연 구 논 문

SH-EMAT를 이용한 알루미늄 박판의 두께감육 평가

김 용 권* · 박 익 근**,†

*서울산업대학교 에너지환경대학원
**서울산업대학교 기계공학과

Evaluation of Thickness Reduction in an Aluminum Sheet using SH-EMAT

Yong-Kwon Kim* and Ik-Kuen Park**,†

*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

†Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received November 30, 2009 ; Revised December 17, 2009 ; Accepted February 12, 2010)

Abstract

In this paper, a non-contact method of evaluating the thickness reduction in an aluminum sheet caused by corrosion and friction using SH-EMAT (shear horizontal, electromagnetic acoustic transducer) is described. Since this method is based on the measurement of the time-of-flight and amplitude change of guided waves caused from the thickness reduction, it provides information on the thinning defects. Information was obtained on the changes of the various wave features, such as their time-of-flight and amplitude, and their correlations with the thickness reduction were investigated. The interesting features in the dispersive behavior of selected guided modes were used for the detection of thinning defects. The measurements of these features using SH waves were performed on aluminum specimens with regions thinned by 7.2% to 29.5% of the total thickness. It is shown that the time-of-flight measurement provides an estimation of the thickness reduction and length of the thinning defects.

Key Words : Ultrasonic guided-wave, non-contact, EMAT, SH wave, Thickness reduction, dispersive behavior, time-of-flight

1. 서 론

기계설비시스템을 구성하고 있는 배관이나 튜브등의 부식이나 마모에 의한 두께변화가 광범위하게 존재하는 경우 이를 정밀하고 신속하게 진단하는데 비접촉으로 유도초음파(ultrasonic guided wave)를 이용하는 기법이 현장 적용에 유용하고 비교적 신뢰성이 높은 기술로 평가되고 있다. 비접촉으로 재료특성 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(magnetostrictive 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 특징으로 다소 거친 표면과 코팅이나 보호막을 제거하지 않아도 비접촉 검사가 가능하며, 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 모드와 표면파 모드의 초음파도 쉽게 발생할 수 있다는 것이다[4].

Rose등[5]은 유도초음파의 분산특성인 모드컷오프를 이용하여 박판의 부식을 평가하는데 있어 그 유용성에 대한 연구를 진행하였으며 이를 위해 접촉식 초음파탐촉자를 적용하였다. Tuzzeo등[6]은 비접촉식 공기결합초음파탐촉자를 이용하여 박판의 부식평가에 유도초음파를 적용하였으며 모드컷오프와 군속도 변화로 두께감육을 정성적으로 평가한 바 있으며, Park 등[7-10]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 초음파검사기법(SH-EMAT)을 개발하기위한 선행 연구로 모드컷오프와 군속도변화, 즉 유도초음파의 분산특성과 두께변화의 상관관계를 실험적으로 검증하고, 박판의 두께변화를 평가하기위한 기법을 확립하고자 한다. 이를 위해 SH-EMAT을 이용하여 비접촉식으로 발생된 유도초음파의 분산특성과 이론적인 분산선도와의 비교를 통하여 박판의 두께변화를 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

2. EMAT에 의한 SH파의 발생

표면 근처에 놓인 코일에 교류전류를 흘려주면 재료 표면에는 와전류 J_e가 유도되며, 여기에 정자기장 B_0를 가하면 재료 표면의 입자들은 Lorentz 힘 F를 받는다.[4]

$$F = J_e \times B_0 \tag{1}$$

여기서, J_e 는 도체 내에 발생하는 와전류, 변위전류를 무시한 맥스웰의 방정식(J_e = rotH)으로부터 얻을 수 있다.

이 로렌츠 힘을 이용하여 SH파(SH-wave)를 발생하는 경우, Fig. 1과 같이 요소의 간격(Δd)이 주기적으로 배열된 자석이 필요하다. 또한 구조물 표면에 근접하여 위치하는 코일에 흐르는 교류전류에 의해 로렌츠 힘의 방향이 전환되며 이는 초음파 발생의 구동력이 되어 SH파를 송·수신한다.

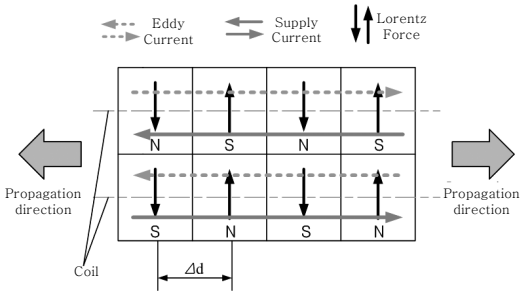

Fig. 1 Structure of the lorentz type EMAT for SH waves

특히 파장과 발생 주파수를 적용하고자 하는 재료의 특성에 맞게 변경하여 사용한다. 파장과 발생 주파수는 사용하는 영구자석의 요소 간격에 따라 결정할 수 있으며 SH파의 음속을 C_p라하고 자석의 요소 간격을 Δd라 하면 식(4)과 같다.

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

3. 실험 장치 및 시험편

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

펄서/리시버에 의해 발생된 초음파 펄스는 임피던스

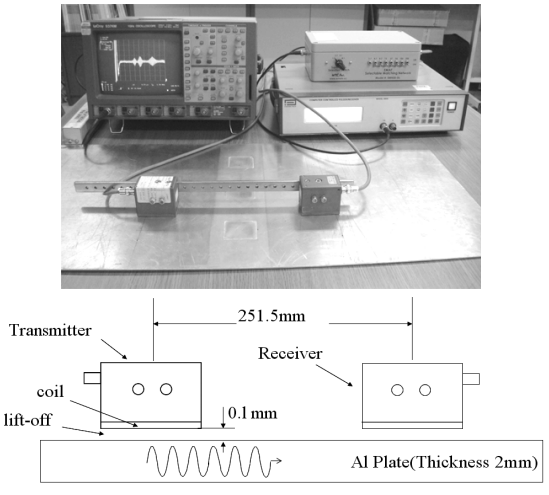

Fig. 2 Experimental details of SH-EMAT system

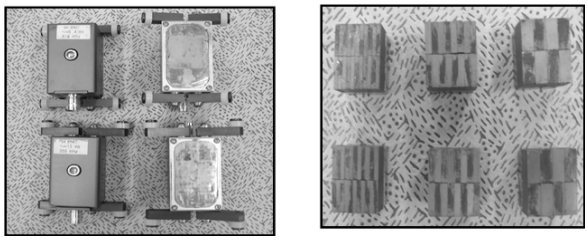

Fig. 3 SH-EMAT and permanent magnets

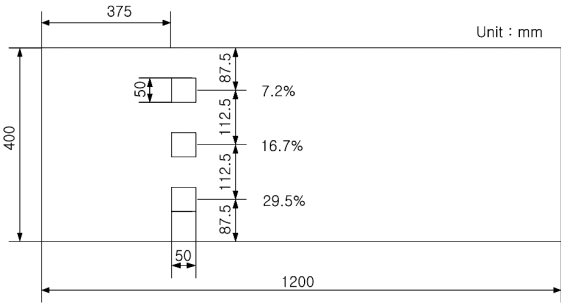

Fig. 4 The aluminum sheet specimen geometry

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 2 mm 두께의 알루미늄 박판에 결함크기 50×50 mm^2이며, 두께의 7.2%, 16.7%, 29.5%가 감소된 감육을 가지는 결함을 시험편에 기계 가공하였다. Fig. 4는 두께감육결함 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

4. 실험방법

알루미늄 박판에서 두께변화를 평가하기위해 SH-EMAT을 이용하여 비접촉으로 SH파를 송·수신하였다. 이때 초음파 펄서/리시버의 주파수 범위는 0.1~5 MHz이다. SH파의 가진 주파수는 이론적인 분산선도에서 파장과 위상속도의 관계로부터 확인할 수 있으며, SH파의 여러 모드 중에서 SH_1, SH_2 모드를 발생하기 위해서 이론적인 분산선도로부터 가진 주파수를 선정하였다. 예를 들어 파장이 4.30 mm인 SH_1 모드를 발생하기 위한 가진 주파수는 2.17 MHz이다. 한 쌍의 SH-EMAT간격은 251.5 mm로 하여 피치-캐치 방식으로 SH파를 송·수신하였으며 탐촉자의 위치는 결함

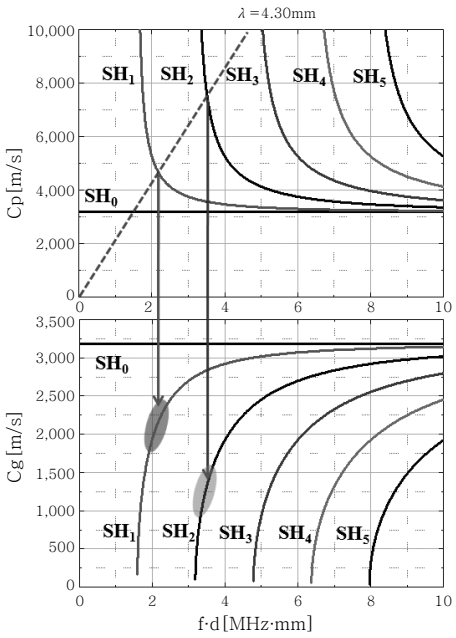

Fig. 5 Phase and group velocity dispersion curves for SH waves, showing the excitation line for the 4.30mm-wavelength EMAT for the 2 mm aluminum sheet

의 양쪽에 배치하였다. 그리고 수신된 신호는 가진 주파수에 해당하는 주파수 대역으로 필터링하였으며 사용된 필터는 버터워스(Butterworth) 필터이다. Fig. 5는 파장 4.30 mm일 때 분산선도에서 SH_1, SH_2 모드의 발생 주파수와 군속도를 나타낸다.

5. 실험결과

5.1 두께감육평가

Fig. 6은 SH_1 모드가 두께감육결함 부위를 지나 수신된 신호로 두께 변화에 따른 SH_1 모드의 전파시간차 변화를 나타낸다. 이때 SH_1 모드의 파장은 3.18 mm와 4.30 mm이고 두께감육결함의 길이는 50 mm이다. 이 결과로부터 두께감육이 증가할수록 전파시간차가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 이론적인 군속도 분산선도에서 두께 d가 감소하면 SH_1 모드의 군속도가 감소하는 결과와 일치한다. 또한 파장이 4.30 mm일 때 두께변화가 30%인 결함으로부터 수신된 모드는 모드컷오프가 일어나 신호가 사라짐을 확인하였다. 이와 같은 모드컷오프가 발생한 이유는 본 실험에서 파장이 4.3 mm이고 f·d가 2.17 MHz·mm인 SH_1 모드는 두께변화가 30%를 넘게 되면 f·d가 1.52 MHz·mm보다 적어지고 Fig. 5의 이론적인 분산선도로부터 SH_1 모드가 모드컷오프를 발생하는 f·d인 1.60 MHz·

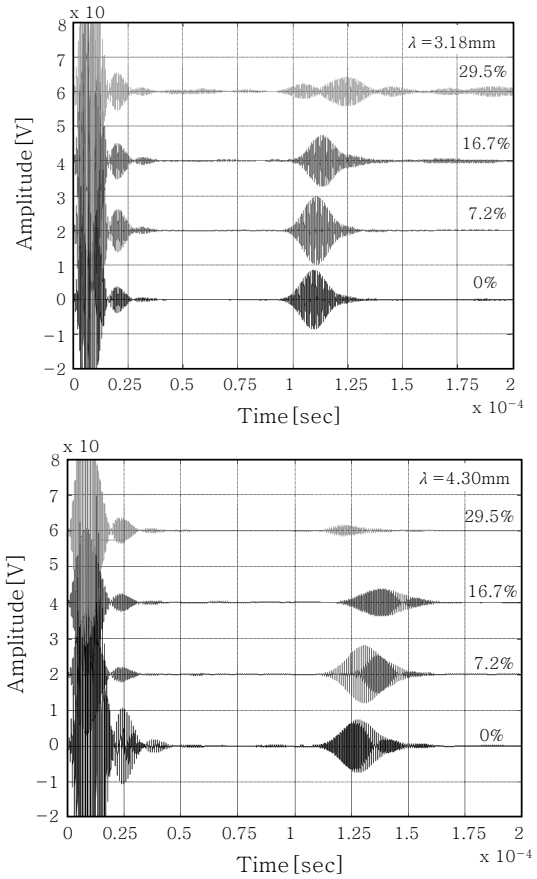

Fig. 6 SH_1 mode waveforms in a sheet for a defect-free region and the 7.2, 16.7 and 29.5% thinning defects (using wave length is 3.18 mm and 4.30 mm)

mm보다 적기 때문에 모드컷오프가 발생하게 된다.

Fig. 6과 같이 두께변화가 발생하면 모드의 분산성으로 인해 전파시간차가 발생하게 된다. 전파시간차의 변화, 즉 군속도 변화는 두께변화를 나타내기 때문에 두께 변화를 정량적으로 평가하기 위해 군속도 측정값을 통계적으로 분석하였다. 이를 위해 분산특성에 의한 유도초음파의 군속도 변화를 측정하고 군속도 평균값, 군속도 분산 그리고 군속도 표준편차를 확인하였다. Table 1은 95% 신뢰구간을 구하기 위해 표준 편차를 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 7은 SH_1 모드의 군속도 측정결과를 이론적 분산곡선과 비교한 결과로 전체적인 군속도의 변화는 이론적인 군속도 변화와 유사함을 확인할 수 있었다. 수치적으로 계산된 분산선도로부터 얻은 군속도와 군속도 측정값을 비교하여 두께 감육을 평가한 결과를 Table 2에 정리하였으며, 파장 3.18 mm에서의 결과를 나타낸다. 신뢰구간에 대한 두께 감육을 평가하였으며 접촉식 수직 탐촉자를 이용하여 측정된 두께와 비교하였다. 이 결과로부터 SH_1 모드에서는 실제 두께감육에 대하여 최대 3.75% (±0.18%)의 편차

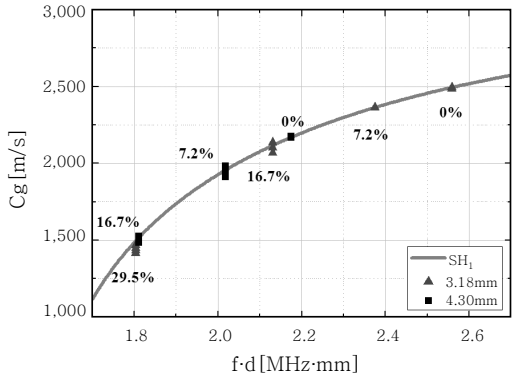

Fig. 7 Group velocity dispersion curve of SH_1 mode and symbols, showing the calculated group velocity obtained by SH_1 mode waveforms

Table 1 Calculated group velocity and standard deviation of SH_1 mode with thickness reduction

Real thickness reduction [%]	Wavelength [mm]			
	3.18		4.30	
	Calculated group velocity [m/s]	Standard deviation [m/s]	Calculated group velocity [m/s]	Standard deviation [m/s]
0	2492.86	0.59	2169.08	3.18
7.2	2364.36	1.40	1948.24	11.87
16.7	2098.53	20.70	1500.33	8.76
29.5	1440.32	8.55	N/A	N/A

Table 2 Experimental results from evaluation of thickness reduction for a defect about SH modes with wavelength 3.18 mm

Mode	Real thickness reduction [%]	Calculated thickness reduction [%]	Difference [%]	95% confidence interval [%]
SH_1	7.2	10.95	-3.75	0.18
SH_2	7.2	6.77	0.44	0.15
SH_1	16.7	15.85	0.88	0.50
SH_2	16.7	N/A	N/A	N/A

를 가지며 SH_2 경우에는 0.44% (±0.15%)의 편차를 보였다. 특히 감육이 7.2% 인 경우에 SH_1, SH_2 모드를 적용한 결과에 대한 차이가 큼을 확인하였다. 이는 두께변화에 따른 모드의 군속도 분산성 차이 때문이며 두께감육이 적은 경우에는 분산성이 큰 고차 모드가 두께감육을 평가하는데 더 적합하다는 것을 의미한다.

Table 3 Experimental results from evaluation for length of thickness reduction about SH modes with wavelength 3.18 mm

Mode	Real thickness reduction 〔%〕	Real length of thickness reduction 〔mm〕	Calculated length of thickness reduction 〔mm〕	Difference 〔mm〕	95% confidence interval 〔%〕
SH_1	7.2	50	29.01	20.99	0.83
SH_2	7.2		56.76	-6.76	2.55
SH_1	16.7		61.70	-11.70	4.46
SH_2	16.7		N/A	N/A	N/A

5.2 두께감육 길이평가

두께감육을 정량적으로 평가하기위해서 두께변화뿐만 아니라 결함길이도 함께 전파시간차를 이용하여 평가하였으며 이론적인 분산선도와 비교하여 실험적으로 검증하였다. 이를 위해 두께감육 평가에 적용한 동일한 시험편으로 실험을 진행하였다. 이 전파 시간차, 즉 속도 측정값을 바탕으로 두께 감육결함의 길이를 평가한 결과를 Table 3에 정리하였으며, 파장 3.18 mm에서의 결과를 나타낸다. 이 결과로부터 결함길이에 대해 최대 20.99 mm(±0.83 mm)의 편차를 보였다. 특히 두께 감육결함이 7.2%인 경우에는 모드에 따라 큰 차이를 보였으며, SH_2 모드를 적용하여 결함길이를 평가한 결과 6.77 mm(±2.55 mm)의 편차를 보인 반면에 SH_1 모드인 경우에는 편차가 20.99 mm(±0.83 mm)로 편차가 상당히 큼을 확인하였다. 이는 전파시간차에 의해 계산된 두께감육평가 결과로부터 결함길이를 추정하기 때문에 오차의 전파에 의한 결과라고 판단된다.

6. 결 론

알루미늄 박판에 가공된 두께감육결함을 검출하기 위해 비접촉식 초음파기법를 적용하였다. 이를 위해 박판에 유도초음파를 송·수신하기 위해 한 쌍의 SH-EMAT을 적용하였으며 파장과 발생 주파수의 조정을 통해 효과적인 전파모드를 선택하는 것이 가능하였다. 그리고 두께감육결함으로 인해 발생하는 유도초음파의 분산특성변화, 즉 전파시간차변화를 두께 감육 평가에 이용하였다. 이 실험결과로부터 SH_1, SH_2 모드를 이용하여 박판에서 95% 확률로 두께감육을 최대 약 4%(0.08 mm)이내의 편차를 가지고 평가할 수 있음을 보였다. 또한 박판에서의 두께감육뿐만 아니라 두께감육부의 길이도 평가가 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. R.B. Thompson : A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves, IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics, **SU-20** (1973), 340-346
2. B.W. Maxfield and C.M. Fortunko : Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs), Materials Evaluation, **41-12** (1983), 1399-1408
3. B.W. Maxfield, A. Kuramoto and K. Hulbert : Evaluating EMAT Designs for Selected Applications, Materials Evaluation, **45-10** (1987), 1166-1183
4. M. Hirao and H. Ogi : EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements, Kluwer Academic Publisher, 2003
5. J.L. Rose and J. Barshinger : Using Ultrasonic Guided Wave Mode Cutoff for corrosion Detection and classification, IEEE Ultrasonics Symposium. (1998), 851-854
6. D. Tuzzeo and F. Lanza di Scalea : Noncontact Air-Coupled Guided Wave Ultrasonics for Detection of Thinning Defects in Aluminum Plates, Res. Nondestructive Evaluation, **13-2** (2001) 61-77
7. I.K. Park, C.K. Lee, H.M. Kim, T.S. Park, Y.K Kim, Y.S. Cho, W.J. Song and H.K. Ahn : Non-contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments, Journal of the KWS, **23-5** (2005), 37-42 (in Korean)
8. I.K. Park, Y.K. Kim, H.M. Kim, W.J. Song, Y.S. Cho and Y.S. Ahn : Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques for Inspection of Pipes, Journal of the KWS, **23-5** (2005), 43-48 (in Korean)
9. I.K. Park, H.M. Kim, T.H. Kim, Y.K. Kim and Y.S. Cho : Non-contact Ultrasonic Technique for the Evaluation wall thinning of the plate, Journal of the KSNT, **25-4** (2005), 287-293
10. I.K. Park, H.M. Kim, Y.K. Kim and Y.S. Cho : Ultrasonic Guided Wave Mode Identification in Pipe by Using Air-coupled Transducer and Time Frequency Analysis, Key Engineering Materials, 321-323 (2006), 804-807