

모드 선택성을 강화한 비접촉식 유도초음파 기술

Non-Contact Guided Wave Technique with Enhanced Mode-Selectivity

김현묵*, 이태훈*, 장경영**†

Hyun-Mook Kim*, Tae-Hun Lee* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 유도초음파의 현장적용에 있어 전파모드를 규명하는 것은 매우 어렵지만 중요한 과제이다. 본 연구에서는 분산성이 적은 단일모드를 발생시키고 검출할 수 있는 기법에 대해 다루고 있으며, 현장 적용성과 자동화를 위해 비접촉식의 기법을 적용하였다. 모드 선택성을 강화한 비접촉식의 유도초음파 기법으로는 선배열 슬릿을 이용한 레이저 빔을 이용하였으며, 에어커플 변환기를 수신자로 사용하였다. 선배열의 레이저 조명은 파장과 일치하여 특정한 모드를 발생시킬 수 있다. 또한, 에어커플 변환기는 공기 중으로 누설되는 유도초음파를 수신각도를 조절하여 선택적으로 모드를 수신할 수 있다. 1 mm 두께의 알루미늄 판에 본 기법을 적용한 실험결과로부터 제안하는 기법의 유용성을 검증하였고, 특히 단일한 a_0 모드의 발생 및 수신에 효과적인 기법으로 나타났다.

주요용어: 레이저-초음파, 유도초음파, 파장 맞춤, 각도 맞춤, 모드 선택, 에어커플 변환기

Abstract In practical applications of guided wave techniques, it is very important but also difficult to identify the propagating modes, and it is preferred to generate and detect a single or less dispersive mode. Also the noncontact method is required in the automated field application. So this paper considers a non-contact guided wave technique with enhanced mode-selectivity, where a laser beam illuminated through arrayed line slits is used as the transmitter and the air-coupled transducer is used as the receiver. The line arrayed laser illumination is a wavelength matching technique that can generate only a few modes. The air-coupled transducer detects the leaky wave of the propagated guided wave, and by tuning its detection angle we can detect the selected single mode. Experimental results for a 1 mm thick aluminum plate proved the usefulness of the proposed method, and especially it was shown that this method was powerful in the generation and detection of the a_0 mode.

Keywords: laser-ultrasound, guided wave, wavelength matching, angle matching, mode selection, air-coupled transducer

1. 서 론

두께가 얇은 판재를 따라 전파하는 유도초음파(guided wave 또는 Lamb wave)는 고정된 탐촉자의 위치에서 원거리 탐사를 할 수 있는 유용한 초

음파이며, 많은 연구자들이 이러한 장점을 활용하여 박판이나 셸에 존재하는 결함을 검출하는 연구를 수행하였다[1-3].

그러나 기존의 초음파 기법에서는 대부분 접촉식 트랜스듀서를 이용하기 때문에 넓은 영역의 검사에

는 시간소요가 많고, 자동화와 현장적용에 어려움이 있다. 따라서 보다 신속하고 효율적인 검사기법의 개발이 요구되고 있다. 이와 같은 요구에 따라 최근에는 기계적인 접촉이나 조합을 사용하지 않는 비접촉식 검사기술이 주목을 받고 있다. 즉, EMAT (electro-magnetic acoustic transducer), 레이저-초음파 (laser-ultrasound), 에어커플 변환기 (air-coupled transducer) 등이 단독 또는 조합으로 이용되는 기술에 대한 검토가 이루어졌다[4-11]. 그런데 EMAT는 파장을 조절하기가 용이하고 송신효율이 좋다는 장점이 있으나 시험체가 전도체이어야 하고 수 mm 이내로 근접시켜야 하는 불편한 점이 있다. 반면 레이저-초음파 방식은 선배열의 슬릿을 이용할 경우 파장의 조절이 용이하고, 시험체와의 거리에 제한을 받지 않아 안정적인 비접촉식 유도초음파 발생 방식이다[12].

한편 완전한 비접촉식 방식을 구현하기 위해서는 수신되는 파장도 비접촉식 방법이어야 하는데, EMAT는 S/N비가 좋고 발생된 램파의 모드를 선택적으로 수신할 수 있다는 장점이 있으나 앞서 기술한 단점이 있고, 레이저 간섭방식은 다른 비접촉식 방식에 비해 먼 거리에서 수신할 수 있는 장점이 있으나, 현재까지 보고 된 바에 의하면 S/N비가 상대적으로 낮고 모드를 선택적으로 수신할 수 없는 단점이 있다. 이와 달리 에어커플 변환기는 S/N비가 우수하고 모드를 선택하여 수신할 수 있으며, 100 mm까지 떨어진 거리에서도 수신할 수 있다는 장점이 있다[8].

이상에서 유도초음파를 비접촉으로 발생하는 방법으로는 선배열 슬릿을 이용한 레이저-초음파 방식이 유리하고, 수신하는 방법으로는 에어커플 변환기를 이용하는 것이 모드 선택성 측면에서 효율적이고 안정적인 조합이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 레이저와 에어커플 변환기를 조합한 유도초음파 송/수신 시스템을 제안하고, 발생된 램파의 모드에 대한 정확한 규명을 위해 웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수 해석[13-15]을 수행하여 이론적으로 예측된 결과와 비교함으로써 본 연구에서 제안한 시스템의 기본적인 성능을 고찰하고자 한다.

2. 유도초음파의 비접촉식 발생 및 수신

2.1. 선형 배열 레이저조사를 이용한 유도초음파의 모드 선택적 발생

Fig. 1은 전체시스템의 구성도를 보여준다. 레이저 빔은 빔폭을 확장하고 검사체 표면에 가까이 설치된 선배열 슬릿을 갖는 마스크에 조사된다. 이러한 슬릿을 이용하는 것은 선배열(line array) 광원과 동등한 효과를 얻기 위한 것이다. 즉, 슬릿의 배열 간격은 발생하는 유도초음파의 파장에 일치하기 때문에 슬릿의 간격을 조정하여 특정한 유도초음파 모드를 효과적으로 발생시킬 수 있다.

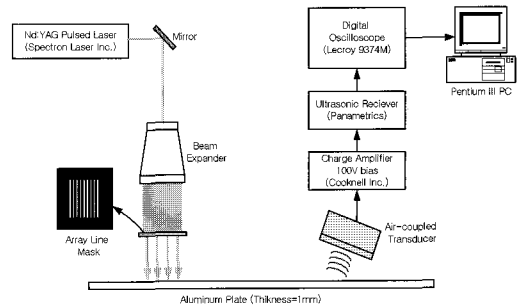


Fig. 1 System configuration for the mode-selective and non-contact Lamb wave system

Fig. 2는 이렇게 파장이 정해지는 경우, 발생 가능한 유도초음파의 모드를 예측하기 위해 분산선도 위에 파장선을 중첩시켜 나타낸 것이다. 여기서 분산선도는 본 연구에서 사용된 1 mm 두께의 알루미늄 박판에 대해 구한 것이다[16]. Fig. 2(a)는 위상속도분산선도를 나타내며, Fig. 2(b)는 군속도 분산선도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 2(a)에서 나타낸 직선이 파장선이며 그 기울기는 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda = \frac{C_p}{f} \quad (1)$$

여기서, C_p 는 유도초음파의 위상속도, f 는 주파수, λ 는 파장이다. Fig. 2(a)로부터 파장이 2 mm인 경우, 1.21 MHz의 a_0 모드, 2.21 MHz의 s_0 모드 등이 발생 가능함을 알 수 있다.

한편 이런 선배열 슬릿을 이용하면 배열에 수직인 방향으로 최대의 초음파 에너지가 전파하는 지향성을 갖게 되는데 이것은 결함의 위치를 정확하게 규명하는데 유리하다. 또한 슬릿의 개수가 증가할수록 협대역 신호를 발생시킬 수 있어 신호의 S/N비도 향상되는 효과를 얻을 수 있다.

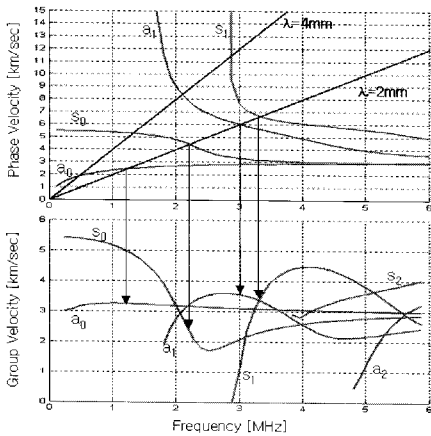


Fig. 2 (a) Phase velocity and (b) group velocity dispersion curves for 1 mm aluminum plate

2.2. 에어커플 변환기를 이용한 유도초음파의 모드 선택적 수신

에어커플 변환기는 Fig. 3에 보인 바와 같이 공기 중으로 누설되는 유도초음파를 고감도로 수신한다. 이 때 누설방향은 판재를 진행하는 파와 공기 중으로 누설된 파의 파면의 연속성으로 인해 식 (2)와 같이 전파속도에 의존하게 된다.

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

여기서, C_a 는 공기의 음속이다.

따라서 에어커플 변환기의 수신각을 수신하고자 하는 유도초음파 모드의 누설방향에 맞추면 해당 모드만을 수신할 수 있게 된다.

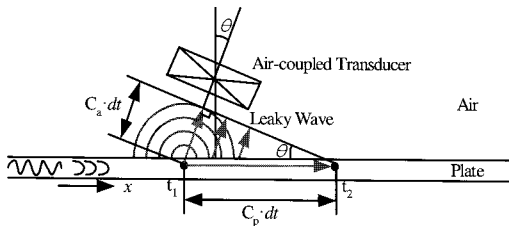


Fig. 3 Radiation of leaky Lamb wave and detection by the air-coupled transducer

3. 실험조건 및 방법

두께 1 mm의 알루미늄 박판에 유도초음파를 발생시키기 위해 사용된 레이저는 Nd:YAG 펄스 레

이저로 파장은 1.064 μm, 펄스폭은 10 ns이다. 또한 레이저의 에너지는 0.5 J로 설정하였으며 빔폭을 확장하여 조사하는 관계로 열탄성 영역의 초음파가 발생한다. 마스크의 선배열 슬릿은 Fig. 4와 같이 설계되었으며, 발생하는 초음파의 파장을 조절하기 위해 슬릿의 간격을 2 mm와 4 mm로 달리하였다.

한편 에어커플 변환기로는 광대역 전기 용량형을 사용하였으며, 수신각은 예상되는 유도초음파 모드의 위상속도를 고려하여 식 (2)에 의해 계산되었다. Table 1은 설계된 슬릿의 파장에 따라 발생하는 특정한 모드가 공기중으로 누설되는 각도를 계산한 것이다. 이때 측정된 공기의 음속은 331 m/s이다. 단, 사용된 변환기의 주파수대역은 0.1 kHz ~ 2 MHz로, λ = 2 mm에서는 a₀모드만, λ = 4 mm에서는 a₀와 s₀모드만이 수신 가능한 것으로 예상된다.

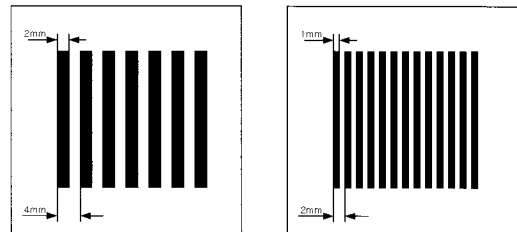


Fig. 4 Shape of arrayed line slit mask

Table 1 Calculated radiation angle of the Lamb wave leaked into air

Wave length (λ)	2 mm		4 mm	
	C _p [km/s]	θ[°]	C _p [km/s]	θ[°]
a ₀	2.420	7.9	1.821	10.5
s ₀	4.424	4.3	5.268	3.6
a ₁	5.923	3.2	8.392	2.3
s ₁	6.650	2.9	11.528	1.6

레이저 조사 중심으로부터 측정점까지의 거리는 95 mm이며, 변환기와 알루미늄 박판의 이격거리는 경사각에 따라 다소 다르나 대략 5 mm 내외로 하였다. 여기서, 이격거리를 50 mm까지 변화시켰을 때 수신 신호의 진폭 변화는 크지 않았으며, 50 mm 이후부터는 진폭의 감소가 두드러지는 경향을 보였으나, 이격거리를 100 mm까지 증가하여도 측정은 가능하였다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프에서 저장된 후 PC를 이용하여 처리되었다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 파장이 2 mm인 선배열 슬릿 마스크를 이용했을 때의 수신된 파형이다. Table 1에서와 같이 누설파의 방향성을 고려하여 에어커플 변환기의 수신각이 계산되었다. Fig. 5(a)는 a_0 모드를 수신하기 위한 조건에서 수신된 파형으로, S/N비가 우수한 파형이 수신되었다. Fig. 5(b)는 s_0 모드를 수신하기 위한 조건에서의 파형이다. 그러나 s_0 모드의 파형은 수신되지 않았으며 상대적으로 S/N비가 좋지 않은 a_0 모드만이 수신되었다. 이것은 앞에서 기술한 바와 같이 에어커플 변환기의 수신 주파수 대역이 파장 2 mm에서의 s_0 모드의 주파수인 2.3 MHz를 초과하기 때문이다. 또한 55 μ s 부근에서 발생한 파형은 a_0 모드 누설파가 에어커플 변환기의 표면과 알루미늄 박판 사이에서 반사되어 수신된 파형이다. 이러한 현상은 변환기의 경사각이 비교적 큰 경우에는 거의 나타나지 않았다.

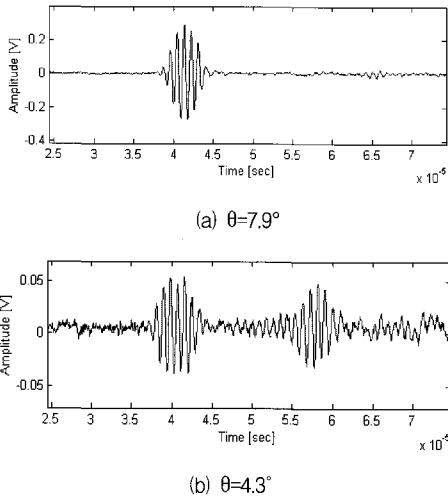


Fig. 5 Detected waveform at $\lambda=2$ mm, when the detection angle was tuned for (a) a_0 mode and (b) s_0 mode.

Fig. 6은 파장이 4 mm인 경우에 수신된 파형이다. Fig. 6(a)는 a_0 모드를 수신하기 위한 조건에서의 수신파형이며, Fig. 6(b)는 s_0 모드를 수신하기 위한 조건에서의 수신파형이다. 수신각이 10.5°일 때 S/N비가 우수한 a_0 모드의 파형이 수신되었다. 반면 s_0 모드의 수신 조건인 수신각 3.6°에서는 27 μ s 부근에서 s_0 모드의 발생을 확인할 수 있었

으나 a_0 모드도 동시에 수신되었다. 이것은 a_0 모드의 에너지가 상대적으로 매우 강하여 s_0 모드의 수신에 영향을 미치는 때문이다. 또한 Fig. 5(b)에서와 마찬가지로 변환기와 박판 사이에서의 반사성분이 나타나고 있다.

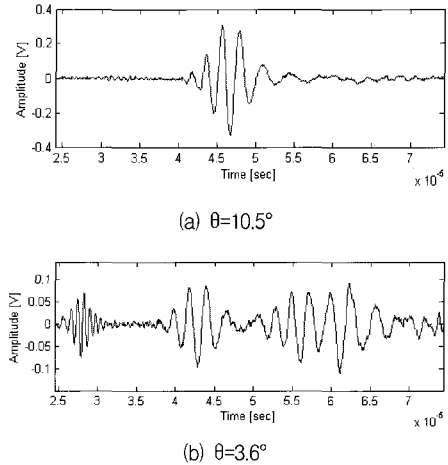


Fig. 6 Detected waveform at $\lambda = 4$ mm when the detection angle was tuned for (a) a_0 mode and (b) s_0 mode

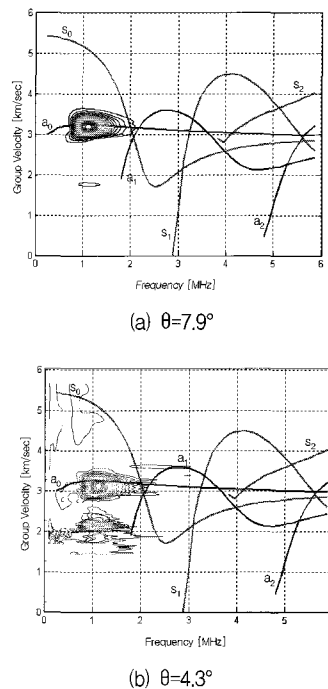


Fig. 7 Dispersion curve of group velocity and contour plot of wavelet transform for the detected signals at $\lambda = 2$ mm

한편 이론적으로 예측된 전파모드를 실험적으로 규명하기 위해서는 획득한 신호의 분산특성을 고려해야 한다. 따라서 수신된 신호를 웨이블릿 변환을 이용하여 시간-주파수영역에서 분석하고 앞에서 예측한 모드를 확인하여 보았다. 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타낸다. 웨이블릿 변환된 신호는 등고선도로 표현하였으며, 이론적인 군속도 분산선도와 비교하기 위해, 시간축을 군속도로 환산하여 나타내었다. Fig. 7은 Fig. 5의 파형에 대한 변환결과이며, Fig. 8은 Fig. 6의 파형에 대한 변환결과이다. 결과적으로 이론적으로 예측했던 Fig. 2의 모드와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

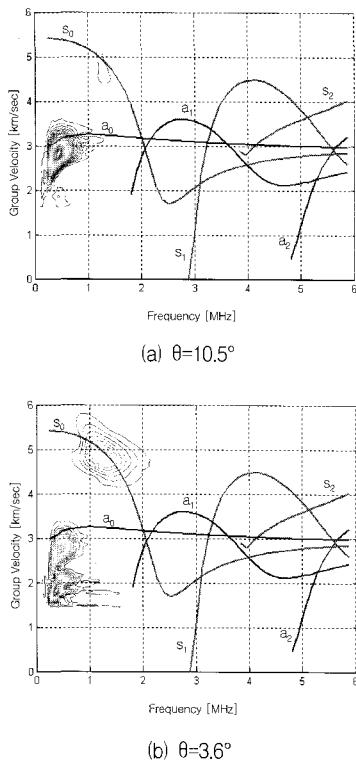


Fig. 8 Dispersion curve of group velocity and contour plot of wavelet transform for the detected signals at $\lambda = 4$ mm

5. 결론

비접촉식 유도초음파(램파)를 실용적으로 이용하는데 있어서 극복해야 할 문제 중의 하나인 모드 선택성을 향상시키기 위하여 선배열 슬릿을 이용한 레이저 조사와 에어커플 변환기를 이용한 누설파

수신 기술을 접목하는 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 선배열 슬릿 마스크를 통한 Nd:YAG 펄스레이저 조사에 의해 발생하는 유도초음파의 파장을 조절할 수 있으며, 이로써 Lamb파 모드의 발생을 제어하는 것이 가능하였다. 또 발생하는 모드의 위상속도와 주파수를 예측하는 것이 가능하다.
- 2) 예측된 위상속도로부터 공기중으로 누설되는 초음파의 모드별 전파방향을 예측할 수 있으며 이에 맞추어 에어커플 변환기의 수신각을 결정함으로써 특정 모드의 선택적 수신이 가능하였다. 이로써 비접촉으로 모드선택성을 강화한 유도초음파의 송수신이 가능하였다.
- 3) 제안된 기술은 두께 1 mm 알루미늄판에 대해 파장 2 mm와 4 mm의 유도초음파를 발생시키고 수신하는 실험을 통하여 그 유효성이 실증되었으며, 수신 파형에 대해 웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수 해석을 수행한 결과 실험적으로 획득한 파형이 이론적인 분산선도에서 예측한 모드와 일치함이 증명되었다.
- 4) 본 연구에서 구성할 실험조건에서는 a_0 모드의 발생과 수신이 매우 효과적이었으며, 따라서 a_0 만을 선택적으로 이용하는 경우에 특히 유용한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-042-E00008)

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] S. S. Lee and T. S. Jhang, "Understanding of Laser-based Ultrasonics," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 22, No. 1, pp. 74-87, (2002)
- [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] K. Y. Jhang, H. J. Kim, D. Ceringlia and B. Djordjevic, "Non-Contact Ultrasonic Testing of Aircraft Joints using Laser Generated Lamb Wave," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 21, No. 2, pp. 163-168, (2001)
- [13] H. J. Shin and S. J. Song, "Time-localized Frequency Analysis of Ultrasonic Guided Waves for Nondestructive," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, D. O. Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 19, pp. 709-716, (1999)
- [14] D. N. Alleyne, P. Cawley, "A 2-dimensional Fourier Transform Method for the Quantitative Measurement of Lamb Modes," IEEE 1990 Ultrasonics Symposium Proceedings, New York, Vol. 2, pp. 1143- 1146, (1990)
- [15] W. H. Prosser, M. D. Seale and B. T. Smith, "Time-Frequency Analysis of the Dispersion of Lamb modes," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 105, No. 5, pp. 2669-2676, (1990)
- [16] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," pp. 111-113, Cambridge University Press, (1999)