[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 21, No. 6 (2001. 12)

Ti-6Al-4V 합금의 내부 미소결함에 따른 초음파 신호 특성 연구

The Characteristics of Ultrasonic Signals for Detecting Micro-Defects in Ti-6Al-4V Alloy

최상우*, 이준현**, M. Kubota***, Y. Murakami***
Sang-Woo Choi*, Joon-Hyun Lee**, M. Kubota*** and Y. Murakami***

초 록 Ti합금은 고온환경에서 고강도가 요구되는 항공기의 엔진 부품등의 소재로 적용되고 있다. Ti합금은 이와 같이 기계적 성능이 우수함에도 불구하고 α상과 β상의 조성에 의한 두 상의 미세 구조에 의한 초음파 산란으로 초음파를 이용한 비파괴 평가에서 피로균열 검출이 어려운 단점이 있다. 합금내의 결정립에서 산란되는 초음파 신호에 의하여 결함이 존재하지 않는 경우에도 산란 신호가 검출되는 결정립 산란 잡음 신호가 존재하며, 이들 결정립 산란 잡음 신호는 합금내부에 존재하는 기공 및 불순물 등의 결함 검출을 어렵게 하는 요인이다. 본 연구에서는 Ti합금의 효율적인 초음파를 이용한 비파괴 평가의 적용을 위하여 Ti합금 시험편에 대하여 초음파 전파속도 측정 및 미세 드릴 가공에 의한 인공 결함의 검출능 평가 등을 수행하였다.

주요용어: 초음파, Ti합금, 감쇠계수, 초음파 전파속도

Abstract Ti alloy is used for essential parts of aircraft for high temperature environment. Although Ti alloy has excellent performance in regard to mechanical properties, it is difficult to find fatigue cracks by nondestructive ultrasonic inspection due to its two-phase microstructure, which consists of hard alpha and beta phases. Sound energy reflected from microstructural features in the component produces a background inspection noise which is seen even when no defects are present. This noise can inhibit the detection of critical internal defects such as pores cracks or inclusions. To obtain fundamental data on ultrasonic inspection of Ti alloy, ultrasonic testing was performed using a specimen with small drill holes and ultrasonic wave propagation velocities were measured.

Keywords: ultrasonic wave, Ti-Alloy, attenuation coefficient, ultrasonic wave velocity

1. 서 론

피로하중의 영향하에 있는 항공기의 경우 운항중의 피로하중에 의한 균열발생이 예상되고 있으며 따라서 항공기에 대한 안전성 확보 목적의 유지보수를 위하여 초음파를 이용한 평가 등을 통한 비파괴 평가가 적용되고 있다[1]. 한편 Ti합금은 항공기 엔진의 구조용 재료로 적용되고 있어 내열 및 내식성이 요구되고 있으며 특히 내피로 특성이 요구된다. 일반적으로 Ti합금은 두 상(two-phase)의 재료이며 초음파를 이용한 평가에 있어서 결정립(grain)에 의한 영향으로 미소결함(micro-crack)검출이 어려운 재료로 알려져 있다. 즉, 재료를 구성하는 결정립중 거대 결정립의 계면에서 산란된 신호가 잡음(noise)신호로 측정되어 미소결함신호를 검출하지 못하게

(접수: 2001. 10. 30) * 부산대학교 대학원(Graduate School, Pusan National University, Pusan 609-735), ** 부산대학교 기계공학부, *** Kyushu University, Japan

하며 이러한 잡음 신호는 일반적으로 잡음신호를 제거하기 위하여 적용되는 주파수 대역 필터 또는 불규칙적으로 발생하는 전기적 잡음 등을 제거하기 위한 동기가산법 등으로 제거할 수 없는 잡음이다[2].

본 연구에서는 Ti합금에서의 미소결함 검출을 위한 초음파 신호 특성에 관하여 연구하였다. 압연된 Ti합금의 이방성을 조사하기 위하여 각 방향에서 초음파 전파 속도를 측정하였으며, 미소결함의 검출능에 대한 평가를 위하여 Ti합금 표면에 인공결함으로 미소직경의 드릴홀을 가공하고 초음파 표면파 탐촉자를 이용하여 다양한 깊이와 직경의 인공결함을 검출하고자 하였다. 또한, Ti합금의 재질특성을 평가하기 위하여 초음파 감쇠계수(attenuation coeff-icient)를 측정하였고, 결정립에 의한 잡음신호의 강도를 측정하고자 하였다.

2. 실험방법 및 내용

2.1. 시험편

본 연구에서 적용된 재료는 6%wt의 알루미늄과 4%wt의 Vanadium의 조성을 가지는 압연된 Ti-6Al-4V합금이다. 폭이 36mm이고 너비가 26mm 그리고 길이가 110mm인 두 개의 시험편과 폭과 너비가 각각 23mm이고 길이가 100mm인 한 개의 시험편, 모두 3개의 시험편에 대하여 이방성 특성을 나타내는 초음파 전파 속도 측정이 수행되었으며 한 개의 시험편에 대하여 미세드릴로 가공된 미소결함 검출을 위하여 표면파를 이용한 표면 결함 평가가 수행되었다.

2.2. 초음파 전파속도 측정

시험편의 3방향에 대한 전파속도를 측정하기 위하여 3면에서의 초음파 전파속도를 펄스에코법으로 종파와 횡파에 대하여 측정하였다. 5MHz의 종파 탐촉자 그리고 5MHz의 횡파 탐촉자를 접촉식으로 사용하였으며, 펄서리시버를 통하여 초음파를 발생시킨 뒤, 저면에서 반사된 반사파를 수신한 후 이들 초음파 파형을 디지털 오실로스코프에서 시험편 내부를 1회 왕복하여 수신된 반사파와 2회 왕복하여 수신된 반사파 사이의 시간차이, t를 구하여 초음파 전파속도를 계산하였다. 즉, 식 (1)과 같이 시험편의 두께, d를 알고 있고 이 두께를 왕복 전파하는데 소요되는 시간, t를 수신된 초음파 파형으로부터 측정하여 초음파 전파속도를 계산하였다.

$$v=\frac{2d}{t} \quad \cdots\cdots (1)$$

2.3. 감쇠계수 측정

감쇠를 가지는 재료에서 초음파의 진폭은 다음 식(2)와 같이 지수함수를 이용하여 정의될 수 있다.

$$I=I_o e^{-\alpha x} \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 I_o는 초기 진폭크기이고 α는 감쇠계수(attenuation coefficient)이다. 감쇠계수, α는 수침법의 측정방법에서 A가 시험편 내부로 입사되기전 표면에서 반사된 반사파의 진폭, B는 시험편 내부로 입사되어 시험편 내부를 1회 왕복한 반사파의 진폭, C는 시험편 내부를 2회 왕복한 반사파의 진폭일 때, 다음 식과 같이 구해진다. 즉, D와 E를 다음 식 (3)과 (4)와 같이 정의 할 때, R은 식 (5)와 같이 정의한다.

$$D=\frac{A}{B} \quad \cdots\cdots (3)$$

$$E=\frac{C}{B} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$R=\frac{DE}{(1+DE)} \quad \cdots\cdots (5)$$

이로부터 시험편의 두께가 d일 때, 감쇠계수는 다음 식 (6)으로부터 계산되어진다.

$$\alpha=\frac{1}{2d}\ln\frac{R}{E} \quad \cdots\cdots (6)$$

2.4. 결정립 산란 잡음신호

Ti합금 재료 내부의 거대 결정립에서 산란되는 잡음신호의 강도는 다음의 식 (7)에 의하여 M개의 측정지점에 대한 RMS(Root Mean Square)값으로 측정된다. 여기서 $V_j(t)$는 결정립 산란 잡음(grain noise) 신호를 포함하는 초음파 신호이며, $b(t)$는 결정립 산란 잡음이 제거된 초음파 신호이다.

$$n_{rms}(t)=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}(V_j(t)-b(t))^2} \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서 결정립 산란 잡음은 시불변(time invariant) 잡음이므로, 결정립 산란 잡음이 제거된 신호는 다음 식 (8)과 같이 M개의 측정지점에 대한 측정지점 변화에 따른 산술평균값으로 구해진다.

$$b(t)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}V_j(t) \quad \cdots\cdots (8)$$

2.5. 표면결함검출

Fig. 1은 Ti합금 시험편 표면에 가공된 인공결함을 나타내는 그림이다. 시험편의 한 면에 0.3mm 부터 1.2mm까지의 직경을 가지는 드릴홀을 인공결함으로 가공하였으며, 또 다른 면에 직경 0.5mm의 드릴홀을 0.5mm 부터 2.5mm까지의 깊이를 가지는 인공결함을 가공하였다. 이들 인공결함을 검출하기 위하여 5MHz의 표면파 탐촉자를 이용하였다.

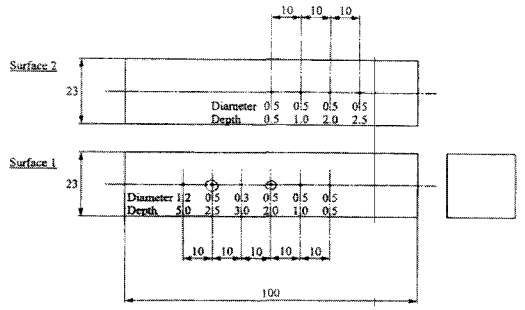

Fig. 1 Dimension of specimen and drill hole on specimen

Fig. 2와 같이 표면파 탐촉자에서 발생된 초음파 펄스 즉, 표면파는 시험편의 표면을 따라 전파되고, 이 표면파는 인공결함인 드릴홀에서 일부 반사되어 펄스에코법으로 탐촉자에 다시 수신된다. 또는 드릴홀을 지난 표면파는 전파를 계속하여 오른쪽 모서리 즉, 표면파가 전파되는 방향의 전방의 모서리면에서 반사되어 다시 표면파 탐촉자에서 수신된다. 이러한 표면파를 이용한 초음파 기법은 체적파(Bulk wave)를 이용한 기법에 비하여 감쇠가 적고 표면(surface) 또는 표면직하(subsurface)에 존재하는 결함에 대한 검출능이 높은 방법으로 적용되고 있다[3-5]. 즉 기존의 체적파를 이용하는 방법에서는 표면에서 반사된 초음파 파형과 표면직하의 결함에서 반사된 초음파 파형이 중첩되어 결함신호를 구분해내지 못하는 단점이 발생할 수 있으나 표면파를 이용하는 경우 결함이 존재하는 동일 표면에서 초음파를 전파시키므로 표면에서 반사 또는 산란되는 초음파의 간섭 없이 결함에서 반사되는 초음파 파형을 측정할 수 있다.

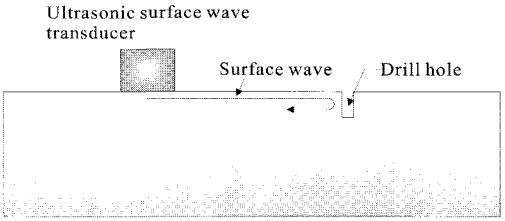

Fig. 2 Wave propagation path of ultrasonic surface wave to detect flaw on surface by pulse/echo method

3. 실험결과 및 검토

3.1. 초음파 전파속도에 따른 방향성

본 연구에서 사용된 Ti합금은 압연된 재료이며, Fig. 3에서 본 연구에서 사용된 Ti합금의 조직 사진을 나타내고 있다. 본 연구에서 사용된 Ti합금은 α상과 $\alpha+\beta$상으로 이루어져 있다. Y면에서 결정립이 Z축방향으로 길게 늘어난 형태를 보이고 있으므로 롤링(Rolling)방향은 Z축임을 알 수 있다. Z면에서의 결정립은 Y방향으로 길게 늘어난 경향을 보이고 있으며, X면에서 결정립은 나머지 두 면에서의 결정립에 비하여 어느 방향으로도 길게 늘어나지 않고 원형의 형상을 나타내고 있어 압연시 X방향으로 하중이 가해졌음을 알 수 있다.

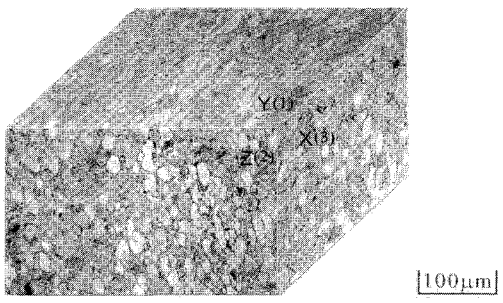

Fig. 3 Micro-structure of Ti alloy used in the experiment

다음은 세 개의 Ti합금 시험편에 대한 초음파 전파 속도를 측정한 결과이며, Table 1은 종파의 전파 속도를 측정한 결과이고 Table 2는 횡파의 전파 속도를 측정한 결과로 3개의 시험편에 대하여 3방향에서 측정한 값들이다.

Table 1의 종파 전파속도 결과에서 제1방향(Direction 1)의 측정결과는 평균 6,257m/s이고, 제2방향(Direction 2)에서 평균 6,234m/s 그리고 제3방향(Direction 3)에서 평균 6,126m/s로 제 1방향에서의 종파의 전파가 가장 빠르고 제 3방향에서 가장 느린 것으로 나타났다. 제 1방향과 제 2방향에서의 전파속도 차이는 평균 23m/s이나 제 3방향과는 최대 평균 131m/s의 차이를 나타내어 제 3방향은 나머지 두 방향과 큰 차이를 나타내었다. 이들 방향에 따른 초음파 전파 속도의 차이는 Ti합금의 이방성에서 기인된 것으로 압연 가공시 Ti합금내의 결정립의 변형 등이 원인으로 판단된다.

Table 1 Longitudinal wave velocities

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Direction 1	6,256 m/s	6,331 m/s	6,285 m/s
Direction 2	6,247 m/s	6,183 m/s	6,272 m/s
Direction 3	6,126 m/s	6,115 m/s	6,137 m/s

Table 2의 횡파 전파 속도 결과에서 제 1방향(Direction 1)에서의 횡파 전파 속도는 평균 3,254m/s이고 제 2방향(Direction 2)에서의 횡파 전파 속도는 평균 3,267m/s 그리고 제 3방향(Direction 3)에서의 횡파 전파 속도는 평균 3,097m/s이다. 앞의 종파의 전파속도 결과와 비교해볼 때, 제 3방향에서의 전파속도가 가장 느리고 제 1방향과 제 2방향의 평균속도차이가 적다는 공통점이 있었다.

Table 2 Shear wave velocities

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3
Direction 1	3,273 m/s	3,266 m/s	3,223 m/s
Direction 2	3,269 m/s	3,247 m/s	3,293 m/s
Direction 3	3,089 m/s	3,116 m/s	3,087 m/s

앞의 Fig. 3의 Ti합금의 조직사진과 비교해볼 때 제 2방향(Direction 2)이 압연방향으로 Z축의 방향이고, 제 1방향(Direction 1)은 Y축의 방향 그리고 제 3방향(Direction 3)은 X축의 방향이다. 제 3방향 즉, X축 방향으로 초음파 전파가 느린 것은 동일한 전파 거리에서 X축 방향에서 더 많은 결정립계면을 통과하기 때문으로 사료된다. 즉, 결정립계면에서 산란과 굴절에 의하여 전파시간이 증가하였을 것으로 판단된다.

3.2. 감쇠측정

Ti합금의 방향성을 측정하기 위한 또다른 방법으로 Ti합금의 방향에 따른 감쇠계수를 측정하였다. 즉, direction 1과 direction 2의 방향에서 수침법을 적용하여 앞의 식 (3)-(6)과 같이 시험편 표면에서 반사된 A와 저면에서 반사된 B, 그리고 C의 진폭크기를 측정하여 두 방향으로의 초음파 전파에서 감쇠계수를 측정하였다. 감쇠계수를 측정하기 위하여 10MHz의 초점거리 1.5inch의 수침용 탐촉자가 사용되었다.

Table 3과 같이 두께가 26mm인 direction 1에서의 감쇠계수는 평균 0.01820Np/mm 이었고, 두께가 36mm인 direction 2에서의 감쇠계수는 평균 0.00802Np/mm 이었다. 본 결과에서는 direction 1의 방향으로의 전파에서 감쇠가 심한 결과를 나타내고 있다. 즉, 앞의 Fig. 3의 Ti합금의 미세 구조와 같이 direction 1방향으로의 전파에서는 많은 결정 경계면(grain boundary)를 통과하여야 하므로, 결정경계면에서의 산란으로 감쇠가 높게 나타나고 있다.

Table 3 Attenuation coefficient

	Attenuation coefficient (α)
Direction 1	0.01820 Np/mm
Direction 2	0.00802 Np/mm

3.3. 결정립 산란 잡음 신호 측정

앞의 결과에서 보여주는 감쇠는 초음파 전파시에 발생하는 결정립에서의 산란에 의한 것이며 이는 단순히 초음파 감쇠현상만을 발생시킬 뿐만 아니라 Ti합금 구조물 내부의 미소결함 검출시 결정립 산란잡음을 발생시켜 미소결함검출을 어렵게 하는 요인이다. 본 연구에서는 결정립 산란잡음에 대한 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 방법으로 결정립 산란 잡음 신호를 측정하였다.

Ti합금의 결정립에서 산란되어 일반적인 잡음제거 기법으로 제거되지 않는 시불변의 잡음 신호를 측정하기 위하여 10MHz의 수침용 탐촉자를 이용하여 0.001inch 마다 40개의 파형을 수신하고 이를 평균화(positional

average)하여 결정립 산란 잡음 신호가 배제된 파형을 얻게되었다. 그리고 각 위치에서 동기가산(time-average)을 수행하여 Fig. 4과 같이 일반적인 전기적 잡음을 제거하였다. 시간축에 37㎲에서 시험편 표면에서 반사된 신호가 수신되었고 45㎲에서 저면에서 반사된 신호가 수신되었다.

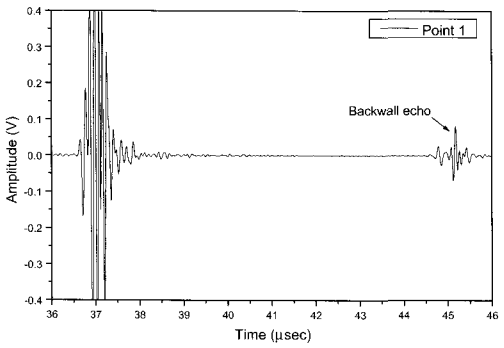

Fig. 4 Time-averaged waveform at arbitrary point

위의 한 지점에서 동기가산(time-average)을 수행하여 일반적인 잡음신호를 제거시킨 파형 40개를 평균화(positional average) 하여 Fig. 5의 결정립 산란 잡음 신호를 제거시킨 파형을 얻게되었다. 일반적으로 거대 결정립을 가지는 재료에 대하여 한 지점에서 평균화(time-average)하는 경우 결정립에서 산란된 잡음 신호가 미소결함 신호의 진폭크기 만큼의 진폭을 가지므로 이러한 재료에서의 미소결함 검출을 곤란하게 한다. 그러나 본 결과에서 그 영향은 다소 미소하게 나타났다.

앞의 Fig. 5에서는 결정립 산란 잡음 신호의 영향이 미소하게 나타났으므로 이를 효과적으로 보이기 위하여 다음의 Fig. 6에서는 앞의 식 (7)에 의하여 잡음 신호만을

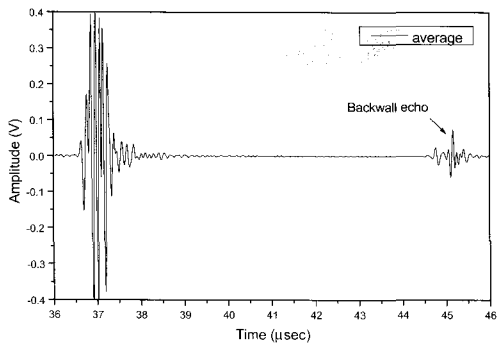

Fig. 5 Positional averaged waveform

분리하여 RMS값으로 나타내었다. 본 결과에서 시간축의 36~39㎲ 구간에서 결정립 산란 잡음 신호가 측정되었으며 특히 표면으로부터 멀지 않은 36~37㎲ 구간에서 높은 진폭을 나타내었다. 이는 점 집속형의 트랜스듀서의 초점을 시험편 내부에서 집속이 되도록 하였으므로 시험편 내부에서 상대적으로 높은 강도의 잡음 신호가 측정되었음을 보여준다. 그리고 이 구간 이후의 영역에서는 초음파의 재료내부에서의 산란과 빔 퍼짐에 의하여 그 신호의 강도가 약화되었다.

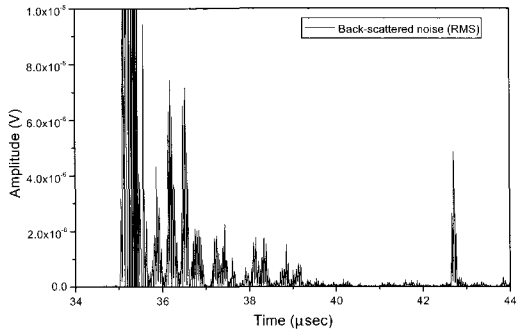

Fig. 6 Back-scattered noise signal

3.4. 결함크기에 따른 초음파 신호 특성

본 연구에서 검출하고자하는 시험편 표면에 존재하는 미소결함은 깊이와 폭이 작아서 일반적인 체적파(Bulk wave)를 적용하는 수침법에서의 10MHz 집속형 트랜스듀서를 이용한 기법으로는 다음 Table 4와 같이 그 검출이 용이하지 못하였다. 특히 surface2에서 즉, direction 2 방향에서의 Ti합금의 감쇠 특성으로 미소인공결함이 체적파를 이용해서 검출되지 못함을 보여주고 있다. 그러나, 표면파는 재료 표면을 따라서 많은 에너지를 전파시키는 초음파로 표면 및 표면 직하에 존재하는 결함에 대하여 민감한 검출 결과를 나타낸다.

Table 4 Detecting ability of drill hole for the various hole size

Diameter(surface1)		1.2mm	0.5mm	0.3mm
		○	○	×
Depth	surface1	2.5mm	2.0mm	1.0mm	0.5mm
		○	○	○	×
	surface2	2.5mm	2.0mm	1.0mm	0.5mm
		×	×	×	×

○: Detectable ×: Undetectable

Fig. 7은 앞의 Fig. 2의 방법 즉, 5MHz 표면파 탐촉자를 이용하여 펄스에코법으로 인공결함을 검출한 초음파 파형의 예이며, 이때의 인공결함은 직경 0.3mm부터 1.2mm까지의 드릴홀이다. 시간축의 0μs 위치에서의 초기 초음파 펄스 신호가 나타나고 있고, 10μs 위치에서 인공결함인 드릴홀에서 산란되고 반사되어 수신된 신호가 나타나고 있다. 시간축에서 3μs 위치에서 탐촉자와 시험편 접촉면에서의 반사된 파형이 수신되고 있고, 그 이후 5μs에서부터 재료 내부의 표면파 산란에 의한 잡음으로 판단되는 산란 신호가 측정되었다. 이는 Ti합금내의 거대 결정립에서 산란되는 표면파로 고려되고, 표면파의 에너지가 높은 전파 초기 위치에서 민감하게 측정되고 있다. Fig. 7은 직경 0.3mm의 인공결함을 측정한 초음파 파형으로 드릴홀에서 반사된 초음파 신호의 진폭이 약 0.3V로 1.2mm직경의 인공결함에서 반사된 신호의 진폭인 0.65V보다 낮은 값을 나타내었다.

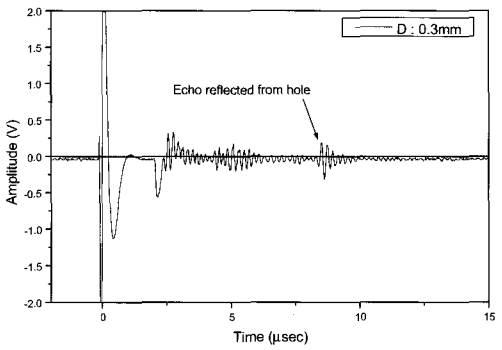

Fig. 7 Ultrasonic waveform reflected from 0.3mm diameter drill hole

Fig. 8은 인공결함인 드릴홀에서 반사된 신호로부터 드릴직경변화에 따른 신호의 진폭 변화를 나타낸 결과 그래프이다. 직경이 증가함에 따라서 드릴홀에서 반사된 초음파의 진폭 높이가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 표면파를 이용한 평가에서 드릴홀의 직경변화에 따라 표면파의 진폭높이가 민감한 영향을 나타냄을 뜻한다.

다음의 Fig. 9는 앞의 표면파 펄스에코법에 의하여 결함 깊이의 변화 따른 초음파 신호 특성을 평가하기 위하여 측정된 초음파 파형이다. 인공결함은 직경 0.5mm인 드릴홀이며 깊이는 0.5mm부터 2.5mm까지이다. 시간축에서 0μs 위치에서의 펄스 신호가 나타나고 있고, 15μs 위치에서 드릴홀에서 산란된후 전파방향의 전방에 위치한 모서리에서 반사되어 수신된 신호가 나타나고 있다. 시간축에서 7μs 위치에서는 드릴홀에서 반사된 초음파 신호가 나타나고 있다. 앞의 드릴홀의 직경 변화에 따른 초음파 신호 결과와는 달리 본 결과에서는 드릴홀에서 반사된 초음파 신호 보다 초음파 탐촉자 전방의 모서리에서 반사된 초음파 신호에 관점을 두었다. 표면파의 에너지는 표면에 집중되고 표면으로부터 깊이가 증가할수록 급격히 감소되므로, 깊이증가에 따라 인공결함에서 산란된 신호의 진폭크기 변화가 점차 둔감해지게 된다. 따라서, 이를 보완하는 방법으로 깊이 증가에 따라 신호의 진폭 변화가 큰 전방의 모서리에서의 반사파 신호가 민감한 결과를 나타내었다.

Fig. 10은 인공결함인 드릴홀에서 산란되고 통과하여 전파된 후 표면파 전파방향의 전방에 위치한 모서리에서 반사된 신호로부터 드릴홀의 깊이변화에 따른 신호의 진폭 변화를 나타낸 결과 그래프이다. 본 결과에서 드릴홀

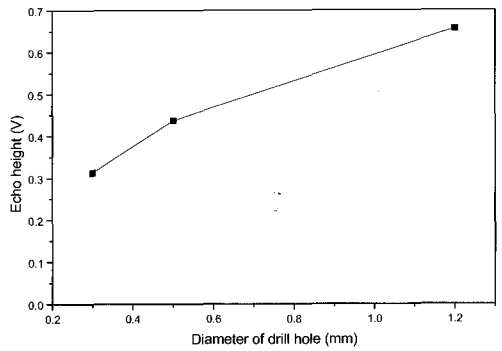

Fig. 8 Relationship between diameter of drill hole and echo height

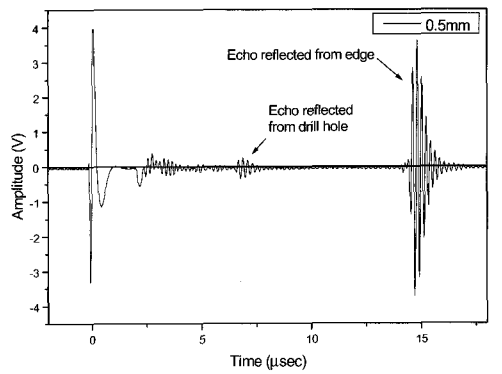

Fig. 9 Ultrasonic waveform containing the reflection from edge and the scattering from drill hole (depth : 0.5mm)

의 깊이가 증가할수록 모서리에서 반사되는 초음파의 진폭 높이가 급격하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 앞의 결과인 드릴홀에서 반사된 신호는 드릴홀에 대한 영향을 1회만 받게되지만 본 결과에서 표면파는 드릴홀에서 2회의 산란 영향을 받으므로 그 민감도가 증가되었음을 보여준다.

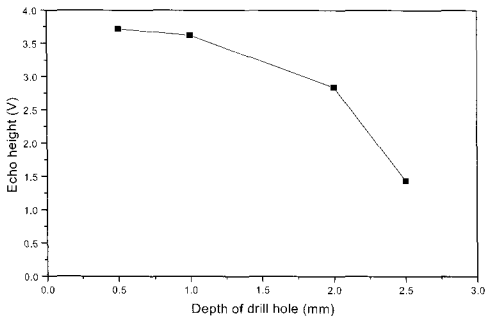

Fig. 10 Variation of echo height due to increase of depth of drill hole (diameter: 0.5mm)

이들 인공결함 크기 변화에 따른 표면파 측정 방법들은 초음파 탐촉자와 시험편과의 접촉(coupling) 조건변화에 대한 문제점이 해결되지 못한 상태이다. 그리고 인공결함의 깊이에 따른 초음파 신호에서 인공결함을 통과한 초음파 신호의 진폭이 결함 깊이 증가에 대하여 감소하는 경향 등을 보인다. 따라서, 앞으로 자기보상기법(self-calibrating technique)과 같은 기법등을 적용하여 시험편과 초음파 탐촉자의 접촉조건에 대한 영향과 정량적인 인공결함 크기 평가가 이루어져야할 것으로 사료된다.

4. 결 론

Ti합금의 미소결함 검출을 위한 초음파 특성에 대한 본 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

압연된 Ti합금의 이방성은 초음파 전파속도와 초음파 감쇠계수에서 나타났다. 시험편의 3개 면 방향에서 종파 및 횡파의 전파 속도를 측정한 결과는 2개 면에서는 전파속도가 유사한 결과값이 나왔지만 1개 면에서는 나머지 면방향에서 전파속도 보다 느린 값으로 나타났다. 그리고, 두 방향에서 초음파 감쇠계수를 측정하였을 때 압연방향으로의 초음파 전파에서 감쇠계수가 작게 나타났다.

Ti합금 표면에 존재하는 미소 결함의 검출기법은 체적파의 적용기법보다는 표면파를 적용하는 기법이 효과적이었다. 즉, 체적파를 적용한 경우 검출하지 못했던 미소결함까지 검출하였으며, 결함의 크기에 따라서 결함으로부터 산란되는 신호의 진폭과 결함을 통과하여 전달되는 초음파의 진폭이 결함의 크기와 밀접한 상관관계를 나타내었다. Ti합금 내부 결정립 산란 잡음 신호는 트랜스듀서의 측정 위치 이동을 통한 positional-averaging을 통하여 측정되었으며, Ti합금내의 미소 결함에 대하여 보다 정량적인 표면결함 측정이 수행되어야할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국제공동연구(20006-304-01-2)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Rose J. L., Barchinger J. N. "Guided Wave Applications in Aging Aircraft," Proc. of 14th WCNDT, pp. 157-160, (1996)

[2] Frank J. Margetan, R. Bruce Thomson, Issac Yalda-Mooshabad and Y. Kim Han, "Detectability of Small Flaws in Advanced Engine Alloys," Center for Nondestructive Evaluation, Iowa State University, (1993)

[3] Lee, J. H., Song. W. J., Popovics, J. S. and Achenbach, J. D., "One-Sided Stress Wave Velocity Measurement in Concrete," Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol. 9, No. 1, pp. 544-550, (1997)

[4] Lee, J. H. and Park, W. S., "Application of One-Sided Stress Wave Velocity Measurement Technique to Evaluate Freeze-Thaw Damage in Concrete," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18, pp. 1935-1942, (1999)

[5] 최상우, 이준현, "레이저 유도 표면 탄성파를 이용한 비파괴 평가," 비파괴검사학회 2000년도 춘계학술발표회, pp. 332-341, (2000)