

◆특집◆ 비접촉 측정

링배열 펄스레이저 조사에 의한 파장매칭형 배관 유도초음파의 비접촉 발생과 검출

임병옥\*, 이태훈\*, 장경영\*\*

Noncontact Generation and Detection of Wavelength-Matched Guided waves in Pipe using Ring-arrayed Pulse Laser Illumination

Byoung Ok Lim\*, Tae Hun Lee\* and Kyung Young Jhang\*\*







**Key Words** : Guided wave (유도초음파), Pipe (배관), Laser (레이저), Wavelength-Matching (파장매칭), Ring-array (링배열)

1. 서론

레이저를 이용한 초음파 기술은 비접촉식으로 유도초음파를 발생시키는데 유용한 방법이다. 이 기술은 레이저 빔의 형상을 다양하게 만들어 목표 지점에 원하는 모양으로 조사할 수 있는 장점이 있다. 레이저 빔은 발생하는 유도초음파의 소스가 되며, 유도초음파의 특성은 이 레이저 빔의 형상에 따라 다르다. Table 1 은 레이저 빔 형태를 비교한 것이다. 일반적으로 점, 선, 선배열의 레이저 빔의 형상을 만들수 있는데, 점형태의 레이저 빔은 간단한 형상이긴 하지만 발생된 파는 전방향으로 전파하고 여러 개의 모드와 주파수 대역의 넓은 범위로 인해 수신된 신호를 해석하기에는 어려운 점이 있다.<sup>1</sup> 선 형태의 레이저 빔은 점 형태보다 방향성을 향상시킨 형태이나 이 역시 파장의 주파수 대역이 넓다.<sup>2</sup>

선배열 레이저 조사는 파장을 고정함으로써 단일모드의 초음파를 만들어 낼 수 있다.<sup>3,4</sup> 이러한 방법을 파장매칭법(Wavelength-matching method)이라 하며, 이는 유도초음파를 발생시켰을 때 모드 분리를 용이하게 한다. 그러나 이 방법은 기존에 주로 판재 검사를 대상으로 하였으며, 배관에 적용할 경우 레이저 빔을 배관 표면에 원주방향으로 균일하게 조사하기 어려운 불편함이 있다.

Table 1 Typical source types of the laser induced guided-wave

	Source Type		
	Point	Line	Line-array
Directivity	Low	High	High
Wave Propagating			
Wave form			
Frequency Bandwidth	Wide	Wide	Narrow (Wavelength Matching)

\* 한양대학교 자동차공학과 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

Tel. 02-2220-0434, Fax. 02-2299-7207

Email [kyjhang@hanyang.ac.kr](mailto:kyjhang@hanyang.ac.kr)

초음파, 레이저-초음파, 광학, AE, 비선형 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

본 논문은 이러한 문제를 해결하기 위해 링배열 방법을 제안한다. 이 방법은 배관 내에 원추형 반사거울을 장착하여 레이저 빔을 반사시키고, 반사된 레이저 빔은 링배열의 슬릿을 통과하여 배관 내벽에 원주방향으로 균일하게 조사된다.

수신에 있어서는 비접촉식 센서인 공기결합 트랜스듀서(Air-coupled transducer, ACT)가 사용되었다.<sup>5</sup> 공기결합 트랜스듀서 외에도 비접촉 센서인 EMAT 를 사용할 수 있지만 강자성체의 시험체만 적용가능하고 비접촉 거리가 1-2mm 내외로 아주 작다.<sup>6</sup> 공기결합 트랜스듀서는 비접촉식으로 배관 표면에서 공기중으로 누설되는 유도초음파를 수신하며 검출각도를 조절함으로써 모드를 선택하여 수신할 수 있는 장점이 있다. 또한 이로써 배관 내에 유도초음파를 완전 비접촉으로 발생시키고 측정할 수 있다.

제안된 방법의 성능을 검증하기 위해서 실험 장치를 구성하였고, 두께 0.6mm, 외경 19mm 의 스테인리스 시험편을 대상으로 실험하였다. 파장은 1.5mm 로 하였으며 최저 차수의 L 모드(Longitudinal) 를 수신하고자 하였다. 수신된 신호의 모드를 확인하기 위하여 시간-주파수 해석법<sup>7</sup> 을 사용하였고, 원주방향으로 균일하게 유도초음파가 발생되었는지를 확인하기 위해 원주방향으로의 신호크기를 구하였다. 또한, 전파거리에 따른 감쇠를 분석하였으며, 이를 선배열 방식과 비교하였다.

## 2. 원리

### 2.1 링배열 레이저 조사에 의한 파장매칭형 유도초음파 발생

Fig. 1 은 실험장치의 구성도를 보여주고 있다. Nd:YAG 펄스 레이저 빔은 빔확대기에 의해 확장되고 확장된 빔은 배관 내에 장착되어 있는 원추형 반사거울에 의해 90 도로 반사되어 배관 내벽에 조사된다. 이 레이저 빔은 원추형 반사거울 외부에 장착되어 있는 링배열의 슬릿을 통과하면서 링배열 형태로 만들어지고 그 배열 간격과 동일한 파장의 유도초음파를 배관 내에 발생시키게 된다. 이때 발생된 유도초음파는 비접촉 센서인 공기결합 트랜스듀서에 의해 수신된다.

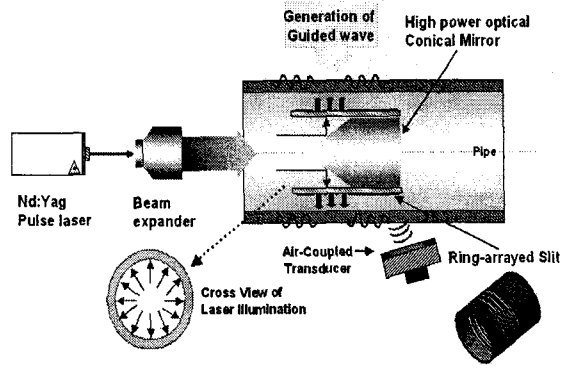


Fig. 1 System construction to launch the ring-arrayed guided wave in pipe and to detect the leaky wave

Fig. 2 는 파장이 고정되었을 때 발생하는 유도초음파의 모드를 예측하기 위하여 위상속도 분산 선도에 파장선을 교차시킨 것이다. 여기서의 분산 선도는 0.6mm 두께의 스테인리스 배관에 대한 것이며, 파장은 1.5mm 로 하였다. 교차점이 동작점을 나타내며 이로부터 발생 가능한 모드 및 주파수, 위상속도, 군속도를 예상할 수 있다.<sup>8-10</sup> Table 2 는 예상된 파라미터들이다.

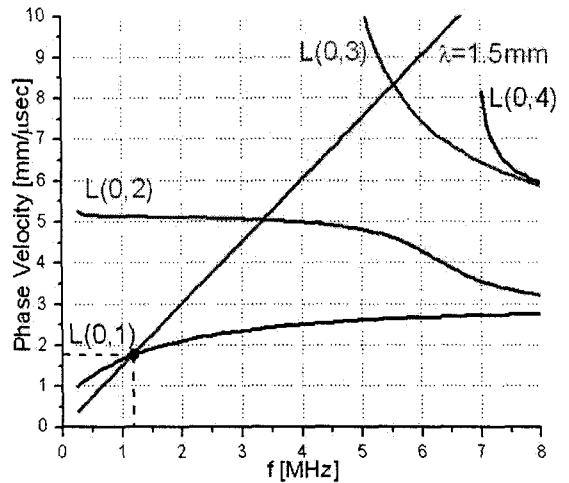


Fig. 2 Dispersion curve for phase velocity in a 0.6mm thick stainless steel pipe

Table 2 Predicted system parameters

Specimen	Stainless steel pipe
Wavelength: $\lambda$ [mm]	1.5
Mode	L(0,1)
Frequency: $f$ [MHz]	About 1.2
Phase velocity: $C_p$ [m/sec]	1842
Air-coupled transducer angle: $\theta$ [degree]	10.6

2.2 공기결합 트랜스듀서를 이용한 검출각 매칭형 유도초음파 수신

공기결합 트랜스듀서의 수신각은 다음 식 (1) 과 같이 구할 수 있다."

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{c_a}{c_p} \right) \quad (1)$$

여기서  $C_a$  는 공기중의 음속을 말하며,  $C_p$  는 발생모드의 위상속도이다. 즉, 유도초음파의 누설각은 위상속도에 의존하는데 위상속도가 서로 다른 경우는 다른 누설각을 가지게 되므로 검출각을 조정함으로써 특정 모드를 선택적으로 수신할 수 있다. 단, 여기서 사용된 공기결합 트랜스듀서 (mBAT-1, MicroAcoustic Instrument)의 수신 주파수 대역은 0.5~2.25MHz 로 이보다 큰 주파수를 갖는 모드는 수신할 수 없다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파장매칭된 유도초음파의 발생과 수신

제안된 방법의 성능을 확인하기 위해서 0.6mm 두께의 스테인리스 배관은 대상으로 실험하였다. Table 2 에서 예상한 시스템의 파라미터를 가지고 파장이 1.5mm 인 L(0,1) 모드만을 수신하고자 하였다. Fig. 2 에서와 같은 동작점 분석에 의해 발생되는 L(0,1) 모드의 주파수는 약 1.2MHz, 위상속도는 1842m/s, 누설각은 약 10.6 도이다. 수신위치는 링배열 슬릿 중심에서 50mm 떨어진 지점에서

하였고, 공기 결합 트랜스듀서와 배관과의 이격거리는 10mm 이다.

Fig. 3 은 이렇게 예상한 파라미터를 바탕으로 수신한 신호를 보여주고 있다. 첫번째로 도달하는 신호는 링배열 슬릿에서 곧바로 전파되어 수신된 신호이고, 두번째로 도달하는 신호는 배관 끝에서 반사되어 수신된 신호이다.

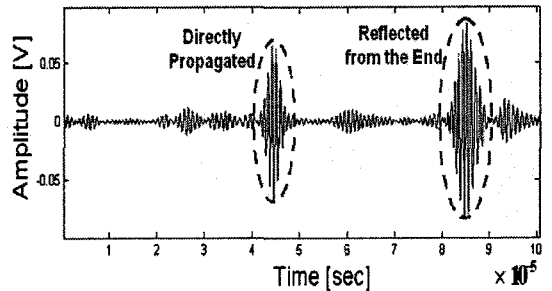


Fig. 3 The received signal from the stainless steel pipe specimen

Fig. 4 는 Fig. 3 에서 수신한 신호가 예상한 모드의 주파수와 일치하는지 확인하기 위해서 FFT (Fast Fourier Transform) 처리하여 얻은 스펙트럼이다. 이 결과를 보면 첫번째로 도달하는 신호와 두번째로 도달하는 신호 모두 중심주파수가 1.2MHz로 두 신호가 같은 성분임을 알 수 있고, 또 예상한 주파수와 실제 실험에서 얻은 결과가 정확히 일치함을 알 수 있다. 또한, Fig. 3 에서 유도초음파가 전파한 시간을 알 수 있는데, L(0,1) 모드의 군속도와 전파거리에 의해 계산한 수신 시간이 각각 48 $\mu$ sec 와 87 $\mu$ sec로 일치함을 알 수 있다.이로부터 제안하는 방법에 의해 L(0,1) 모드의 단일 모드 유도초음파를 송·수신할 수 있음을 확인할 수 있다.

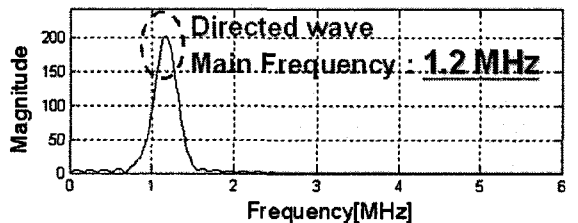


Fig. 4(a) Power spectrum of the directly propagated wave

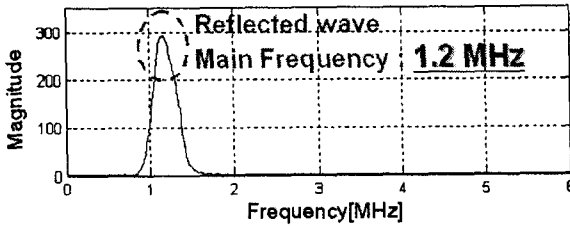


Fig. 4(b) Power spectrum of the reflected wave from the end

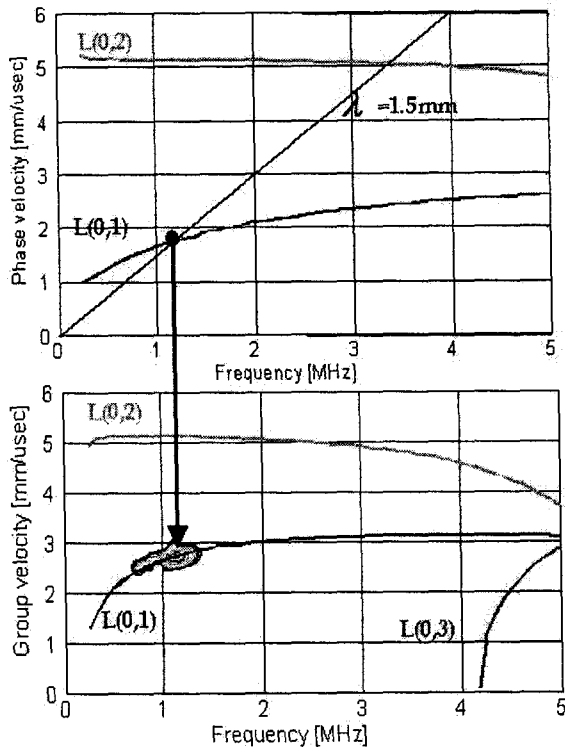


Fig. 5 The STFT matching with dispersion curve in a stainless steel pipe

Fig. 5 는 수신된 유도초음파 신호의 STFT (Short Time Fourier Transform) 처리한 결과를 군속도 분산선도에 나타낸 것이다. 위의 그래프는 위상속도 분산선도를 나타내며 교점은 동작점을 나타낸다. 아래 그래프는 군속도 분산선도로써 수신 신호의 성분이 정확히 L(0,1) 모드의 동작점에 해당함을 보여준다. 이로써 L(0,1) 모드의 유도초음파가 정확히 발생되고 수신되었음을 확인할 수 있다.

### 3.2 링배열과 선배열의 비교

서론에서 언급했듯이 링배열 방법은 레이저 빔을 배관 내면에 원주방향으로 균일한 유도초음파를 발생시키는 것을 목표로 하였다. 그러나, 기존의 선배열 방법을 배관에 적용할 경우, 배관 표면의 일부분에만 레이저 배열빔이 조사되어 원주방향으로 균일한 유도초음파를 발생시키기 어렵다. 이 차이점을 비교하기 위하여 수신점을 원주방향으로 0도, 90도, 180도, 270도 네 위치로 나누어 수신하였다. Fig. 6 은 링배열과 선배열의 레이저 조사시 배관 표면에 조사되는 레이저 빔의 형태와 수신기의 수신 위치를 보여주고 있다.

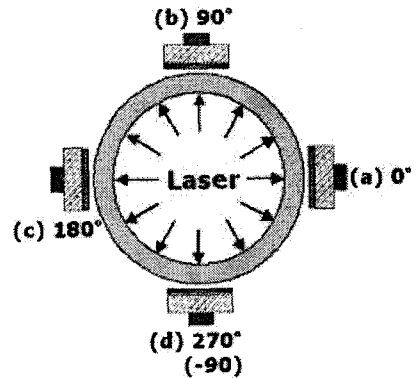


Fig. 6(a) Angular position of the Ring-arrayed illumination

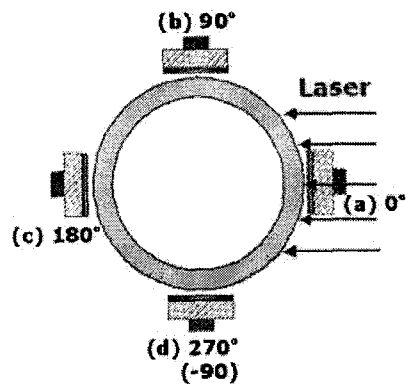


Fig. 6(b) Angular position of the Line-arrayed illumination

Fig. 7 은 링배열과 선배열 조사시 네 위치에서 수신한 신호의 피크치를 비교하여 나타낸 결과이다. 이 결과에서 링배열 방법은 신호의 피크치가 수신 위치에 따라 거의 변하지 않고 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 유도초음파가 배관 내에서 원주방향으로 일정하게 발생하였다는 것을 의미한다. 그러나, 선배열의 결과를 보면 신호의 피크치가 수신 위치에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있다. 특히 레이저 조사점과 동일 폭선상 위치(0 도)에서의 신호크기에 비해 다른 위치에서의 신호는 상대적으로 매우 작게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 선배열 방법의 경우 유도초음파가 배관 표면의 일부분에서만 발생하였음을 증명한다.

한편 링배열과 선배열 슬릿에서 레이저 조사점과 동일 축선상 위치(0 도)에서의 신호의 피크치가 다른 이유는 링배열과 선배열 슬릿을 통과해서 시험편 표면에 조사되는 에너지의 차이 때문이다. 즉, 레이저 출력이 동일하여도 링배열은 원주방향으로 균일하게 조사되는데 반해, 선배열은 일부분에서만 조사되므로 선배열의 경우에서 레이저 에너지 밀도가 높게 된다. 따라서 이때 발생하는 신호의 피크치는 선배열의 경우가 링배열의 경우보다 더 커지게 된다.

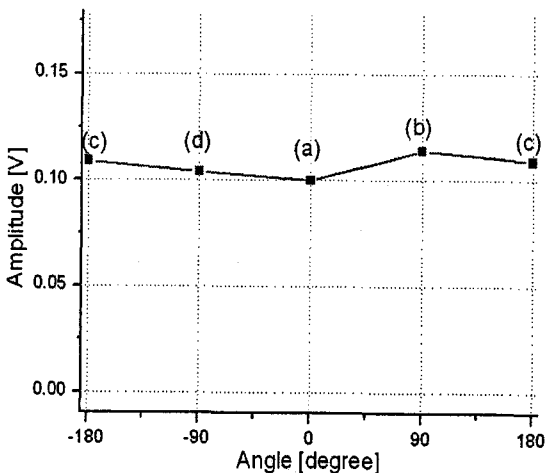


Fig. 7(a) Peak amplitude distribution of Ring-arrayed slit

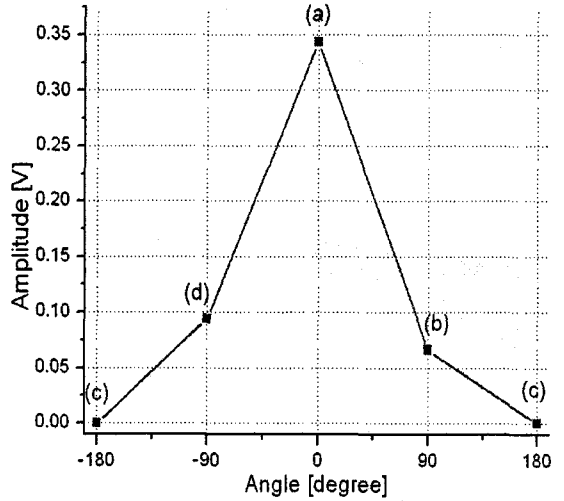


Fig. 7(b) Peak amplitude distribution of Line-arrayed slit

### 3.3 전파거리에 따른 감쇠 비교

Fig. 8 은 링배열과 선배열 방법의 거리에 따른 전파거리에 따른 감쇠비교 그래프이다. 본 실험에서는 앞의 경우와 달리 두 방법에서 얻어지는 신호 크기의 절대적인 비교를 위해 시험편 표면에 조사되는 레이저 에너지 밀도가 동등해지도록 레이저 출력을 조절하여 실험하였다. 수신점의 위치는 0 도를 유지하면서 레이저 조사점으로부터 거리를 초기위치에서 20mm 씩 800mm 까지 변화시켜 가며 파크치를 측정하였다. 단, 초기위치에서의 피크치가 같아지도록 레이저 출력을 조절하였다. 링배열 방법의 경우 약 72mJ, 선배열의 경우 약 36mJ 로 하였다. 실험 결과를 보면 링배열 슬릿의 경우 첫번째 지점에서의 신호의 피크치보다 마지막 지점에서의 피크치가 약 66.5% 줄어든 것을 볼 수 있다. 반면에 선배열 슬릿의 경우 첫번째 지점에서 신호의 피크치보다 마지막 지점에서의 신호의 피크치가 약 97.2% 줄어든 것을 볼 수 있다. 두 방법을 비교해보면 링배열의 방법이 선배열의 방법보다 감쇠율이 훨씬 적은 것을 할 수 있다. 또한 전파거리에 따른 감쇠를 비교해보면 링배열의 방법이 선배열 방법보다 20dB 이상 향상된 결과를 보인다.

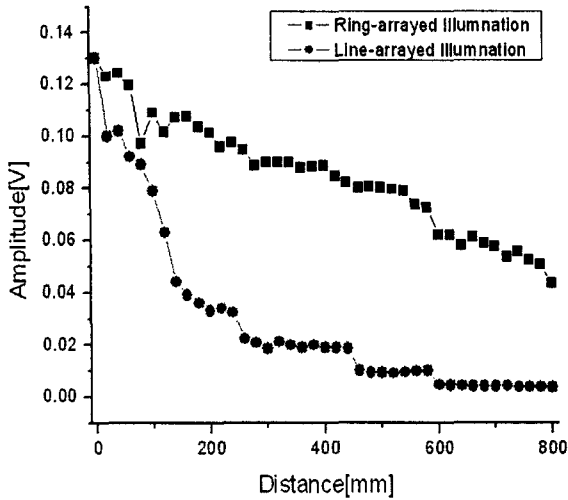


Fig. 8 Attenuation comparison between Ring & Line-arrayed slit

#### 4. 결론

본 연구는 링배열 펄스레이저와 공기결합 트랜스듀서를 이용하여 비접촉식으로 배관 내에 유도초음파를 원주방향으로 일정하게 발생시키고 검출하는 방법을 제안하였고, 성능 검증을 위한 실험을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 링배열의 레이저 빔을 배관 내에 조사함으로써 단일 파장의 L 모드 유도초음파를 발생시킬 수 있다.
- 2) 공기 결합 트랜스듀서의 수신각을 조절하여 단일 모드의 유도초음파 신호를 검출할 수 있다.
- 3) 링배열 방법으로 유도초음파를 배관 원주방향으로 균일하게 발생시킬 수 있었다.
- 4) 링배열 방법은 기존의 선배열 방법에 비해 전 파거리에 따른 감쇠에 있어서도 현저히 향상된 (20dB 이상) 결과를 보였다.

#### 후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00018)

#### 참고문헌

1. Tsukahara, Y., "Analysis of the elastic wave excitation in solid plates by phase velocity scanning of a laser beam," Appl. Phys. Lett, Vol. 59, No. 25, pp. 2384 – 2385, 1991.
2. Huang, J., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J.D., "Laser-generation of narrow-band surface waves," Ultrasonics Symposium, Proceeding IEEE, pp. 537 – 541, 1992.
3. Baldwin, K. C., Berndt, T. P. and Ehrlich, M. J., "Narrowband laser generation/ air-coupled detection," Ultrasonics, Vol. 37, No. 5, pp. 329 – 334, 1999.
4. Jhang, K. Y., Kim, H. M., Jung, K. I. and Ahn, H. K., "Automatic non-contact defect inspection of cylindrical shell using a laser-ultrasonic technique," Key engineering Materials, Vol. 270, No. 1, pp. 334 – 339, 2004.
5. Hutchins, D. A., Wright, W. M. D., Hayward, G. and Gachagan, A., "Air-coupled piezoelectric detection of laser-generated ultrasound," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 41, pp. 796 – 805, 1994.
6. Hwnag, E. C., Jhang, K. Y., Ahn, B. Y., Lee, S. S., Kim, S. K. and Kim, S. Y., "Measurement of Plastic anisotropy of cold rolled steel sheets using electromagnetic acoustic transducer," Proceedings of KSPE 1994's Autumn Conference, pp. 383–388, 1995.
7. Kwun, H. and Bartels, K. A., "Experimental observation of wave dispersion in cylindrical sheels via time-frequency analysis," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 97, No. 6, pp. 3905, 1995.
8. Rose, J. L., "Ultrasonics wave in solid media," Cambridge university press, pp. 154 – 161, 1999.
9. Eisenhardt, C., Jacobs, L. J. and Qu, J., "Application of laser ultrasonics to develop dispersion curves for elastic plates," Journal of Applied Mechanics, Vol. 66, No. 4, pp. 1042 – 1045, 1999.
10. Daniel, C. R. Jr. and Berthelot, Y. H., "Dispersion curve analysis of laser-generated Lamb waves," Ultrasonics, Vol. 32, No. 4, pp. 249 – 253, 1994.

11. Kim, H. M., Lee, T. H. and Jhang, K. Y., "Non-contact Single-Mode Guided Wave Technique by the Combination of Wavelength-Matched Laser Generation and Angle-Matched Leak Wave Detection," Key Engineering Materials, Vol. 326-328, pp. 477 – 480, 2006.