

공기-결합 트랜스듀서를 이용한 레이저 여기 램파의 검출과 웨이블릿 변환을 이용한 전파모드 규명

김현묵[†] · 김홍준^{*} · 장경영^{**} · 이준현^{***}

Detection of Laser excited Lamb-wave using Air-coupled Transducer and Identification of Propagation Mode using Wavelet Transform

Hyun-Mook Kim, Hong-Jun Kim, Kyung-Young Jhang and Jun-Hyun Lee

Key Words: air-coupled transducer(공기-결합 트랜스듀서), laser-ultrasonic(레이저-초음파), guided wave(유도초음파), wavelet transform(웨이블릿 변환)

Abstract

This paper proposes a single-mode Lamb-wave generation and detection system using a pulsed laser as a generator and an air-coupled transducer combined with the wavelet transform analysis, as the detector. The laser source with arrayed linear slits was used to generate Lamb-wave which is able to control the wavelength of Lamb-wave to be generated by changing the slits separation. An air-coupled transducer was used to receive Lamb-wave, which can selectably receive a single mode of leaky Lamb wave by changing the oblique angle of transducer, since the leaky Lamb-wave has unique leaky-angle according to the mode. Also, the received signal was processed by wavelet transform for the analysis in domain of time-frequency. The theoretical dispersion curve and the experimental result was compared to show good agreement.

1. 서 론

초음파 비파괴평가는 감도, 경제성 등에 있어서 유리하기 때문에 접합불량이나 크랙과 같은 기계적 결함의 평가에 효과적인 방법으로 널리 이용되고 있다. 그러나 기존의 초음파 기법에서는 대부분 접촉식 트랜스듀서를 이용하기 때문에 넓은 영역의 검사에는 시간소요가 많고, 자동화와 현장 적용에 어려움이 있다. 따라서 보다 신속하고 효율적인 검사기법의 개발이 요구되고 있다. 이와 같은 요구에 따라 최근에는 기계적인 접촉이나 조합을 사용하지 않는 비접촉식 검사기

술이 주목을 받고 있다. 즉, EMAT, 레이저 방식, 공기-결합 트랜스듀서(air-coupled transducer) 등이 단독 또는 조합으로 이용되는 기술에 대한 검토가 이루어졌다[1-3].

다양한 초음파의 종류에서 램파(Lamb wave)는 박판과 같은 두께가 얇은 구조물을 전파하는 초음파로써 고정된 탐촉자의 위치에서 원거리 탐사를 할 수 있는 유용한 초음파이며 많은 연구자들이 이러한 램파의 장점을 활용하여 박판이나 셸에 존재하는 결함을 검출하는 연구를 수행하였다[9-11]. 그러나 기존의 연구는 일반적으로 접촉식 방식이 사용되었으며, 최근에는 앞에서 언급한 바와 같은 비접촉식으로 램파를 송수신할 수 있는 방법이 주목받고 있다[4-7]. Table 1은 램파를 발생하고 수신할 수 있는 방식들의 특징을 비교하여 나타내고 있다. PZT를 이용하는 방식은 가장 일반적인 방법으로 S/N비가 좋고 경제적인 방법이나 시험체에 트랜스듀서를 접촉해야하는 단

[†] 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

E-mail : mookstory@hanmail.net

TEL : (02)2281-9206 FAX : (02)2281-9206

^{*} 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

^{**} 한양대학교 기계공학부

^{***} 부산대학교 기계공학부

Table 1 Type of the generator and detector for Lamb wave

Lamb-wave Generator				
Type	PZT	EMAT	Air-coupled transducer	Laser (with line array slit)
Variables	frequency angle	wavelength	angle	wavelength
Contact or not	contact	closely non-contact	non-contact	non-contact
Lamb-wave Detector				
Type	PZT	EMAT	Air-coupled transducer	Laser Interferometer
Variables	frequency angle	wavelength	angle	displacement
Contact or not	contact	closely non-contact	non-contact	non-contact
Mode selection or not	selectable	unselectable	selectable	unselectable
S/N ratio	good	good	good	bad

점이 있다. EMAT는 파장을 조절하기가 용이하고 송신효율이 좋다는 장점이 있으나 시험체에 가깝게 근접해야하기 때문에 고온의 환경에는 적용할 수 없다는 단점이 있고, 공기-결합 트랜스듀서는 낮은 음향임피던스의 공기에서 높은 음향임피던스의 고체매질로 전파하는 물리적인 과정에서 송신효율이 떨어지는 단점이 있다. 반면 레이저 방식은 선배열의 슬릿을 이용할 경우 파장의 조절이 용이하고, 시험체와의 거리에 영향을 받지 않아 안정적인 비접촉식 램파 발생 방식이다. 완전한 비접촉식 방식을 위해서는 수신되는 과정도 비접촉식 방법이어야 하는데, EMAT는 S/N비가 좋고 발생된 램파의 모드를 선택적으로 수신할 수 있다는 장점이 있으나 송신에서와 마찬가지로 시험체에 근접해야하는 단점이 있고, 레이저 방식은 다른 비접촉식 방식에 비해 먼 거리에서 수신할 수 있는 장점이 있으나 현재까지 보고된 바에 의하면 S/N비가 상대적으로 낮고, 모드를 선택적으로 수신할 수 없는 단점이 있다. 이와 달리 공기-결합 트랜스듀서는 S/N비가 좋고 모드를 선택하여 수신할 수 있으며, 다소 떨어진 거리에서도 수신할 수 있다는 장점이 있다[8].

다양한 램파의 비접촉식 발생 및 수신방식에 대해 조사한 결과, 램파를 발생하는 방법으로는 선배열 슬릿을 이용한 레이저 방식이 유리하고, 수신하는 방법으로는 공기-결합 트랜스듀서를 이용하는 것이 효율적이고 안정적인 조합이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 레이저와 공기-결합 트랜스듀서를 조합한 램파 송수신 시스템을

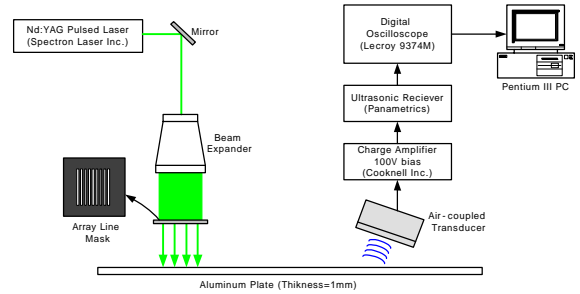


Fig. 1 System configuration for Laser generation of Lamb wave and air-coupled detection.

제안하고, 발생된 램파의 모드에 대한 정확한 규명을 위해 웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수 분석을 수행하여 이론적으로 예측했던 결과와 비교함으로써 본 연구에서 제안한 시스템의 기본적인 성능을 고찰하고자 한다.

2. 비접촉식 램파 송수신 시스템

Fig. 1은 전체 시스템의 구성도를 보여준다. 레이저 빔은 빔폭을 확장하고 검사체 표면에 가까이 설치된 배열 라인 슬릿을 갖는 마스크에 조사된다. 이런 슬릿을 이용하는 것은 배열 선형 광원과 동등한 효과를 얻기 위한 것이다. 즉, 라인 슬릿을 이용하므로 슬릿에 수직한 방향으로 최대의 에너지가 전파하는 지향성을 갖게 되고 이 지향성은 슬릿의 개수가 많을수록 강해지며, 이런 효과는 검사 영역을 국소화하여 결함의 위치를 정확히 규명하는데 유리하다. 또 슬릿의 배열 간격은 발생하는 램파의 파장에 일치하기 때문에 슬릿의 간격을 조정하여 특정한 램파 모드를 효과적으로 발생시킬 수 있다. 또한 슬릿의 개수가 증가할수록 협대역 신호를 발생시킬 수 있으며 신호의 S/N비도 향상된다.

램파의 발생을 위해 1mm 두께의 알루미늄 박판에 대해 이론적인 종파 및 횡파속도로부터 Fig. 2와 같은 분산선도를 얻었다. Fig. 2(a)는 주파수에 따른 위상속도 분산선도를 나타내며, Fig. 2(b)는 주파수에 따른 군속도의 분산선도를 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서 나타난 직선의 기울기 값은 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda = \frac{C_p}{f} \text{ or } C_p = \lambda \cdot f \tag{1}$$

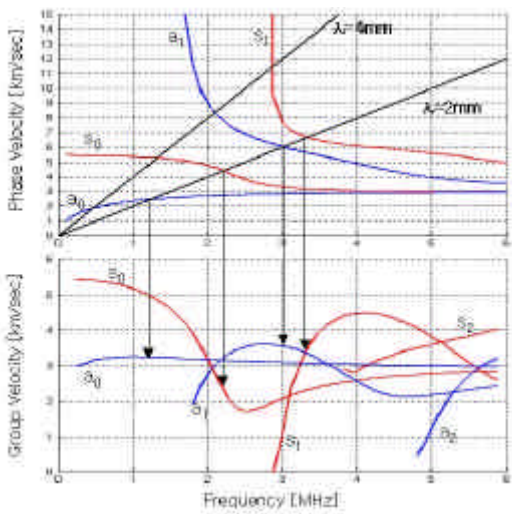


Fig. 2 (a) Phase velocity (b) Group velocity dispersion curves for 1mm aluminum plate

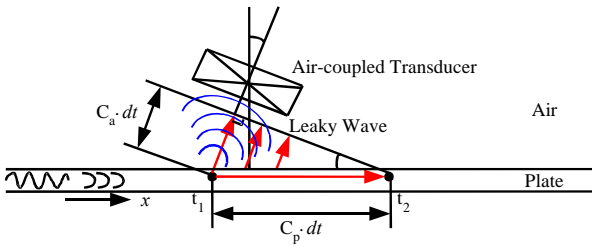


Fig. 3 Consideration of leaky Lamb wave and angle of air-coupled transducer

여기서 C_p 는 램파의 위상속도, f 는 주파수, λ 는 램파의 파장이다.

발생시킨 램파의 수신을 위해서는 공기-결합 트랜스듀서를 사용하였으며 이것은 공기중으로 누설되는 램파를 고감도로 수신한다. 또한 공기-결합 트랜스듀서의 경사각은 Fig. 3과 같이 관재를 진행하는 램파와 공기중으로 누설된 램파의 파면의 연속성으로 인해 식(2)와 같이 구해진다.

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

여기서 C_a 는 공기중의 음속이다.

3. 실험조건 및 방법

두께 1mm의 알루미늄 판에 램파를 발생하기

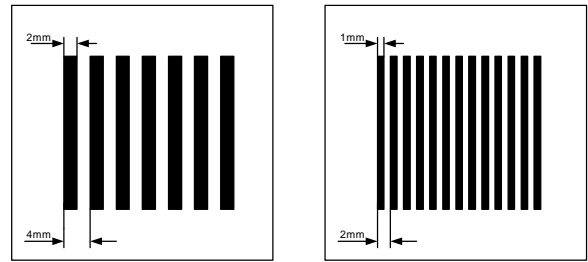


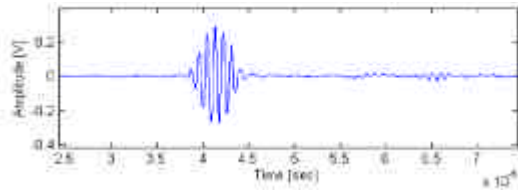
Fig. 4 Shape of array line slit mask

Table 2 Calculation of reflection angle of leak Lamb wave into air

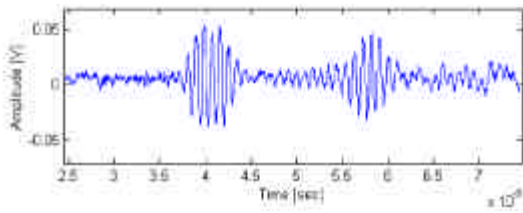
Wave length (λ)	2mm		4mm	
	C_p [km/sec]	θ [°]	C_p [km/sec]	θ [°]
A ₀	2.420	7.9	1.821	10.5
S ₀	4.424	4.3	5.268	3.6
A ₁	5.923	3.2	8.392	2.3
S ₁	6.650	2.9	11.528	1.6

위해 사용된 Nd:YAG 레이저의 파장은 $1.064\mu m$, 펄스폭은 0.1sec이다. 레이저의 에너지는 0.5J로 하였으며 빔폭을 확장하여 조사하는 관계로 이 정도의 에너지라도 열탄성 영역의 초음파가 발생한다. 마스크의 슬릿은 Fig. 4와 같이 설계되었으며 발생하는 램파의 파장을 달리하기 위해 슬릿의 간격을 달리하여 램파의 파장 $\lambda=2mm$, $\lambda=4mm$ 가 되도록 하였다.

공기-결합 트랜스듀서(Micro Instruments, mBAT-1)의 경사각은 발생이 예상되는 램파 모드의 위상속도를 고려하여 식(2)에 의해 계산되었다. Table 2는 설계된 슬릿의 파장에 따라 특정 모드가 공기중으로 누설되는 각도를 계산한 것이다. 이 때 공기의 음속은 공기-결합 트랜스듀서로 측정된 결과 331m/sec이며, 실험온도는 10°C이다. 마스크의 중심으로부터 트랜스듀서 중심까지의 거리는 95mm이며 트랜스듀서와 알루미늄 판의 이격거리는 경사각에 따라 다소 다르나 대략 3mm~4mm이다. 여기서, 이격거리를 1mm부터 50mm까지 변화시켰을 때 수신 신호의 진폭 변화는 크지 않았으며 50mm 이후부터는 진폭의 감소가 두드러지는 경향을 보였으나 사용된 트랜스듀서의 이격거리를 100mm까지 증가하여도 측정이 가능하였다. 수신된 램파 신호는 디지털 오실로스코프에서 저장된 후 PC를 통해 웨이블릿 변환된다.

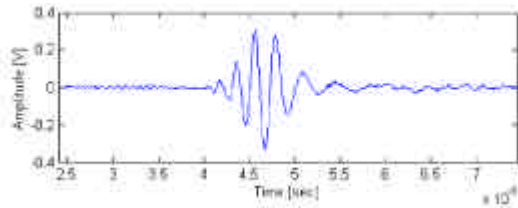


(a) $\theta = 7.9^\circ$

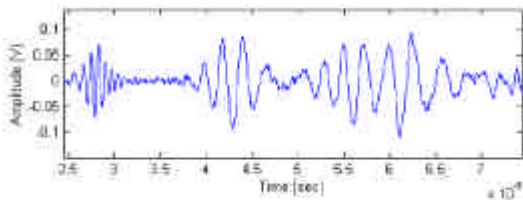


(b) $\theta = 4.3^\circ$

Fig. 5 Signal waveform at $\lambda = 2\text{mm}$.



(a) $\theta = 10.5^\circ$

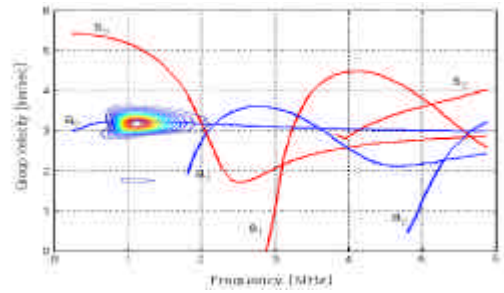


(b) $\theta = 3.6^\circ$

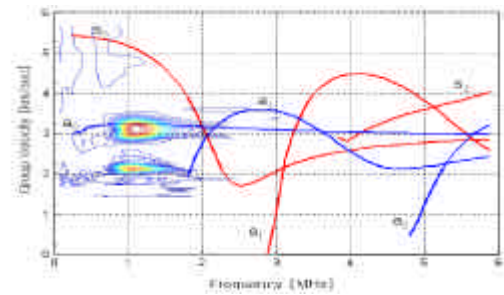
Fig. 6 Signal waveform at $\lambda = 4\text{mm}$.

4. 결과 및 고찰

이론적으로 예측하여 발생시킨 램파의 전파모드를 증명하기 위해 공기-결합 트랜스듀서로부터 수신된 신호를 웨이블릿 변환을 통해 시간-주파수 해석을 수행하였다. 웨이블릿 변환된 신호는 등고선도로 나타내었으며, 이론적인 군속도 분산선도와 비교하기 위해, 시간축을 군속도로 환산하여 표시하였다. Fig. 5는 $\lambda = 2\text{mm}$ 인 마스크를 이용했을 때의 수신된 파형이다. Table 2에서 계

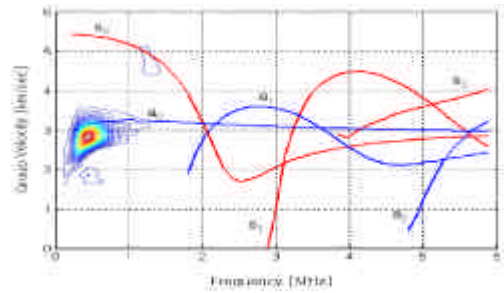


(a) $\theta = 7.9^\circ$

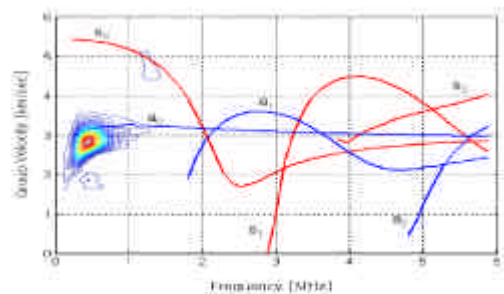


(b) $\theta = 4.3^\circ$

Fig. 7 Dispersion curve of group velocity and contour plot of wavelet transform with $\lambda = 2\text{mm}$.



(a) $\theta = 10.5^\circ$



(b) $\theta = 3.6^\circ$

Fig. 8 Dispersion curve of group velocity and contour plot of wavelet transform with $\lambda = 4\text{mm}$.

산된 이론적인 수신각을 이용하여 공기-결합 트랜스듀서의 경사각을 결정했다. Fig. 5(a)는 a_0 모드를 수신하기 위한 조건이며 S/N비가 우수한 a_0 모드의 파형이 수신되었다. Fig. 5(b)는 s_0 모드를 수신하기 위한 조건이나 s_0 모드의 파형은 수신되지 않았으며 상대적으로 S/N비가 좋지 않은 a_0 모드의 파형만 수신되었다. 이러한 원인은 공기-결합 트랜스듀서의 수신주파수대역이 0.1~2.25MHz 인데 비해 $\lambda = 2\text{mm}$ 일때의 s_0 모드의 주파수는 2.3MHz이므로 이를 초과하기 때문에 수신되지 않은 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)에서 55 μ sec 부근에서 발생된 신호는 a_0 모드와의 전파시간차가 17 μ sec이고 왕복전파거리가 6mm 인 조건을 고려할 때 음속이 353m/sec이므로 a_0 모드의 신호가 트랜스듀서와 시험체에 반사되어 수신된 파형으로 판단된다. 이러한 현상은 트랜스듀서의 경사각이 비교적 큰 경우에는 나타나지 않았다. Fig. 6은 $\lambda = 4\text{mm}$ 인 경우에 수신된 파형이다. Fig. 6(a)는 a_0 모드를 수신하기 위한 조건이며, Fig. 6(b)는 s_0 모드를 수신하기 위한 조건이다. $\theta = 10.5^\circ$ 일 때 S/N비가 우수한 a_0 모드의 파형이 수신되었다. s_0 모드의 수신조건인 $\theta = 3.6^\circ$ 에서는 27 μ sec 부근에서 s_0 모드의 발생을 확인할 수 있다.

이론적으로 예측된 전파모드를 실증적으로 규명하기 위해서는 실험적으로 획득한 신호의 분산 특성을 고려해야 한다. 따라서 수신된 신호를 웨이블릿 변환을 이용하여 시간-주파수영역에서 분석하고 앞에서 예측한 전파모드에 대해 증명하였다. Fig. 7은 Fig. 5의 파형을, Fig. 8은 Fig. 6의 파형을 웨이블릿 변환하여 등고선도로 나타내고, 이것을 이론적인 분산선도와 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 Fig. 2에서 이론적으로 예측된 모드와 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

비접촉식으로 램파를 발생 및 수신하기 위하여 레이저와 공기-결합 트랜스듀서를 이용하고, 전파모드를 규명하기 위해 웨이블릿 변환을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Q-스위치된 Nd:YAG 레이저와 배열 라인 슬릿 마스크를 이용하여 램파의 파장을 변화시켜 램파의 모드에 따른 위상속도와 주파수의 예측이 가

능하였으며 공기-결합 트랜스듀서를 이용하여 비접촉식으로 램파의 수신이 가능하였다.

램파는 모드에 따라 공기중으로 누설되는 경사각이 달라 특정모드가 최대 수신감도를 갖도록 공기-결합 트랜스듀서의 경사각을 조절하면 특정모드의 수신효율을 상승시켜 선택적인 모드 수신이 가능하였다.

웨이블릿 변환을 이용한 시간-주파수 분석을 수행하여 이론적인 분산선도와 비교한 결과 이론적으로 예측한 전파모드와 잘 일치함이 증명되었다.

이와 같은 연구결과로부터 향후 공기-결합 트랜스듀서와 조합된 새로운 형태의 레이저 램파 시스템을 응용한 연구가 가능할 것으로 판단되며, 웨이블릿 변환과 같은 신호처리가 시스템에 응용될 경우 형상이 복잡한 박판이나 셸 구조물에서 발생하는 다중모드의 전파모드를 규명하여 기존의 시스템에 비해 보다 정량적인 결함탐상이나 물성측정이 가능할 것으로 판단되어 레이저 여기 램파의 응용분야가 넓어질 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-042-E00008)

참고문헌

- (1) B. Djordjevic, 1993, "Advanced Ultrasonic Probes for scanning of Large Structure", *Proc. Ultrasonic International*, Vienna, Austria
- (2) D. A. Oursler and J. W. Wagner, 1995, "Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves", *Material Evaluation*, Vol. 53, pp. 593-597.
- (3) S. G. Pierce, B. Culshaw, W. R. Philp, F. Lecuyer and R. Farlow, 1997, "Broadband Lamb Wave Measurements in Aluminum and Carbon/graph Fiber Reinforced Composite Materials using Non-contacting Laser Generation and Detection", *Ultrasonics*, Vol. 35, pp. 105-114.
- (4) D. A. Hutchins, W. M. D. Wright, G. Hayward

- and A. Gachagan, 1994, "Air-coupled Piezoelectric Detection of Laser-generated Ultrasound", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Control*, Vol. 41, pp. 796-805.
- (5) J. R. Park, K. Y. Jhang and K. C. Kim, 1999, "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.
- (6) K. C. Kim, H. Yamawaki, K. Y. Jhang, 2000, "Detection of Laser Generated Ultrasonic Wave Using Michelson Interferometer", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 9, pp. 27-32.
- (7) S. S. Lee and T. S. Jhang, 2002, "Understanding of Laser-based Ultrasonics", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 1, pp. 74-87.
- (8) W. M. D. Wright, D. W. Schindel and D. A. Hutchins, 1994, "Studies of Laser-generated Ultrasound using a Micromachined Silicon Electrostatic Transducer in Air", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, pp. 2567-2575.
- (9) J. L. Rose and Y. H. Cho, 1995, "Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential in the Power Generation Field", *Safety & NDT' 95*, pp. 101-115.
- (10) H. J. Shin and J. L. Rose, 1998, "Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36.
- (11) A. E. Bahrawy, 1994, "Stopbands and Passbands for Symmetric Rayleigh-Lamb modes in a plate with corrugated surfaces", *J. Sound Vibration*, Vol. 170, No. 2, pp. 145-160.
- (12) H. J. Shin and S. J. Song, 1999, "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.
- (13) D. N. Alleyne, P. Cawley, 1990, "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.
- (14) W. H. Prosser, M. D. Seale and B. T. Smith, 1990, "Time-Frequency Analysis of the Dispersion of Lamb modes", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 105, No. 5, pp. 2669-2676.
- (15) K. Y. Jhang, H. J. Kim, D. Ceringlia and B. Djordjevic, 2001, "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.