

두께감육 평가를 위한 SH-EMAT파의 모드특성 분석

박익근*, 김용권⁺

(논문접수일 2009. 9. 28, 심사완료일 2010. 2. 1)

Mode Characteristics Analysis of the SH-EMAT Waves for Evaluating the Thickness Reduction

I. K. Park*, Y. K. Kim⁺

Abstract

In this paper, study on the mode characteristics analysis of the SH-EMAT (shear horizontal, electromagnetic acoustic transducer) waves for evaluating the thickness reduction in plates such as corrosion and friction is presented. Non-contact methods for ultrasonic wave generation and detection have been a great concern and highly demanded due to their capability of wave generation and reception on surface of high temperature or on rough surface. Mode identification of the SH-EMAT wave is carried out in an aluminum plate with thinning defects using time frequency analysis method such as wavelet transform, compared with theoretically calculated group velocity dispersion curve. The changes of various wave features such as the amplitude and the time-of-flight have been observed and the correlations with the thickness reduction have been investigated. Firstly, experiments have been conducted to confirm that it is possible to selectively generate and receive specific desired SH modes. These modes have then been analyzed to select the parameters that are sensitive to the thickness change. The results show that the mode cutoff and the time-of-flight changes are feasible as key parameters to evaluate the thickness reduction.

Key Words : EMAT(전자기초음파탐촉자), shear horizontal wave(SH파), noncontact(비접촉), dispersion curve(분산선도), wavelet transform(웨이블릿변환), mode cutoff(모드컷오프), time of flight(전파시간), thickness reduction(두께감육)

1. 서론

기계설비시스템을 구성하고 있는 배관이나 튜브 등의 부식

이나 마모에 의한 두께변화가 광범위하게 존재하는 경우 이를 정밀하고 신속하게 진단하는데 비접촉으로 유도초음파(Ultrasonic guided wave)를 이용하는 기법이 현장 적용에 유용하고

* 서울산업대학교 기계공학과 (ikpark@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

⁺ 서울산업대학교 에너지환경대학원

비교적 신뢰성이 높은 기술로 평가되고 있다. 비접촉으로 재료 특성 평가나 기계설비진단에 응용되고 있는 초음파 진단 기법으로는 레이저 초음파(Laser-based ultrasonics), 공기결합초음파탐촉자(Air-coupled transducer)와 전자기초음파탐촉자(Electromagnetic acoustic transducer; 이하 EMAT라 한다)에 의한 방법 등이 있다. 이 중 EMAT에 의한 방법은 현재 대표적인 비접촉 초음파검사기법의 하나로서 60년대에 기존의 접촉식 초음파검사기법에서는 불가피한 접촉매질을 사용하지 않고 전자기력을 이용하여 금속 검사체의 표면에서 수 mm정도 떨어져 초음파를 송·수신할 수 있는 연구 결과가 보고된 이래, 1970년대에 이르러 R. B. Thompson⁽¹⁾은 로렌츠 힘(Lorentz force)과 자왜효과(Magneto-strictive effect)를 이용한 EMAT의 구동원리를 설명하였으며, 1980년대부터 B. W. Maxfield^(2,3)에 의해 급속히 연구가 진행되었다.

EMAT는 기존의 압전소자를 접촉하여 초음파를 이용하는 PZT와는 달리 도체 표면에 근접한 EMAT 코일의 교류 전류에 의한 재료내의 전자기계(Electromagnetic field)와 정자기계(Biasing magnetic field)로부터 발생된 로렌츠힘에 의해 도체가 가진되기 때문에 비접촉으로 초음파를 송·수신하는 것이 가능하다. EMAT의 중요한 특징으로는 비접촉 검사가 가능하여 검사체의 표면처리가 불필요하고 코팅이나 보호막을 제거하지 않아도 되며, 종래의 접촉식 초음파로 곤란했던 고온의 측정 대상물에 적용이 가능하게 되었다는 점과 EMAT을 구성하고 있는 자석과 코일의 형상과 배열을 적절히 조절하면 PZT로는 발생이 어려운 SH파(Shear horizontal wave) 뿐 만 아니라 다양한 체적파 모드의 초음파도 쉽게 발생할 수 있다는 것이다.⁽⁴⁾

Rosc⁽⁵⁾은 유도초음파의 분산특성인 모드컷오프를 이용하여 박판의 부식을 평가하는데 있어 그 유용성에 대한 연구를 진행하였으며 이를 위해 접촉식 초음파탐촉자를 적용하였다. Tuzzeo⁽⁶⁾은 비접촉식 공기결합초음파탐촉자를 이용하여 박판의 부식평가에 유도초음파를 적용하였으며 모드컷오프와 군속도 변화로 두께감육을 정성적으로 평가한 바 있으며, Park 등⁽⁷⁻⁹⁾은 시간-주파수해석법인 웨이블릿변환(Wavelet transform)을 이용하여 두께변화가 있는 배관의 주파수 의존성에 대한 연구를 위해 각종 모드의 분산특성과 파형 구조로부터 유도초음파의 모드특성을 예측하고 그 유용성 유무를 실험적으로 검증한 바 있다.

본 연구에서는 배관이나 튜브 등에 부식이나 마모에 의한 두께감육을 정량적으로 평가할 수 있는 비접촉식 초음파탐상검사 기법(SH-EMAT)을 개발하기위한 선행 연구로 분산선도와 웨이블릿변환을 이용한 시간-주파수 신호해석에 의해 SH-EMAT파

모드의 선택적인 송·수신이 가능한지 여부와 진폭, 모드컷오프 주파수 그리고 전파시간차 등 두께변화에 민감한 인자로 유용한지 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. SH-EMAT파 모드의 선택적 수신

유도초음파의 한 종류인 SH파를 송수신하는 SH-EMAT은 PPM(Periodic permanent magnet)형 영구자석과 spiral 코일로 구성되어 있다. 이를 이용하여 발생하는 초음파 모드는 PPM형 영구자석의 요소 간격에 영향을 받으며 발생주파수에 따라 모드를 선택할 수 있다.⁽⁹⁾

SH파의 발생을 위해 2mm 두께의 알루미늄 박판에 대한 횡파속도로부터 Fig. 1과 같은 분산선도를 얻었다. Fig. 1은 주파수에 따른 위상속도(Phase velocity) 분산선도(Dispersion curve)와 군속도(Group velocity) 분산선도를 나타내고 있다. Fig. 1에서 나타난 직선의 기울기 값은 식 (1)과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda = \frac{C_p}{f} = 2 \times \Delta d \tag{1}$$

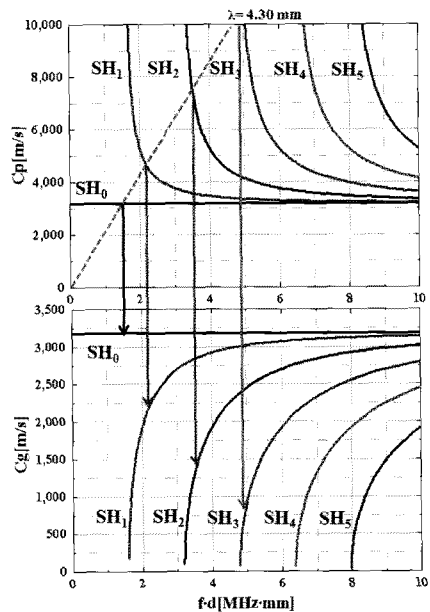


Fig. 1 Phase velocity and group velocity dispersion curves for SH-EMAT waves in an aluminum plate (thickness 2mm)

여기서, C_p 는 SH파의 위상속도, f 는 주파수, λ 는 SH파의 파장 그리고 Δd 는 영구자석의 요소 간격이다. 두께 2mm의 알루미늄 박판에 SH파를 발생하기 위해 사용된 EMAT의 자석의 간격이 2.15mm이므로 발생모드의 파장은 4.30mm이다. 따라서 위상속도 분산선도에서 4.30mm의 파장을 나타내는 직선과 교차되는 지점에 해당하는 SH파의 모드가 발생하게 된다.

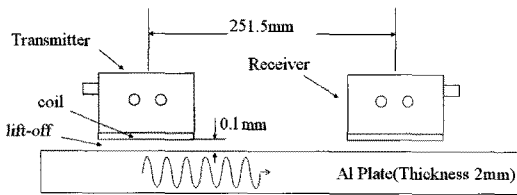
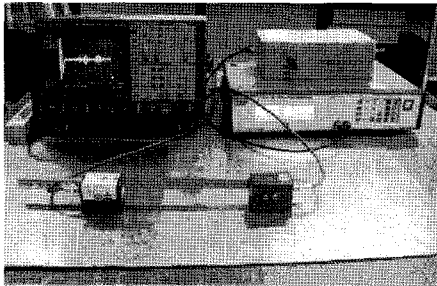


Fig. 2 Experimental details of SH-EMAT system

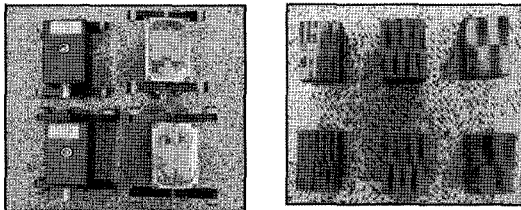


Fig. 3 SH-EMAT and permanent magnets

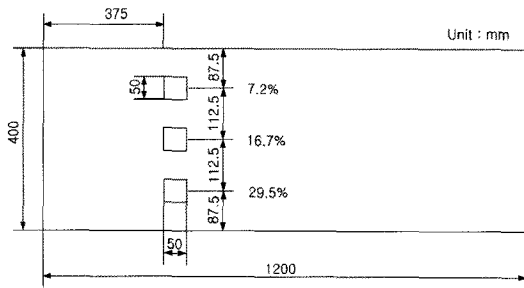


Fig. 4 The aluminum plate specimen geometry

3. 실험 장치 및 시험편

Fig. 2는 알루미늄 박판의 두께변화를 평가하기 위해 구성된 SH-EMAT 시스템이다. 시험편과 코일의 리프트 오프(lift off)는 0.1mm로 설정하였으며 한 쌍의 SH-EMAT의 간격은 251.5mm이다. SH-EMAT과 송수신을 위해 초음파 펄서/리시버(Panametrics, 5800)가 사용되었다.

펄서/리시버에 의해 발생된 초음파 펄스는 임피던스 매칭박스를 통해 송신 EMAT에 보내져 SH파를 발생시킨다. 그리고 발생된 SH파는 동일한 형태의 EMAT으로 수신되어 프리앰프(WIS사)에서 증폭된 후 신호처리를 위해 디지털 오실로스코프(Lecroy사)와 연결되어 신호의 평균화 및 주파수 분석 등을 수행할 수 있도록 구성하였다. Fig. 3은 SH-EMAT 센서와 EMAT의 구성품 중 하나인 영구자석이다.

박판에서의 두께변화에 의한 비접촉 SH파의 모드분산성 분석을 위해 2mm 두께의 알루미늄 박판에 결합 크기 $50 \times 50 \text{mm}^2$ 이며, 두께의 7.2%, 16.7%, 29.5%가 감소된 감육을 가지는 결함을 시험편에 기계 가공하였다. Fig. 4는 두께감육결함 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

4. 모드 특성 분석

Fig. 5는 수신된 SH-EMAT파의 파형과 웨이블릿변환에 의한 시간-주파수 분석 결과를 나타낸다. 이 결과로부터 여러 개의 모드가 동시에 수신되고 있음을 확인할 수 있다. 수신된 파

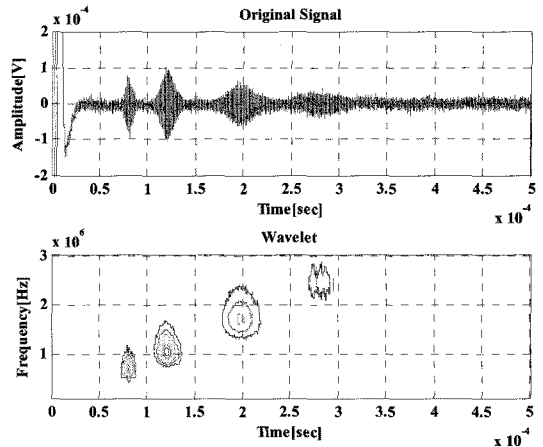


Fig. 5 The waveform obtained by SH-EMAT and wavelet transform results

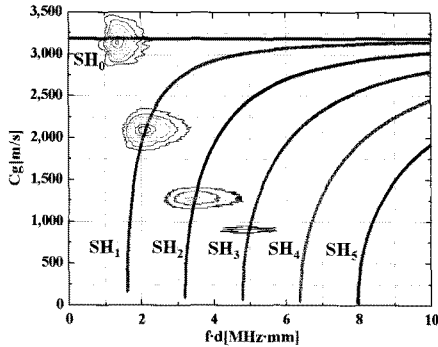


Fig. 6 Comparison between dispersion curve of group velocity and the wavelet transform result

형의 전파시간을 측정하여 음속을 계산하면 SH 모드를 예측할 수 있다. 그러나 위와 같이 여러 파형이 함께 시간축상에서 전파하면 음속을 구하는 것만으로는 어떤 모드인지를 명확히 밝히는 것이 어렵다. 따라서 모드식별(Mode identification)을 위해 웨이블릿변환과 같은 시간-주파수 해석법을 이용하여 파형을 분석하였다. Fig. 6은 웨이블릿변환을 이용하여 시간-주파수 분석하고 이론적인 군속도 분산선도와 비교한 결과이다. 그림에서와 같이 각각의 파형이 SH₀, SH₁, SH₂, SH₃ 모드임을 알 수 있었다. 식 (1)으로부터 이론적으로 예측된 모드는 자석간격에 두 배에 해당하는 파장으로 선택적으로 송수신할 수 있었으며 차단 주파수에 해당하는 고차모드는 발생하지 않음을 알 수 있다.

5. 두께 변화에 민감한 인자 결정

SH-EMAT파를 이용하여 두께감속을 평가하기 위해서는 각 모드들의 분산특성을 수치적 계산에 의해 예측하고 두께 변화에 가장 민감한 인자들을 결정해야 한다. 이를 위해 한 쌍의 EMAT에 의해 피치-캐치(Pitch-catch) 방법으로 초음파 모드들을 수신하게 된다. 일반적으로 초음파는 전파하면서 기본적으로 에너지, 즉 수신신호의 진폭이 줄어드는데 그 원인으로 흡수, 산란, 확산 그리고 분산성을 들 수 있다. 특히 분산성을 갖는 유도초음파의 진폭은 상당히 복잡한 양상을 보인다. 그 이유는 단일 주파수를 가지는 유도초음파 모드를 발생시키는 것은 불가능하기 때문에 여러 가지 모드들이 함께 발생하여 전파하는 파로써 다양한 주파수 또는 군속도를 가지고 재료 내를 전파한다. 따라서 두께 변화에 의해 진폭이 변화할 뿐만 아니라 각 모드들이 서로간의 간섭에 의해 진폭변화가 발생하

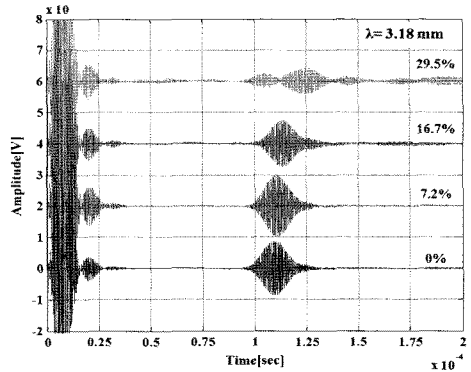
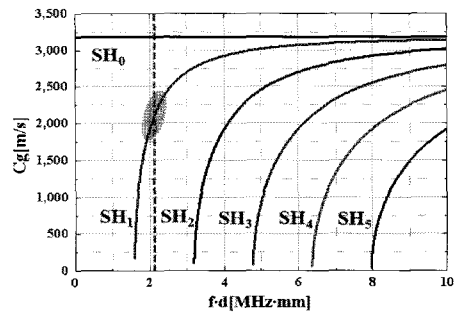
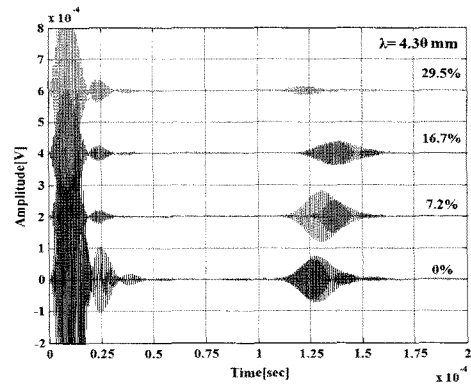


Fig. 7 Amplitude change of a SH₁ mode with wavelength 3.18mm with thickness reduction



(a) group velocity



(b) time-of-flight change

Fig. 8 Dispersion curves of SH₁ wave with wavelength 4.30mm and time-of-flight change with thickness reduction

게 된다. 또한 두께 변화 부위에서 발생하는 반사파에 의해 수신되는 신호의 진폭은 영향을 받게 된다. 이러한 유도초음파의

진폭변화는 두께변화를 평가하기 위해 진폭변화와 두께변화의 상관관계를 분석할 필요성이 있다.

Fig. 7은 두께변화에 따른 SH₀ 모드의 진폭변화를 나타내고 있다. 이 결과로부터 반사파에 의한 수신되는 SH₁ 모드의 진폭변화는 두께변화와의 상관관계를 확인하기에는 어려움이 있음을 알 수 있다. 그러나 유도초음파 모드는 저차모드인 SH₀ 모드를 제외하고 고차모드들은 k 가 0이 되어 위상속도가 무한대가 되는 조건인 차단주파수(Cut off frequency)를 가지고 있다. 따라서 두께변화에 의해 주파수와 두께 곱인 $f \cdot d$ 값이 차단주파수에 해당하는 영역에 접근하게 되면 모드는 점점 분산성이 커져 진폭이 감소하게 되고 그 영역을 벗어나게 되면 모드가 사라지는 모드컷오프가 발생하게 된다.

Fig. 8은 SH₁ 모드의 군속도 분산선도와 두께변화에 따른 전파시간차를 나타낸다. Fig. 8(a)은 이론적인 군속도 분산선도로 두께가 감소하면 $f \cdot d$ 값이 감소하여 전파 모드의 속도가 줄어든다. 이 특성에 의해 Fig. 8(b)에서 두께감육이 증가할수록 모드의 전파시간이 늘어남을 확인할 수 있다. 유도초음파는 주파수 또는 형상에 따라 각기 다른 속도, 즉 분산성을 가지고 전파하게 된다. 만약 두께가 변하게 되면 전파하고 있는 모드의 속도가 변화하게 되기 때문에 수신되는 유도초음파의 전파시간차를 발생시킨다.

Fig. 8(b)은 두께변화에 따른 모드의 전파시간차를 나타내는 결과이다. 이를 위해 분산성을 나타내는 파장이 4.30mm인 SH₁ 모드를 선택하여 두께 변화에 따른 전파시간차를 측정하였다. 특히 그림에서 두께감육이 30%이면 모드가 사라지는 모드컷오프 현상이 발생한다는 것을 실험적으로 확인하였다. 이와 같은 모드컷오프가 발생한 이유는 본 실험에서 파장이 4.30mm이고 $f \cdot d$ 가 2.17MHz·mm인 SH₁ 모드는 두께변화가 30%를 넘게 되면 $f \cdot d$ 가 1.52MHz·mm보다 적어지고 Fig. 8(a)의 이론적인 분산선도로부터 SH₁ 모드가 모드컷오프를 발생하는 $f \cdot d$ 인 1.60MHz·mm보다 적기 때문에 모드컷오프가 발생하게 된다. 이 결과로부터 이론적인 분산선도에서 해당 모드의 분산성을 예측하고 전파시간(Time of flight)를 측정하면 두께 변화를 평가하는 것이 가능함을 알 수 있다. 또한 모드컷오프를 이용하면 두께의 변화가 특정 두께감육 이상으로 진행되었음을 확인할 수 있다. 따라서 재료의 두께변화에 따른 전파시간차를 통해 두께감육 결함을 평가가 가능함을 확인하였다.

6. 결론

부식이나 마모에 의한 두께감육을 평가할 수 있는 비접촉식

초음파검사기법(SH-EMAT)을 개발하기 위한 선행연구로서 유도초음파의 분산선도와 웨이블릿변환을 이용한 시간-주파수 신호해석에 의해 두께변화에 따른 SH-EMAT파 모드의 특성을 실험적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

이론적인 분산선도와 비교한 결과 선택적으로 SH-EMAT파의 모드를 송·수신할 수 있음을 확인하였으며, 반사파에 의한 유도초음파 모드의 진폭변화는 두께변화와의 상관관계를 확인하기에는 어려움이 있어 두께변화를 평가하는 인자로는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 모드의 분산성에 의한 모드컷오프 현상을 이용하면 특정 두께이상의 두께변화를 평가하는 것이 가능할 것이라 판단된다. 그리고 두께 변화에 의해 발생하는 전파시간차의 변화는 해당 모드의 분산성을 나타내는 이론적인 분산선도로부터 예측이 가능하고 전파시간차를 측정하면 두께 변화를 평가할 수 있는 민감한 인자의 하나임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Thompson, R. B., 1973, "A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves," *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-20, pp. 340~346.
- (2) Maxfield, B. W. and Fortunko, C. M., 1983, "Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers(EMATs)," *Materials Evaluation*, Vol. 41, No. 12, pp. 1399~1408.
- (3) Maxfield, B. W., Kuramoto, A., and Hulbert, J. K., 'Evaluating EMAT Designs for Selected Applications', *Materials Evaluation*, Vol. 45, No. 10, pp. 1166~1183.
- (4) Hirao, M. and Ogi, H., 2003, *EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements*, Kluwer Academic Publisher, USA.
- (5) Rose, J. L. and Barshinger, J., 1998, "Using Ultrasonic Guided Wave Mode Cutoff for corrosion Detection and classification," *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 851~854.
- (6) Tuzzeo, D. and Lanza di Scalea, F., 2001, "Noncontact Air-Coupled Guided Wave Ultrasonics for Detection of Thinning Defects in Aluminum Plates," *Res. Nondestructive Evaluation*, Vol. 13, No. 2, pp. 61~77.

- (7) Park, I. K. and Ahn, H. K., 2001, "Time-Frequency Analysis of Lamb wave mode," *Journal of the KSMTE*, Vol. 10, No. 1, pp. 133~140.
- (8) Park, I. K., 2003, "Guided Wave Mode Identification Using Wavelet Transform," *Journal of the KSMTE*, Vol. 12, No. 5, pp. 94~100.
- (9) Park, I. K., Kim, H. M., Kim, Y. K., and Cho, Y. S., 2006, "Ultrasonic Guided Wave Mode Identification in Pipe by Using Air-coupled Transducer and Time Frequency Analysis," *Key Engineering Materials*, Vols. 321-323, pp. 804~807.