

티타늄 용접부의 용접결함평가를 위한 초음파거리진폭특성곡선에 관한 연구

이 원[†] · 박희동^{*} · 윤인식^{**}

숭실대학교 기계공학과 · ^{*}숭실대학교 대학원 · ^{**}경기공업대학 메카트로닉스과
(2008. 2. 27. 접수 / 2008. 8. 12. 채택)

A Study on the Ultrasonic Distance Amplitude Characteristics Curve for Weld Defects Evaluation of Titanium Weld Zone

Won Yi[†] · Hee-Dong Park^{*} · In-Sik Yun^{**}

Mechanical of Engineering, Soongsil University

^{*}Graduate School of Soongsil University

^{**}Department of Mechatronics, Kyonggi Institute of Technology

(Received February 27, 2008 / Accepted August 12, 2008)

Abstract : This study proposes integrity evaluation method of weld zone in titanium using titanium distance amplitude characteristics curve(TDACC) and ultrasonic signals. For these purposes, the ultrasonic signals for porosity defects of weld zone in titanium are acquired in the type of time series data and echo strength. 4 lines in the DACC indicated damage evaluation standard of weld zone in titanium. The acquired ultrasonic signals agree fairly well with the measured results of reference block and sensitivity block(defect location, beam propagation distance, echo strength, etc). The proposed TDACC in this study agree fairly well with the measured results of weld zone in titanium(weld defects as porosity). The proposed TDACC in this study can be used for integrity evaluation of weld zone in titanium.

Key Words : TDACC, ultrasonic, weld zone, integrity, direct scan method, angle beam method, reference block, sensitivity block

1. 서론

현재 산업계에서 절대적으로 사용되고 있는 연강의 단점을 보완하는 티타늄은 1940년 W. Kroll에 의하여 공업적으로 제조된 이래 급속하게 발전하여 내식성, 인장강도, 비중 등에서 우수성을 인정받아 그 이용이 점점 증가하고 있다.

특히 산업계에서 사용 중에 있는 대형 플랜트의 티타늄 배관라인은 고온과 강산 등의 가혹한 환경인 관계로 용접부의 건전성 확보가 반드시 필요한 사항이라 할 수 있다. 그러나 용접공정 중의 여러 가지 변수로 인하여 티타늄 용접부에는 결함이 많이 발생하게 된다. 따라서 용접 후, 용접부에 존재하는 결함을 검출하고 평가하는 것은 플랜트 전체의 건전성 및 안전성 측면에서 대단히 중요하다.

최근 고온 및 고내식성을 요구하는 산업플랜트의 탱크 등에 있어서 외부는 일반 탄소강으로 하고 내부는 티타늄 용접의 조합으로 하는 용도의 사용이 증가하고 있다. 그러나 티타늄 용접부의 특성상 열영향부가 용착금속부와 모재부에 비하여 경도와 충격치가 높다는 점¹⁾과 용접 시, 산소, 질소, 수소와의 친화력이 강하다는 점²⁾을 고려할 경우, 용접결함의 발생가능성이 크다고 할 수 있다.

특히 가동 중에 있는 탱크의 티타늄 용접부는 고온 등의 가혹한 환경 하에 지배를 받는 관계로 결함 발생과 이로 인한 누수 및 파괴로 이어지게 되면, 플랜트 전체시스템의 안전성에 심각한 문제가 될 수 있다. 따라서 티타늄 용접부에 대하여 제작 후 및 유지, 보수 시에 용접부의 정량적인 평가가 필요하다 할 수 있다. 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하기 위하여 현재 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과³⁾

[†] To whom correspondence should be addressed.
yiwon@hanmail.net

와 초음파 탐상^{4,5)} 등과 같은 정량적 탐상평가법을 들 수 있다.

이중에서 방사선 투과(γ -ray나 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 내포하고 있다.

그러나 초음파에 의한 방법^{6,7)}은 건축·화학·화력·원자력 등과 같은 산업 플랜트에서의 건전성 및 안전성 평가방법 중에서 방사선 투과법 다음으로 사용되고 있다. 특히, 초음파법은 인간에게 치명적인 피폭 등의 문제점을 갖고 있는 방사선 투과에 의한 방법을 대체하고, 실시간 결과처리의 강점을 갖고 있어 그 위력을 발휘하고 있다. 따라서 초음파에 의한 티타늄 용접부의 건전성 평가^{8,9)}는 안전성 확보를 가능하게 함으로서 플랜트에서의 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다.

티타늄용접 후에 이루어지는 용접성 평가에 있어서 실시간 결과처리 등의 강점을 갖고 있는 초음파 탐상의 정량화는 대단히 중요하지만 맞대기 용접부에 대한 두께와 초음파와의 상관관계로 인하여 아직까지 뚜렷한 관련 규격이나 평가기준이 정해져 있지 않은 상태이다¹⁰⁾.

따라서 본 연구에서는 0.5스킵(skip)에서 1.0skip 초음파진행거리를 스캔(scan)한 결과로부터 티타늄거리진폭특성곡선(TDACC)을 구축하고, 이로부터 티타늄 용접부의 용접성에 대한 평가기준을 제시하였다.

2. 초음파 이론

초음파 탐상에 있어서 측정범위를 결정하는 중요한 인자인 음속은 시형체 재료의 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 E 는 종탄성 계수, K 는 체적 탄성 계수, G 는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ 는 밀도, ν 는 푸와송비이다.

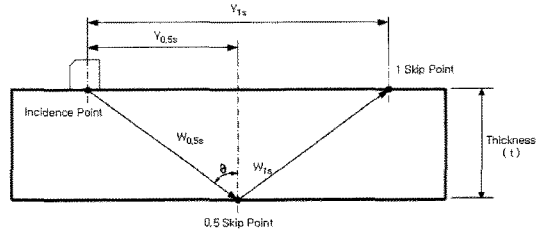


Fig. 1. Schematic of angle beam method.

결합 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질 내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결합으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용접부 결합을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 횡파 사각탐상을 적용할 수 있다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 용접부에 대한 결합검출은 사각탐촉자를 사용하여 결합의 위치를 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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

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

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

$$d_{0.5s} = W_f \times \cos\theta \quad (7)$$

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

Fig. 1에서 skip점이란 음파가 경사지게 입사하여 반대면에 도달했을 때 그 지점을 0.5skip점이라 하며, 반대면에서 다시 반사하여 탐상면에 부딪혔을 때 그 지점을 1.0skip점이라 한다. 입사점에서 0.5 skip점까지 거리를 0.5skip빔거리 $W_{0.5s}$ 라 하며 1.0skip점까지는 1.0skip빔거리 W_{1s} 라 한다. 이때 W_{1s} 는 $W_{0.5s}$ 의 2배가 된다. 그리고 입사점에서 0.5skip점까지 탐상면상에서의 수평거리를 0.5skip거리, 즉 $Y_{0.5s}$ 라 한다. 1skip점까지는 Y_{1s} 라 한다. 마찬가지로 Y_{1s} 는 $Y_{0.5s}$ 2배이다.

그리고 입사점에서 결합까지의 거리(W_f)를 초음파탐상기 화면상의 시간축상에서 읽을 수 있으므로 사각탐촉자의 초음파 입사각을 알면 삼각함수를 사용해 결합의 깊이를 구할 수 있다. 즉, 0.5skip이 내에서의 결합깊이($d_{0.5s}$)는 식 (7)과 같으며, 0.5skip에서 1.0skip이내에 존재하는 결합의 깊이(d_{1s})는 식 (8)로 구할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1. 시스템의 구성 및 실험방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Panametrics사의 EPOCH XT), 결합 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70°, 진동자 크기: 8×9mm), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관관계에 의하여 초음파 탐상기의 화면상에 나타나는 결합 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같은 티타늄 맞대기 용접부에 대하여 목돌림(tilting)을 병행하여 스캔하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 기준으로 진폭대 범진행거리와의 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다(시간축과 초음파에코축이 만나는 디지털 값).

3.2. 티타늄의 특성

티타늄은 크게 순 티타늄, α합금, α+β합금, β합금의 4종류로 나눌 수 있다.

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

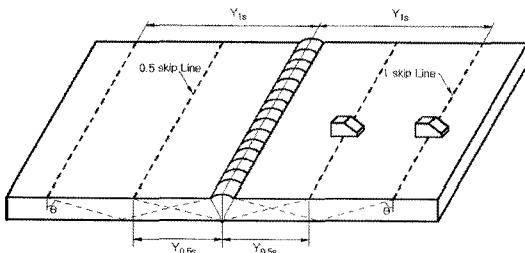


Fig. 2. Schematic of titanium weld zone scan.

Table 1. Mechanical properties

	Minimum values	Typical values
Tensile strength(MPa)	345	485
Yield strength(MPa)	275	350~450
Elongation in 50mm,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

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

3.3. 일반 DACC의 작성

용접부에 사용되는 DACC는 일반적으로 Fig. 3의 STB-A1을 사용하여 초음파의 입사점, 굴절각, 측정범위를 확인하게 되며, Fig. 4의 대비시험편(STB-A2)을 사용하여 DACC를 작성한다.

DACC는 Fig. 5와 같이 작성되며, 작성프로세스는 아래와 같이 크게 6가지로 요약할 수 있다. Fig. 5에서 초음파 탐상기 CRT상의 가로축은 초음파빔의 반사지시가 있을 때 반사원까지 음파가 왕복 진행하는데 걸린 시간 또는 반사원까지의 거리를 나타내며, 세로축은 에코의 강도를 의미한다.

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

1) 시험체의 두께를 기준으로 탐촉자의 굴절각 및 시간축을 결정하기 위하여 Fig. 3과 같은 STB-A1 시험편을 이용한다. 초음파 탐촉자로 탐상하여 100R의 반사에코원을 최대로 한 위치에서 탐촉자의 입사점과 시간축을 결정한다.

2) STB-A2의 ø4×4mm 홀(hole)을 대상으로 0.5skip 내에서 초음파탐촉자로 탐상하였을 때 에코높이를 100%로 맞춘 후 마킹한다.

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

4) STB-A2의 ø4×4mm 홀(hole)을 대상으로 0.5skip 내에서 최대에코를 80%에 위치시킨 후, 6dB와 12dB로 낮추어 각각의 에코높이점을 마킹한다.

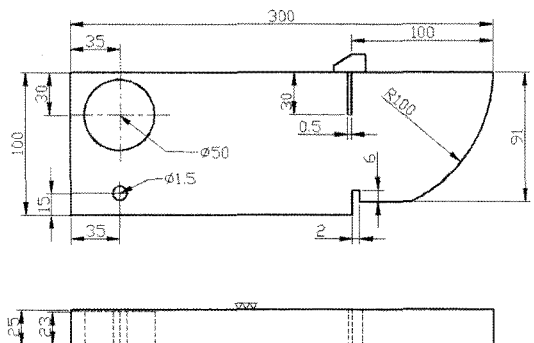


Fig. 3. STB-A1 Reference block.

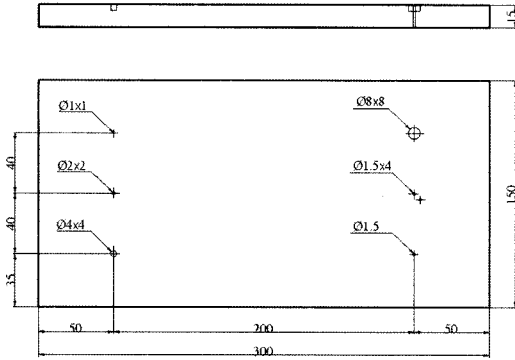


Fig. 4. STB-A2 Reference block.

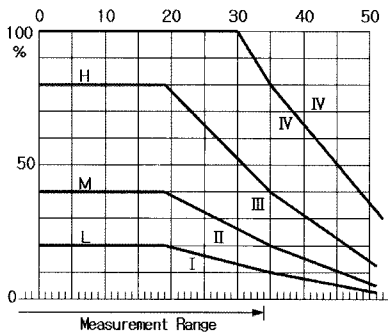


Fig. 5. General DACC.

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

6) Fig. 5와 같이 각 점을 직선으로 연결한 곡선들 중 평가대상이 되는 빔거리에서 높이가 40% 이상 되는 선을 H선이라 하고, 다음을 M선, L선 순으로 표시하며, 기준 탐상감도는 H선으로 한다. 그리고 L선 이하의 영역은 I 영역, L-M선은 II영역, M-H선은 III영역, H선 이상은 IV영역으로 구분한다.

3.4. TDACC의 작성

사각 탐촉자를 이용한 초음파결함탐상 시, 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 탐상하고자 하는 대상체의 크기 및 재질에 부합되는 기준설정이며, 기준 설정에는 대비시험편을 사용한다. 대비시험편의 요구특성으로는 초음파빔 진행거리의 변화가 없는 가능한 동일재 또는 유사재에 의한 용접성이 확보되어야 하며, 감도 및 초음파센서의 교정을 한다.

사각에 의한 티타늄 용접부와 초음파의 상관관계를 평가하기 위해서는 대비시험편과 주사하고자 하는 위치에 따라 초음파에코를 분석하는 것이 필요하다.

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

TDACC는 결함탐상 목적에 따라 M검출 레벨 또는 L검출 레벨로 설정하여 사용하며, 설정된 검출레벨선 이상으로 에코가 발생되는 것만을 결함으로 인정하여 용접부의 건전성을 평가한다.

TDACC 작성에 있어서는 초음파센서의 굴절각과 티타늄재의 두께, 주사위치 등을 최대한 고려하여 0.5~1.5skip거리를 기준으로 하였다.

주요 설정조건으로는 탐촉자 4.0MHz, 70°를 사용하였으며, 측정범위는 125mm를 기준으로 Fig. 6과 같은 TDACC를 플로팅 하였다.

Fig. 6에서 세로축은 초음파에너지(에코강도), 가로축은 초음파 빔의 거리를 나타내는 시간축이고, 화면속의 4개선은 거리진폭특성곡선의 선을 나타낸다. 가로축을 기준으로 S/N비는 불감대 영역에서 높지만, 획득신호와의 차이가 큰 관계로 영향을 주지는 않고 있어, 주사와 목돌림에 의한 최대 에코의 획득에 문제가 없게 나타났다.

초음파에너지축의 가장 높은 값을 나타내는 80으로 시작되는 선이 처음 주사를 하여 ø4×4mm의 최대 에코를 획득한 위치이며, 이때의 감도는 45dB로 설정되었다. 이로부터 6dB를 내려서 두 번째 선인 40에 한 점을 정하고, 다시 6dB를 내려서 20에 설정하였다.

1.0skip거리에서도 80으로부터 3개의 위치에서 점들을 결정하였으며, 1.5skip거리 내에서 3개의 점을 결정하여 가로축의 8(초음파 빔 거리가 100mm)에서 최종적인 TDACC를 작성하였다.

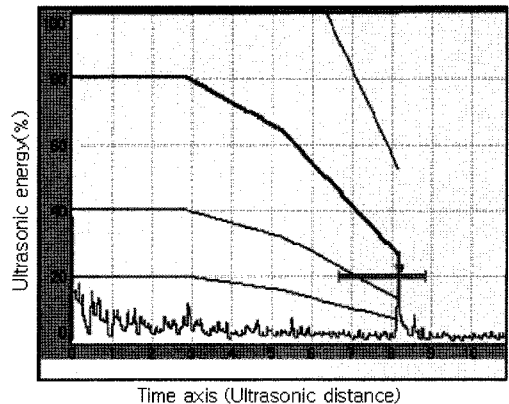


Fig. 6. Titanium TDACC.

3.5. TDACC에 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 불활성 가스의 순도 및 압력에 따른 부적절한 공급 등의 원인으로, 용접결합인 기공 등이 발생하기 쉽다.

따라서 본 연구에서는 티타늄 용접부의 맞대기 용접에 대하여 작성한 TDACC로부터 기공결합에 대한 건전성평가를 하고자 Fig. 7과 같이 용접시험편(순 티타늄 Grade 2, 두께 10mm)을 제작하여, 인공결합을 방전 가공하였다.

Fig. 7에서 기공결합인 ①($\phi 1 \times 3$ mm)을 대상으로 주사하여 획득한 신호의 결과는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서는 거리축 2.5와 이에 대한 에코강도 60%를 기공결합 신호로 획득하였으며, 신호획득 시, 0.5skip거리 내에서 직선주사를 한 후, 결합신호 획득과 함께 최대에코를 정하기 위하여 목돌림을 하여 최종적으로 신호를 결정하였다. 게이트 레벨을 40%로 한 것은 최초 신호획득과 목돌림 시의 신호 레벨이 45% 정도인 관계로 30%부터 조정하면서 최종레벨을 설정하였다.

Fig. 9는 기공결합인 ②($\phi 1 \times 5$ mm)를 대상으로 주사하여 획득한 신호의 결과로서, ①의 기공결합과 크기는 같지만, 용접시험편의 저면으로부터 2mm의 깊이를 더 가공한 관계로 초음파빔의 반사율이 더욱 높아진다고 할 수 있다. 따라서 거리축 등의 주

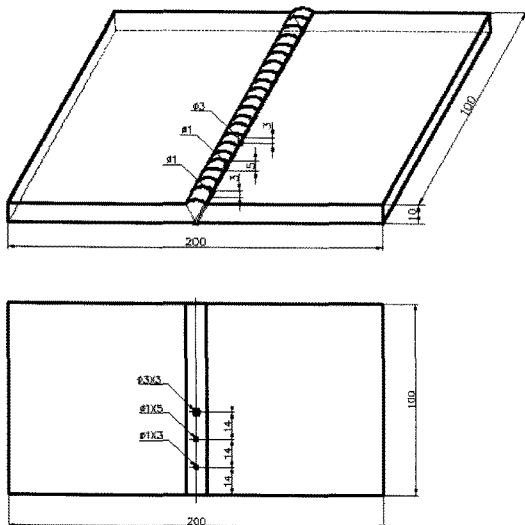


Fig. 7. Titanium welding sample.

Table 3. Configuration of titanium welding sample

결합번호	결합크기	가공형태	단위: mm
			가공기준
①	$\phi 1 \times 3$	방전	용접부 중심
②	$\phi 1 \times 5$	방전	
③	$\phi 3 \times 3$	방전	

사에 대한 조건을 거의 동등하게 하여도 에코의 강도는 90%로 약 30%의 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 동일결합에 대한 면적과 초음파빔의 정량적 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 10은 기공결합인 ③($\phi 3 \times 3$ mm)을 대상으로 획득한 신호의 결과로서, 결합 ①, ②와 같은 기공결합이지만, ①과 비교하면, 결합의 깊이는 3mm로 같으나, 단면적의 지름은 2mm가 더 큰 형태로써, 수신된 에코의 강도가 결합 ②와 유사한 약 35%의 차이를 나타냈다. 또한 결합 ②와의 비교에서는 결합의 크기와 깊이가 서로 다른 경우로서, 인공결합의 면적이 크고, 기공에 대한 초음파빔의 특성상 에코강도와 신호의 폭이 넓다는 경향과 일치함을 알 수 있다.

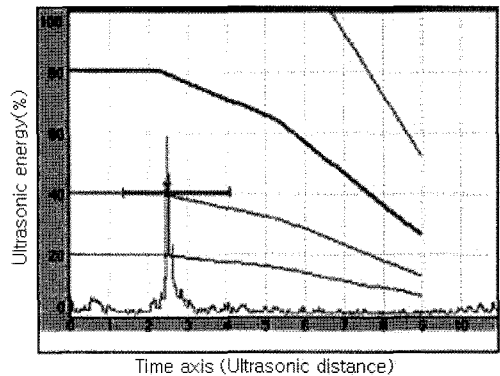


Fig. 8. Ultrasonics signal of titanium welding zone($\phi 1 \times 3$ mm).

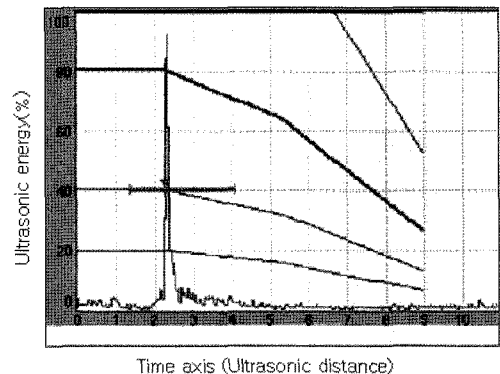


Fig. 9. Ultrasonics signal of titanium welding zone($\phi 1 \times 5$ mm).

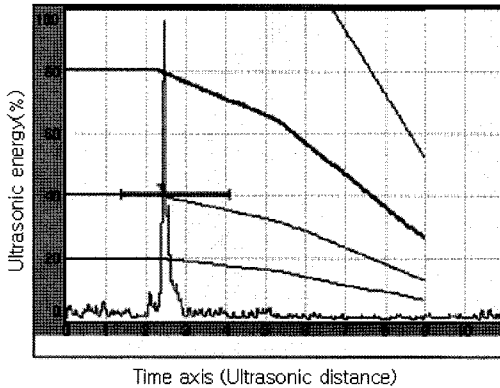


Fig. 10. Ultrasonics signal of titanium welding zone (ø3×3mm).

Fig. 8~10의 결과로부터 기공결함에 대한 초음파 빔의 특성상, 동일 시간축 거리로부터 에코의 강도, 감도, 게이트레벨, 신호 폭 등을 정량적으로 평가하는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서의 결과는 향후 티타늄 용접부의 건전성평가에 새로운 방법이 될 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 용접부의 건전성 평가분야에서 각광을 받는 초음파 신호를 이용하여, 티타늄 용접부 기공결함을 대상으로 건전성 평가에 대하여 연구하였다.

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

1) 세로축을 에코강도, 가로축을 초음파 빔의 진행에 의한 깊이로 하는 시간영역상의 실시간 초음파 신호평가로부터 티타늄 용접부에 존재하는 기공결함평가 기준용 TDACC를 제시하였다.

2) 티타늄 용접부의 결함검출을 위한 대비시험편 및 인공시험편을 제작하였으며, 이에 대한 거리진폭특성곡선과 용접시험편의 주사를 통한 초음파 에코신호의 획득으로부터 TDACC를 작성하기 위한 감도기준과 인공결함을 평가하기 위한 감도기준으로 45dB를 최적의 탐상조건으로 제시하였다.

3) 티타늄 용접부의 인공결함 ø1×3mm, ø1×5mm, ø3×3mm에 대하여 TDACC에 의한 감도기준으로부터 주사하여 거리축 2.5의 위치에 결함검출 초음파에코의 레벨로 60%, 90%, 95%를 제시하였다.

4) 본 연구에서 사용된 티타늄 용접시험편(인공결함 내재)의 두께는 10mm로 초음파 불감대의 영역을 제외한 위치에서도 결함의 검출이 가능함을 확인하였으며, 따라서 두께 10mm 이하의 티타늄 용접부에 대해서도 결함검출의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- 1) 성백섭, 김일수, 김인주, 차영훈, “티타늄재 맞대기 용접부의 개선형상에 따른 잔류응력평가”, 한국정밀공학회 2001년도 추계학술 대회논문집, pp. 290~294, 2001.
- 2) 이용태, 이종형, “티타늄 가공기술”, 청문각, pp. 141~151, 2002.
- 3) Thomas F. Perrone, “Principles of Radio-graphic Film Interpretation of Pipeline Welds”, Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, pp. 1268~1273, 1992.
- 4) 윤인식, 이 원, 정의섭, 유영철, “신경회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가”, 대한기계학회 논문집, 제21권, 제4호, pp. 586~595, 1997.
- 5) 윤인식, 이 원, “산업체 적용을 위한 초음파 검사 기술 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제14권, 제8호, pp. 49~56, 1997.
- 6) 윤인식, 이 원, “초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함검출 분류최적화”, 대한용접학회지, 제16권, 제3호, pp. 192~201, 1998.
- 7) 윤인식, 이 원, 권성태, “어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가”, 한국철도학회지, 제2권, 제1호, pp. 38~46, 1999.
- 8) S. J. Song and L. W. Scherrer, “Ultrasonic Flaw Classification in Weldments Using Probabilistic Neural Networks”, Journal of Non-destructive Evaluation, Vol. 11, pp. 69~77, 1992.
- 9) 윤인식, 박원규, 정의섭, “초음파센서의 거리 진폭특성(DAC)을 이용한 철도레일 용접부의 용접성 평가”, 대한토목학회논문집, Vol. 22 pp. 113~120, 2002.
- 10) 심철무, 주영상, 홍순신, 장기옥, “형상인식을 이용한 압력용기 용접부 결함특성 분류”, 비파괴검사학회지, 제13권, 제2호, pp. 1~18, 1993.