

## 초음파를 이용한 배면웨지의 일방향 비파괴 특성평가

정종안<sup>+</sup>, David K. Hsu<sup>++</sup>, 임광희\*

(논문접수일 2011. 06. 28, 수정일 2011. 09. 08, 심사완료일 2011. 10. 18)

### One-Sided Nondestructive Evaluation of Back-Side Wedge By Using Ultrasonic Sound

Jong-An Jeong<sup>+</sup>, David K. Hsu<sup>++</sup>, Kwang-Hee Im\*

#### Abstract

Conventional ultrasonic thickness measurement is to be considered as the assumption that the ultrasonic velocity is known. In actual applications the velocity is often not well known and access is often limited to one side. This paper aims at determining the ultrasonic velocity and thickness of plates with parallel or wedged surfaces using contact measurements made on one surface only. For wedged plates the thickness at one point and the wedge angle are determined. Equations are used for determining the ultrasonic velocity, thickness and wedge angle of the plate based on the times-of-flight measured by two contact transducers coupled to one surface. The time-of-flight of the obliquely reflected longitudinal wave echo was measured as a function of the separation between the two transducers. In addition, a simulation was made for comparing the experimental data and a FEM image. Experiments and simulations were performed on flat and wedged plates of aluminium materials; the calculated results for the unknown quantities are generally agreed with them to some degree.

**Key Words :** Ultrasonic sound(초음파), Back-side wedge(배면 웨지), One-sided NDE(일방향 비파괴평가), Time-of-flight(주행거리), Contact transducer(접촉 탐촉자)

## 1. 서론

초음파를 이용해 시험편의 물성치 파라메타가 되는 각도, 두께 및 속도 측정 등 은 일반적으로 적용하는 비파괴기법이다<sup>(1~3)</sup>.

초음파신호인 펄스를 사용 할 때는 음향 진행 방향으로 진행 하는 초음파 비행거리(time-of-flight)는 그 시험편의 두께 및 속도를 결정하기 위한 요소이다. 이러한 초음파를 이용한 시험편 두께 측정하는 방법은 잘 알려져 있다. 또한 초음파 측정에 있어서 두께를 직접 측정하거나 또는 기계적인 방법으로 측정

할 수 있으며 공진방법(resonance method)이 초음파속도나 두께를 측정할 때 사용을 할 수 있다. 한편 양쪽면(both-sided)이 접근이 가능한 시험편을 상정하여 초음파 속도 및 두께를 동시에 측정 할 수 있는 방법을 개발하였다<sup>(4~5)</sup>. 이러한 방법은 수침조나 스쿼터방법을 이용하여 실험실에 직접 적용이 될 수 있다.

그러나 현장구조물에서는 초음파를 이용해 두께를 측정할 때 보통 일방향(one-sided) 접근만이 가능한 경우가 다수 내재하고 있다. 따라서 일방향(one-sided) 측정방법을 가정하여 초음파 속도 및 구조물 두께를 동시에 측정 할 수 있는 방법을 제안

\* 우석대학교 기계자동차공학과 (khim@woosuk.ac.kr)

주소: 565-701 전북 완주군 삼례읍 후정리 490

+ 송원대학 자동차과

++ 미국 아이오와 주립대학교 CNDE

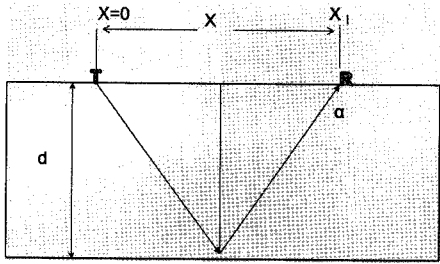


Fig. 1 Configurations in longitudinal wave echo

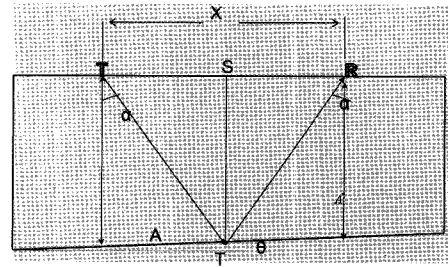


Fig. 2 Wedge angle,  $\theta$

하고자 한다.

본 연구에서는 일방향 접근 측정방법을 가정하여 동시에 초음파속도와 두께를 측정할 때 문제점을 규명한다. 이 방법은 2개의 탐촉자를 같은 시험편 표면에서 연결을 하며 “간격(skip)”이라는 2개의 탐촉자 간격 함수로써 경사면에서 반사되는 종파의 비행거리(time-of-flight)를 측정하는 것이다. 이 방법은 잘 알려져 있다<sup>(6-8)</sup>. 포인트 송신 및 수신이라고 가정하여 초음파 속도와 두께를 측정하기 위한 간지 수식을 유도 할 수 있다. 두께가 다른 판은 부식 및 마모로 인해 평평한 부재가 웨지 모양으로 변해가는 사용중인 공학 구조물에 도처에 존재를 하고 있다. 웨지 모양인 판을 실험 대상으로 상정하였다. 웨지판을 이용하여 한쪽 면에서 측정을 하였고 한 포인트에서 초음파속도, 두께 및 웨지각을 동시에 결정을 하였다. 수식은 비행거리(time-of-flight)와 간격(skip)을 파라메타로 하여 초음파속도, 두께 및 웨지각을 유도 하였다. 사용되는 비행거리(time-of-flight)는 경사반사인 피치캐치 비행거리(time-of-flight)와 수직 탐상인 펄스에코우 측정 시 탐촉자를 사용 할 때 투과하는 시간이다.

본 실험에서 얻은 데이터를 이용하여 초음파속도, 판 두께 및 웨지각을 동시에 측정 할 수 있는 알고리즘 개발과 더불어 시뮬레이션으로 검증을 하고자 한다. 여기에서 알고리즘 개발 시 근사화 및 간소화를 적용하였다. 재료는 등방성재료로 가정 하였으며 웨지각이 너무 크게 되면 노이즈(noise)에 혼합되기 때문에 너무 크게 하지 않았다. 이 방법은 정확도를 검증하기 위하여 FEM 패키지를 이용하여 비교 하여 나타냈다.

## 2. 이론

### 2.1 평판의 초음파 속도 및 두께 측정

Fig.1에 나타낸 바와 같이 간격(skip), x 사이를 T (transmitting transducer)와 R (receiving transducer)의 2개의 송·수신 탐촉자를 가정한다. 송신 탐촉자가 x=0일 때 비행거리 (time-of-flight)와 간격(skip)은 각각  $x_i$  및  $t_i$ 이다.  $x_j$ 에서 수신 탐촉자, R를 이동시킴으로써 비행거리(time-of-flight),  $t_j$ 를 구할 수 있다. Fig.1로 부터 다음 식을 구할 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$v = \sqrt{\frac{x_i^2 - x_j^2}{t_i^2 - t_j^2}} \quad (1)$$

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x_i^2 t_j^2 - x_j^2 t_i^2}{t_i^2 - t_j^2}} \quad (2)$$

여기에서 v는 초음파 속도이며, d는 시험편 두께이다.

### 2.2 웨지의 초음파 속도 및 두께 측정

본 내용에서는 비행거리(time-of-flight)와 간격(skip) 함수로써 초음파속도, 판두께 및 웨지각의 이론적인 수식을 활용 하였다<sup>(6)</sup>. 유도과정방법은 웨지각이 아주 작을때이며 가정하여 근사화 하였다. 수직입사예코에 대해서는 임의의 음향방향으로 가정하였다.

해를 구하기위해서 컴퓨터 수렴과정을 통해 구하였으며 3가지의 미지수 함수는 경사 비행거리 반사로 표현 하였다. 형상 관계함수를 사용하여 측정 데이터와 미지수인 웨지각을 포함 하는 수식을 간소화 하였다. 측정된 및 계산된 비행거리사이의 잘 일치하는 해를 찾기 위해 고려하였다.

Fig. 2는 작은 웨지각,  $\theta$  와 두께, d를 갖는 웨지판에 송신 탐촉자, T와 수신 탐촉자, R에 대해서 나타냈다. 작은각에 대해서는 음향방향에 대체적으로 대칭이다. Fig. 2의 TS 길이는 간격의 절반거리이다. 그리고 ST는 대략  $d - (x/2)\tan\theta$ 이며 T에서 송신하는 비행거리,  $t_1$  및 T에서 수신하는 비행거리,  $t_2$ 라 하고 또한 R에서 수신하는 비행거리,  $t_3$ 라 할 때 다음과 같이 수식을 표현 하면 다음 같이 수식을 유도 할 수 있다.

$$\sqrt{(2d - X\tan\theta)^2 + x^2} = vt_1 \quad (3)$$

상식 (3)의 d 와  $\theta$ 를 제거함으로써 초음파속도를 유도 할 수 있다.

$$v = \frac{X}{T_{time}} \quad (4)$$

$$T_{time} = \sqrt{t_1^2 - \frac{1}{4}(t_2 + t_3)^2}$$

따라서 웨지각이 작을 때는 식 (3) 및 (4)을 활용하면 구할 수 있다. 만약에 탐촉자가 아주 작을때는 수직입사하는 펄스에 코우 신호는 판의 배면과 수직하는 음향 진행방향이 일치하는 것을 가정하였다.

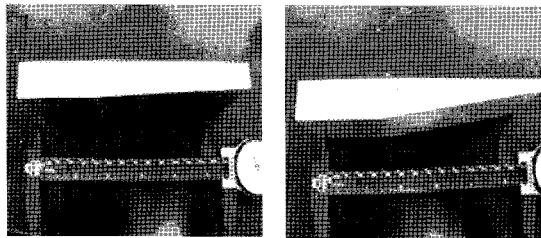
### 3. 실험

#### 3.1 시험편

2개의 웨지각 (Fig. 3 참조)을 가지고 있는 시험편을 사용하였다. 이 시험편의 초음파속도는 임의의점 x=0인 곳에서 측정하였으며 웨지각은 Table 1 에 나타났다. 초음파 속도는 펄스에코우 방법으로 측정하였다. 이때 시험편의 두께 20mm이며 웨지각은 0°, 3°, 8° 이다.

#### 3.2 실험장치

Fig. 4에 실험장치를 나타냈다. 실험 방법은 직접 접촉식인



(a) 3-degree (b) 8-degree

Fig. 3 Wedged samples

Table 1. Parameters of wedged plate samples

Materials	UT velocity (m/s)	Thickness at x = 0(mm)	Wedge angles
Aluminium	6,420	19.6	0°, 3°, 8°

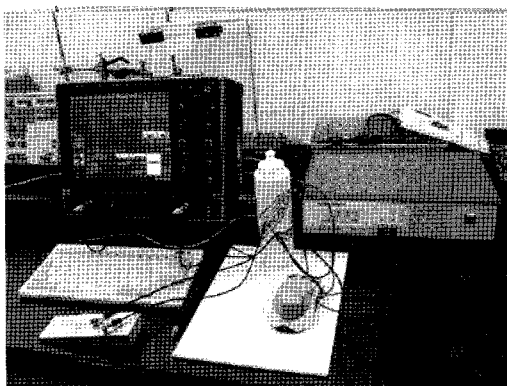


Fig. 4 Ultrasonic setup system

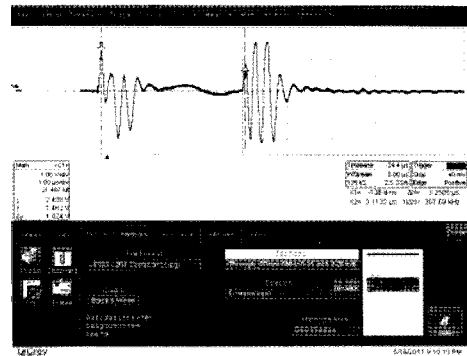


Fig. 5 Typically ultrasonic signal

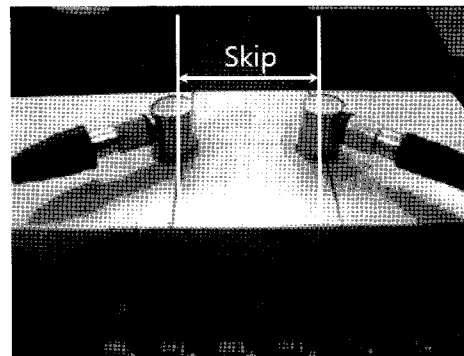


Fig. 6 Typically skip separation

평면형 트랜스듀서를 이용하였으며, AIQS사의 APR-S300T PR인 스파이크 전압펄서/리시버를 이용하여 초음파를 발생시켰다. 시험편에 의한 RF파형을 Oscilloscope(Wave Surfer (42Xs-A)에서 획득하고 컴퓨터에서 저장하였다. 오실로스코프에서 2개의 에코우파는 독립적으로 이동이 가능하며 스크린 상에서 에코우파를 저장 및 비교하여 측정하는데 매우 편리하다. 이때 초음파속도를 구하기 위하여 Fig. 5는 시험편에 펄스에코우를 이용하여 초음파 속도를 측정한 전형적인 예이다. 유사한 파형을 갖은 기존 시험편의 주행시간(time-of-flight signal) 신호를 측정하여 시스템 상에 저장한 것이다.

사용된 초음파 탐촉자는 5MHz, 6.35mm인 지름을 갖는다. 시험편에 경사진 곳에 위치에서 일정한 클램프 압력을 가하여 비행거리를 측정하였다. 또한 Fig. 6은 2개의 탐촉자의 간격(skip)을 나타냈다. 간격은 가능한 클수록 바람직하지만 수신 및 감쇄가 크게 발생 함으로 탐촉자가 수신가능한 범위를 찾았다. 그리고 초음파신호 측정 시에 노이즈 등이 많이 포함하고 있으므로 100번 평균하여 획득하여 평가하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 웨지 시험편의 측정된 초음파 신호이다. Fig. 7에서 상에서 하까지 웨지각이 0°, 3°, 8° 까지 의 일련의 데이터이다.

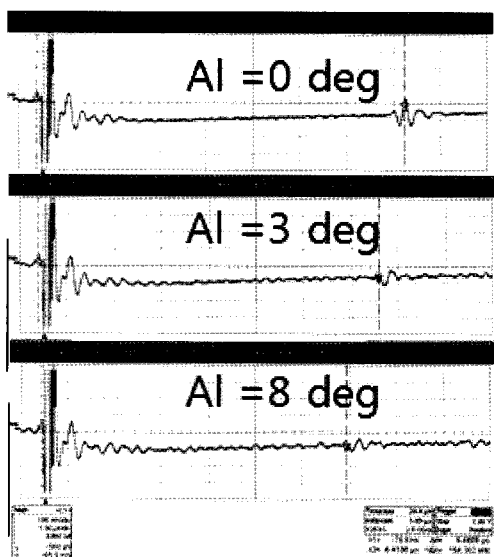


Fig. 7 Typical UT echoes taken from wedged plates

이 신호들은 경사 에코우,  $t_1$ , 송신 탐촉자의 펄스에코우,  $t_2$ , 수신 탐촉자의 펄스에코우,  $t_3$ , 의 알루미늄의 판을 나타냈으며 웨지각은 위의 3가지이며 간격(skip)은 30mm이다. 초음파 펄스는 주파수 대역으로 인해 유한하기 때문에 유한한 시간영역의 한계가 있다. 한 포인트에서 비행거리를 측정하는데 한계가 존재한다. 처음에 “main bang”이라는 트리거링 점에서 영이 되기 때문에 펄스위치에서 비행거리를 측정하는 것은 바람직하다. 그러나 펄스위치는 노이즈에 민감하고 의존하는 게인(gain)이다. 중앙 피크 위치를 비행거리를 측정 할 때 선정한다. 오실로스코프 커서를 이용할 때 비행거리는 직접 측정을 한다.

4.1 평판

Fig.1에 나타낸 바와 같이 미지수인 두께 와 초음파 속도를 측정하기 위해서는 2개의 비행거리( $t_1, t_2$ )가 필요하다. 식 (1)과 (2)에 주어졌다. 그러나 탐촉자의 유한 크기는 이상적인 포인트 소스로 가정하여 실질적으로는 편차가 발생하면 또한 결과정확성이 다소 떨어진다. 측정은 20mm 두께인 알루미늄 판을 실험 · 측정하였다. 초음파 탐촉자는 5MHz, 6.35mm 지름인 경우를 이용하였다. 초음파의 간격(Skip)은 30mm로 하였다. 너무 가까운 거리는 초음파 속도와 두께가 과도 평가가 되어 3

Table 2. 0°-wedged plate

	Aluminium
Skip(mm)	30
$v=6,420\text{m/s(Al)}$	6,650
$d=20.0\text{mm}$	20.7

0~40% 오차를 가져왔다. 될 수 있는 원거리가 정확도 더 높게 나타났다. 하지만 S/N비가 고려 되어져야 한다. 알루미늄과 스틸의 초음파속도와 두께를 비교를 하면 3%의 오차를 가져오고 있음을 확인 할 수 있었다.

4.2 웨지

비행거리  $t_1, t_2$  및  $t_3$ 는 2개의 시험편에서 측정하였으며 초음파 속도, 두께 및 웨지각도를 계산하였다. 이론방법은 웨지각이 작다고 가정하여 근사해를 적용하였다. 웨지각이 8° 근방까지까지는 제안한 방법인 초음파 속도, 두께 및 웨지각을 동시 측정이 유효 하여  $d$ 와  $\theta$ 를 구하였다. 이것은 수치해석으로 다항식 방법으로 구하였다. Tables 3, 4는 제안한 방법을 이용하여 3°, 8° 웨지각을 갖는 경우의 데이터를 나타냈다. 결과를 보면 2가지 다 유사한 결과를 준다. 웨지각이 작은 경우가 좀 더 정확성을 준다. 알루미늄을 사용한 Table 3와 4를 보면 3도에서 대략 0.3%~5%차이를 나타내고 있으며 8도에서는 다소 큰 1.6%~6.5% 차이를 나타내고 있다. 웨지각이 다소 커 짐에 따

Table 3. 3°-wedged aluminium plate

	Method
Skip(mm)	30
$v=6,420\text{m/s}$	6,650
$d=19.6\text{mm}$	19.1
$\theta=3$	3.11

Table 4. 8°-wedged aluminium plate

	Method I
Skip(mm)	30
$v=6,420\text{m/s}$	6,670
$d=18.4\text{mm}$	19.3
$\theta=8$	8.40



(a) 0° wedged plate



(b) 3° wedged plate



(c) 8° wedged plate

Fig. 8 FEM simulation

라서 차이가 조금 증가함을 알 수 있었다. 이는 지름이 6.35mm 인 피스톤 소스를 가지고 있는 초음파탐촉자와 웨지각의 크기에 영향이 미치므로 초음파 탐촉자 크기와 웨지각의 한계의 영향이라고 사료된다.

### 4.3 시뮬레이션

초음파 전파는 FEM(Finite Element Method)를 이용하면 시뮬레이션을 할 수 있다. 본 FEM패키지를 이용하여 등방성 재료 가정하여 알루미늄의 웨지각을 구현하여 초음파 탐촉자를 5MHz, 6.35mm(지름)를 이용하여 일방향에서 피치캐치 방법으로 모델링을 하였다. 알루미늄의 영계수는  $7 \times 10^{10} pa$ 이며, 포와송비는 0.33 이며, 밀도는  $2,700kg/m^3$ 이며, 종파속도는 64,200m/s, 파장길이는 1.28m이다. 입사초음파는 등방성재료에 투과하는 것을  $(1 - \cos(2\pi ft/3))\cos(2\pi ft)$  ( $t \leq 3.0/f$ )로 가정하여 구현 하였다. 모델형상은 임의의 크기를 갖는 종파 전파를 이용하였다. 메시는  $\frac{\lambda}{10}$  ( $\lambda$ :파장) 기준으로 설정하였다.

FEM 모델링과 사각형 메시를 생성하기 위해  $\frac{\lambda}{10}$ 로 하여 노이즈 수준을 낮추었다. 그리고 Fig. 8은 0°, 3°, 8° 웨지에 따른 FEM 시뮬레이션을 각각 나타냈다. 각 Fig.의 (a), (b) 및 (c)는 초음파가 발생한 후 4.8 $\mu s$  및 6.1 $\mu s$  후의 시뮬레이션을 나타냈다. 또한 웨지각이 증가함에 따라 시험편 상면(화살표방향)에 더 일찍 도달함을 알 수 있어 실험과 유사함 경향이 있음을 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

평판 및 웨지각을 가지고 있는 시험편을 일방향에서 초음파 속도, 두께 및 웨지각을 동시에 측정 할 수 있는 방법을 적용 및 활용였다. 근사해 방법을 이용하여 미지수인 비행거리, 두께 등을 유추 할 수 있었으며 또한 시뮬레이션을 통하여 웨지각이 증가함에 따라 같은 비행거리에서 비교해 보면 실험과 마찬가지로 짧아 짐을 알 수 있었다. 실험은 알루미늄을 이용하여 가공하여 0°, 3°, 8° 웨지시험편을 가공하여 시험· 측정하였다. 예러는 3°에서는 5% 이하이며 8°에서는 6.5%이내 정도 발생하였다. 이는 초음파 탐촉자 크기 및 웨지각에 대한 영향이라고 사료된다. 추후 현장 비파괴 평가에 크게 활용성이 매우 판단된다.

## 후 기

This work was supported by Woosuk University(2011).

## 참 고 문 헌

- (1) Goebble, K., 1980, "Structure Analysis by Scattered Ultrasonic Radiation," *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Vol. 4, CH.4, pp. 30~38.
- (2) Hsu, D. K., Thompson, D. O., and Thompson, R. B., 1986, "Evaluation of Porosity in Aluminum Alloy Castings by Single-sided Access Ultrasonic Backscattering," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 5B, pp. 1633~1642.
- (3) Im, K. H., Zhang, G. L., Choi, S. R., Ye, C. H. Ye, Ryu, J. S., Lim, S. H., Han, M. G., and Hsu, D. K., 2011, "One-sided Nondestructive Evaluation of CFRP Composites by using Ultrasonic Sound," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol 20, No. 1, pp. 47~52.
- (4) Im K. H., Hsu D. K., Sim J. G., Yang I. Y., and Song S. J., 2003, "On Fiber Orientation Characterization of CFRP Laminate Layups Using Ultrasonic Azimuthal Scanners," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 6, pp. 566~576.
- (5) Gruber, J. J., Smith, J. M., and Brockelman, R. H., 1988, "Ultrasonic Velocity C-scans for Ceramic and Composite Material Characterization," *Mater Eval*, Vol. 46, No.1, pp. 90~96.
- (6) Hsu, D. K., Allan Ayres, M., Guangda, M., and Guangwen, M., 1994, "Simultaneous Determination of Ultrasonic Velocity, Plate Thickness and Wedge Angle Using One-sided Contact Measurements," *NDT & E International*, Vol.27, No. 2, pp. 75~82.
- (7) Hsu, D. K., and Margetan, F. J., 1992, "Analysis of Acousto-ultrasonic Signals in Unidirectional Thick Composites using the Slowness Surfaces," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 4, pp. 1050~1061.
- (8) Barnard, B. J., Peters, J. J., and Hsu, D. K., 2005, "Towards a Generic Manual Scanner for Nondestructive Inspection," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 24B, pp. 1669~1676.