

◆특집◆ 레이저 계측

탄소강 배관 감육의 정량적 평가를 위한 레이저 유도 초음파의 적용

이준현*, 박종호*, 송봉민*, 이승준*

Application of Laser-Generated Guided Waves for Quantitative Evaluation of Local Wall Thinning in Carbon Steel Pipe

Joon-Hyun Lee*, Jong-Ho Park*, Bong-Min Song* and Seung-Joon Lee*

Key Words : Laser (레이저), Guided wave (유도초음파), Pipe (배관), Dispersion curve (분산선도)

1. 서론

레이저 유도 초음파 기법에 의한 비파괴 평가 기술은 기존의 초음파 비파괴 계측 기술의 한계를 극복하여 신속한 결함 평가를 가능하게 하고, 안전성이 강하게 대두되는 발전 설비, 항공기 등의 각종 부품들의 신뢰성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 첨단 기술이다. 특히 원자력 발전소의 탄소강 배관에서 흔히 발생하는 감육 현상(wall thinning)을 실시간으로 평가하기 위한 레이저 유도 초음파의 응용은 기존의 접촉식 탐상 기법이 가지는 한계를 넘어서 접근이 어려운 부위에서의 탐상 및 고온의 부재에서의 평가를 가능하게 하였다.¹⁻⁴

일반적으로 유도 초음파 기법은 장거리 탐상에 주로 이용되고 있으나, 국부적인 탐상 방법으로는 적용 사례가 적다. 하지만 유도 초음파 기법은 국부적 결함의 발생 빈도가 높은 영역에 대해 비접촉식으로 단시간 내에 결함 탐지가 가능한 장점이

있다. 이 특성을 이용하면 내부 결함 형상에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 기기 건전성에 대한 신뢰성 있는 평가가 요구되는 분야에 응용할 수 있다.⁵ 본 연구에서는 레이저 유도 초음파가 감육부를 지나면서 발생하는 특정 모드의 변화 특성을 분석하여 배관 내의 인공 결함 형상 및 크기를 예측하고자 한다.⁶⁻⁸ 이를 위해 레이저와 공기 정합 센서(air-coupled transducer)로 구성된 비접촉식 탐상 시스템을 구축하였고 유도 초음파의 특정 모드를 선택적으로 수신하기 위해 선형 배열 슬릿을 사용하였다.⁹

2. 실험 방법 및 원리

2.1 시편

본 실험에서는 두께가 6 mm 이고, 지름이 114.3 mm 인 탄소강 배관을 시편으로 사용하였다. 배관의 결함 깊이 변화에 따른 유도 초음파의 관계를 평가하기 위해 일정한 폭 48 mm 에 깊이가 각각 1.2, 2.4, 3.6 mm 인 타원형의 결함을 배관의 내부에 가공하였다. 또한 유도 초음파 모드에 대한 결함 폭의 영향을 조사하기 위하여 일정한 깊이 3.6 mm 에 폭 16, 32, 48 mm 인 타원형의 결함을 같은 크기의 배관 내부에 가공하였다. Fig. 1 은 앞서 언급한 결함의 형태에 대한 탄소강 배관의 형

* 부산대학교 기계공학부 대학원
Tel. 051-510-2430, Fax. 051-512-9835
Email johlee@pusan.ac.kr

발전 설비, 구조물, 각종 부품 등의 파손 방지 및 신뢰성 확보를 위한 비파괴 평가 분야에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

상을 보여주고 있다.

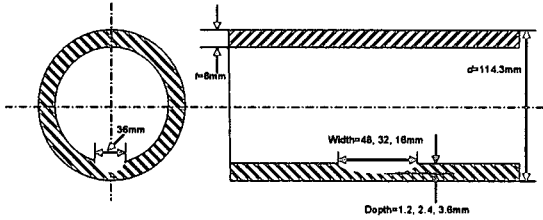


Fig. 1 Shape of defects on 6 mm thick pipes

2.2 실험장치

Fig. 2 는 실험을 수행하기 위해 사용된 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 레이저와 air-coupled transducer 는 배관의 같은 선상에 위치시켰고, 각각 유도 초음파를 발생시키고 수신하는 역할을 한다. 초음파를 발생시킬 때 사용된 Nd:YAG 펄스 레이저의 파장은 532 nm 이고, 이 펄스 레이저는 32 mJ/pulse 의 에너지를 방출한다.

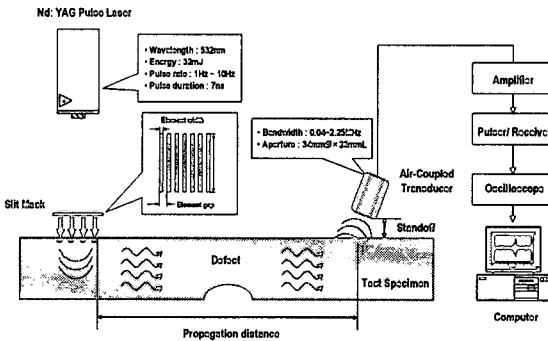


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

레이저 빔은 선형 배열 슬릿(slit mask)에 방사되고, 슬릿에 투과된 빔은 라인 소스로서 배관에 유도 초음파의 발생원으로서 작용한다. 생성된 유도 초음파는 배관의 표면을 따라 90 mm 의 거리를 이동하여 전파된다. 결함을 지나면서 누출된 신호는 air-coupled transducer 를 이용하여 수직 거리(standoff) 15 mm 의 거리만큼 떨어져서 수신되었다. Air-coupled transducer 로부터 수신된 신호들은 증폭과 필터링의 과정을 거쳐, 1000 개의 샘플링 데이터의 평균값으로 저장된다.

선형 슬릿은 시편의 타입과 두께에 따라 제작되었다. 실험에 사용된 슬릿 사이의 간격은 4.5

mm, 슬릿의 폭은 2.25 mm, 슬릿의 수는 7 개로 제작하였다.

2.3 유도 초음파의 선택적 모드 송수신

분산성으로 인해 유도 초음파는 다양한 모드의 형태로 나타나게 되는데, 원하는 모드를 선택적으로 송수신하는 것이 결함 검출을 위해서 무엇보다도 중요하다.¹⁰ 따라서 본 연구에서는 선형 배열 슬릿을 사용하여 레이저를 이용한 유도 초음파의 파장을 조절하고 원하는 모드를 발생시키고자 한다. 선형 배열 슬릿을 통해 발생된 유도 초음파는 직진성이 뛰어나며, 신호 대 잡음비(S/N ratio)가 우수한 것으로 알려져 있다.¹¹

Fig. 3 은 선형 배열 슬릿을 이용하여 원하는 모드를 발생시키는 방법을 보여주고 있다. Fig. 3 과 식 (1)에서 보여주는 것과 같이, 슬릿 배열의 요소 간격(element gap) Δs 는 유도된 초음파의 파장 λ 와 같으며, $\Delta s/d$ 의 기울기를 가지는 사선을 위상속도 분산 선도에 표현할 수 있다. 여기서 유도 초음파의 모드는 사선과 위상속도 분산 선도 사이의 교점에 의해 결정된다.

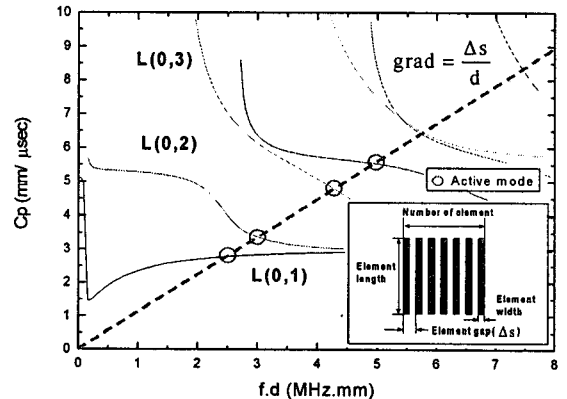


Fig. 3 Determination of desired modes using the relation between slit gap and the wavelength of generated signal in phase velocity dispersion curve

$$C_{ph} = f \times \lambda = f \times (\lambda/d) \times d \quad (1)$$

C_{ph} 는 유도 초음파의 위상속도(phase velocity)이며 λ 는 발생된 파의 파장을 의미한다. 또한 f 는 발생 모드의 주파수이며, d 는 시편의 두께이다.

레이저와 선형 배열 슬릿에 의해 발생된 모드

를 0.04~2.25 MHz 의 대역폭을 갖는 air-coupled transducer 를 이용하여 선택적으로 수신하였다. Fig. 4 에 보이는 air-coupled transducer 는 수신 각에 상당히 민감한 특성을 보이기 때문에 air-coupled transducer 의 각도를 조절하는 것이 매우 중요하다.

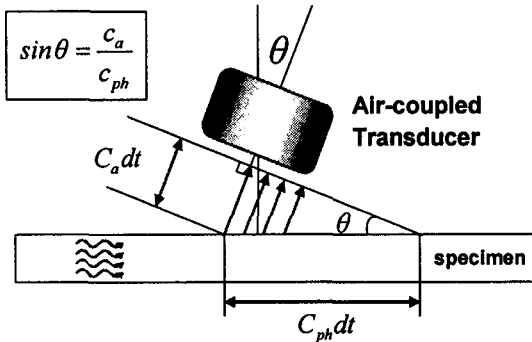


Fig. 4 Reception of active mode by turning air-coupled transducer to the angle calculated by Snell's law

Air-coupled transducer 의 수신각은 식 (2)에 보여주는 스넬의 법칙(Snell's law)에 근거하여, 원하는 모드의 위상속도와 공기 중에서의 파의 속도와 의 관계식에 의해 구해질 수 있다.

$$\theta = \sin^{-1}(C_a/C_{ph}) \quad (2)$$

theta 는 특정 모드를 수신하기 위한 각도이며, C_a 는 공기 중에서 전파되는 파의 속도를 나타낸다. 본 연구에서 C_a 는 340 m/s 이며 위상속도 C_ph 는 Fig. 3 에서 얻을 수 있다.

Table 1 Theoretical values of L(0,1) and L(0,2) modes at 4.5mm wavelength on each defect

Element Gap [mm]	Mode	Frequency [MHz]	Phase Velocity [mm/s]	Receiving Angle [degree]
4.5	L(0,1)	0.64	2.89	6.4
	L(0,2)	0.68	3.06	6

배관의 경우에 실험적으로 수신이 가능한 모드 중에 가장 먼저 발생되며, 비교적 덜 분산되어 있는 L(0,1)모드와 L(0,2)모드가 수신 모드로서 선택

하였다. 이와 같은 모드를 수신하기 위해 선형 배열 슬릿의 슬릿 간격과 수신각은 시편의 두께에 따라 분산 선도 곡선의 위상속도로부터 결정된다. 특정모드에서의 수신 각도와 분산 선도에서 얻어진 위상 속도는 Table 1 에 나타나 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 타원 결함의 깊이와 유도 초음파의 관계

Fig. 5 (a)~(d)는 수신각이 6.4 도로 정해졌을 때, 발생원으로부터 20 mm 떨어진 지점에서 결함이 없을 경우(Fig. 8 (a))와 결함의 깊이가 각각 1.2, 2.4, 3.6 mm 를 가질 경우(Fig. 8 (b)~(d)), 레이저 발생원으로부터 90 mm 떨어진 air-coupled transducer 에 의해 수신된 신호의 파형을 보여준다. Fig. 5 (a)~(d)의 신호들은 L(0,1)과 L(0,2) 모드를 포함하고 그 특성을 보여준다. 각 모드의 진폭을 비교하면, 결함의 깊이가 커짐에 따라 L(0,1) 모드의 파형은 일정한 반면에 L(0,2) 모드의 크기는 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 Fig. 6 (a)~(d)에서 보여주는 바와 같이 morlet wavelet 을 활용한 wavelet 변환에 의한 시간-주파수 분석의 결과를 통해서 더욱 정확히 확인할 수 있다.¹² Fig. 6 (a)~(d)에 나타난 것처럼 0.64 MHz 의 주파수를 갖는 L(0,1) 모드와 0.68 MHz 의 주파수를 갖는 L(0,2) 모드는 결함이 없을 때 동시에 나타나고, 그리고 결함의 깊이가 증가할수록 L(0,2) 모드의 크기가 작아진다.

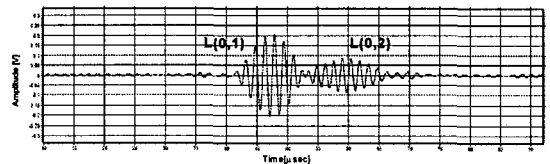


Fig. 5(a) Signal with elliptical defect on 6mm-thick pipe according to the variation of reduced thickness (No defect)

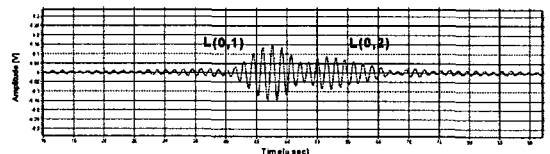


Fig. 5(b) Signal with elliptical defect on 6mm-thick pipe according to the variation of reduced thickness (1.2 mm deep defect)

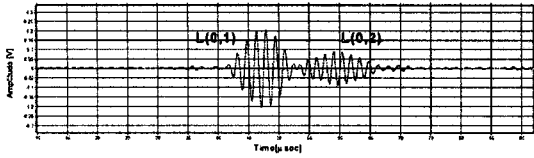


Fig. 5(c) Signal with elliptical defect on 6mm-thick pipe according to the variation of reduced thickness (2.4 mm deep defect)

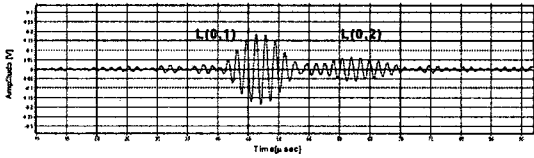


Fig. 5(d) Signal with elliptical defect on 6mm-thick pipe according to the variation of reduced thickness (3.6 mm deep defect)

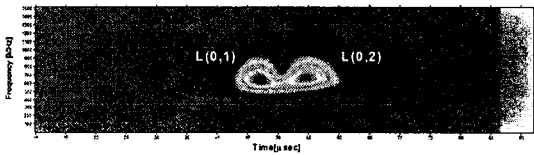


Fig. 6(a) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect on 6 mm thick pipe according to deeper defect (No defect)

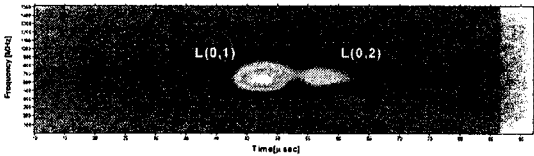


Fig. 6(b) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect on 6 mm thick pipe according to deeper defect (1.2 mm deep defect)

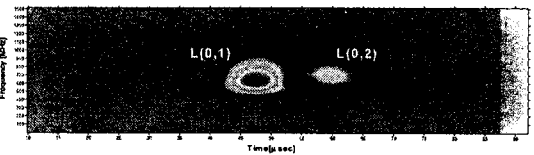


Fig. 6(c) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect on 6 mm thick pipe according to deeper defect (2.4 mm deep defect)

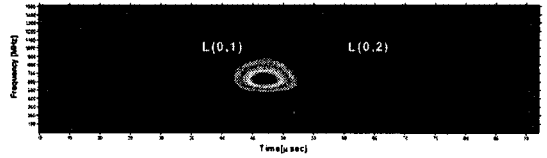


Fig. 6(d) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect on 6 mm thick pipe according to deeper defect (3.6 mm deep defect)

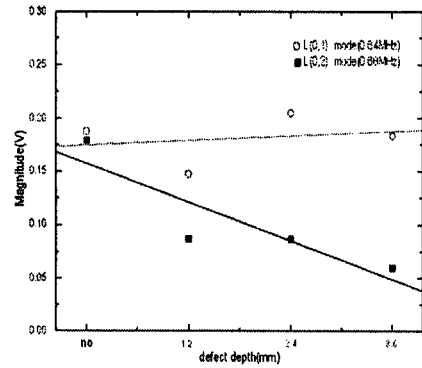


Fig. 7(a) Characteristic of variation of L(0,1) and L(0,2) according to deeper defect on 6 mm-thick pipe (magnitude of L(0,1) and L(0,2) mode versus elliptical defect depth)

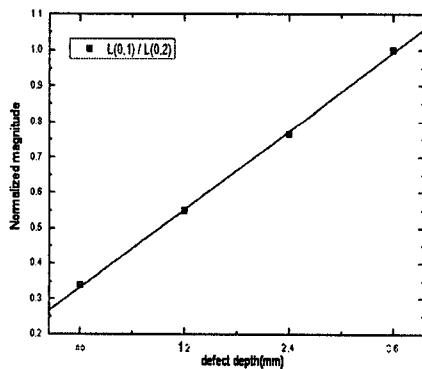


Fig. 7(b) Characteristic of variation of L(0,1) and L(0,2) according to deeper defect on 6 mm-thick pipe (normalized ratio of L(0,1) to L(0,2) mode versus elliptical defect depth)

Fig. 7 (a), (b)는 탄소강 배관의 6 mm 두께의 각 모드별 결함 깊이에 대한 진폭의 변화를 나타낸

것과 두 모드의 진폭의 상대적인 비를 나타낸 것이다. Fig. 7 (a)는 결함 깊이가 증가함에 따라 각 모드의 진폭이 불규칙한 변화를 보여준다. Fig. 7 (b)에서 L(0,2) 모드의 진폭에 의해 나뉜 L(0,1) 모드의 진폭의 비는 결함 깊이에 비례함을 알 수 있었다.

3.2 타원 결함의 폭과 유도 초음파의 관계

유도 초음파의 진폭의 변화는 결함 폭에 대해서 더 민감하다. Fig. 8 (a)~(d)는 수신각을 6 도로 하였을 때, 결함이 없는 경우(Fig. 8(a))와 깊이가 3.6 mm 이고 폭이 각각 1.6, 3.2, 4.8 mm 로 변할 때 (Fig. 8(b)~(d))의 파형을 나타낸 것이다. Fig. 8 (a)~(d)에 나타난 것처럼 각 모드의 크기 변화는 결함의 폭이 넓어질수록 커진다. 타원형 결함의 폭을 변화시켜 수신한 신호에 대하여 시간-주파수 분석을 수행한 결과를 Fig. 9 (a)~(d)에 나타내었다.

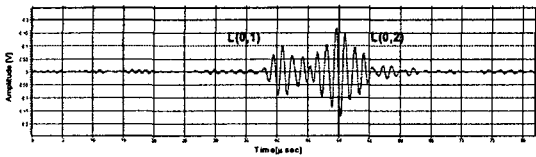


Fig. 8(a) Signal with elliptical defect of constant depth 3.6mm and varying width on 6mm-thick pipe (No defect)

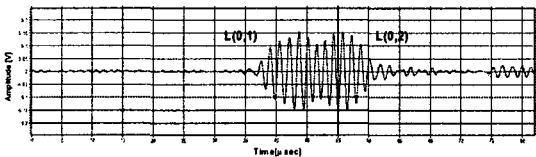


Fig. 8(b) Signal with elliptical defect of constant depth 3.6mm and varying width on 6mm-thick pipe (1.6 mm deep defect)

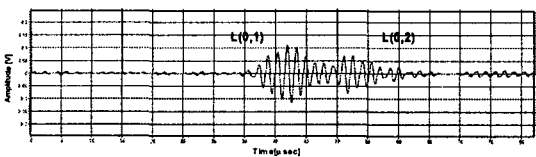


Fig. 8(c) Signal with elliptical defect of constant depth 3.6mm and varying width on 6mm-thick pipe (3.2 mm deep defect)

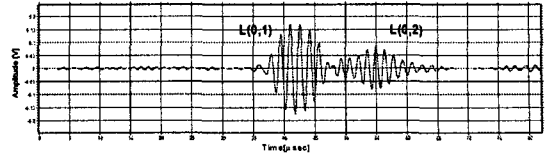


Fig. 8(d) Signal with elliptical defect of constant depth 3.6mm and varying width on 6mm-thick pipe (4.8 mm deep defect)

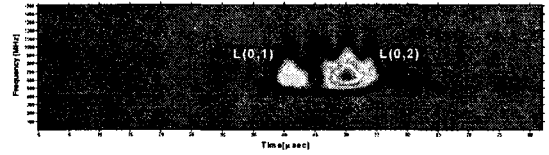


Fig. 9(a) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect of constant depth 3.6 mm and varying width in 6 mm thick pipe (No defect)

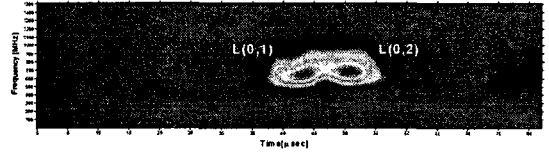


Fig. 9(b) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect of constant depth 3.6 mm and varying width in 6 mm thick pipe (1.6 mm deep defect)

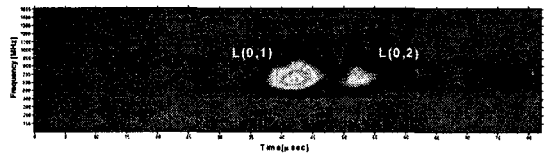


Fig. 9(c) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect of constant depth 3.6 mm and varying width in 6 mm thick pipe (3.2 mm deep defect)

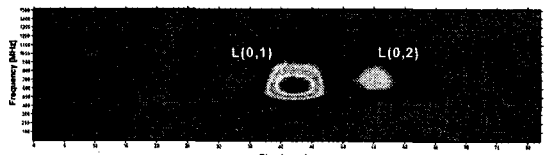


Fig. 9(d) Time-frequency analysis for signal with elliptical defect of constant depth 3.6 mm and varying width in 6 mm thick pipe (4.8 mm deep defect)

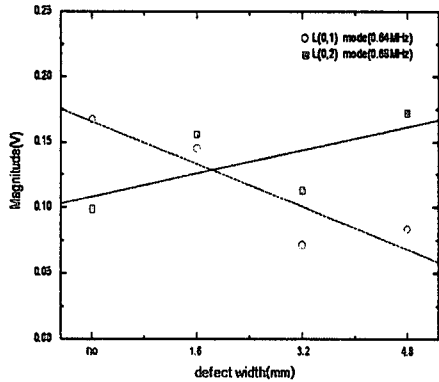


Fig. 10(a) Measured magnitude of L(0,1) and L(0,2) mode with elliptical defect on 6mm-thick pipe and ratio between the magnitudes of the modes (magnitude of L(0,1) and L(0,2) mode versus elliptical defect width)

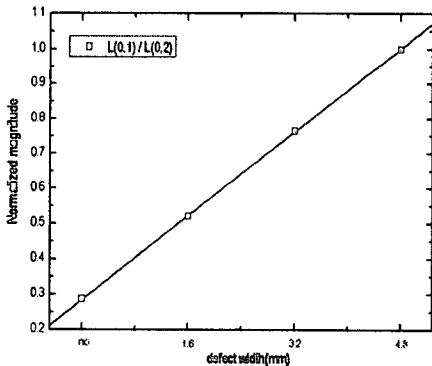


Fig. 10(b) Measured magnitude of L(0,1) and L(0,2) mode with elliptical defect on 6mm-thick pipe and ratio between the magnitudes of the modes (normalized ratio of L(0,1) to L(0,2) mode versus elliptical defect width)

Fig. 10 (a), (b)는 각각 결함 폭이 증가함에 따라 변화하는 진폭의 크기와 두 모드간의 상대적인 진폭비를 나타낸 것이다. Fig. 10 (b)을 보면 L(0,1) 모드의 진폭에 대한 L(0,2) 모드의 진폭 비가 결함 폭의 변화에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 앞서 언급한 결함 깊이에 따른 두 모드의 진폭 비에 대한 경향성과 비슷하다. 그러나 결함 깊이에 대한 결과와 비교했을 때, Fig. 10 (a)와 같이 각 모드별

진폭의 변화가 좀 더 불규칙하게 변화하는 특성을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 배관에서 결함 깊이는 L(0,2) 모드의 진폭에 대한 L(0,1) 모드의 진폭의 비에 비례하며, 또한 배관에서의 결함 폭은 L(0,1)과 L(0,2) 모드의 진폭의 변화에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 결함의 깊이와 폭의 변화에 따른 모드의 변화 양상이 비슷한 경향성을 띄고 있으므로 두 특성을 구분하는 특성에 대한 추가적인 연구가 진행될 것이다. 배관에서의 결함 크기를 예측함에 있어, 이상과 같은 결과는 유도 초음파의 변화 특징을 이용한 결함 형상의 정량적 평가가 가능하다는 사실을 보여주고 있다. 또한 향후 연구를 통해 실제 현장에서도 이에 대한 응용과 적용이 가능하리라 예상할 수 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 결함의 정량적 비파괴 평가를 하는데 있어 유도 초음파의 모드 변화를 이용한 분석 기법이 배관 결함의 기초적인 검사 기법의 하나로서 고려될 수 있음을 제시하고 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 기초공동 연구소(Basic Atomic Energy Research Institute) 지원사업을 통하여 수행되었음.

참고문헌

1. Murfin, A. S. and Dewhurst, R. J., "Estimation of Wall Thinning in Mild Steel Using Laser Ultrasound Lamb Waves and A Non-steady-state Photo-emf Detector," *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 1, pp. 777-781, 2002.
2. Alleyne, D. N. and Cawley, P., "The Interaction of Lamb Waves with Defects," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, Vol. 39, Issue 3, pp. 381-397, 1992.
3. Green, R. E. Jr., "Non-contact Ultrasonic Techniques," *Ultrasonics*, Vol. 42, Issues 1-9, pp. 9-16, 2004.
4. Achenbach, J. D., "Wave Propagation in Elastic

- Solids," North Holland / Elsevier, pp. 1-8, 1973.
5. Rose, J. L., "A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential," Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 124, Issue 3, pp. 273-282, 2002.
 6. Alleyne, D. N. and Cawley, P., "Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework," Materials Evaluation, Vol. 55, No. 4, pp. 504-508, 1997.
 7. Wright, W. M. D., Hutchins, D. A., Hayward, G. and Gachagan, A., "Ultrasonic Imaging Using Laser Generation and Piezoelectric Air-coupled Detection," Ultrasonics, Vol. 34, No. 2-5, pp. 405-409, 1996.
 8. Scruby, C. B. and Drain, L. E., "Laser ultrasonics: Techniques and applications," Adam Hilger, pp. 325-355, 1990.
 9. Hutchins, D. A., Wright, W. M. D., Hayward, G. and Gachagan, A., "Air-Coupled Piezoelectric Detection of Laser-Generated Ultrasound," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., Vol. 41, No. 6, pp. 796-805, 1994.
 10. Kim, H. J., Jhang, K. Y., Shin, M. J. and Kim, J. Y., "A Noncontact NDE Method Using a Laser Generated Focused-Lamb Wave with Enhanced Defect-Detection Ability and Spatial Resolution," NDT&E International, Vol. 39, Issue 4, pp. 312-319, 2006.
 11. Kim, H. M., Lee, T. H. and Jhang, K. Y., "Non-Contact Guided Wave Technique with Enhanced Mode-Selectivity," J. Korean Soc. NDT, Vol. 24, No. 6, pp. 597-602, 2004.
 12. Silva, M. Z., Gouyon, R. and Lepoutre, F., "Hidden Corrosion Detection in Aircraft Aluminum Structures Using Laser Ultrasonics and Wavelet Transform Signal Analysis," Ultrasonics, Vol. 41, No. 4, pp. 301-305, 2003.