

조향 자기변형 트랜스듀서(OPMT)를 이용한 비자성체 판구조물에서 램파 발생 및 신호해석

이 주승*, 선 경호*, 조 승현*, 홍 진철**, 김 윤영***

Lamb wave generation and analysis in a non-ferromagnetic plate using an orientation-adjustable patch-type magnetostrictive transducer

Ju Seung Lee, Kyung Ho Sun, Seung Hyun Cho, Jin Chul Hong and Yoon Young Kim

Key words : Magnetostrictive Transducer(자기변형 트랜스듀서), OPMT(조향 자기변형 트랜스듀서), Plate(판재), Lamb wave(램파), Dispersion(분산), Short-time Fourier transform(단시간 푸리에 변환)

Abstract : This paper is concerned with the generation of the Lamb waves in a non-ferromagnetic plate by a recently-developed orientation-adjustable patch-type magnetostrictive transducer (OPMT) and the dispersion analysis from the measured Lamb waves. OPMT is capable of adjusting wave-propagation orientation only with a single installation on a plate. The mechanics behind the wave generation and measurement by the magnetostrictive phenomenon, the working principle of OPMT is explained and the actual generation and measurement of the Lamb waves were conducted in a 3 mm-thick aluminum plate. For the accurate analysis of the dispersion characteristics of the measured Lamb waves, a modified version of the short-time Fourier transform, known as the dispersion-based short-time Fourier transform, was employed. The results presented in this work would serve as the underlying research for an advanced non-destructive evaluation based on ultrasonic waves.

1. 서 론

최근 구조물 건전성 평가 및 상태 감시를 위해 이용되는 비파괴검사 기법으로 유도초음파(ultrasonic guided wave)를 이용한 탐상기법이 널리 사용되고 있다. 유도초음파 기반 검사 기법은 파동의 전파를 이용하기 때문에 구조의 광범위 탐상을 단시간에 효과적으로 수행할 수 있다는 장점이 있다. ⁽¹⁻⁴⁾

일반적으로 판재(plate)로 구성된 구조물의 평가에 있어서는 램파(Lamb wave)라고 불리는 유도초음파를 사용할 수 있다. 램파는 무한 매질에서 발생하는 체적파(bulk wave)인 종파(longitudinal wave)나 횡파(transverse wave)에 비해 상대적으로 효율성과 결함 검출 민감도가 뛰어난 장점이 있어 판재 구조물의 결함 탐상에 효과적이다. 지금까지 판재 구조물에서 램파의 발생을

위해서는 주로 압전소자를 이용한 트랜스듀서가 사용되어 왔는데, 최근에는 트랜스듀서를 고정된 상태에서 2차원 영역을 한번에 탐상하기 위해서 다수의 압전 트랜스듀서를 배열한 위상 배열 트랜스듀서 기법(phased array transducer)도 이용되고 있다.^(5, 6)

본 연구에서는 이러한 압전소자를 이용한 트랜스듀서의 대안으로 최근 발명된 조향 자기변형 트랜스듀서(OPMT)⁽⁷⁾를 이용한 램파의 발생에 대해 소개하고자 한다. 조향 자기변형 트랜스듀서

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail : wntmddl@idealab.snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7130 Fax : (02) 872-5431

** 현대자동차

*** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 멀티스케일 설계 창의 연구단장

E-mail : yykim@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-7154 Fax : (02) 872-5431

는 비자성체 판재에서 램파를 발생시킬 수 있으며, 몇몇 트랜스듀서만으로도 2차원 영역을 효과적으로 탐상할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 하지만 이렇게 발생된 램파는 유도초음파의 고유한 특성인 분산(dispersion) 특성을 지니게 된다. 분산현상은 파의 속도가 주파수에 따라 변화하는 특성으로, 파의 정확한 속도 추정을 위해서는 정확한 분산관계를 알아내는 것이 중요하다. 일반적으로 파의 분산관계 추정을 위해서는 시간-주파수 해석(time-frequency analysis)을 통한 신호처리 기법이 이용되는데, 본 연구에서는 OPMT에 의해 측정된 램파의 해석을 위해 수정된 시간-주파수 해석기법을 이용하여 정확한 분산관계를 추정하는 과정을 소개하고자 한다.

램파 발생 실험을 위해서는 두께가 3mm인 알루미늄 판재가 이용되었으며, 두 개의 조향 자기변형 트랜스듀서를 이용하여 일반적으로 가장 많이 사용되는 첫 번째 대칭모드 (통상 SO 모드라고 부름)에 속하는 램파를 발생시키고 수신하였다.

2. OPMT의 원리 및 램파의 특성

본 연구에서 램파를 발생하기 위해 사용되는 조향 자기변형 트랜스듀서(OPMT)는 원형의 강자성체 패치, 바이어스 자기장 발생을 위한 두 개의 영구자석 및 팔자 형상의 코일로 구성되며, Fig. 1은 제안한 OPMT의 개념도를 보여주고 있다. 패치의 형상이 원형이기 때문에 각 방향에 동일한 크기의 탄성파를 발생시킬 수 있으며, 패치와 트랜스듀서 사이의 직접 접촉을 필요로 하지 않기 때문에 트랜스듀서를 자유롭게 회전시킬 수 있다.

두 개의 영구 자석은 특정 방향으로 바이어스 자기장이 걸리도록 배열되었으며, 이는 탄성파의 발생을 한 방향으로 집중시켜주는 역할을 한다. 또한 바이어스 자기장과 가진 자기장을 일치시키기 위해 팔자 형상의 코일을 적용하였다. 바이어스 자기장과 가진 자기장이 강자성체 패치를 따라 걸리면서 자기변형 현상에 의해 패치에 변형이 발생하고, 판재에 램파가 전파하게 된다. 제안한 OPMT는 패치의 재질로 니켈을 사용한다. 니켈은 연질자성재료(soft magnetic material)로 자화곡선의 상승이 빠르고 히스테리시스가 적어 자기장이 제거된 후 원래의 상태로 비교적 빨리 돌아오는 성질을 가지고 있다⁽⁶⁾. 니켈 패치와 판의 결합을 위해 에폭시(Model:3M DP420)를 사용했고, 패치의 두께, 직경은 각각 0.15mm, 24mm이다. 바이어스 자석으로는 Nd자석을 사용했다.

얇은 평판에 발생하는 램파는, 각 주파수

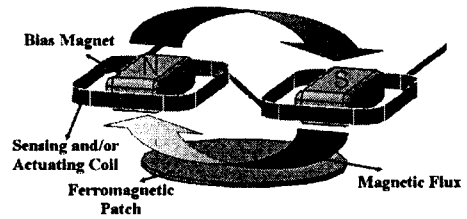


Fig. 1 Schematic diagram of an OPMT

(angular frequency) 와 파수(wave number) k 가 다음과 같은 관계를 지닌다⁽⁹⁾.

$$\frac{\omega^2}{c_1^2} - k^2 = \alpha^2 \quad (1)$$

$$\frac{\omega^2}{c_2^2} - k^2 = \beta^2 \quad (2)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 종파와 횡파의 속도를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$c_1 = \sqrt{E/\rho} \quad (3)$$

$$c_2 = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)} \quad (4)$$

식 (5,6)에서 E , ρ , ν 는 각각 탄성계수, 밀도, 포아송비를 나타내며, 식 (3,4)에서의 α , β 는 다음과 같은 식들로 결정된다.

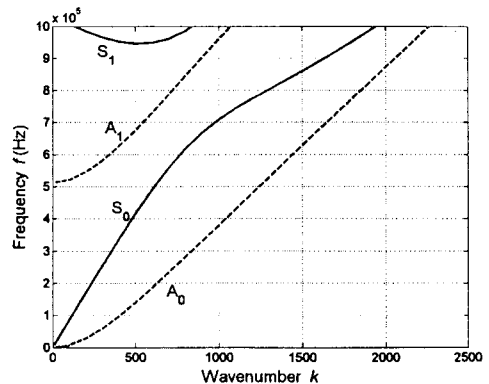


Fig. 2 The frequency spectrum of the guided Lamb waves in a 3-mm thick aluminum plate. (Solid lines: symmetric modes, dashed lines: antisymmetric modes)

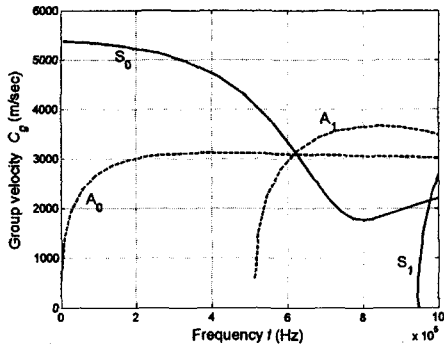


Fig. 3 The group velocity dispersion curve of the guided Lamb waves in a 3-mm thick aluminum plate. (Solid lines: symmetric modes, dashedlines: antisymmetric modes)

$$\frac{\tan \beta b}{\tan \alpha b} = \frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \quad \text{for symmetric modes} \quad (5)$$

$$\frac{\tan \beta b}{\tan \alpha b} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4\alpha\beta k^2} \quad \text{for antisymmetric modes} \quad (6)$$

여기서 $2b$ 는 판재의 두께를 나타낸다.

Figs. 2,3은 실험에 사용된 알루미늄 판재에서 전파될 수 있는 램파의 주파수 스펙트럼과 군속도 곡선(group velocity curve)의 이론값을 나타낸다. 일반적으로 첫 번째 대칭모드인 S_0 램파는 다른 모드에 비해 빠른 전파속도와 단면에서의 균일한 응력분포를 갖기 때문에 평판 탐상에 유리하다.

3. 실험 결과 및 해석

이 절에서는 평판에서의 유도초음파 중 S_0 모드의 램파 발생 실험과 분산 해석을 위한 신호처리 방식을 소개하고자 한다. Fig. 4는 평판에서 S_0 램파를 측정하기 위한 실험 장치로서, 두 개의 OPMT를 이용하여 A위치에서 중심주파수 280KHz의 가보 펄스를 이용하여 가진하고, B위치에서 20MHz의 샘플링 주파수로 신호를 측정하였다. 측정된 신호는 Fig. 5에 도시하였으며 Pulse 1은 초기에 측정된 신호로 200mm 이동한 파이고, pulse 2~4는 판의 끝단에서 반사된 신호들로 각각 680mm, 1740mm, 2160mm 진행된 파를 나타낸다. 그림에서 보듯 OPMT를 이용하면 평판에서의 단일 모드만을 성공적으로 발생시킬 수가 있다. 여기서 파의 진행거리가 늘어남에 따라 파의 형태가 왜곡되는 현상을 볼 수 있는데 이는 분산에 의한 효과 때문이다. 따라서, 이렇게 얻어진 램파 신호를 바탕으로

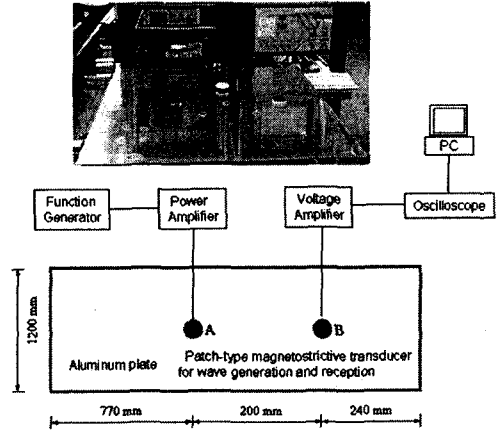


Fig. 4 The experimental setup used to generate and measure an S_0 Lamb wave in a plate

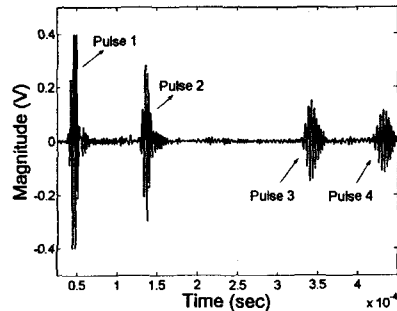


Fig. 5 The measured S_0 Lamb wave signal

분산관계를 해석하기 위해서 다음 단계의 신호처리 과정을 수행하였다.

파의 분산곡선을 추정하기 위해서는 일반적으로 단시간 푸리에 변환(short-time Fourier transform, SIFT)^(10, 11)과 같은 시간-주파수 해석법이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 보다 정확한 해석을 위해서 분산을 고려한 적응 단시간 푸리에 변환(dispersion-based SIFT, D-SIFT)을 이용하였다. D-SIFT는 해석하고자 하는 신호 특성에 맞는 회전된 격자구조를 이용하기 때문에 보다 정확한 파의 해석이 가능하게 한다. (자세한 내용은 [12]참조) Fig. 5의 측정된 신호 중 pulse 2, 3을 SIFT한 결과는 Fig. 6에 도시되어 있다. 이렇게 변환된 결과에 대해서 능선 해석(ridge analysis)을 사용하여 초기 추정된 분산 곡선은 Fig. 7에 점으로 나타나 있으며, [12]에서 제시하는 분산 추정을 위한 알고리즘과 D-SIFT를 적용하면 최종적으로 보다 정확한 분산 곡선을 얻을 수 있게 된다. Fig. 8에서는 D-SIFT에 의해 해석된 결과가

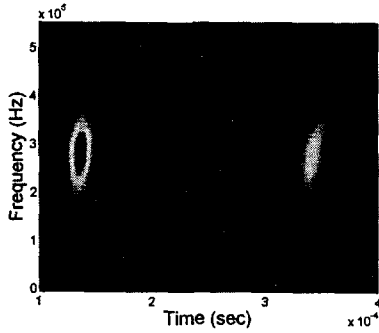


Fig. 6 The absolute values of the STFT of measured pulse 2, 3

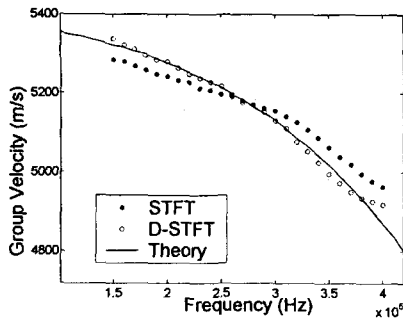


Fig. 7 An estimated of the dispersion relationship of the measured S0 Lamb wave

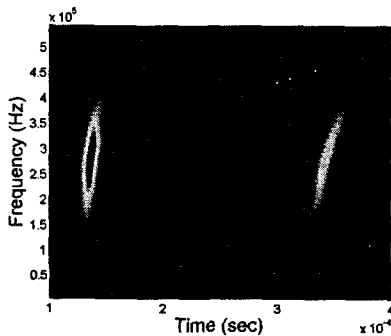


Fig. 8 The absolute values of the D-STFT of measured pulse 2, 3

보여주고 있다. Fig. 6과 비교하여 보다 향상된 해상도로 파의 거동을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 조향 자기변형 트랜스듀서를 이용하여 비자성체 평판에서 램파를 발생시키는 방법에 대해서 설명하였다. 또한, 측정된 램파의 분

산해석을 위해서 새로운 신호처리 기법인 D-STFT를 이용하여 보다 정확한 분산관계를 추정해 낼 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] J. Li, J. L. Rose, 2001. "Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder", J. Acoust. Soc. Am. Vol.109, no.2, pp.457-464
- [2] D. N. Alleyne, P. Cawley, 1996. "The excitation of Lamb waves in pipes using dry-coupled piezoelectric transducers", J. Nondestructive. Eval. Vol.15, no.1, pp. 11-20
- [3] J.L. Rose, K. Rajana, and M.K.T. Hansch, 1995. "Ultrasonic guided waves for NDE of adhesively bonded structures", Journal of Adhesion Vol.50, pp.71-82
- [4] H. Kwun, S.Y. Kim, 2001, "Long-range guided wave inspection of structures using the magnetostrictive sensor", 한국비파괴검사학회 Vol.21, no.4, pp.383-390
- [5] A. S. Purekar, D. J. Pines, S. Sundararaman and D. E. Adams, 2004. "Directional piezoelectric phased array filters for detecting damage in isotropic plates", Smart Mater. Struct. vol.13, pp. 838-850
- [6] P. D. Wilcox, M. J. S. Lowe, P. Cawley, 2000. "Lamb and SH wave transducer arrays for the inspection of large areas of thick plates", Review of Progress in Quantitative NDE vol.19, American Institute of Physics, pp.1049-1056
- [7] S. H. Cho, K. H. Sun, J. S. Lee, and Y. Y. Kim, 2004. "Orientation-adjustable patch-type magnetostrictive ultrasonic transducer for non-ferromagnetic plates", Proceedings of EMSA 2004, pp. T-O 6.
- [8] R. M. Borzorth, 1993. Ferromagnetism, Piscataway, N. J.:IEEE Press.
- [9] K. F. Graff, 1975. Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State Univ. Press, Columbus
- [10] D. Gabor, 1946. "Theory of communications", J. IEE, 93, pp. 429-457
- [11] X. Sun, Z. Bao, 1996. "Adaptive spectrogram or time-frequency signal analysis", Proceedings of the IEEE-SP International symposium on time-frequency localization and time-scale analysis, pp. 87-90
- [12] J.-C. Hong, K. H. Sun, Y. Y. Kim, 2005. "Dispersion-based short-time Fourier transform applied to dispersive wave analysis", J. Acoust. Soc. Am. Vol.117, no.5, pp.2929-2960