

박판의 두께감육 평가를 위한 비접촉 유도초음파 검사 기법

Non-contact Ultrasonic Technique for the Evaluation Wall Thinning of the Plate

박익근*[†], 김현목**, 김태형***, 김용권****, 조용상*****, 송원준*****

Ik-Keun Park*[†], Hyun-Mook Kim**, Tae-Hyung Kim***, Yong-Kwon Kim****,
 Yong-Sang Cho***** and Won-Joon Song*****

초 록 유도초음파는 박판이나 봉재와 같은 구조를 효율적으로 검사할 수 있는 초음파로 주목받고 있으며, 더불어 시험체를 비접촉으로 검사할 수 있는 기법이 개발되면서 다양한 분야에 응용하기 위해 연구되고 있다. 본 연구에서는 비접촉식 초음파기법과 유도초음파의 장점을 결합하여 기존의 검사기법에 비해 효율적인 검사기법을 제안하고자 하였으며, 실험적인 검증을 위해 알루미늄 박판에 모의 부식결함을 가공하여 두께감육을 검출하고 평가하였다. 제안된 비접촉식 초음파기법으로는 EMAT을 이용하여 유도초음파를 발생 및 수신하였다. 선택된 유도초음파 모드의 분산거동특성에서 모드 컷-오프는 두께 감육을 검출할 수 있는 정성적인 파라미터이며, 군속도 변화는 두께 감육의 깊이를 정량적으로 평가할 수 있는 파라미터로 나타났다.

주요용어: 유도초음파, 비접촉검사, EMAT, 두께감육, 분산거동

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 defects thinning simulating hidden corrosion in thin aluminum plates. The proposed approach uses EMAT(electro-magnetic acoustic transducer) for the noncontact generation and detection of guided 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 defects thinning. Measurement of the mode group velocity can be also used to quantify depth thinning.

Keywords: guided-wave, non-contact inspection, EMAT, thickness thinning, dispersive behavior

1. 서 론

대표적인 비접촉 초음파검사기법의 하나로서 EMAT은 1968년 Wallance가 기존의 접촉식 초음파

검사기법에서는 불가피한 접촉매질을 사용하지 않고 전자기력을 이용하여 금속 검사체의 표면에서 수 mm정도 떨어져 초음파를 발수신하는 연구결과를 보고한 이래, 1970년대에 이르러 R. B. Thompson[1]은

(접수일: 2005. 3. 23, 심사완료일: 2005. 4. 22) * 서울산업대학교 기계공학과, ** 한양대학교 대학원, *** 서울산업대학교 산업대학원, **** 서울산업대학교 에너지환경대학원, ***** 한전 전력연구원, ***** 포항산업과학연구원,
 † Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743 (E-mail: ikpark@snut.ac.kr)

로렌츠 힘과 자왜효과를 이용한 EMAT의 구동원리를 설명하였으며, 1980년대에는 B. W. Maxfield[2,3]에 의해 급속히 연구가 진행되고 있다. EMAT은 기존의 압전소자를 이용하는 센서와는 달리 비접촉으로 초음파를 발생하고 수신하는 것이 가능하다. 외부 자계로 도체 표면에 근접시키면 강자성체의 경우 자왜효과에 의해 도체가 가진 되고 비자성체의 경우에는 로렌츠 힘에 의해 도체가 가진 되며 또한 역과정으로 초음파를 수신하게 된다. 따라서 도전체에 한정하여 초음파를 발생시킬 수 있다. EMAT의 중요한 특징으로는 첫째, 비접촉검사가 가능하여 검사체의 표면처리가 불필요하고 코팅이나 보호막을 제거하지 않아도 된다. EMAT으로 가능한 비접촉 거리는 약 10 mm 정도까지이며 대부분 1 mm이하에서 작동한다. 둘째, 발생이 어려운 다양한 초음파의 모드를 발생할 수 있다. EMAT에 의해 다양한 모드의 초음파가 발생가능하지만 자석과 코일의 형상과 배열을 조절하여 접촉식으로는 발생이 어려운 SH파와 같은 모드를 용이하게 발생시킬 수 있다.

유도초음파는 구조물의 판재 및 배관재의 접합부나 용접부를 검사하는 효율적인 기법으로 부각되고 있다. 가동 중인 항공기의 판재나 발전설비의 배관은 유도초음파 검사를 적용하기에 이상적인 구조체이다. 이와 같은 연구의 결과로 최근 가동 중인 항공기에 판파를 적용한 사례가 보고 되고 있다[4,5]. 기존의 연구에서 모의 부식과 실제로 부식된 알루미늄 판에 유도초음파를 적용한 실험에서, 판의 두께 감육으로 인해 전파하는 판파 모드의 모드 컷오프(cut-off), 군속도, 음압 통과/반사율과 같은 다양한 파라미터들이 민감하게 반응함을 증명하였다[6,7]. 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

EMAT에 의한 초음파 발생 및 수신은 3개의 메카니즘으로 설명될 수 있다. 첫째는 발신효율과 수신효율이 바이어스 자속밀도 B_0 에 비례하는 로렌츠 효과, 둘째는 바이어스 자화 M_0 에 비례하는 자화효과, 셋째는 자왜정수에 비례하는 자왜효과이다. 로렌츠 효과는 도체내에서 존재하며, 자왜효과는 강자성체에 존재한다[8-10].

도체가 전기장내에 놓이면, 도체내의 이온들은 전기장에 의한 영향과 전자들의 충돌이 일어난다. 전기장내에서 이온들은 전자들과 반대방향으로 운동하며, 전자들과의 충돌에 의해 운동에너지를 전달받는다. 이러한 운동에너지 전달에 의한 힘은 전기장에 의해 받는 힘의 크기와 거의 같고 방향만 반대이므로 전기장내에서 받는 힘은 무시할 수 있다. 그러나 자기장 B_0 가 전기장내에 있는 도체에 가해지면 도체내의 전자들과 이온들은 식(1)과 같이 로렌츠 힘을 받게 된다.(Fig. 1 참조)

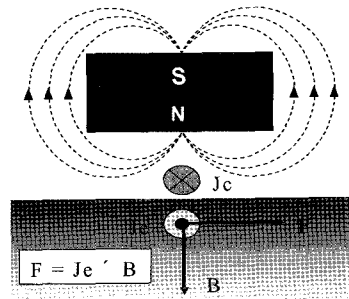


Fig. 1 Wave generation mechanism of the EMAT

EMAT을 도체에 접근시키면 도체는 자화되고, 코일에 교류전류를 통과시키면 공기 중에 자기장을 형성하여 도체표면을 거쳐 도체내에 자기장이 발생한다. 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 힘($f^{(L)}$), 자화력($f^{(M)}$), 자왜력($f^{(MS)}$)의 합성력이며, 각각 다음의 식으로 표현된다.

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

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

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

여기서, J_e 는 도체 내에 발생하는 와전류이며, 변위전류를 무시한 Maxwell 방정식, $J_e = rotH$ 로부터 얻어진다. e 는 자왜정수 텐서로서 자장 Hk 에 의해 발생하는 자왜응력 σ_{ij} 로 식(4)와 같다.

$$e_{k,ij} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial H_k} \tag{4}$$

또한, 합성 체적힘 f 의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot T + f \tag{5}$$

여기서, u 는 초음파입자의 변위이며, T 는 응력 텐서이다.

EMAT에 의해 자화된 영역에 초음파가 들어오면 도체내의 자장은 초음파 변위 u 로 설명되고, 이것으로부터 부가적인 전자장 E 와 B 가 도체내에 작용된다.

$$E = \sigma^{-1} J + \frac{\partial u}{\partial t} \times B_0 \quad (6)$$

$$B = \mu_0 \mu \cdot (H - M_0 \nabla \cdot u) + e \cdot \varepsilon \quad (7)$$

여기서, J 는 전류밀도, σ 는 전기전도율, μ_0 는 투자율, μ 는 비투자율텐서이다. 또한 $e_{ij,k}$ 는 수신에 대한 자왜정수텐서로서 초음파의 왜곡 ε_{ij} 에 의한 자속밀도의 변화를 B_k 를 표시하면 식 (8)과 같다.

$$e_{ij,k} = \frac{\partial B_k}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (8)$$

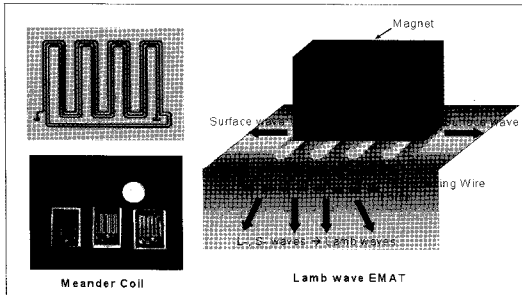


Fig. 2 Structure and coil of the general EMAT for the Lamb wave

식 (6)과 식 (7)은 Maxwell 방정식, $rot E = \partial B / \partial t$ 와 $J = rot H$ 를 사용하여 도체내의 자장 H 와 전기장 E 가 얻어진다. 이것은 식 (9)와 식 (10)의 진동하는 도체표면에 대한 경계조건을 만족하고, EMAT의 코일이 공기중에서의 전기장 E^{air} 와 H^{air} 로 변환된다.

$$n_0 \times (E^{air} - E) = V_n (B_0^{air} - B_0) \quad (9)$$

$$n_0 \times (H^{air} - H) + n' \times (H_0^{air} - H_0) = 0 \quad (10)$$

여기서, n_0 와 n' 는 각각 초기상태와 초음파가 진동하는 상태의 도체표면에 법선방향이 되고, V_n 은 표면에 수직방향인 입자속도이다. 최종적으로 E^{air} 와 H^{air} 가 EMAT의 코일에 의해 수신된다.

로렌츠 힘을 이용하여 판파(Lamb-wave)를 발생 하는 경우, 전파방향에 대해 수직인 면내의 힘을 일정 간격마다 힘의 방향을 180°로 반전하여 전달 한다. Fig. 2와 같은 구조의 EMAT을 판파에 적용 하면 판파가 발생하고, 두꺼운 판에 적용하면 표면파가 발생하여 Lamb파와 표면파용 EMAT을 따로 구별하지는 않는다. 다만 발생 주파수 등을 적용하고자 하는 재료의 특성에 맞게 변경하여 사용 한다. 발생 주파수는 사용하는 코일의 간격에 따라 결정할 수 있으며 판파의 음속을 V 라하고 코일의 간격을 W 라 하면 식(11)과 같다.

$$f = V/2W \quad (11)$$

3. 유도초음파검사의 이해

두께 $d = 2h$ 인 자유경계면을 전파하는 탄성파는, 이미 잘 알려진 바와 같이 Rayleigh-Lamb 주파수 방정식으로부터 유도되며, 식 (12)와 같다[11].

$$\frac{\tan(ph)}{\tan(qh)} = - \left(\frac{4k^2 pq}{q^2 - k^2} \right)^{\pm 1} \quad (12)$$

여기서 우측 상단의 지수부에 있는 +와 -부호는 각각 대칭모드와 비대칭모드를 나타내며, p 와 q 는 아래의 식으로부터 얻어진다.

$$p^2 = \left(\frac{w}{c_L} \right)^2 - k^2 \quad (13)$$

$$q^2 = \left(\frac{w}{c_T} \right)^2 - k^2 \quad (14)$$

식 (12)로부터 수치적인 판의 분산선도를 얻을 수 있다[11]. Fig. 3은 알루미늄 판에 대한 위상속도와 군속도 분산선도를 보여준다. 그림에서 c_p 는 위상속도, c_g 는 군속도, f 는 주파수, d 는 판의 두께이다.

유도초음파를 이용한 판의 두께 감육의 검출은 판의 두께 d 에 따른 모드의 분산거동에 기초하고 있다. 특히, 전파모드의 위상속도 및 군속도와 주파수의 관계에 따라 두께가 평가될 수 있다.

일정한 두께의 판에서는 협대역 신호의 위상속도에 의해 실험적으로 모드를 선택할 수 있다. 위상속도는 EMAT의 파장과 임피던스 매칭에 의해 선택할 수 있다. 대안적으로 발생주파수의 변환을 이용하면 다른 모드들을 가진시킬 수 있다. 두께 감

육의 정상적인 검출을 위해서는 각각의 조건에서 전파모드의 특징을 관찰해야 한다. 본 연구에서는, 이러한 전파모드의 특징으로 모드 컷오프, 군속도를 이용하여 두께 감육을 평가하게 된다.

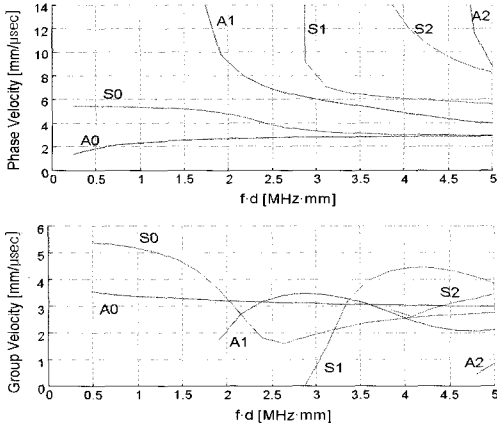


Fig. 3 Dispersion curves for traction-free aluminum plate ($c_L=6.35$ mm/ μ sec, $c_T=3.13$ mm/ μ sec), S=symmetric modes, A=antisymmetric modes.

4. 실험장치 및 시험편

본 연구에서 제안하는 검사시스템은 형상이 같은 한 쌍의 Lamb-EMAT을 사용하는 방법으로 Fig. 4와 Fig. 5은 구성된 시스템의 개략도와 사진이다. 한쌍의 EMAT은 각각 송신자와 수신자이며 둘 사이의 거리는 270 mm로 고정 하였다. 현장에서는 박판의 양쪽 면 을 접근할 수 없고, 한쪽 면에서만 검사가 가능한 경우를 실험에서 고려하였다. 내부 부식과 같은 결함은 보통 판의 내부 면에 위치하게 된다.

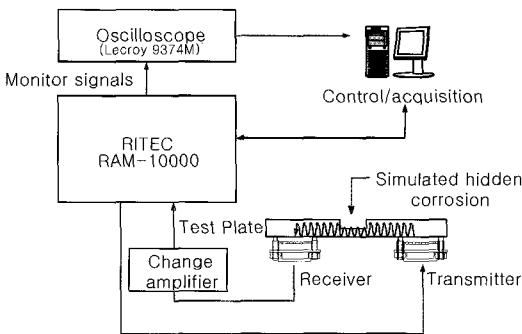


Fig. 4 Experimental setup for EMAT Lamb-wave detection of thinning defects in aluminum plate.

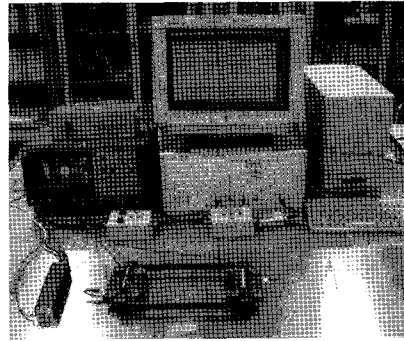


Fig. 5 Scene of Experimental system

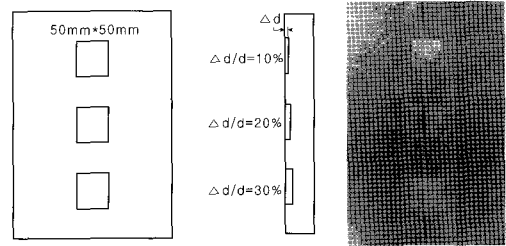


Fig. 6 Dimensions and location of simulated 10%, 20% and 30% hidden corrosion defects in the test aluminum plate.

유도초음파 송·수신을 위해 고출력 초음파 펄서/리시버(Ritec, RAM-1000) 사용되었다. 이 장치는 고출력의 톤버스트 발생기와 수신 증폭기, 고감도 수신장치, 아날로그 적분기로 구성되어 있다. 디지털 오실로스코프를 이용하여 송신자에 가진되는 고출력 전압신호를 모니터링 및 수신신호의 신호처리를 수행하게 된다.

제작된 시험편은 알루미늄 박판으로 두께는 2 mm이며, 크기는 1200 mm × 400 mm이다. 시험편에는 3개의 깊이가 다른 모의 내부 부식 결함이 기계가공으로 제작되었다. 결함의 면적은 50 mm × 50 mm이며 각각 판 두께의 10%, 20%, 30%의 두께 감육비를 갖는다. Fig. 6은 시험편의 치수와 사진을 보여준다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1, 모드 컷오프(cut-off)

모드 컷오프는 톤버스트로 가진된 EMAT으로 발생한 유도초음파가 두께 감육이 존재하는 위치에서

유도초음파의 모드가 소실되거나 감쇠되는 특성을 말한다. 결함의 존재유무에 대한 모드 컷오프의 측정 민감도는 실험에서 분산성이 큰 모드가 선택되면 가장 이상적이다. 본 연구에서는 Fig. 3의 $f \cdot d$ 영역에서 A1 모드 또는 S1 모드가 이상적인 컷오프 모드이다. Fig. 7은 EMAT으로 알루미늄 판의 건전부에서의 S1모드 파형과, 10%, 20%, 30%의 두께 감속 결함에서 수신된 신호를 나타낸다. 가진된 톤버스트의 주파수는 1.4 MHz이며, 두께가 감속된 부분에서는 S1 모드가 소실되어 두께 감속 유무를 판단할 수 있는 근거가 될 수 있다. 그러나 모드 컷오프의 접근방식을 이용하여 두께 감속을 정량화하는 것은 한계가 있다.

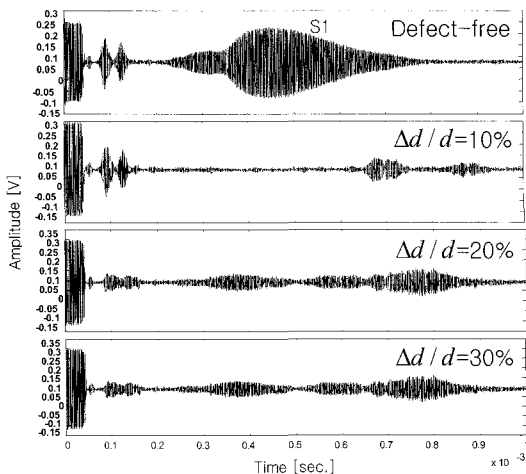


Fig. 7 S1 waveform recorded in the 2mm plate for a defect-free and 10%, 20% and 30% thinning defects.

5.2. 군속도 변화

두께 변화에 민감한 판파의 대표적인 분산특성으로는 전파속도의 변화이다. 판파의 위상속도와 군속도는 모두 변화하지만, 위상속도는 송신용 EMAT의 파장에 따라 선택되며 실험에서는 측정되지 않는다. 반면, 군속도는 쉽게 측정할 수 있다.

발생된 전파모드의 군속도 측정은 본질적으로 위상속도 분산 선도의 기울기를 따라 이동하게 되며, 전파시간과의 관계는 다음의 식(15)와 같다.

$$T_F = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(f)}{df} \tag{15}$$

여기서 T_F 는 전파시간이며 ϕ 는 위상이다. 이때 군속도 $c_g = S/T_F$ 로 구해진다. 여기서 S 는 위상이 0에서부터의 전파거리이다.

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.

$$c_g = \frac{\overline{AB}2\pi}{(d\phi/df)_B - (d\phi/df)_A} \tag{16}$$

다음으로, 두께가 감속된 위치를 탐상하면 파는 감속 영역을 가로질러 전파하면서 단지 군속도만 변화하게 된다. 이러한 원인은 분산영역에서 일정한 음속으로 전파하던 파가 두께가 감속된 부분에서 $f \cdot d$ 의 변화로 군속도가 변하게 되고, 다시 건전부로 빠져나오면서 음속은 초기상태로 변하게 된다. 이러한 거동은 실험결과를 통해 증명될 수 있다. 건전부는 감속 결함의 길이 L_{defect} 의 거리에 해당하는 전파시간만큼 더 늘어나게 된다. 즉 $T_0 = L_{defect}/c_g$ 의 관계가 된다. 결함이 존재하는 영역에서 군속도를 동일하게 측정하기 위해서는, 발생위치와 수신위치의 거리(\overline{IB})가 일정한 상태에서 측정해야 한다. 이렇게 측정된 전파시간으로부터 판의 두께에 대한 감속 결함의 전파시간은 다음과 같다.

$$\Delta T_{defect} = \frac{(d\phi/df)_{B,defect} - (d\phi/df)_B}{2\pi} \tag{17}$$

전파하는 감속 영역만큼 ΔT_{defect} 가 발생하고, 최종적으로 얻어지는 군속도는 다음과 같다.

$$c_{g,defect} = \frac{L}{T_0 + \Delta T_{defect}} \tag{18}$$

이러한 과정은 단지 결함이 없는 영역에서만 다르고, 결함이 있는 영역에서의 모든 군속도 값은 일정한 송신자와 수신자의 거리를 적용하였다.

Fig. 8은 판 두께 2 mm에서 건전부와 두께 감속비가 10%, 20%, 30%에서의 S0의 전파시간을 보여주고 있다. 가진된 톤버스트의 주파수는 1.21 MHz이며, 도착시간을 비교해보면 군속도의 변화가 명

확하게 일어나고 있음을 확인 할 수 있다. 두께 감속비가 증가 할수록 전파시간이 빨라지고 있어, 군속도는 증가하고 있다. 이러한 결과는 Fig. 3의 S0 모드 분산선도에서 $f \cdot d$ 의 변화로부터 예측된 군속도변화와 일치한다. Table 1은 두께 감속비에 따른 군속도와 건전부와의 군속도 감소비를 나타내며, 측정된 군속도로부터 두께 감속비를 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 9는 Table 1의 수치를 분산선도에 기호로 표시한 것이다. 이론적인 군속도와 결합이 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 유도초음파를 적용하여 두께 감속을 평가하는 것이 가능함이 증명되었다. 그러나 실제 현장에서 정량적인 두께 감속을 평가하기 위해서는 검사되는 시험편의 기하학적 형상이나 재질특성에 따라 분산선도가 달라지기 때문에 사전에 이러한 유도초음파 분산성에 대한 이론적인 데이터의 확보가 필요하다.

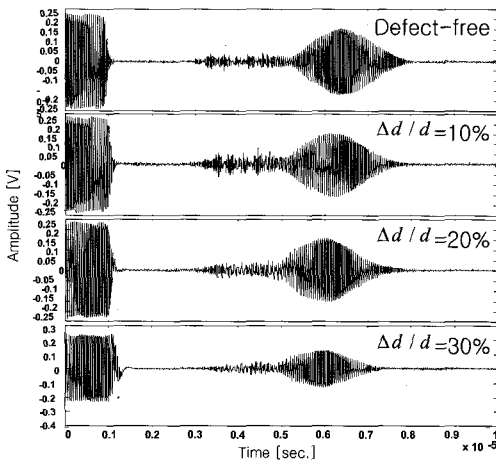


Fig. 8 S0 time histories in the 2mm plate for a defect-free and the 10%, 20% and 30% thinning defects.

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

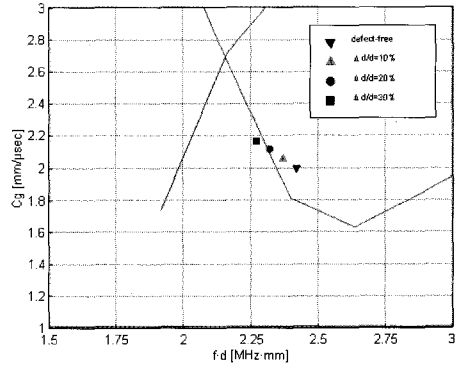


Fig. 9 Group velocity dispersion of S0-mode curves and symbols represent the experimentally determined group velocity values for the 2 mm plate.

6. 결 론

알루미늄 박판에 가공된 모의 내부 부식결함을 검출하기 위해 비접촉식 초음파기법의 접근이 수행되었다. 박판에 유도초음파를, 발생 및 수신하기 위해 한 쌍의 EMAT이 적용되었다. 이때 발생하는 모의 내부 부식결함으로 인한 유도초음파의 분산특성이 두께 감속 평가에 이용되었다. EMAT의 파장으로부터 주파수와 위상속도의 선정으로 효과적인 전파모드를 선택하는 것이 가능하였다.

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

참고문헌

- [1] J. S. Lim and 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, Vol. 41, No. 12, pp. 1399-1408, (1983)
- [3] B. W. Maxfield, A. Kuramoto and K. Hulbert J, "Evaluating EMAT Designs for Selected Applications," Materials Evaluation, Vol. 45, No. 10, pp. 1166-1183, (1987)

- [4] J. L. Rose and L. E. Soley, *Mater. Eval.*, 58:1080, (2000)
- [5] 박익근, 김용권, 조윤호, 안연식, 조용상, "Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도초음파 모드의 거동에 관한 연구," *비파괴검사학회지*, Vol. 24, No. 2, pp. 142-150, (2004)
- [6] W. Zhu, J. L. Rose, J. N. Barshinger and V. S. Agarwala, *Res. Nondestr. Eval.*, 10:205, (1998)
- [7] D. Tuzzeo and F. Lanza di Scalea, "Noncontact Air-Coupled Guided Wave Ultrasonics for Detection of Thinning Defects in Aluminum Plates," *Res Nondestr Eval*, pp. 61-77, (2001)
- [8] B. Y. Ahn, Y. J. Kim, Y. G. Kim and S. S. Lee, "Development of an EMAT System for Detecting Flaws in Pipeline," *Journal of KSNT*, Vol. 24, No. 1, pp. 15-21, (2004)
- [9] R. Murayama, "A Survey of Electromagnetic Acoustic Transducer," *J. JSNDI*, Vol. 52, No. 2, pp. 63-67, (2002)
- [10] M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements," *Kluwer Academic Publisher*, (2003)
- [11] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," *Cambridge University Press*, pp. 111-113, (1999)