

수평횡파 송수신용 EMAT를 이용한 스틸 박판의 두께 감육 평가

Evaluation of Thickness Reduction in Steel Plate by Using SH-EMATs

이진혁*, 박익근**, 김용권*, 김대현**†

Jin-Hyuk Lee*, Ik-Keun Park**, Yong-Kwon Kim* and Dae-Hyun Kim**†

초 록 전자기 초음파 탐촉자(electromagnetic acoustic transducer; EMAT)는 접촉 매질 없이 초음파의 송·수신이 가능하며 자석과 코일의 형상과 배열을 조절하여 SH파나 Lamb파 같은 유도 초음파 모드를 용이하게 발생시킬 수 있다. 또한 이러한 유도 초음파는 박판에서 판 두께 전체를 장거리로 전파하며 두께에 따른 분산특성이 있어 배관 등의 구조물을 탐상하는데 효과적인 비파괴검사 기법으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 수평횡파(shear horizontal wave; SH)의 전파 거동을 해석하고 EMAT을 이용하여 SH파를 발생하여 스틸 박판의 두께 감육을 평가하였다. 그 결과 SH파의 분산특성은 두께 감육량의 증가에 따라 군속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 군속도 변화를 통해 두께 감육량을 정량적으로 평가하는 것이 가능함을 확인하였다.

주요용어: 수평횡파, 전자기 초음파 탐촉자, 두께 감육량

Abstract An electromagnetic acoustic transducer(EMAT) is a non-contact transducer which can transmit the ultrasonic guided waves into specimens without couplant. And it can easily generate specific guided waves such as SH(shear horizontal) or Lamb waves by altering the design of coil and magnet. In this study, the SH wave, which is generated by EMAT, has been applied to estimate the thickness-reduction in a steel plate. Especially, the interesting feature of the dispersive behavior in selected wave modes is used to detect the thickness-reduction. Experimental results show that the reduction-level can be quantified by the measurement of the group velocity of the wave which passes through the thinning area.

Keywords: Shear Horizontal Ultrasonic Wave(SH wave), Electromagnetic Acoustic Transducer(EMAT), Thickness Reduction

1. 서 론

평판 구조물 및 배관의 파손 원인으로는 외부 작용 하중, 건설 및 재료결함, 배관손상, 설비화재, 기계 부분품 등으로 여러 가지가 있지만 주요 요인 중 하나로 부식을 들 수 있다. 내부 부식은 강관 및 강판의 내부 면이나 항공기 날개에 사용되는 알루미늄 판의 뒷면에 발생하여 두께감육의 원인이 된다. 내부 부식은 구조물의 외부에

서는 관찰이 되지 않기 때문에 최근 이러한 결함을 검출하고 정량화할 다양한 비파괴평가기법이 시도되고 있다.

일반적으로 평판 구조물뿐 아니라 배관은 직경에 비하여 두께가 얇기 때문에, 배관에서 진행되는 초음파는 판파 등과 같은 유도초음파의 형태로 이용될 경우, 두께 전체에 대한 장거리 탐상이 가능하다. 또한 유도초음파는 파이프 내를 수미터에서 수백 미터 전파가 가능하다는 것이 실

험적으로 검증되어 장거리 파이프의 고속진단이나 매설 배관을 검사하는 기법으로 연구되고 있다. 반면 유도초음파는 상기와 같은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 평판 구조물 및 배관의 검사에 적용하는데 해결되어야 할 어려움이 남아있다. 유도초음파는 판 표면 간을 왕복 전파하는 종파·횡파의 간섭 및 공명에 의해 형성된 파동 모드이기 때문에 전파 송·수신 메커니즘이 상당히 복잡하고 이에 따라 모드 분석 및 수신 신호 해석이 어렵다.

다양한 유도초음파의 모드 중에서 SH파는 표면과 수평한 방향으로 입자가 진동하는 모드로써 모드변환이 없고 분산특성이 단순하여 신속한 신호해석 용이한 장점이 있다. 그러나 SH파를 기존의 접촉식 탐촉자를 이용하여 발생시키는 경우에는 감쇠 특성으로 높은 점성의 접촉매질을 사용해야 한다. 이러한 단점은 검사의 속도 및 신뢰성을 저하시키고, 접촉식이라는 기법의 한계로 인해 현장적용에 한계가 있는 것으로 보고되고 있다[1-5].

그러나 전자기 초음파 탐촉자 (electromagnetic acoustic transducer; EMAT)는 기존의 압전소자를 이용하는 센서와는 달리 비접촉으로 초음파를 발생하고 수신하는 것이 가능하다. 또한, EMAT에 의해 다양한 모드의 초음파가 발생 가능하며, 자석과 코일의 형상과 배열을 조절하여 접촉식으로는 발생이 어려운 SH파나 Lamb파 같은 유도초음파 모드를 용이하게 발생 시킬 수 있다[6].

본 논문에서는 다양한 판구조물과 각종 배관 등 박판 구조물의 부식에 의한 두께 감육 평가에 적용하기 위하여 비접촉 EMAT을 이용한 SH파의 전파거동을 해석하고 SH파의 분산특성을 이용하여 스틸 박판의 두께 감육에 대하여 정량적인 평가를 하였다.

2. EMAT의 SH파의 송신 메커니즘

EMAT을 도체에 접근시켜 코일에 교류전류를 흘려주면 재료 표면에는 와전류 J_e 가 유도되며, 여기에 정자기장 B_0 를 가하면 재료 표면의 입자들은 식(1)과 같이 Lorentz 힘 F 를 받는다[6-8].

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

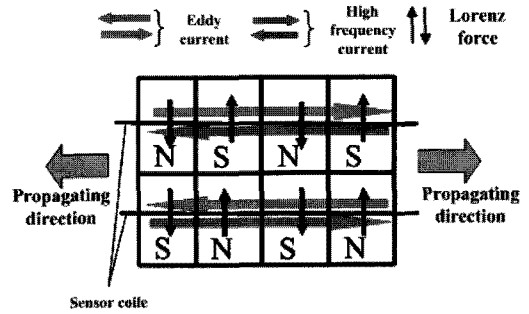


Fig. 1 Structure of the Lorentz type EMAT for generating SH wave

로렌츠 힘을 이용하여 SH파를 발생하는 경우 진행 방향에 대해 수직인 면내의 힘을 일정 간격(반파장 주기)마다 힘의 방향을 180° 반전하여 피검체에 전달해야 한다. 따라서 Fig. 1과 같이 자석의 극성을 반전시킨 배열형 자석이 필요하고, 각 자석 간격이 SH파의 반파장이 된다.

3. 판에서의 SH파의 전파거동

구체적으로 외력이 0인 경우에 대한 SH판파의 전파에 대해 다음과 같은 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \tag{2}$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{3}$$

여기서, 식(3)의 c_T 는 횡파 음속을 나타내며, μ 는 전단탄성계수이다. 식(2)의 파동방정식을 평판의 윗면과 아랫면 ($y = \pm d/2$)에 대한 응력이 0 일 경계조건은 식(4)와 같다.

$$\tau_{xy} = 0 \text{ at } y = \pm d/2 \tag{4}$$

이때, z 방향으로 진행하는 파동의 파수에 해당하는 k_n 은

$$k_n = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_T}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2} \tag{5}$$

이것은 SH판파의 n 차 모드에 대한 파수 이다.

또한 차수가 n 인 모드는 n 차 SH판파의 의미를 갖는 SH_n 모드라 표기하기도 한다.

SH파의 차수 n 의 모드에 대한 위상속도와 군속도는 각각,

$$c_{P_n} = \frac{\omega}{k_n} = c_T \left\{ 1 - \left(\frac{nc_T}{2fd} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$c_{g_n} = \frac{\partial \omega}{\partial k_n} = c_T \sqrt{1 - \left(\frac{nc_T}{2fd} \right)^2} \quad (7)$$

와 같이 얻어진다[3,4,9].

위상속도 및 군속도는 주파수에 크게 의존하고 주파수와 두께에 변화에 속도 파형이 크게 변화한다. 이렇게 파형이 흐트러지는 성질을 속도 분산성이라 한다. Fig. 2, Fig. 3은 각각 SH파의 위상속도와 군속도 분산선도 이다.

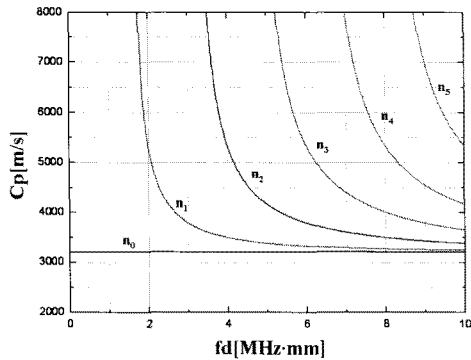


Fig. 2 Phase velocity dispersion curves of SH wave for steel plate ($c_T=3.20 \text{ mm}/\mu\text{sec}$)

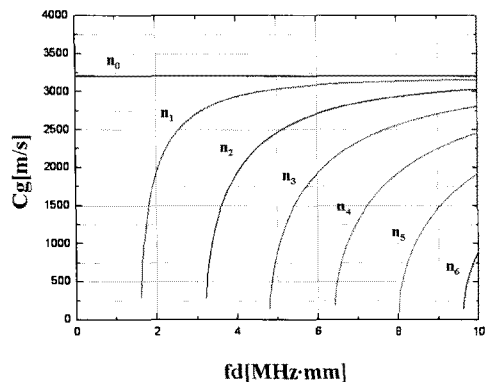


Fig. 3 Group velocity dispersion curves of SH wave for steel plate ($c_T=3.20 \text{ mm}/\mu\text{sec}$)

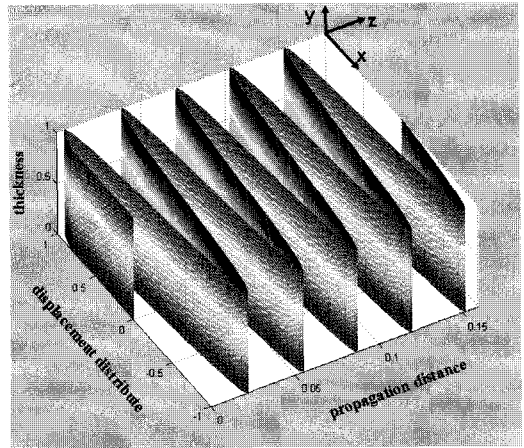


Fig. 4 Simulated wave propagation of SH wave

이때, SH파 모드의 x 방향 변위식은 비대칭모드와 대칭모드에서 각각 다음과 같다.

$$u_x = A \sin(n\pi y/d) e^{i(kx - \omega t)} \quad (8)$$

anti-symmetric modes

$$u_x = A \cos(n\pi y/d) e^{i(kx - \omega t)} \quad (9)$$

symmetric modes

Fig 4는 두께 1 mm의 판을 전파하는 모드차수 $n=0$ 인 SH파의 전파거동시뮬레이션 결과이다. 이때, SH파의 전파 방향은 z 축 방향이며, y 축은 판의 두께, x 축은 진동변위를 나타낸다[9,10].

4. 실험장치 및 시험편

4.1. EMAT 두께감육평가 시스템

본 실험 장치는 형상이 같은 한 쌍의 EMAT을 사용하는 방법으로 Fig. 5는 스틸 박판 및 배관의 두께 감육 결함을 평가하기 위해 구성된 시스템의 개략도와 사진이다.

초음파검사를 위한 장비는 초음파를 발생시키고 반사파를 수신하는 탐촉자와 이를 구동하고 신호를 처리하는 펄서/리시버 및 수신된 신호를 표시하는 스코프로 구성된다[13]. 유도초음파 송·수신을 위해 고풍력 초음파 펄서/리시버(Ritec, RAM-1000)가 사용되었다. 이 장치는 고풍력의 톤버스트 발생기와 수신 증폭기, 고감도 수신 장치, 아날로그 적분기로 구성되어 있다.

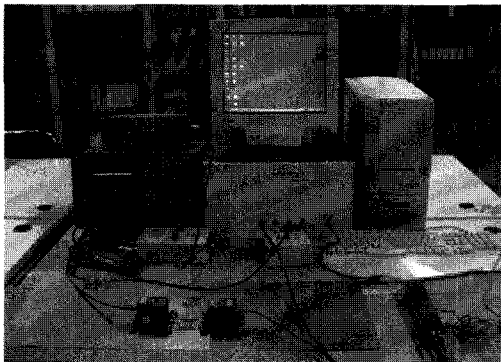
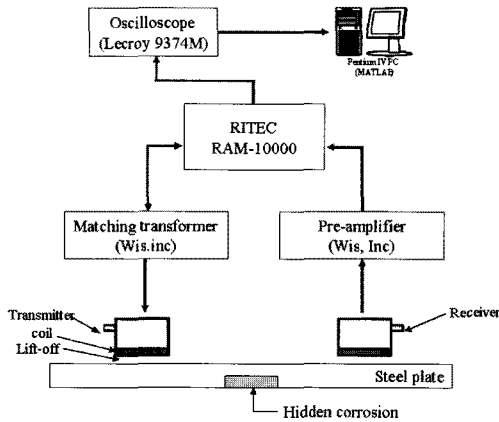


Fig. 5 Experimental setup for the evaluation of thickness reduction using SH-EMAT

4.2. 두께 감육 시험편

판에서의 비점촉 판파의 전파거동 해석을 위해 1 mm 두께의 스틸 박판에 결함 크기 50×50 mm 와 결함의 깊이는 두께의 3%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15%, 17%, 20%의 시험편을 밀링으로 기계 가공하여 제작하였다. 결함의 깊이는 주파수 10 MHz의 초음파 수직탐촉자를 이용하여 측정 결과 ±0.4% 이내의 오차를 보였다. Fig. 6은 제작된 시험편의 형상과 결함 크기를 나타낸 도면이다.

5. 실험 방법

스틸 박판의 두께 감육을 평가하기 위하여 SH-EMAT을 이용하여 SH파를 송·수신 하였다. 주파수는 분산선도에서 파장과 위상속도의 관계로부터 두께에 따라 군속도가 변화하는 n_1 모드가 발생되도록 선정하여 실험 하였다.

SH파의 파장이 3.18 mm일 때 n_1 모드를 발생

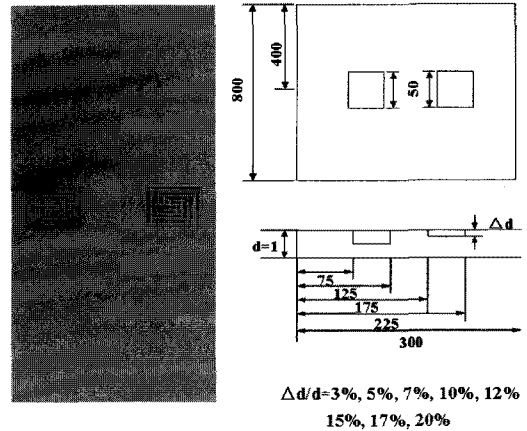


Fig. 6 Steel plate specimen and thinning defects

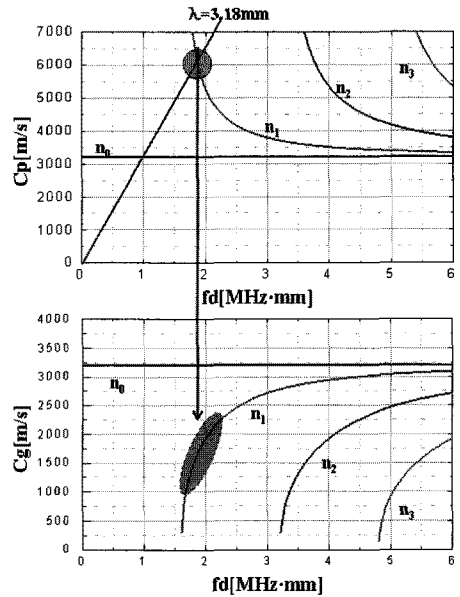


Fig. 7 Modes and fd from wave-length on velocity dispersion curves of SH wave for steel plate

하기 위해 주파수 1.90 MHz로 펄서를 가진 하였으며, 탐촉자 거리는 150 mm로 하여 결함의 양쪽에 배치하였다. 이때 시험체와 EMAT의 리프트오프는 1 mm로 설정하였다. Fig. 7은 파장 3.18 mm일 때 분산선도에서 n_1 모드의 발생 주파수와 군속도 구역을 나타낸다.

6. 두께 감육 평가 결과

Fig. 8은 SH파의 파장이 3.18 mm, 결함크기 50x50 mm, 결함 깊이 0%~17%의 두께 감육 시험

Table 1 Comparison of group velocity between theoretical and experimental result depending on thickness reduction

Theoretical analysis		Experimental analysis	
Δd	Group velocity (m/s) $c_t=3071.8(\text{m/s})$	Group velocity (m/s)	Δd
0%	1808.3	1808.3	N/A
3%	1697.8	1652.5	4.0%
5%	1613.6	1630.9	4.6%
7%	1518.8	1530.7	6.8%
10%	1350.4	1359.5	9.8%
12%	1213.9	1123.6	13.1%
15%	949.6	829.9	16.0%
17%	696.7	677.6	17.2%

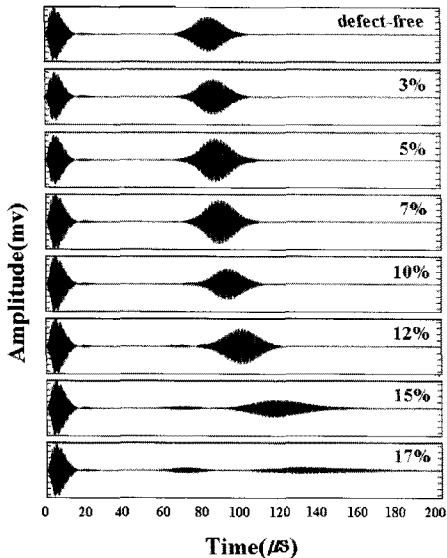


Fig. 8 SH- n_1 mode time histories in the 1mm plate for a defect-free and the 3~17% thinning defects

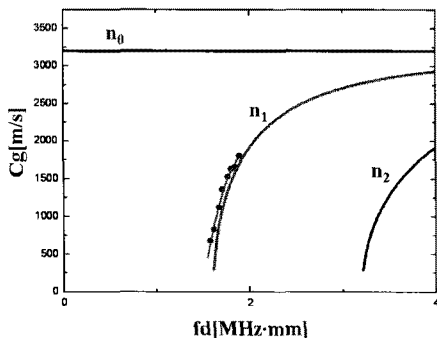


Fig. 9 Group velocity dispersion of n_1 -mode and symbols for representing the experimentally determined group velocity values

편에서 탐촉자 거리 150 mm에서 수신되는 SH파 n_1 모드의 시간 변화를 나타낸다. SH파가 전파되는 구간에서 이론적인 분산곡선과 같이 두께 d 의 감소에 따라 군속도가 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 9는 수신된 신호의 최대 피크의 시간과 탐상거리를 이용하여 계산된 군속도와 이론적인 분산곡선과 비교한 결과이다.

Table 1은 이론적으로 계산된 군속도의 변화와 실험을 통해 얻어진 군속도의 변화이다. 횡파 속도 3071.8 m/s를 기준으로 군속도의 계산 결과와 실험결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 또 이때 얻어진 군속도 결과를 이용하여 두께 감육량을 계산한 결과 가공된 결함의 두께 감육량과 적은 오차 범위에서 평가 할 수 있었다.

7. 결론

본 연구에서 비접촉 초음파 기법인 EMAT을 이용하여 SH파를 발생하여 두께 감육을 평가하였다. 두께 감육을 효율적으로 검출하고 평가하기 위하여 EMAT 판파를 이론적으로 고찰하고, 모의 내부 부식결함의 두께 감육을 연구한 결론은 다음과 같다.

- 1) SH파의 분산 거동 특성이 모의 내부 부식결함으로 인해 발생하는 두께 감육 평가에 이용되었다. 시험체의 재질과 두께에 따라 파장과 주파수의 조정을 통해 검사에 효과적인 전파모드를 선택하는 것이 가능하였다.
- 2) EMAT을 이용하여 SH파를 발생하여 결함의 두께 감육량에 따른 군속도의 변화를 확인하였다. 이러한 군속도 변화는 이론적 분산특성과 일치하며 이를 통해 두께 감육량의 정량적 평가가 가능함을 확인하였다.
- 3) 두께 감육량이 20%이상인 경우 모드 컷-오프 또는 모드 변환으로 정량적인 두께 감육 평가가 불가능하였다.

참고문헌

[1] J. L. Rose and L. E. Soley, "Material Evaluation," 58:1080 (2000)
 [2] W. Zhu, J. L. Rose, J. N. Barshinger and V.

- S. Agarwala. Res. "Nondestructive Evaluation," 10:205 (1998)
- [3] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press (1999)
- [4] J. D. Achenbach, "Wave Propagation in Elastic Solids," North-Holland, New York (1984)
- [5] 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)
- [6] M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements," Kluwer Academic Publisher (2003)
- [7] K. Fujisawa, "Application of EMAT to steel and nonferrous metal," *J. JSNDI*, Vol. 51, No. 2, pp. 68-73 (2002)
- [8] S. Suyama and K. Morimoto, "Non-destructive examination technique by electro-magnetic acoustic transducer," *J. JSNDI*, Vol. 46, No. 5, pp. 320-325 (1997)
- [9] T. Hayashi, "Study on ultrasonic propagation in thin plates and its applications to the non-destructive evaluation", *Nagoya Institute of Technology*, Doctoral thesis (2001)
- [10] T. Hayashi, "Numerical simulation of guided wave propagation," *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol. 52, No. 12, pp. 662-665 (2003)
- [11] 박익근, 김현묵, 김태형, 김용권, 조용상, 송원준, "박판의 두께 감육 평가를 위한 비접촉 유도초음파 검사 기법", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 4, pp. 287-293 (2005)
- [12] 이진혁, 박익근, 김용권, 조용상, 김대현, "비접촉 Lamb-EMAT를 이용한 가스배관의 헬스 모니터링", *한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 252-256 (2007)
- [13] 이진혁, 임성진, 박익근, 김대현, "발전소 열교환기 헤더와 튜브의 부분 용입형 용접부 초음파 자동검사시스템 개발", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 4, pp. 367-372 (2010)