

음향 이방성을 고려한 티타늄 용접부의 결함길이 측정에 관한 연구

A Study on the Defect length Measurement of Titanium Weld Zone Considering Acoustical Anisotropy

박희동^{1,✉}, 윤인식², 이원¹
Hee-Dong Park^{1,✉}, In-Sik Yun² and Won Yi¹

¹ 숭실대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Soongsil Univ.)
² 경기과학기술대학교 메카트로닉스과 (Department of Mechatronics, Kyonggi National University of Science and Technology)
✉ Corresponding author: pgun21@hanmail.net, Tel: 032-472-9001

Manuscript received: 2011.2.23 / Revised: 2011.6.2 / Accepted: 2011.6.8

This study intends to assess the defect in the weld zone of titanium grade 2 plate in terms of acoustical anisotropy based on the angle beam method. Depending on the rolling direction, the ratio of wave velocity was found to be 1.08 and the difference in the angle of refraction was more than seven degrees, confirming the presence of acoustical anisotropy. Thus for measuring the length of defect in the weld zone of the titanium plate (thickness of 10mm), the distance amplitude characteristics curves of titanium, TDACC-R and TDACC-T were constructed for the measurements in consideration of the acoustical anisotropy on CRT of the ultrasonic testing equipment. As a result, when the distance amplitude characteristics curve corresponds to the rolling direction, the length of defect was close to the actual measurement within 1mm and when different, the difference was found to be over 4mm. It was affirmed that the acoustical anisotropy should be taken into consideration when measuring the length of defects in the weld zone of the titanium plate with the presence of acoustical anisotropy.

Key Words: TDACC (티타늄 거리진폭특성곡선), Acoustical Anisotropy (음향 이방성), Rolling Direction (압연방향), Angle of Refraction (굴절각), Angle Beam Method (사각탐상법)

1. 서론

티타늄은 비강도가 높고, 내식성이 우수하여 항공, 우주, 화학플랜트, 열교환기 등에 사용되는 중요한 구조용 소재이다. 티타늄은 용접부의 특성상 열영향부가 용착금속부와 모재부에 비하여 경도와 충격치가 높다는 점¹과 용접 시, 산소, 질소, 수소와의 친화력이 강하다는 점²을 고려할 경우 용접결합의 발생가능성이 크며, 용접부에 대한 건전성평가는 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하는 것이 요구되고 있으며, 현재 용접부의 내부결함을 검사하는데 있어 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과법^{3,4}과 초음파 탐상법⁵⁻⁸ 등이 있다.

이중에서 방사선 투과(γ -ray 나 X-ray)에 의한 방법은 비파괴검사 분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있지만, 방사선 피폭에 의한 사용자의 피폭 위험성, 방사선 필름 해독을 위한 현상 및 실시간 결과처리의 불가능 등과 같은 많은 문제점을 내포

하고 있다.

초음파에 의한 방법은 인간에게 치명적인 피폭 등의 문제점을 갖고 있는 방사선 투과에 의한 방법을 대체하고, 실시간 결과처리의 강점을 갖고 있으며 작업효율이 높은 등의 의점이 있어 건축, 화학, 화력·원자력 등과 같은 산업 플랜트에서의 건전성 및 안전성 평가방법으로 각광 받고 있다.

그러나 초음파 탐상은 검사체의 재질, 형상 및 탐상면의 상태에 따라 초음파특성이 다르게 나타나기 때문에 이를 해결하기 위해 검사체와 동일한 계열의 재질로 만든 표준시험편 및 대비시험편을 이용하여 탐상조건을 정하고 있다.^{8,9}

순 티타늄소재는 육방정금속으로 일반 탄소강재와 다르게 기계적 성질이 면내 이방성에 크게 의존한다. 이는 음향이방성과 상관관계가 있는 것으로서 초음파 사각탐상시 굴절각에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 굴절각 설정이 잘못되면 결함의 위치와 크기를 정확하게 분석할 수 없다.

따라서 본 연구는 순 티타늄 판재의 용접부에 존재하는 결함을 정확하게 분석하기 위하여 순 티타늄판재의 압연방향과 압연직각방향의 음속과 굴절각을 각각 측정하여 티타늄 용접부의 거리진폭 특성곡선(TDACC-R, TDACC-T)⁹⁻¹¹ 을 구축하였고, 이로부터 티타늄 용접부의 용접성에 대한 평가기준을 제시하였다.

2. 초음파 이론

초음파 탐상에 있어서 측정범위를 결정하는 중요한 인자인 음속은 시험체 재질의 밀도와 탄성에 따라서 달라진다.

음속은 종파의 음속 C_l 인 경우 식(1)로 횡파의 음속 C_s 는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)G}{\rho}} \quad (1)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

여기서 E는 종탄성 계수, K는 체적 탄성 계수, G는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ 는 밀도, ν 는 푸와송비이다. 그리고 Fig.1 과 같이 초음파

의 사각탐촉자를 이용하여 결함탐상에 필요한 정보를 다음과 같이 구할 수 있다.

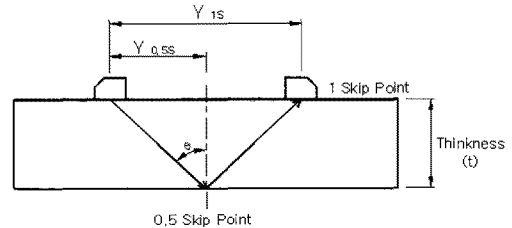


Fig. 1 Schematic of angle beam method

$$W_{0.5s} = \frac{t}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$W_{1s} = 2 \times W_{0.5s} \frac{2t}{\cos \theta} \quad (4)$$

$$Y_{0.5s} = t \times \tan \theta = W_{0.5s} \times \sin \theta \quad (5)$$

$$Y_{1s} = 2 \times Y_{0.5s} = 2t \times \tan \theta = W_{1s} \times \sin \theta \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(Y_{1s} / 2t) \quad (7)$$

$$d_{1s} = 2t - W_f \times \cos \theta \quad (8)$$

$$d_{0.5s} = W_f \times \cos \theta \quad (9)$$

Fig. 1에서 skip 점이란 음파가 경사지게 입사하여 반대면에 도달했을 때 그 지점을 0.5 skip 점이라 하며, 반대면에서 다시 반사하여 탐상면에 부딪혔을 때 그 지점을 1.0 skip 점이라 한다. 입사점에서 0.5 skip 점까지 거리를 0.5 skip 빔거리 $W_{0.5sf}$ 라 하며 1.0 skip 점까지는 1.0skip 빔거리 W_{1sf} 라 한다. 이때 W_{1sf} 는 $W_{0.5sf}$ 의 2 배가 된다. 그리고 입사점에서 0.5skip 점까지 탐상면상에서의 수평거리를 0.5 skip 거리, 즉 $Y_{0.5sf}$ 라 한다. 1.0 skip 점까지는 Y_{1sf} 라 한다. 마찬가지로 Y_{1sf} 는 $Y_{0.5sf}$ 의 2 배며, 음속이 표준시험편(STB-A1, Standard Block)과 다른 시험체를 검사할 경우 STB 굴절각의 차가 $\pm 1^\circ$ 의 2 개의 탐촉자를 사용하여 V 투과 펄스를 구하여, 그때의 입사점간의 간격 및 모재의 두께 t 에서 식

(7)에 따라 탐상 굴절각¹²을 0.5° 단위로 구한다.

그리고 입사점에서 결합까지의 거리(W_s)를 초음파탐상기 화면상의 시간축상에서 읽을 수 있으므로 사각탐촉자의 초음파 입사각을 알면 삼각함수를 사용해 결합의 깊이를 구할 수 있다. 즉, 0.5 skip 이내에서의 결합 깊이($d_{0.5s}$)는 식(8)과 같으며, 0.5 skip 에서 1.0 skip 이내에 존재하는 결합의 깊이(d_{1s})는 식(9)로 구할 수 있다.

초음파 탐상시험의 결합 등급분류는 용접 모재 두께에 대한 결합의 길이로 분류한다.⁸ 따라서 초음파 탐상시 결합의 중심부가 초음파의 반사에너지가 가장 크므로 CRT 상에 최고에코(파형)가 나타나며 이 최고 에코점을 기준으로 탐촉자를 결합의 진행방향 전후로 움직이면 CRT 상에서는 전후방 각각 최고에코(파형) 높이의 1/2 이 되는 에코가 나타난다. 이 점은 결합의 시종점이 되며 시종점의 간격을 측정함으로써 결합의 깊이를 측정한다.

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 디지털 초음파 탐상기, 결합 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(주파수 4MHz, 굴절각 : 70°, 진동자 크기: 8×9 mm) 등이다. 실험에 있어서는 초음파 탐상결합의 크기와 위치확인에 중요한 인자인 입사점, 굴절각, 음속 등을 티타늄판재를 대상으로 압연방향(R 방향, Rolling direct)과 압연직각방향(T 방향, Transverse rolling)으로 각각 구한 것로부터 용접부의 결합깊이를 측정하기 위한 기준선도 (TDACC, Ultrasonic Distance Amplitude Characteristics Curve of Titanium)를 작도하여 티타늄 용접부에 존재하는 결합깊이를 평가하고자 하였다.

3.2 티타늄의 특성

티타늄은 비중이 4.51 g/cm³으로 철강의 약 60 %이며, 강도는 철강과 유사한 값을 가지므로 비강도(강도/비중)가 크다. 그리고 티타늄 표면에 형성된 산화 티타늄의 부동태 피막이 견고하고 산화성 환경에서 파괴 즉시 재생이 쉽기 때문에 내식성이 우수하다. 특히 해수 부식성과 600℃까지 고온에서도 산화가 거의 없는 것 등이 특징이다.

이런 여러 성질들은 항공기, 로켓재료, 가스 터빈재료, 화학공업용 기계기구 등에서 중요하게 사용되는 까닭들이다. 그러나 아직 가격이 비싸 일

반화되고 있지는 못한 실정이다. 공업용에 사용되는 순 티타늄의 순도는 (99.0~99.2%)로서 가공경화성이 좋아 초경질 공구에 TiC 를 15% 이하 함유시켜 절삭능률을 향상시키며 TiC, TiO₂ 의 형태로 Co 와 소결해서 제트기관등의 초고온재료로 사용된다.

티타늄은 크게 순 α 티타늄, $\alpha + \beta$ 합금, β 합금, 합금의 4 종류로 나눌 수 있다.

본 연구에 사용된 티타늄은 일반적으로 많이 사용되는 순 티타늄 Grade 2 를 선정하여 초음파를 이용한 용접부의 건전성을 평가하였다.

순 티타늄 Grade 2 의 기계적 성질은 Table 1 과 같고, 화학성분은 Table 2 와 같다.¹³

Table 1 Mechanical properties

	Minimum values	Typical values
Tensile strength (MPa)	345	485
Yield strength (MPa)	275	350~450
Elongation in 50 mm, A5 (%)	20	28%
Reduction area(%)	30	55
Hardness(HV)	-	160~200
Charpy v-notch impact(J)	-	40~82

Table 2 Chemical compositions(wt.%)

H	O	N	Fe	Ti
0.013	0.20	0.05	0.25	Re

그리고 순 티타늄판재는 조밀육방격자 결정구조를 갖는 금속으로 인장방향 의존성(면내이방성)이 크며 음향이방성도 용접구조용 압연강재보다 크게 존재하는 특징이 있다.

Figs. 2-3 은 2 개의 초음파 사각탐촉자로 V 투과하여 용접구조용 압연강재 강판(두께 15 mm)의 음향이방성을 확인한 결과이다. 여기서 송신탐촉자와 수신탐촉자의 입사점간 거리가 압연방향과 압연직각방향이 약 80 mm로 일치하여 초음파 탐상시 음향이방성을 심각하게 고려하지 않아도 된다.

그러나 순 티타늄판재(두께 15 mm)를 대상으로 음향이방성을 확인한 결과 Figs. 4-5 처럼 R 방향과 T 방향의 탐촉자간 거리가 약 20 mm차이 나므로 초음파 탐상시 음향이방성을 고려해야 한다.

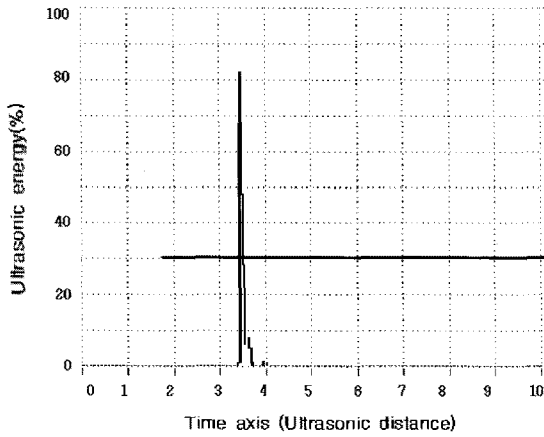


Fig. 2 Ultrasonic signal of Rolling direction (carbon steel)

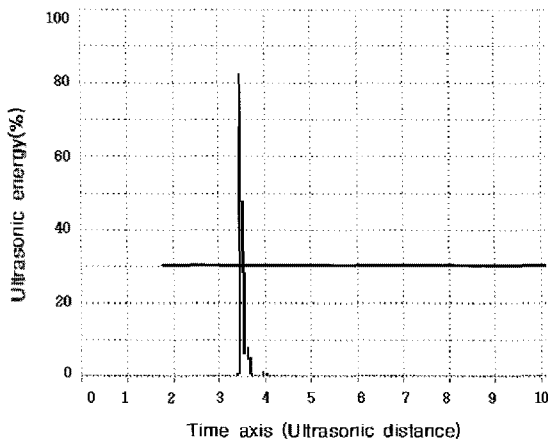


Fig. 3 Ultrasonic signal of Transverse direction (carbon steel)

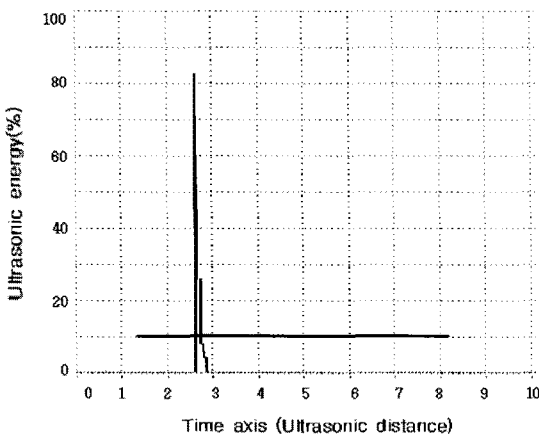


Fig. 4 Ultrasonic signal of rolling direction (titanium)

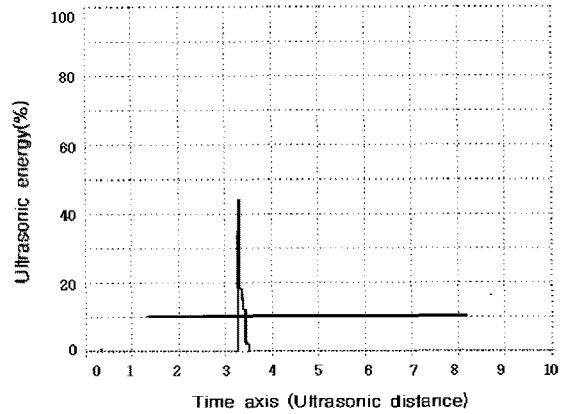


Fig. 5 Ultrasonic signal of transverse direction (titanium)

3.3 TDACC 의 작성

사각 탐촉자를 이용한 초음파 결함탐상 시, 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 탐상하고자 하는 대상체의 크기 및 재질에 부합되는 기준 설정이며, 기준 설정에는 대비시험편을 사용한다. 대비시험편의 요구특성으로는 초음파 빔 진행거리의 변화가 없는 가능한 시험체와 동일재 또는 유사재로 제작하여 초음파탐상에 필요한 입사점, 굴절각, 측정범위 등 초음파장비를 정확하게 교정할 수 있어야 한다.

티타늄 용접부와 초음파의 상관관계를 사각 탐촉자로 평가하기 위해서는 대비시험편을 대상으로 주사하고자 하는 위치에 따라 초음파에코를 분석하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 순 티타늄 Grade 2 의 용접시험편재질과 동일한 대비시험편을 제작하여, 초음파탐상에 필요한 기준을 설정하고 티타늄 용접부의 용접결함 평가의 기준이 되는 TDACC 를 작성하였다.

용접부에 사용되는 TDACC 는 대비시험편 STB-A1 을 사용하여 초음파의 입사점, 굴절각, 측정범위를 확인하게 되며, 대비시험편 STB-A2 를 사용하여 TDACC 를 작성한다.

TDACC 는 Figs. 6-7 과 같이 작성되며, 작성프로세스는 아래와 같이 크게 5 가지로 요약할 수 있다.

(1) 시험체의 두께를 기준으로 탐촉자의 굴절각 및 시간축을 결정하기 위해 STB-A1 시험편을 이용한다. 초음파 탐촉자로 탐상하여 100R 의 반사에코원을 최대로 한 위치에서 탐촉자의 입사점과 시간축을 결정한다.

(2) STB-A2 의 (ø4×4)mm 홀(hole)을 대상으로 ⁸ 0.5 skip 내에서 초음파탐촉자로 탐상하였을 때 에코높이를 100%로 맞춘 후 마킹한다.

(3) 0.5 skip 에서 마킹한 후, 동일한 표준 결함을 대상으로 1.0 skip 에서의 최고 에코를 마킹한다. 그리고 1.5skip 및 2.0 skip 점에서도 마찬가지로 반복하여 최대 에코를 마킹한 후, 각 표시 점들을 한 개의 선으로 연결한다.

(4) STB-A2 의 (ø4×4)mm 홀(hole)을 대상으로 0.5 skip 내에서 최대에코를 80%에 위치시킨 후, 6dB 와 12dB 로 낮추어 각각의 에코높이점을 마킹한다.

(5) 1.0 skip, 1.5 skip, 2.0 skip 에서도 0.5 skip 에서와 같이 반복하여 에코높이점을 마킹한 후, 동일한 감도에서 각 점을 직선으로 연결한다.

Fig. 6 에서 초음파 탐상기 CRT 상의 가로축은 초음파빔의 반사지시가 있을 때 반사원까지 음파가 왕복 진행하는데 걸린 시간 또는 반사원까지의 거리를 나타내며, 세로축은 에코의 강도를 의미한다.

본 연구에서는 가로축의 측정범위를 125 mm로 하고, 세로축의 에코강도는 100%로 설정하여 대비 시험편들의 반사에코원과의 상관관계를 이용하였다.

본 연구에서는 티타늄 판재 압연방향의 초음파 특성인 굴절각(63.5°)과 음속(2960 m/s)을 측정하여 TDACC-R 를 Fig. 6 과 같이 작도하였고 압연직각방향은 굴절각(70.6°), 음속(3213 m/s)로 측정하여 TDACC-T 를 Fig. 7 과 같이 결함검출의 기준으로 설정하였으며, 압연방향과 압연직각방향의 음속과 굴절각의 차이로부터 음속비 1.08, 굴절각 7° 이상 차이가 나는 것을 확인하였다.¹⁴

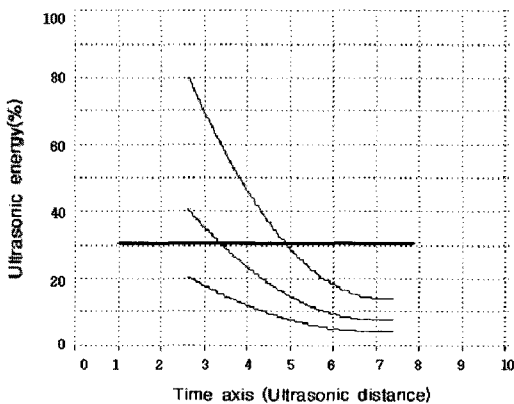


Fig. 6 Rolling direction TDACC-R

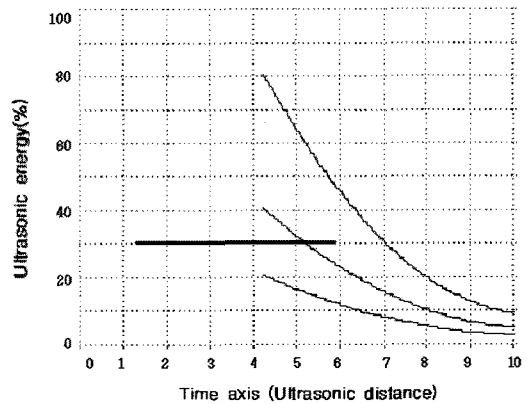


Fig. 7 Transverse direction TDACC-T

3.4 TDACC 에 의한 용접부 건전성 평가

티타늄 용접은 산소나 질소와의 친화력이 커서 용접 시, 대기 중의 산소, 질소 등의 가스와 반응하여 용착금속의 경도를 크게 증가시키고, 연성을 감소시켜, 용접부의 건전성이 저하 된다. 일반적으로 사용하고 있는 불활성 가스 아크용접은 불활성가스의 순도 및 압력에 따른 부적절한 공급 등의 원인으로, 용접결함인 기공 등이 발생하기 쉽다.

따라서 본 연구에서는 티타늄 용접부의 맞대기 용접에 대하여 작성한 TDACC 로부터 기공결함에 대한 건전성평가를 하고자 Fig. 8 과 같이 압연방향이 확인된 모재시험편(순 티타늄 Grade 2, 두께 15 mm)에 방전가공으로 폭 1 mm, 길이 20 mm, 깊이 4 mm 의 인공결함을 압연방향과 압연직각방향으로 각각 만들었다. 그리고 용접시험편을 만들기 위해 순 티타늄 Grade 2, 두께 10 mm 판재를 GTA(Gas Tungsten-Arc)용접법으로 알곤 99.9 % 보호가스를 사용하여 용접하였으며 1-Pass 용접조건은 아크전류 80A, 용접속도 100 mm/min, Touch Shielded 가스량 (5~10) L/min, After shield 가스량 (20~25) L/min, Back shield 가스량 (20~25) L/min 이고, 2-Pass 용접조건은 아크전류 150A, 용접속도 200 mm/min, shield 가스량은 모든 부분이 (20~25) L/min 였다. 그리고 3-Pass 와 4-Pass 의 용접조건은 2-Pass 와 같은 조건으로 용접하였다.

이와 같이 만들어진 용접시험편에 방전가공으로 모재시험편과 동일한 크기(1×20×4) mm의 결함을 Fig. 9 와 같이 가공하였다.

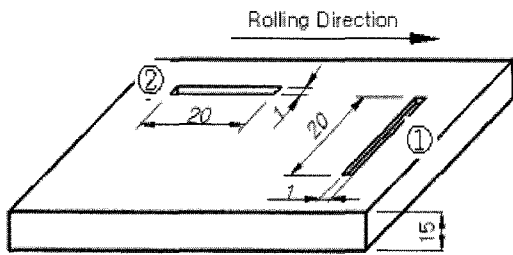


Fig. 8 Schematic of titanium test sample

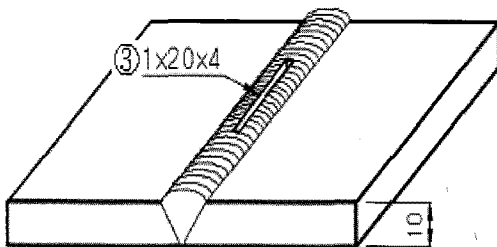


Fig. 9 Titanium weld sample

Fig. 8 에서 압연방향에 직각인 결함②과 압연방향에 수평인 결함①을 대상으로 각각 TDACC-R 과 TDACC-T 의 조건에서 결함길이를 KS B 0896(강용접부의 초음파 탐상 시험 방법)에 따라 1 mm 단위로 측정하였으며 결과는 Table 3 과 같다. Table 3 에서 R-R 은 압연방향에 직각인 결함①을 TDACC-R 로 탐상한 결과며 T-R 은 결함①을 TDACC-T 로 탐상한 결과이다. 그리고 T-T 은 압연방향에 수평인 결함②를 대상으로 TDACC-T 의 조건에서 탐상한 결과이며 R-T 는 결함②를 TDACC-R 로 탐상한 결과이다.

Fig. 10 은 결함①을 TDACC-R 의 기준감도에서 획득한 결함 끝단부에 대한 신호이고, Fig. 11 은 결함①을 TDACC-T 의 기준감도에서 획득한 결함 끝단부에 대한 신호이다. 또한 Fig. 12 는 결함②를 TDACC-T 의 기준감도에서 획득한 신호이며, Fig. 13 은 결함②를 TDACC-R 의 기준감도에서 획득한 신호이다.

압연방향에 직각인 결함①을 대상으로 TDACC-R 과 TDACC-T 의 기준감도에서 결함길이를 측정한 결과 TDACC-R 는 기준 결함길이(20 mm)와 1 mm 이내로 일치하였으나, TDACC-T 에서는 기준길이보다 5 mm 이상 더 길게 평가되었다.

이러한 측정 결과는 압연방향에 수평인 결함②에서도 유사하게 평가되었다.

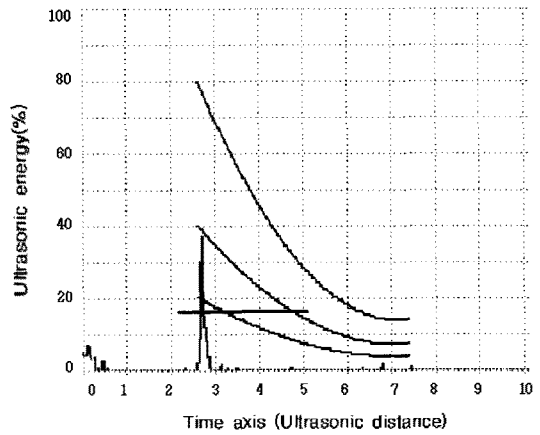


Fig. 10 Ultrasonics signal of titanium parent metal (1x4x20) mm ① R-R

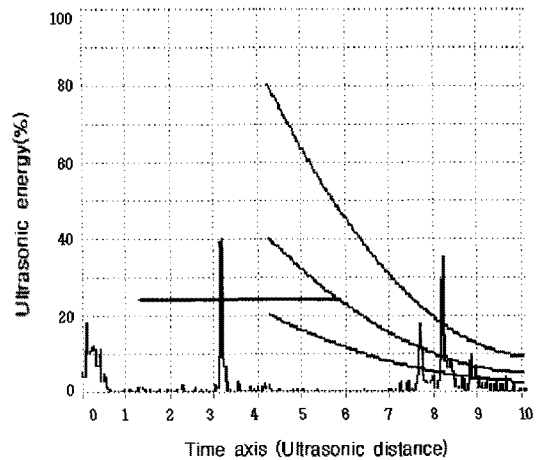


Fig. 11 Ultrasonics signal of titanium parent metal (1x4x20) mm ① T-R

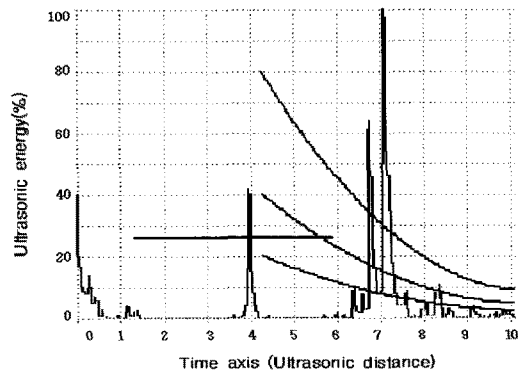


Fig. 12 Ultrasonics signal of titanium parent metal (1x4x20) mm ② T-T

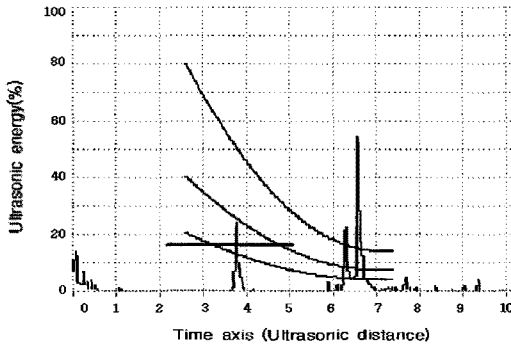


Fig. 13 Ultrasonics signal of titanium parent metal (1×4×20) mm ② R-T

이와 같이 모재부 결함을 대상으로 음향이방성을 고려하여 결함길이를 정확하게 측정할 것이 모재부와 다른 형태의 조직구조를 갖는 용접부에도 적용될 수 있는지 Fig. 9 의 결함③으로 확인한 결과 실측한 결함길이와 1 mm이내로 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 14 는 결함③을 대상으로 측정한 결함길이 끝단부의 초음파 신호로써 압연방향에 직각으로 용접한 시험편내에 존재하는 결함을 TDACC-R 조건에서 평가한 것이다.

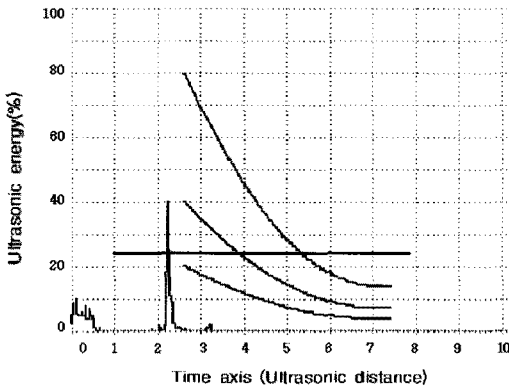


Fig. 14 Ultrasonics signal of titanium welding zone (1×4×20) mm

Table 3 Ultrasonic testing results

Direction(mm) \ Defect	R-R	R-T	T-T	T-R
①	21	-	-	25
②	-	24	22	-
③	21	-	-	24

4. 결론

본 연구에서는 티타늄판재의 초음파 신호에 대한 음향이방성을 정량적으로 확인하고 이를 고려한 티타늄 용접부의 결함길이 측정에 관하여 연구하였다.

초음파 탐상기의 CRT 상에 TDACC 시스템을 구축한 후, 획득한 초음파 신호들로부터 티타늄 용접부에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 순 티타늄판재는 음속비 1.08, 굴절각 7°를 나타내어 일반 용접구조용 압연강재와는 상이한 음향이방성이 존재하는 것을 확인하였다.

2) 순 티타늄판재에 존재하는 음향이방성을 고려하여 초음파 사각탐상시 결함길이 평가에 기준이 되는 TDACC-R, TDACC-T 를 제시하였다.

3) 티타늄 판재의 모재부에 방전가공으로 인공 기준 결함을 압연방향과 압연직각방향으로 만들고 이를 TDACC-R, TDACC-T 로 결함길이를 측정할 결과 기준 결함길이와 1 mm 이내로 일치하였으나, 압연방향에 따른 거리진폭특성곡선을 잘못 적용하면 기준 결함길이 보다 4 mm 이상 차이 나는 결과를 얻었다. 따라서 순 티타늄판재에 대한 초음파 결함길이 측정시 탐상방향에 따라 거리진폭특성곡선을 적용해야 함을 제시하였다.

4) 용착금속부는 모재부가 전기적인 에너지 등으로 용융되었다가 고착된 부분으로 모재부와 다른 형태의 결정립 구조를 가지며 초음파 진행 특성에 영향을 줄 수 있다. 그러나 본 연구의 결함길이 평가 기준용 TDACC-R, TDACC-T 을 티타늄 용접부에 존재하는 결함평가에 적용한 결과 결함길이를 1 mm이내의 차이로 정확하게 평가하였다. 따라서 탐상방향에 따른 거리진폭 특성곡선이 티타늄용접부에도 유용하게 적용될 수 있음을 제시하였다.

참고문헌

- Yi, W., Park, H. D. and Yun, I. S., "A Study on the Ultrasonic Distance Amplitude Characteristics Curve for Weld Defects Evaluation of titanium Weld Zone," J. of KOSOS, Vol. 23 No. 4, pp. 7-8, 2008.
- Sung, B. S., Kim, I. S., Kim, I. J. and Cha, Y. H., "The Residual Stresses Evaluation of Butt Welded

- Zone on the Joint shape in the Titanium Plate,” Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 290-294, 2001.
3. KS B 0845, “Methods of Radiographic Examination for Welded Joints in Steel,” 2005.
 4. KS B ISO 15614-5, “Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 5: Arc welding of titanium, zirconium and their alloys,” 2006.
 5. Yi, W. and Yun, I. S., “A Study on Technical Development of Ultrasonic Test for Application of Industrial Fields,” J. of KSPE, Vol. 14, No. 8, pp. 49-56, 1997.
 6. Yi, W. and Yun, I. S., “The Defect Detection and Evaluation of Austenitic Stainless Steel 304 Weld Zone using Ultrasonic Wave and Neuro,” J. of KWS, Vol. 16, No. 3, pp. 192-201, 1998.
 7. Yun, I. S., Park, W. K. and Seob, J. E., “The Weldability Evaluation of Weld Zone in Railway Rails Using Distance Amplitude Curve of Ultrasonic Sensor,” J. of KSCE, Vol. 22, No. 1-D, pp. 113-120, 2002.
 8. KS B 0896, “Method for ultrasonic examination for welds of ferritic steel,” 1999.
 9. Park, H. D., Yun, I. S., Yoon, G. W. and Yi, W., “Titanium Ultrasonic Distance Amplitude characteristics Curve Considering Acoustical Anisotropy,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 1223-1224, 2010.
 10. Park, H. D., Yun, I. S. and Yi, W., “Crack Evaluation of Titanium Weld Zone using Ultrasonic Distance Amplitude Characteristics Curve,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 801-802, 2009.
 11. Park, H. D., Yun, I. S. and Yi, W., “Porosity Defect Evaluation of Titanium Weld Zone using Ultrasonic Distance Amplitude Characteristics Curve,” Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 529-530, 2009.
 12. KS B 0897, “Methods of Ultrasonic Angle Beam Examination for Butt Welds of Aluminium Plates,” 2009.
 13. KS D 6026, “Titanium and Titanium Alloy Castings,” 2003.
 14. KS B 0533, “Methods for Measurement on Ultrasonic Velocity of Solid by Pulse Technique Using Reference Test Piece,” 2005.