유도초음파의 짐속성능을 평가하기 위해서 Fig. 8의 (a)~(c)는 지름 5mm 관통홀, 2mm × 30mm × 2mm 노치형 결함과 자연 결함으로 이루어진 세 가지의 mock-up 시험편을 사용하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Mock-up specimens used for array guided wave testing: (a) 5 mm diameter of through hall, (b) 2 mm × 30 mm × 2 mm of notch, (c) natural defect

Fig. 9의 (a)와 (b)는 관통홀 결함이 존재하는 ASTM A106 배관, (c)와 (d)는 노치형 결함이 존재하는 ASTM A106 배관, (e)와 (f)는 자연 결함이 존재하는 ASTM A106 배관내에서 배열 유도초음파를 이용하여 실험한 결과이다. Fig. 9의 (a), (c), (e)는 집속알고리즘을 적용하지 않은 경우 획득한 관통홀, 노치, 자연 결함에 대한 유도초음파 신호이며, Fig. 9 (b), (d), (f)는 배열 유도초음파 집속 알고리즘을 적용한 경우에 대한 유도 초음파 신호를

타나내고 있다. Fig. 9에 보인바와 같이, 배열 유도 초음파 집속 알고리즘을 적용하였을 때 획득한 결함 신호가 집속 알고리즘을 적용하지 않은 신호에 비해 S/N 비가 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 개발한 배열 유도초음파 탐상 시스템과 시간 집속 알고리즘을 적용하면 배열 유도초음파 시험의 배관 내재 결함에 대한 검출능이 향상 될 것으로 사료된다.

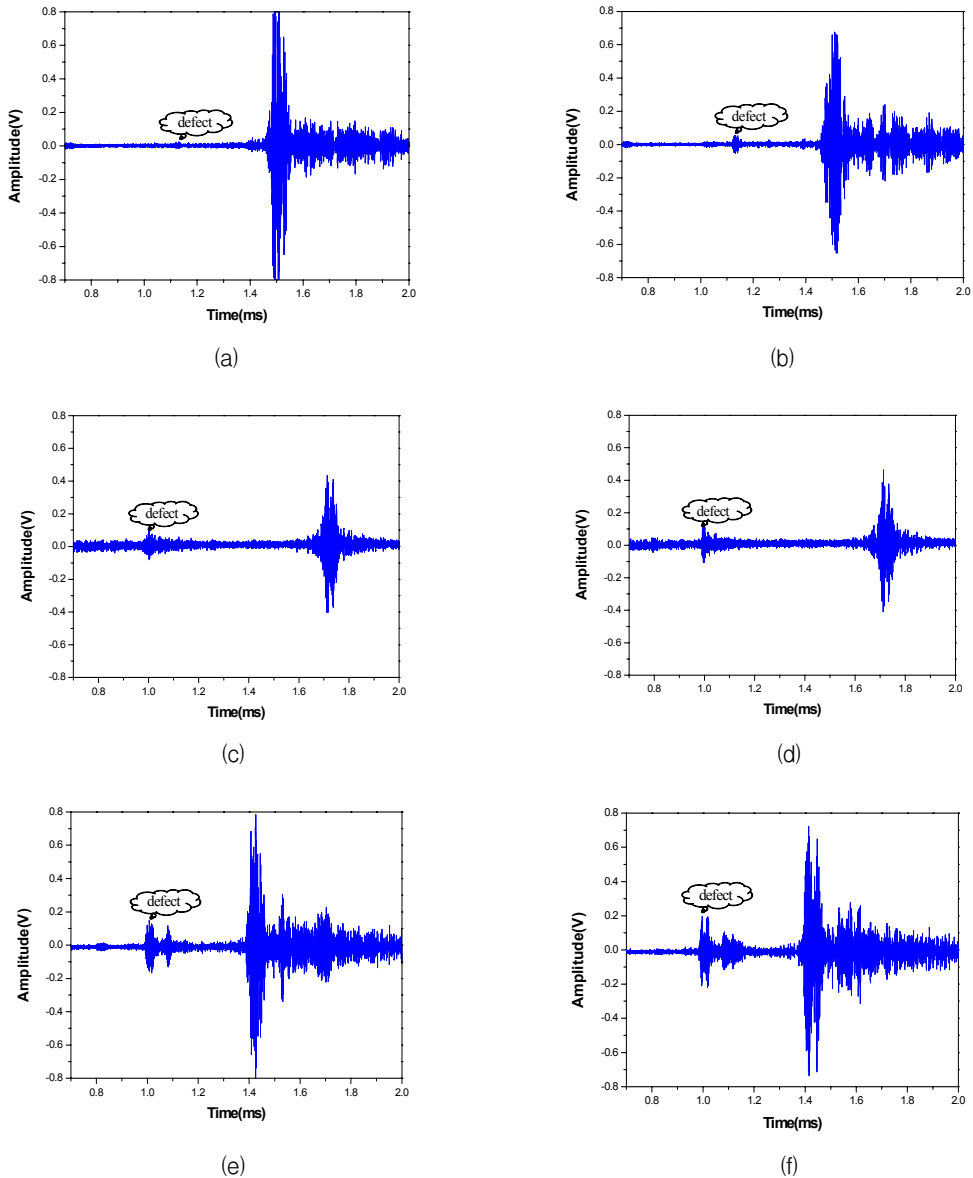


Fig. 9 Obtained signals from the through wall hall ((a), (b)), the notch ((c), (d)) and the natural defect ((e), (f)) without focusing algorithm ((a), (c), (e)) and with time algorithm ((b), (d), (f))

## 5. 결론

본 연구에서는 장거리 배관의 진단을 위한 배열 유도초음파의 집속 기술 및 배열 유도 초음파 시스템을 개발하였다. 개발한 집속 기법과 시스템을 이용하여 ASTM A106 배관에 존재하는 관통홀, 노치, 자연결함에 대한 배열유도초음파 집속 실험을 통해 개발 배열 유도 초음파 집속 기술의 성능을 평가하였다. 본 연구를 통하여 산업설비 배관의 노후화에 따른 배관 결함 혹은 부식 등을 검출하기 위해서는 배열 유도 초음파 기술과 함께 배열 유도 초음파 집속 기술을 적용하는 것이 결함 검출능의 평가 인자인 신호대 잡음비의 향상을 통해 보다 정밀한 배관 비파괴 진단이 가능할 것으로 사료된다.

그러나, 본 연구에서 개발한 기술은 결함에 대한 위치 정보를 기반으로 집속을 위한 시간 지연을 산정 기술로서, 향후에는 배열 유도초음파 집속 기술을 통해 구한 시간지연 값을 토대로 배관의 검사 영역을 설정하고, 주어진 검사 영역에 유도초음파를 집속할 수 있는 시간지연 matrix 산정 기술과, 전자적 스캔을 통한 배관의 결함 이미지를 구축 연구가 필요로 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국가스안전공사가 주관하는 배열 유도초음파 탐상기술 개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구개발 및 지원을 해주신 한국가스안전공사와 (주)품질안전기술원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 송성진, 김영환, 이동훈, 이현동, 배철호, 박정훈, "스케일이 있는 급수관내의 유도초음파의 전파 특성에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 23, No. 1, pp. 1-6, (2003)
- [2] D. C. Gazis, "Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. analytical foundation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, May (1959)
- [3] J. J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of guided wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions," J. App. Phys., Vol. 72, No. 7, pp. 2589-2597, (1992)
- [4] D. N. Alleyne and P. Cawley, "Long range propagation of Lamb wave in chemical plant pipework," Mater. Eval. Vol. 45, No. 4, pp. 504-508, (1997)
- [5] 송성진, 신현재, 박준수, "피복강관의 광범위 비파괴 탐상을 위한 유도초음파 모드에 관한 연구", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회논문집, pp. 527-534, (2000)
- [6] 김영환, 송성진, 박준수, 김재희, 엄홍섭, "배열 탐촉자를 사용한 유도초음파의 모드선정 기법", 비파괴검사학회지, Vol. 25, No. 1, pp. 20-26, February (2005)
- [7] Jian Li and Joseph L. Rose, "Angular-profile tuning of guided waves in hollow cylinders using a circumferential phased array," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 49, No. 12, (2002)
- [8] Jian Li and Joseph L. Rose, "Implementing guided wave mode control by use of a phased transducer array," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 48, No. 3, (2001)
- [9] 정용무, 김상수, 이동훈, 정현규, "원주 유도초음파의 분산 특성 해석 및 가압중수로 피터관 균열 탐지에의 응용", 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 307-314, (2004)