

비접촉 Lamb-EMAT를 이용한 두께감육 평가에 관한 연구

Non-contact Ultrasonic Technique for the Thin Defect Evaluation by the Lamb-EMAT

김태형*, 박익근**, 이철구**, 김용권***, 김현묵****, 조용상*****

* 서울 산업대학교 기계공학과 산업대학원

** 서울 산업대학교 기계공학과

*** 서울산업대학교 에너지시스템대학원

**** 한양대학교 대학원

***** 한국전력 전력연구원

ABSTRACT Ultrasonic guided waves are gaining increasing attention for the inspection of platelike and rodlike structures. At the same time, inspection methods that do not require contact with the test piece are being developed for advanced applications. This paper capitalizes on recent advances in the areas of guided wave ultrasonics and noncontact ultrasonics to demonstrate a superior method for the nondestructive detection of thinning defects simulating hidden corrosion in thin aluminum plates. The proposed approach uses EMAT(electro-magnetic acoustic transducer) for the noncontact generation and detection of guided plate waves. Interesting features in the dispersive behavior of selected guided modes are used for the detection of plate thinning. It is shown that mode cutoff measurements provide a qualitative detection of thinning defects. Measurement of the mode group velocity can be also used to quantify of thinning depth.

1. 서론

EMAT은 1968년 Wallance가 기존의 접촉식 초음파검사기법에서는 불가피한 접촉매질을 사용하지 않고 전자기력을 이용하여 금속 검사체의 표면에서 수 mm정도 떨어져 초음파를 발수신하는 연구결과를 보고한 이래, 1970년대에 이르러 R. B. Thompson[1]은 로렌츠 힘과 자왜효과를 이용한 EMAT의 구동원리를 설명하였으며, 1980년대에는 B. W. Maxfield[2,3]에 의해 급속히 연구가 진행되고 있다. EMAT의 중요한 특징으로는 첫째, 비접촉검사가 가능하여 검사체의 표면 처리가 불필요하고 코팅이나 보호막을 제거하지 않아도 된다. EMAT으로 가능한 비접촉 거리는 약 10mm 정도까지이며 대부분 1mm이하에서 작동한다. 둘째, 발생이 어려운 다양한 초음파의 모드를 발생시킬 수 있다.[4] 본 연구에서는 비접촉 EMAT의 새로운 적용분야를 개발하고자, 모의 부식된 알루미늄 판의 두께 감육을 효과적으로 검출하기 위한 비접촉 유도초음파 검사기법을 개발하고자 한다.

2. EMAT에 의한 유도초음파의 발생

전기장내에서 이온들은 전자들과 반대방향으로

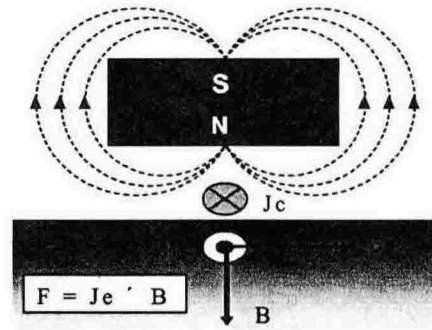


Fig. 1 Wave generation mechanism of the EMAT.

운동하며, 전자들과의 충돌에 의해 운동에너지를 전달받는다. 그러나 자기장 B_0 가 전기장내에 있는 도체에 가해지면 도체내의 전자들과 이온들은 식(1)과 같이 로렌츠 힘을 받게 된다.(Fig. 1)[5]

EMAT을 도체에 접근시키면 도체는 자화되고, 도체내의 자기장은 Maxwell 방정식과 전자기적 경계조건에 의해 구할 수 있다. 도체내의 자장 H 는 바이어스 자장과 작용하는 합성 체적력 f 로 구한다. f 는 로렌츠 식(1)의 힘(f^L), 식(2)의 자화력(f^M), 식(3)의 자왜력(f^{MS})의 합성력이며, 각각 다음의 식으로 표현된다.

$$f^{(L)} = J_e \times B_0 \quad (1)$$

$$f^{(M)} = (\nabla H) \cdot M_0 \quad (2)$$

$$f^{(MS)} = \nabla \cdot (e \cdot H) \quad (3)$$

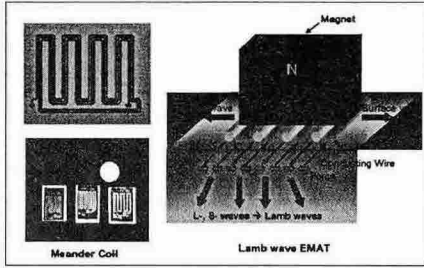


Fig. 2 Structure and coil of the general EMAT for the Lamb wave.

Fig. 2와 같은 구조의 EMAT을 박판에 적용하면 판파가 발생하고, 두꺼운 판재에 적용하면 표면파가 발생하여 Lamb파와 표면파용 EMAT을 따로 구별하지는 않는다.

3. 유도초음파검사의 이해

Fig. 3은 알루미늄 판에 대한 위상속도와 군속도 분산선도를 보여준다. 그림에서 ω_0 는 위상속도, ω_g 는 군속도, ω 는 주파수, d 는 판의 두께이다. 본 연구에서는, 이러한 전파모드의 특징으로 모드 컷오프, 군속도를 이용하여 두께 감육을 평가하게 된다.

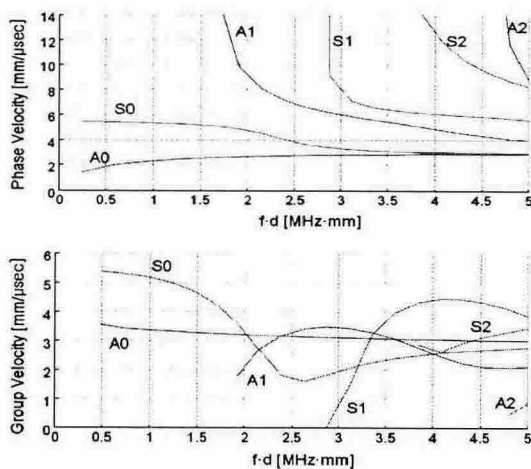


Fig. 3 Dispersion curves for traction-free aluminum plate ($c_L=6.35\text{mm}/\mu\text{sec}$, $c_T=3.13\text{mm}/\mu\text{sec}$), S=symmetric modes, A=antisymmetric modes.

3.1 실험장치 및 시험편

Fig. 4는 실험을 위해 구성된 시스템의 개략도이다.

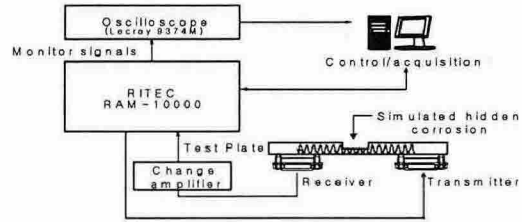


Fig. 4 Experimental setup for EMAT Lamb-wave detection of thinning defects in aluminum plate.

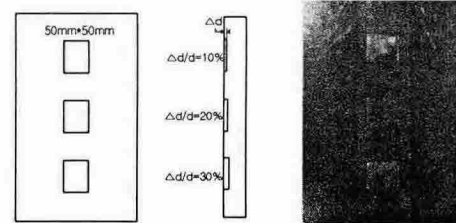


Fig. 5 Dimensions and location of simulated 10%, 20% and 30% hidden corrosion defects in the test aluminum plate.

유도초음파 송·수신을 위해 고출력 초음파 펄서/리시버(Ritec, RAM-1000) 사용되었다.

제작된 시험편은 알루미늄 박판으로 두께는 2mm이며, 크기는 1200mm×400mm이다. 결함의 면적은 50mm×50mm이며 각각 판 두께의 10%, 20%, 30%의 두께 감육비를 갖는다. Fig. 5은 시험편의 치수와 사진을 보여준다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 모드 컷오프(cut-off)

본 연구에서는 Fig. 3의 $f \cdot d$ 영역에서 A1 모드 또는 S1 모드가 이상적인 컷오프 모드이다. Fig. 6은 EMAT으로 알루미늄 판의 건전부에서의 S1모드 파형과, 10%, 20%, 30%의 두께 감육 결함에서 수신된 신호를 나타낸다. 두께가 감육된 부분에서는 S1 모드가 소실되어 두께 감육 유무를 판단할 수 있는 근거가 될 수 있다.

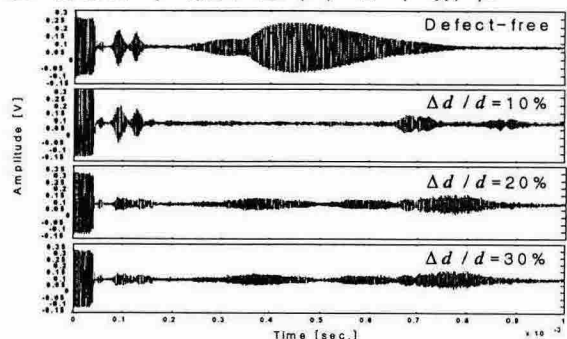


Fig. 6 S1 waveform recorded in the 2mm plate for a defect-free and 10%, 20% and 30% thinning defects.

3.2.2 군속도 변화

본 연구에서는 건전부에 대한 군속도 측정 원리로 송신용 탐촉자로부터의 전파시간을 얻었다. 여기서 수신용 EMAT의 거리를 각각 A와 B로 분리하여, 두 지점의 거리를 \overline{AB} 라 하면, 결함이 없는 영역에서의 군속도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$v_0 = \frac{\overline{AB} 2\pi}{(\phi/\lambda)_B - (\phi/\lambda)_A} \quad (4)$$

결함이 존재하는 영역에서 군속도를 동일하게 측정하기 위해서는, 발생위치와 수신위치의 거리 (\overline{AB})가 일정한 상태에서 측정해야 한다. 이렇게 측정된 전파시간으로부터 판의 두께에 대한 감육 결함의 비는 다음과 같다.

$$\Delta T_{000000} = \frac{(\phi/\lambda)_{B,000000} - (\phi/\lambda)_B}{2\pi} \quad (5)$$

전파하는 감육 영역만큼 ΔT_{000000} 가 발생하고, 최종적으로 얻어지는 군속도는 다음과 같다.

$$v_{0,000000} = \frac{L_{000000}}{T_0 + \Delta T_{000000}} \quad (6)$$

Fig. 7은 판 두께 2mm에서 건전부와 두께 감육비가 10%, 20%, 30%에서의 S0의 전파시간을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Fig. 1의 S0모드 분산선도에서 $f \cdot d$ 의 변화로부터 예측된 군속도 변화와 일치한다. Table 1은 두께 감육비에 따른 군속도와 건전부와 군속도 감소비를 나타내며, 측정된 군속도로부터 두께 감육비를 계산한 결과를 나타낸다.

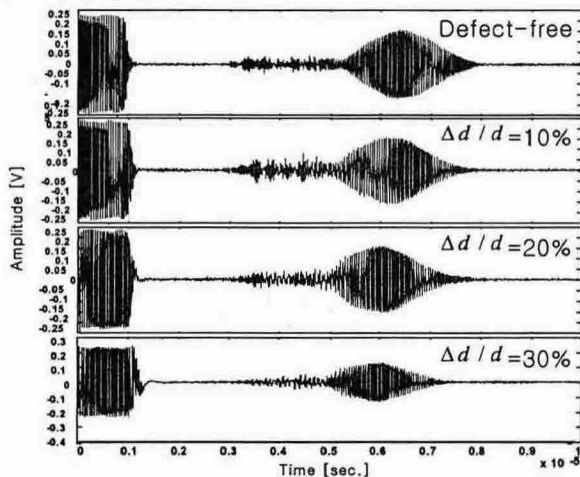


Fig. 7 S0 time histories in the 2mm plate for a defect-free and the 10%, 20% and 30% thinning defects.

Fig. 8는 Table 1의 수치를 분산선도에 기호로 표시한 것이다. 이론적인 군속도와 결함이 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Measured group velocity and relative change with respect to defect-free values for the 2mm plate.

	Mode S0	
	C_g (mm/ μ sec)	ΔC_g (%)
Defect-free	1.99	0
10% thinning	2.05	-2.93
20% thinning	2.11	-5.69
30% thinning	2.16	-7.87

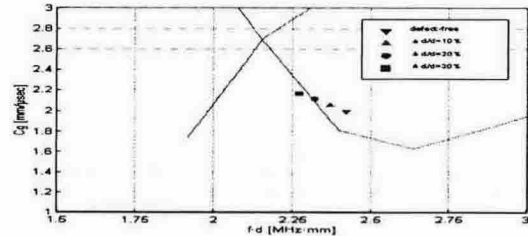


Fig. 8 Group velocity dispersion of S0-mode curves and symbols represent the experimentally determined group velocity values for the 2mm plate.

4. 결 론

박판에 유도초음파를, 발생 및 수신하기 위해 한 쌍의 EMAT이 적용되었다. 이때 발생하는 모의 내부 부식결함으로 인한 유도초음파의 분산특성이 두께 감육 평가에 이용되었다. 주파수와 위상속도의 조정을 통해 효과적인 전파모드를 선택하는 것이 가능하였다.

유도초음파의 분산 특성으로 모드 컷오프와 군속도 변화를 관찰하는 실험을 수행한 결과에서 모드 컷오프는 두께 감육을 검출할 수 있는 정성적인 파라미터로 사용될 수 있고, 군속도 변화는 두께 감육을 평가할 수 있는 정량적인 파라미터로 증명되었다.

참고문헌

- [1] J. S. Lim, R. B. Thompson, "Precise velocity measurement using EMATs", KSNT/SC0009, pp. 54-58, (2002)
- [2] B. W. Maxfield, C. M Fortunko, "Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers(EMATs)", Materials Evaluation, 41-12, pp. 1399-1408, (1983)
- [3] B. W. Maxfield, A. Kuramoto, K. Hulbert J "Evaluating EMAT Designs for Selected Applications", Materials Evaluation, 45-10, pp. 1166-1183, (1987)
- [4] 박익근, 김용권, 조윤희, 안연식, 조용상, "Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도 초음파 모드의 거동에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 2, pp. 142-150, (2004)
- [5] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press, pp. 111-113, (1999)