

## 배관 용접부의 상시감시를 위한 유도초음파 모드 규명

### Identification of Guided-wave Modes for on-line monitoring in the pipe weldment

박익근\*, 김태형\*\*, 이철구\*\*\*, 김용권\*\*\*\*, 박태성\*\*\*\*\*, 이진혁\*\*\*\*\*

- \* 서울산업대학교
- \*\* 서울산업대학교
- \*\*\* 서울산업대학교
- \*\*\*\* 에너지환경대학원
- \*\*\*\*\* 서울산업대학교
- \*\*\*\*\* 서울산업대학교

**ABSTRACT** For efficient NDE of pipes, essential components of power plant facilities, ultrasonic guided waves were generated and received applying an air-coupled transducer and comb one as non-contact technology. Mode generation and selection were predicted based on theoretical dispersive curve and the element space of a comb transducer. In addition, a receiving angle of the air-coupled transducer was determined to acquire the predicted modes by theoretical phase velocity of each mode. Theoretical dispersive curve was compared with the results of the time-frequency spectroscopes based on the wavelet transform and 2D-FFT to identify the characteristics of the received mode. The received modes show a good agreement with the predicted ones.

## 1. 서 론

유도초음파를 발생하는 비접촉식의 방법중에 하나인 EMAT는 초음파의 파장을 조절하기가 용이하고 송신효율이 좋다는 장점이 있으나, 시험체에 가깝게 근접해야하는 단점이 있고, ACT는 낮은 음향임피던스의 공기에서 높은 음향임피던스의 고체매질로 전파하는 물리적인 과정에서 송신효율이 떨어지는 단점이 있다.

본 연구에서는 배관의 용접부 검사를 위한 효율적인 유도초음파 검사기법을 개발하기 위한 기초연구로써 적절한 유도초음파 발생 및 수신기법을 선정하고 유용성을 검증하고자 하였다. 그 첫 번째로 유도초음파의 송신 방식은 기존의 PZT를 보완한 comb 트랜스듀서를 사용하고, ACT로 유도초음파를 수신하였다. 또한 발생된 유도초음파 모드에 대한 정확한 규명을 위해 웨이블릿 변환과 2D-FFT를 이용한 시간-주파수 해석을 수행하여, 이론적으로 예측된 유도초음파의 모드를 규명하고자 한다.

## 2. 유도초음파 송/수신 기법

### 2.1 comb 트랜스듀서(송신)

comb 트랜스듀서의 송신효율과 각 모드의 제어는 comb 트랜스듀서 요소의 개수와 요소사이의 간격, 요소의 크기, 주파수, 그리고 압력분포와 같은 각각의 파라미터에 영향을 받는다[2]. 배관 내에서는 발생 주파수와 배관의 두께 및 재질에 의존한다.  $\Delta s$ 는 comb 트랜스듀서 요소사이의 간격으로 본 연구에 사용된 comb 트랜스듀서의 간격은 12mm이다.

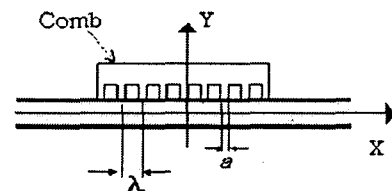


Fig. 1 Parameters of comb transducer  
comb 트랜스듀서의 요소개수는 5개이며, 공칭주파수는 1.5MHz이다.

Fig. 2는 이론적으로 계산된 위상속도 분산곡선과 식(1)의 요소간격,  $\Delta s$ 의 관계를 나타내고

있다.

$$C_p = \Delta S \cdot f = \lambda \cdot f \tag{1}$$

$\Delta S$ 는 발생하는 유도초음파의 파장에 해당하며 Fig. 2와 같이 직선의 관계를 갖는다. 직선과 분산곡선의 교차점에서 유도초음파 모드가 발생된다. 요소의 간격  $\Delta S$ 를 조절함으로써 많은 모드들의 위상속도와 주파수를 조절할 수 있고  $f \cdot d(\text{MHz} \cdot \text{mm})$ 에 해당하는 최적의 모드를 얻을 수 있다.

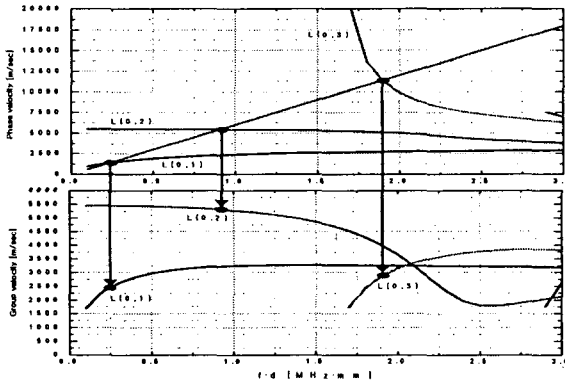


Fig. 2 The relationship between the wavelength and sound velocities

### 2.2 ACT(수신)

ACT의 수신 경사각은 튜브를 진행하는 유도초음파와 공기 중으로 누설되는 유도초음파 파면의 연속성으로 인해서 식(2)와 같이 구할 수 있다[1].

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{C_a}{C_p} \right) \tag{2}$$

여기서  $C_a$ 는 공기 중의 음속이고,  $C_p$ 는 발생모드의 위상속도이다. 각 모드의 위상속도를 이용하여 ACT의 경사각을 계산할 수 있다. Table 1은 파장이 12mm일 때 발생할 수 있는 모드의 위상속도와 ACT의 경사각을 계산한 것이다. 이때 공기의 음속은 340m/sec이며, 실험실의 온도는 23°C이다. 실험에 사용한 ACT(BAT Co., Ltd.) 주파수 수신 대역폭이 0.2~2.25MHz이다.

Table 1 Selected modes and oblique angles of leaky guided waves into air

Mode	Wavelength	12mm	
		$C_p$ [m/sec]	$\theta$ [°]
L(0,1)		2,166	9
L(0,2)		5,200	3.7
L(0,3)		7,400	2.6

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 3는 실험장치의 구성 도를 보여주고 있다. 두께 2mm의 스테인리스 배관에 유도초음파를 발생하기 위해 comb 트랜스듀서를 초음파 발/수신기(Parametrics, Model 5800)를 사용하여 가진 하였다. comb 트랜스듀서의 중심에서 ACT의 중심까지의 거리는 500mm로 설정하였으며, ACT와 스테인리스 배관의 이격거리는 경사각에 따라 다소 다르나 약 30mm이다. 수신된 신호는 웨이블릿 변환을 이용하여 확인한다. 2D-FFT 해석을 위한 데이터는 균등한 간격으로 ACT를 이동하면서 많은 양의 데이터를 획득이 필요하다. 따라서 comb 트랜스듀서의 중앙에서 ACT의 중앙까지의 거리를 500mm 떨어진 위치에서 ACT를 1mm씩 599mm까지 이송하여 100개의 데이터를 획득 하였다. 시험 체와 ACT의 이격거리는 70mm로 설정하였다.

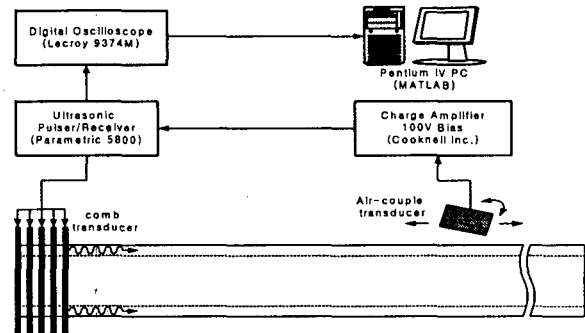


Fig. 3 The setup of experimental system.

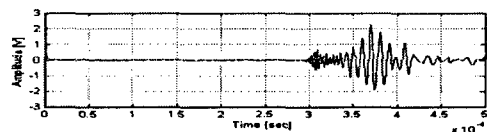


Fig. 4 Waveform of predicted L(0,1) mode with  $\lambda=12\text{mm}$ ,  $\theta = 9^\circ$

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 ACT로 수신된 유도초음파의 파형이다. (a)는 L(0,1)모드의 수신각도인 9°에서 수신된 파형이다. 그림에서와 같이 수신파형은 1개의 모드만이 존재하는 것으로 나타났으며, 파의 형상을 고찰해 볼 때 시간이 지날수록 파장이 커지는 분산성이 나타났다. 이러한 예측

의 정확성을 위해서는 시간-주파수해석을 이용하면 용이하게 확인할 수 있다. Fig. 4의 파형은 이론적으로 예측된 것과 같이 L(0,1) 모드로 규명되었다. 또한 ACT의 수신주파수 대역이 0.2~2.25MHz 이므로 L(0,1) 모드는 군속도 분산선을 따라 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 그러나 수신각도를 변경하여도 L(0,1) 모드는 진폭만 감소되고 지속적으로 수신되었다. 이러한 원인은 comb 트랜스듀서의 격자 간격 12mm에서 발생하게 되는 L(0,m)의 모드에서 원주방향 차수인 m의 값이 커질수록 변환에너지가 감소되는 것으로 판단되며, 부가적으로 모드의 차수가 올라갈수록 주파수가 증가하기 때문에 재료내부에서의 감쇠로 인해 진폭이 더욱 감소된 것으로 사료된다.

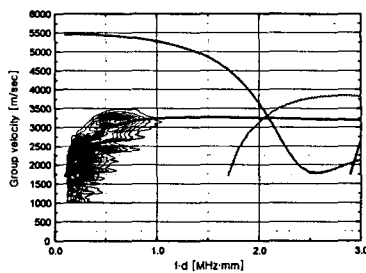
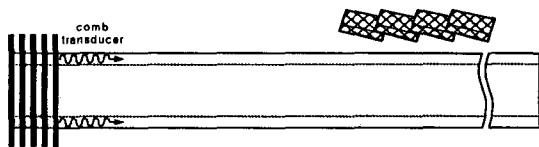
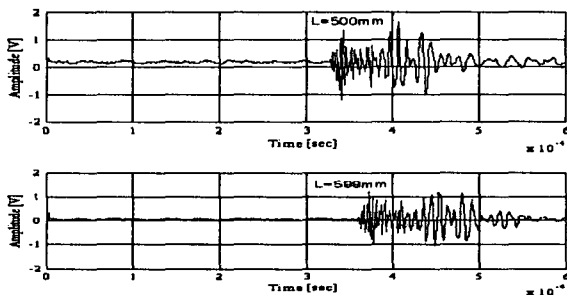


Fig. 5 Group velocity dispersion curve and time-frequency contour plot by wavelet transform,  $\theta = 9^\circ$



(a)



(b)

Fig. 6 Wave detection(a) and waveform(b) at regularly spaced points

Fig. 6은 2D-FFT를 이용한 시간-주파수해석을 위해 획득된 유도초음파의 파형이다. Fig. 6(a)와 같이 ACT의 이동거리를 1mm의 일정한 간격으로 100mm까지 이동하면서 100개의 데이

터를 획득하는 개념을 나타내고 있으며 Fig. 6(b)는 전과거리 500mm에서와 599mm에서의 수신파형을 보여주고 있다. Fig. 7은 획득된 신호를 2D-FFT 시간-주파수해석으로부터 얻은 k-f 이미지와 이론적인 k-f선도를 오버랩하여 나타낸 것이다. 여기서 k는 파수이며, f는 주파수이다. Fig. 2의 위상속도 분산선도를 변환하여 k-f선도로 나타낼 수 있다.[3] Fig. 7의 각 점들은 각각의 모드를 나타낸다. 여기에 2D-FFT의 k-f 이미지를 합성한 결과 Fig. 6(b)의 파형은 L(0,1) 모드임을 규명할 수 있다.

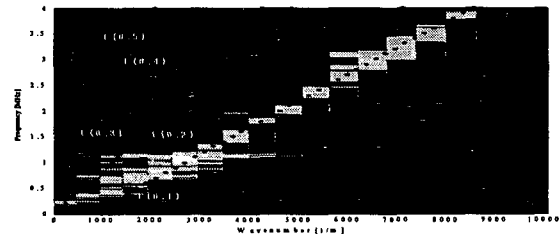


Fig. 7 k-f image by two dimensional FFT (2D-FFT)

### 5. 결 론

comb 트랜스듀서로부터 발생되는 모드를 이론적인 분산선도로부터 예측하여 ACT의 수신각도를 계산하여 수신한 결과 제한적이기는 하나 모드를 선택적으로 수신하는 것이 가능하였다. 또한, 웨이블릿과 2D-FFT를 이용한 시간주파수해석을 적용한 결과 실험적으로 규명된 모드는 이론적으로 예측된 모드와 일치하여 유도초음파의 모드를 규명하는 유용한 기법으로 활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. W. M. D. Wright, D. W. Schindel and D. A. Hutchins, "Studies of Laser-generated Ultrasound using a Micromachined Silicon Electrostatic Transducer in Air", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 95, pp. 2567-2575, (1994)
2. S. Pelts, J. L. Rose and Y. Cho, "A Comb Transducer for Guided Wave Mode Control", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 18, pp. 1029-1036, (1998)
3. T. Hayashi, K. Kawashima, "Mode Extraction from Multi-modes of Lamb Waves", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 21, pp. 219-224, (2002)