

## Air-coupled 트랜스듀서를 이용한 발전설비 배관에서의 유도초음파 모드 규명

### Identification of Guided-Wave Modes in Pipings of Power Plants by using Air-coupled Transducer

박익근\*<sup>†</sup>, 김현묵\*\*, 김용권\*\*\*, 송원준\*\*\*\*, 조용상\*\*\*\*\*, 장경영\*\*\*\*\*, 조운호\*\*\*\*\*

Ik-Keun Park\*<sup>†</sup>, Hyun-Mook Kim\*\*, Yong-Kwon Kim\*\*\*, Won-Joon Song\*\*\*\*,

Yong-Sang Cho\*\*\*\*\*, Kyung-Young Jhang\*\*\*\*\* and Younho Cho\*\*\*\*\*

초 록 발전설비의 중요한 요소인 배관의 효율적인 비파괴검사를 위해, 배관내에 유도초음파를 comb 트랜스듀서를 이용하여 발생시켰으며, 유도초음파를 비접촉 방식으로 수신하기 위해 ACT(air-coupled transducer)를 적용하였다. comb 트랜스듀서의 요소간격과 이론적인 분산선도로부터 발생가능한 유도초음파 모드가 예측되었다. 또한 예측된 모드를 수신하기 위해 각 모드의 이론적인 위상속도를 이용하여 ACT의 수신 각도를 결정하였다. 수신모드의 특성을 규명하기 위해 웨이블릿 변환과 2D-FFT를 이용한 시간-주파수해석을 수행하여 이론적인 분산선도와 비교한 결과, 수신된 모드는 이론적으로 예측된 모드와 일치하는 것으로 나타났다.

**주요용어:** 배관, 유도초음파, Air-coupled 트랜스듀서, 웨이블릿, 2D-FFT

**Abstract** In order to inspect the piping effectively, one of the important components in the facility of power plants, the ultrasonic guided wave was generated by a comb transducer and was received in a non-contact fashion by using an air-coupled transducer. The guided wave modes that can be generated by the comb transducer in piping are predicted from the theoretical dispersion curves and the element spacing of a comb transducer. Moreover, to receive the specific modes, the receiving angle of the air-coupled transducer is calculated from Snell's law between the phase velocities of guided waves and the sound velocity of air. The guided wave modes obtained in experiments are identified from the result of time-frequency analysis such as wavelet transform and two-dimensional fast Fourier transform.

**Keywords:** pipes, guided wave, air-coupled transducer, wavelet, 2D-FFT

#### 1. 서 론

유도초음파는 두께가 얇은 구조물을 전파는 초음파로써 고정된 탐촉자의 위치에서 원거리로 탐상할

수 있는 효율성 때문에 많은 연구자들이 박판이나 셸에 존재하는 결함을 검출하는 연구를 수행하였다 [1-3]. 그러나 기존의 유도초음파 기법에서는 대부분 접촉식 트랜스듀서를 이용하기 때문에 넓은 영역의

(접수일: 2004. 6. 3, 심사완료일: 2004. 7. 9) \* 서울산업대학교 NDE연구센터, \*\* 한양대학교 대학원, \*\*\* 서울산업대학교 에너지환경대학원, \*\*\*\* 포항산업과학연구원, \*\*\*\*\* 한국전력연구원, \*\*\*\*\* 한양대학교 기계공학부, \*\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부, † Corresponding author: Research Institute for Nondestructive Evaluation, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743 (E-mail: ikpark@snut.ac.kr)

Table 1 Type of generator and receiver for guided wave

| Guided wave Generator |                    |                        |             |                              |
|-----------------------|--------------------|------------------------|-------------|------------------------------|
| Type                  | PZT                | EMAT                   | ACT         | Laser (with line array slit) |
| Variables             | frequency<br>angle | wavelength             | angle       | wavelength                   |
| Contact or not        | contact            | closely<br>non-contact | non-contact | non-contact                  |
| Guided wave Detector  |                    |                        |             |                              |
| Type                  | PZT                | EMAT                   | ACT         | Laser Interferometer         |
| Variables             | frequency<br>angle | wavelength             | angle       | displacement                 |
| Contact or not        | contact            | closely<br>non-contact | non-contact | non-contact                  |
| Mode selection or not | selectable         | unselectable           | selectable  | unselectable                 |
| S/N ratio             | good               | good                   | good        | bad                          |

검사에는 시간소요가 많고, 자동화와 현장적용에 어려움이 있다. 따라서 보다 신속하고 효율적인 검사 기법의 개발이 요구되어 왔다. 이와 같은 요구에 따라 최근에는 기계적인 접촉이나 조합을 사용하지 않는 비접촉식 검사기술이 주목을 받고 있다. 즉, EMAT(electro-magnetic acoustic transducer), Laser-ultrasonic, ACT(air-coupled transducer) 등이 단독 또는 조합으로 이용되는 기술에 대한 검토가 이루어지고 있다[4-9].

Table 1은 유도초음파를 송신 및 수신 방식들의 특징을 비교하여 나타내고 있다. PZT를 이용하는 방식은 가장 일반적인 방법으로 신호 대 잡음비가 좋고 경제적인 방법이나, 시험체에 트랜스듀서를 접촉해야하는 단점이 있다. 따라서 PZT의 성능과 대등할 수 있는 비접촉식의 유도초음파 송신 및 수신 기법이 필요하다. 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. 레이저 방식은 선배열의 슬릿을 이용할 경우 파장의 조절이 용이하고 시험체와의 거리에 제한을 받지 않는 장점을 갖고 있지만, 광에너지로부터 음향에너지로 변환되는 효율이 떨어져 장거리로 유도초음파를 발생하는 데는 한계가 있다[10].

유도초음파를 수신하는 방법은 접촉으로 인한 파의 불안정성을 피하고, 자동화의 편의성을 위해 비

접촉식의 기법을 사용하는 것이 바람직하다. EMAT는 신호 대 잡음비가 우수하고 모드를 선택적으로 수신할 수 있다는 장점이 있으나, 센서의 특성상 시험체에 수 mm 이내로 근접해야하는 단점 때문에 검사환경에 제약을 받는다. 레이저 간섭계는 다른 비접촉식 방식에 비해 먼 거리에서 수신할 수 있는 장점이 있으나 현재까지 보고된 바에 의하면 신호 대 잡음비가 다른 트랜스듀서에 비해 상대적으로 낮고, 모드를 선택적으로 수신할 수 없는 단점이 있다. 이와 달리 ACT는 신호 대 잡음비가 다른 비접촉식의 방법에 비해 우수하고, 모드를 선택하여 수신할 수 있으며, 주파수와 ACT특성에 따라 EMAT에 비해 수 배에서 수십 배의 거리에서도 수신가능하다는 장점이 있다[11]. 따라서 유도초음파를 적용하고자 하는 시험체, 검사환경 등의 조건을 고려하여 적절한 송/수신 방식을 선정해야 한다.

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

## 2. 유도초음파 송·수신 기법

### 2.1. Comb 트랜스듀서

Comb 트랜스듀서의 송신효율과 각 모드의 제어는 comb 트랜스듀서 요소의 개수와 요소사이의 간격, 요소의 크기, 주파수, 그리고 압력분포와 같은 각각의 파라미터에 영향을 받는다[12]. 배관 내에서 발생 가능한 유도초음파 모드는 발생 주파수와 배관의 두께 및 재질에 의존한다. Fig. 1은 전형적인 comb 트랜스듀서의 구조를 보여주고 있으며  $\Delta s$ 는 요소사이의 간격으로 본 연구에 사용된 comb 트랜스듀서의 간격은 12 mm이다. Fig. 2는 사용한 comb 트랜스듀서의 형상을 보여준다. 트랜스듀서의 내경은 115 mm로 요소개수는 5개이며, 공칭주파수는 1.5 MHz이다.

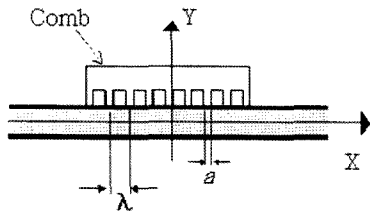


Fig. 1 Parameters of comb transducer



Fig. 2 A comb transducer

Table 2 Material properties and dimensions of the sample tube

| Materials       | Outer Diameter | Thickness | Longitudinal velocity | Transverse velocity |
|-----------------|----------------|-----------|-----------------------|---------------------|
| Stainless steel | 114 mm         | 2 mm      | 6,024 m/sec           | 3,250 m/sec         |

Fig. 3은 Table 2에 나타나 있는 배관의 치수와 재료물성으로부터 이론적으로 계산된 위상속도 분산곡선과 식 (1)의  $\Delta S$ 와의 관계를 나타내고 있다.

$$C_p = \Delta S \cdot f = \lambda \cdot f \quad (1)$$

$\Delta S$ 는 발생하는 유도초음파의 파장( $\lambda$ )에 해당하며 그림에서와 같이 직선의 함수관계를 갖는다. 직선과 위상속도 분산곡선의 교차점에 해당되는 모드의 유도초음파가 발생된다. 요소의 간격,  $\Delta S$ 와 주파수를 조정함으로써 발생시키고자 하는 특정 모드를 얻을 수 있다.

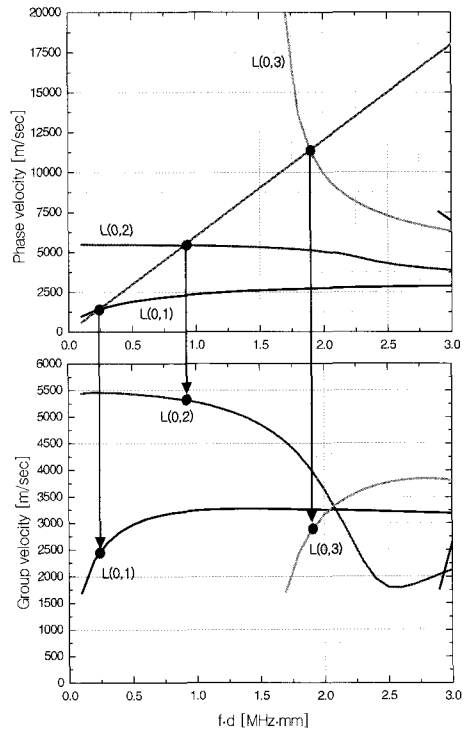


Fig. 3 The relationship between wavelength, and the phase and group velocities

## 2.2. Air-coupled 트랜스듀서

ACT의 수신 경사각은 Fig. 4과 같이 배관을 진행하는 유도초음파와 공기중으로 누설되는 유도초음파 파면의 연속성으로 인해서 식 (2)와 같이 구할 수 있다[10].

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

여기서  $C_a$ 는 공기중의 음속이고,  $C_p$ 는 발생모드의 위상속도이다. Fig. 3에서 모드의 위상속도선과 직선이 교차되는 지점에서 모드는 각각의 위상속도와 주파수를 갖게 된다. 각 모드의 위상속도를 이용하여 ACT의 경사각을 계산할 수 있다. Table 3는 파장이 12 mm일 때 발생할 수 있는 모드의 위상속도와 ACT의 경사각을 계산한 것이다. 이때 공기의 음속은 340 m/sec이며, 실험실의 온도는 23 °C이다. 실험에 사용한 ACT의 주파수 수신 대역폭은 0.2~2.25 MHz이다.

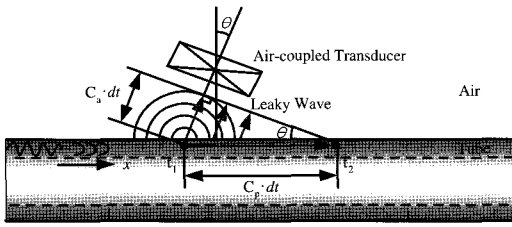


Fig. 4 Consideration of a leaky guided wave and the receiving angle of an air-coupled transducer

Table 3 Selected modes and receiving angles of guided waves leaked into air

| Mode   | Wavelength | 12 mm         |              |
|--------|------------|---------------|--------------|
|        |            | $C_p$ [m/sec] | $\theta$ [°] |
| L(0,1) |            | 1,400         | 14.0         |
| L(0,2) |            | 5,200         | 3.7          |
| L(0,3) |            | 11,250        | 1.7          |

3. 실험장치 및 방법

Fig. 5는 실험장치의 구성도를 보여주고 있다. 두께 2 mm의 스테인리스강 배관에 유도초음파를 발생하기 위해, 초음파 발/수신기(Parametrics, Model 5800)를 사용하여 Energy는 100  $\mu$ J, Damping은 500  $\Omega$ 으로 comb 트랜스듀서를 가진하였다. comb 트랜스듀서의 중심에서 ACT의 중심까지의 거리는 500 mm로 설정하였으며, ACT와 스테인리스강 배관의 이격거리는 경사각에 따라 다소 다르나 약 30 mm이다. 여기서, 이격거리를 1 mm 부터 50 mm 까지 변화시켰을 때 수신 신호의 진폭 변화는 크지 않았으며 50 mm 이후부터는 진폭의 감소가 두드러지는 경향을 보였으나 사용된 ACT의 이격거리를 100 mm 까지 증가하여도 공기 중으로 누설되는 유도초음파의 수신이 가능하였다. ACT를 이용하여 각각의 모드를 선택적으로 수신하기 위해서는, 수신각도를 정확하게 조절하는 것이 중요하기 때문에 Fig. 6과 같이 센서의 회전 및 이송을 위한 지그를 제작하였다. ACT에서 수신된 신호는 100V bias의 Charge Amplifier에 의해 증폭되어 유도초음파 발/수신기의 수신부에서 필터링 된다. 기계적 소음 및 음향 소음을 필터링하기 위해 Highpass filter는 100 kHz, Lowpass filter는 5 MHz로 설정하였다.

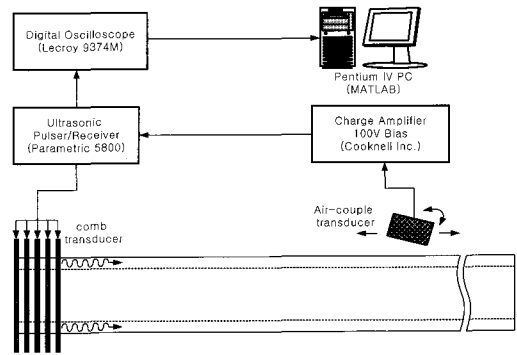


Fig. 5 The setup of experimental system

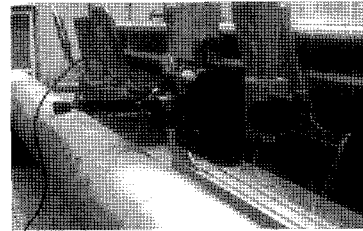
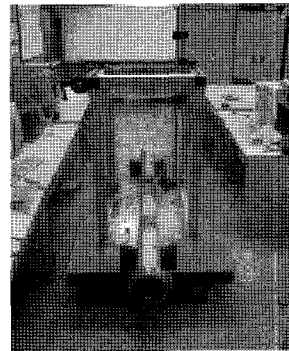


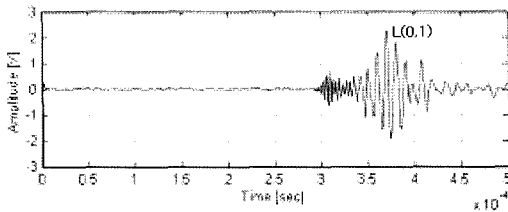
Fig. 6 A scene of the experimental setup and the adjusting jig

최종적으로 유도초음파는 디지털 오실로스코프에서 1000회 평균화되어 저장된 후 컴퓨터에서 웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수해석이 수행된다.

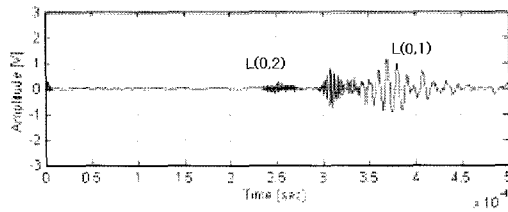
2D-FFT 해석을 위한 데이터는 균등한 간격으로 ACT를 이동하면서 많은 양의 데이터를 획득하는 것이 필요하다. 데이터가 많을수록 해석에서 해상도가 향상되기 때문에 comb 트랜스듀서의 중앙에서 ACT의 중앙까지의 거리를 500 mm 떨어진 위치에서 ACT를 1 mm 씩 599 mm까지 이송하여 100개의 데이터를 획득하였다. ACT의 명확한 비접촉 수신효과를 확인하기 위해 시험체와 ACT의 이격거리를 50 mm로 설정하여 충분히 떨어진 위치에서 수신하였다.

4. 결과 및 고찰

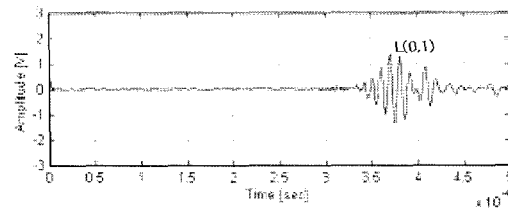
Fig. 7는 ACT로 수신된 유도초음파의 파형이다. 각각의 파형은 Table 3에서 계산된 모드에 따른 각도에서 수신되었다. (a)는 L(0,1)모드의 수신각도인 14°에서 수신된 파형이다. 그림에서와 같이 수신파형은 1개의 모드만이 존재하는 것으로 나타났으며, 파의 형상을 고찰해 볼 때 파의 전파시간에 따라 파장이 증가하는 분산성이 나타났다. 따라서 주파수가 커질수록 군속도가 빨라짐을 알 수 있다. 이러한 예측의 정확성을 위해서는 시간-주파수해석을 이용하면 용이하게 확인할 수 있다. Fig. 8(a)는 Fig. 7(a)의 파형을 웨이블릿 변환을 이용하여 시간-주파수해석된 결과를 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 파형은 이론적으로 예측된 것과 같이 L(0,1) 모드로 규명되었다. 또한 ACT의 수신주파수 대역이 0.2~2.25 MHz이므로 L(0,1) 모드는 군속도 분산선을 따라 넓은 주파수대역에 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 L(0,2) 모드를 수신하기 위한 각도인 3.7°에서 수신된 파형이다.



(a)  $\theta = 14^\circ$

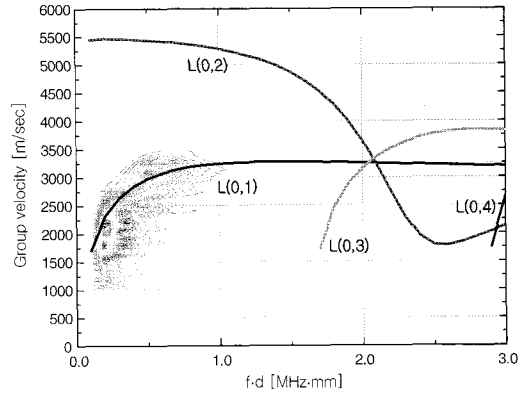


(b)  $\theta = 3.7^\circ$

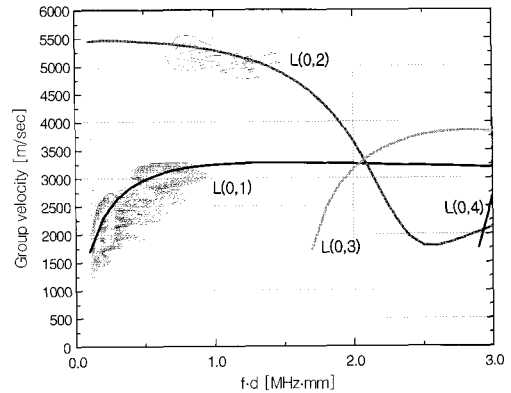


(c)  $\theta = 20^\circ$

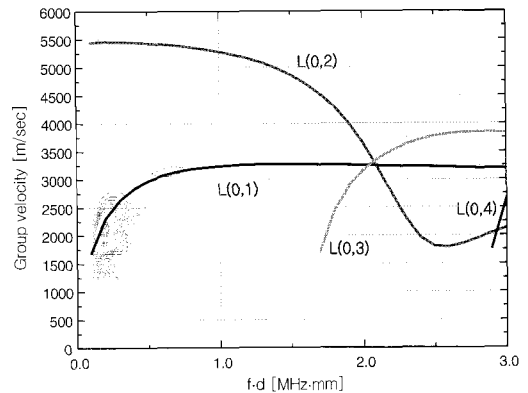
Fig. 7 Waveform of predicted L(0,1) and L(0,2) mode with  $\lambda=12$  mm



(a)  $\theta = 14^\circ$



(b)  $\theta = 3.7^\circ$



(c)  $\theta = 20^\circ$

Fig. 8 Group velocity dispersion curve and time-frequency contour plot by wavelet transform

그림에서와 같이 시간축상의 250  $\mu$ sec에서 새로운 모드의 파형이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 8(b)의 시간-주파수 해석에서 L(0,2) 모드의 군속도 분산선도에 일치하였다. 그러나, 수신각도를 변경하여도 L(0,1) 모드는 진폭만 감소되고 지속적으로 수신되었다. 이러한 원인은 comb 트랜스듀서의 격자간격 12 mm에서 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. 7(c)는 L(0,1) 모드의 파형을 보다 안정적으로 수신하기 위해 수신각도를 20°로 설정한 경우에서의 파형이다. 수신각도가 증가함에 따라 동일한 모드에서라도 빠른 음속을 갖는 파형의 진폭이 크게 감소되어 거의 수신되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 8(c)에서 L(0,1) 모드의 군속도 분산선을 따라 넓게 분포하던 영역이 작아진 것으로부터 증명된다.

Fig. 9는 2D-FFT를 이용한 시간-주파수해석을 위해 획득된 유도초음파의 파형이다. Fig. 9(a)와 같이 ACT의 이송거리를 1 mm의 일정한 간격으로 100 mm까지 이동하면서 100개의 데이터를 획득하는 개념을 나타내고 있으며 Fig. 9(b)는 전파거리 500 mm에서와 599 mm에서의 수신파형을 보여주고 있다. Fig. 10은 획득된 신호를 2D-FFT 시간-주파수 해석으로부터 얻은 k-f 이미지와 이론적인 k-f 선도를 오버랩하여 나타낸 것이다. 여기서 k는 파수(wavenumber)이며, f는 주파수이다. Fig. 3의 위상속도 분산선도를 변환하여 k-f 선도로 나타낼 수 있다[13]. Fig. 10의 각 점들은 각각의 모드를 나타낸다. 여기에 2D-FFT의 k-f 이미지(백색으로 표시된 영역)를 합성한 결과 Fig. 9(b)의 파형은 L(0,1) 모드를 규명할 수 있다.

5. 결 론

발전설비의 중요한 요소인 배관의 효율적인 비파괴검사 기법 개발을 위한 기초연구로서 비접촉 수신방식을 이용한 유도초음파 기법의 적용을 위해 comb 트랜스듀서와 ACT를 결합한 유도초음파 송·수신 시스템을 구축하였다.

comb 트랜스듀서로부터 발생되는 모드를 이론적인 분산선도로부터 예측하여 ACT의 수신각도를 계

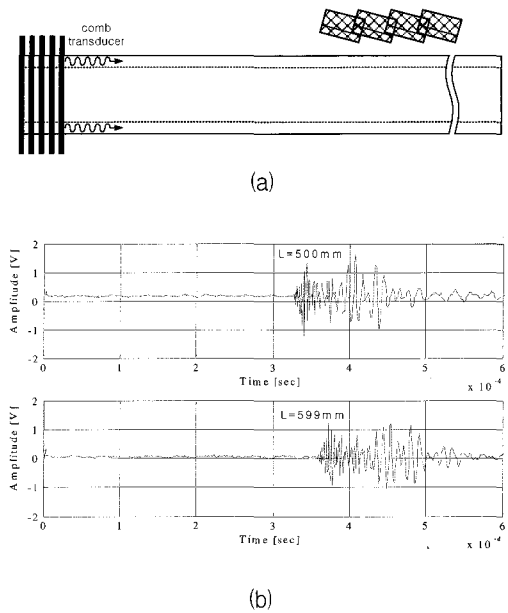


Fig. 9 Regularly spaced wave collection (a) and waveform (b) at 500 and 599 mm

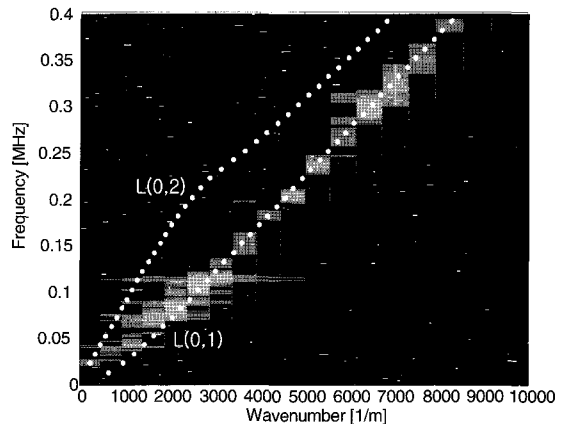


Fig. 10 The k-f image by two dimensional FFT (2D-FFT)

산하여 수신한 결과 제한적이기는 하지만 특정 모드를 선택적으로 수신하는 것이 가능하였다. 또한, 웨이블릿과 2D-FFT와 같은 시간-주파수해석을 통해 실험에서 얻어진 유도초음파 모드와 분산선도를 이용하여 이론적으로 예측된 모드와 일치함을 확인함으로써 이러한 시간-주파수해석들이 유도초음파의 모드를 규명하는 유용한 기법으로 활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] J. L. Rose and Y. H. Cho, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential in the Power Generation Field," *Safety & NDT' 95*, pp. 101-115, (1995)
- [2] H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36, (1998)
- [3] A. E. Bahrawy, "Stopbands and Passbands for Symmetric Rayleigh-Lamb modes in a plate with corrugated surfaces," *J. Sound Vibration*, Vol. 170, No. 2, pp. 145-160, (1994)
- [4] B. Djordjevic, "Advanced Ultrasonic Probes for scanning of Large Structure," *Proc. Ultrasonic International*, Vienna, Austria, (1993)
- [5] D. A. Oursler and J. W. Wagner, "Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves," *Material Evaluation*, Vol. 53, pp. 593-597, (1995)
- [6] S. G. Pierce, B. Culshaw, W. R. Philp, F. Lecuyer and R. Farlow, "Broadband Lamb Wave Measurements in Aluminum and Carbone/grass Fiber Reinforced Composite Materials using Non-contacting Laser Generation and Detection," *Ultrasonics*, Vol. 35, pp. 105-114, (1997)
- [7] D. A. Hutchins, W. M. D. Wright, G. Hayward and A. Gachagan, "Air-coupled Piezoelectric Detection of Laser-generated Ultrasound," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control*, Vol. 41, pp. 796-805, (1994)
- [8] J. R. Park, K. Y. Jhang and K. C. Kim, "Analysis of the Characteristics of Laser-Generated Ultrasonic Waves Detected by PZT Transducer," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 23, No. 9, pp. 1590-1596, (1999)
- [9] K. C. Kim, H. Yamawaki, K. Y. Jhang, "Detection of Laser Generated Ultrasonic Wave Using Michelson Interferometer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 9, pp. 27-32, (2000)
- [10] 김현목, 정경일, 장경영, 안형근, 광노권, 이창목, "레이저를 이용한 얇은 원통형 튜브에서의 유도초음파 발생", *한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 118-125, (2003)
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] T. Hayashi, K. Kawashima, "Mode Extraction from Multi-modes of Lamb Waves," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 21, pp. 219-224, (2002)
- [14] 박익근, 김용권, 조윤희, 안연식, 조용상, "Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도초음파 모드의 거동에 관한 연구", *비파괴검사학회지*, 제 24권, 제 2호, pp. 142-150, (2004)