

티타늄 용접부의 용접결함평가를 위한 형상인식 특징추출에 관한 연구

윤 인 식

경기과학기술대학교 메카트로닉스과
(2011. 5. 11. 접수 / 2011. 9. 14. 채택)

A Study on the Feature Extraction of Pattern Recognition for Weld Defects Evaluation of Titanium Weld Zone

In-Sik Yun

Department of Mechatronics, Kyonggi College of Science and Technology
(Received May 11, 2011 / Accepted September 14, 2011)

Abstract : This study proposes feature extraction method of pattern recognition by evaluation of weld defects in weld zone of titanium. For this purpose, analysis objectives in this study are features of attractor quadrant and fractal dimension. Trajectory changes in the attractor indicated a substantial difference in fractal characteristics resulting from distance shifts such as porosity of weld zone. These differences in characteristics of weld defects enables the evaluation of unique characteristics of defects in the weld zone. In quantitative fractal feature extraction, feature values of 0.87 and 1.00 in the case of part of 0.5 skip distance and 0.72 and 0.93 in the case of part of 1.0 skip distance were proposed on the basis of fractal dimensions. Attractor quadrant point, feature values of 1.322 and 1.172 in the case of $\phi 1 \times 3$ mm porosity and 2.264 and 307 in the case of $\phi 3 \times 3$ mm porosity were proposed on the basis of distribution value. The Proposed feature extraction of pattern recognition in this study can be used for safety evaluation of weld zone in titanium.

Key Words : ultrasonic, weld zone, weld defect, pattern recognition, feature extraction, fractal dimension, attractor quadrant

1. 서 론

현재 산업현장에서 일반적으로 많이 사용되는 탄소강, 알루미늄, 스테인리스강과는 다른 특성의 티타늄은 내식성, 인장강도, 비중 등이 우수하여 그 이용이 점점 증가하고 있다.

특히 산업현장에서 사용 중에 있는 대형 플랜트의 티타늄 배관라인은 고온과 강산 등의 가혹한 환경의 지배를 받는 관계로 용접부의 건전성 확보는 반드시 필요한 사항이라 할 수 있다. 그러나 용접공정 중의 많은 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.

티타늄 용접부는 용접 시, 산소, 질소, 수소와의 친화력이 강하다는 점¹⁾을 고려할 경우, 용접결함의

발생가능성이 크다고 할 수 있다.

특히 가동 중에 있는 탱크의 티타늄 용접부는 고온 등의 가혹한 환경 하에 지배를 받는 관계로 결함이 발생하게 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 투과²⁾와 초음파 탐상^{3,4)} 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 어려움 등과 같은 많은 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파에 의한 방법^{5,6)}은 건축·화학·화력·원자력 등과 같은 산업 플랜트에서 건전성 및

안전성 평가방법으로 방사선 투과법 다음으로 많이 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^{7,8)}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 펄스에 코식인 A-Scan의 특성상 형상인식의 특징추출에 대한 어려움으로 인하여 아직까지 해석 및 평가 방법이 제시되고 있지 않은 상태이다⁹⁾.

따라서 본 연구에서는 티타늄 용접부의 용접결함인 기공에 대하여 최단거리에서 원스킵(1.0 skip)거리를 이동하면서 초음파진행거리를 스캔(scan)한 결과로부터 티타늄 용접부의 초음파결함신호를 획득하고, 획득한 신호로부터 프랙탈 차원과 어트랙터 사분면을 구성하여 형상인식 특징추출에 대한 방법을 제시하고자 한다.

2. 프랙탈 이론

프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 연구에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procassia가 제안한 식 (2)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Theta(r - |\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|) \quad (1)$$

여기서, Θ 는 계단함수(step function)이며, $\bar{X}(i)$ 와 $\bar{X}(j)$ 는 i 와 j 번째 어트랙터를 구성하는 점이다. 또한, N 은 데이터의 수, r 은 반지름, 그리고 $|\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|$ 는 두 점사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

또한 $\Theta(t)$ 의 조건으로는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (2)$$

어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이 r 인 구를 그리고 구 내부 점의 수를 구하는 과정을 어트랙터 상의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

어트랙터상의 특성이 결정되는 것으로부터 식 (4)와 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원(v)으로 나타낸다.

$$v = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (3)$$

형상인식 특징 추출을 위하여 프랙탈 차원과 어트랙터 사분면 특징 추출을 위해서는 시계열 신호로부터 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 어트랙터 재구성은 시계열 신호를 위상 공간으로 궤적의 형태로 나타내게 되며, 어트랙터 재구성은 Takens의 지연 방법을 사용하였다. 즉, i 개의 데이터가 주어졌을 때, 식 (1)과 같이 주어지는 m 차원 벡터 $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로써 어트랙터가 재구성된다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 어트랙터상의 사분면 특징을 구할 수 있다.

$$\bar{X}(1) = [x\{1\}, x\{1+\tau\}, x\{1+2\tau\}, \dots, x\{1+(m-1)\tau\}] \quad (4)$$

$$\bar{X}(2) = [x\{2\}, x\{2+\tau\}, x\{2+2\tau\}, \dots, x\{2+(m-1)\tau\}]$$

⋮

$$\bar{X}(i) = [x\{i\}, x\{i+\tau\}, x\{i+2\tau\}, \dots, x\{i+(m-1)\tau\}]$$

여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩 차원(embedding dimension)을, τ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

임베딩 차원을 결정하는데 있어서는 Kennel이 제안한 FNN(false nearest neighbor)을 이용하였다. FNN은 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터 위의 점이 근접점(nearest neighbor point)이지만 임베딩 차원이 한 차원 증가될 경우에는 근접점이 되지 않는 점을 말하며, 임베딩 차원을 증가시키면서 FNN비를 계산하여 FNN비가 0%근처일 때의 임베딩 차원을 찾아 그 시계열 데이터의 임베딩 차원으로 결정한다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 갯수를 줄이고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로써 계산된다. 이렇게 하여 구성된 어트랙터

는 전체 위상공간 내에서 일정한 궤적을 이루게 된다.

3. 실험 및 결과

3.1. 시스템의 구성 및 실험방법

본 연구에 있어서 구성된 시스템은 Fig. 1과 같으며, 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Panametrics사의 EPOCH XT), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 2 MHz, 굴절각 : 45°, 진동자 크기: 8×9 mm), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 초음파 탐상기의 CRT상 및 오실로스코프의 화면상에 나타나는 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같이 티타늄 용접부의 거리별에 대하여 인공 결함(슬릿형 크랙)을 최대 진폭을 기준으로 목돌림(tilting)을 병행하여 스캔하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 오실로스코프상에서 시계열 데이터로 획득하여 결함에 대한 초음파적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

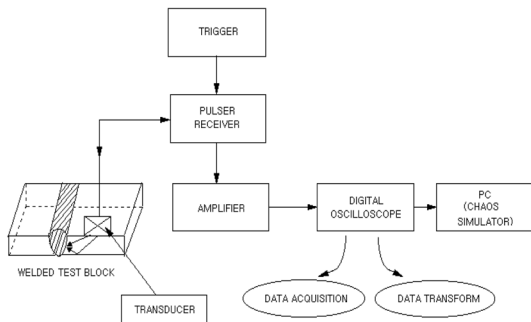


Fig. 1. Schematic of data acquisition and processing.

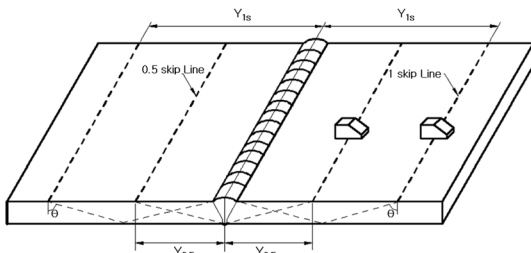


Fig. 2. Schematic of titanium weld zone scan.

3.2. 티타늄 용접부의 결함신호

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코식의 초음파는 결함에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-Scan과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된다.

시뮬레이션에 사용된 시계열 신호는 레일 용접부의 슬릿형 크랙에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 0.5 스킵거리 이내에서 1.0 스킵 거리(Skip Distance) 이내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 10 ns와 100 MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5,000샘플이다.

Fig. 3, Fig. 4는 용접부의 내부에 존재하는 기공 결함에 대하여 결함의 초음파 신호인 에코를 최대한으로 하여 전후 및 목돌림을 한 후, 어트랙터 구성과 사분면상의 특징 추출을 위하여 최대 에코 및 노이즈 레벨을 고려하여 에너지의 크기를 동일하게 기준으로 하여 오실로스코프로 획득한 결함 신호이다.

3.3. 용접결함 특징추출 및 평가

티타늄 용접은 산소나 질소와의 친화력이 커서 용접 시, 대기 중의 산소, 질소 등의 가스와의 반응

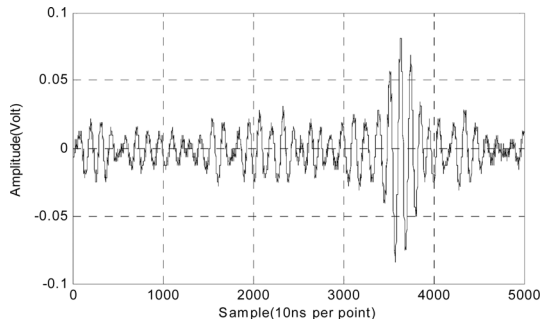


Fig. 3. Defect signal($\phi 1 \times 3$ mm).

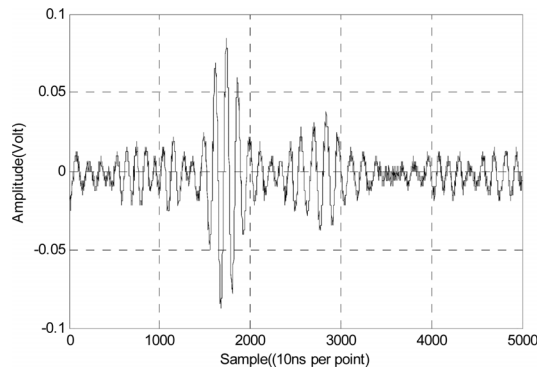


Fig. 4. Defect signal($\phi 3 \times 3$ mm).

하여 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 기공결합 검출 및 이에 대한 형상 인식으로부터 안전성 평가를 하고자 하였으며, Fig. 5, Table 1과 같이 용접시험편(순 티타늄 Grade 2, 두께 10 mm)을 제작하여, 인공결합을 방전 가공하였다.

시계열 신호에 대하여 어트랙터를 재구성 한 후, 특징 추출을 위한 추출 구간을 각각의 데이터에 대하여 5,000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 어트랙터의 사분면 형상, 프랙탈 차원을 구하여 용접 결합의 정량적 특징 추출을 하고자 하였다.

용접 결합 속에 내재되어 있는 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법 중의 하나가 재구성된 어트랙터의 고찰이다. 즉 어트랙터 상의 운동은 추상적이지만 실제계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성, 꼬임은 변화, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다. 따라서 이러한 특징들은 시계열상의 획득데이터인 Fig. 3과 Fig. 4의 샘플링시간에 따른 포인트와 진폭값을 어트랙터상의 분포도와 프랙탈차원 값으로 산출하여 결합의 평가값으로 사용한다.

Fig. 6는 기공결합 ①($\phi 1 \times 3$ mm)을, Fig. 7은 기공결합 ②($\phi 3 \times 3$ mm)를 대상으로 스캔하여 획득한 신호를 어트랙터로 구성한 결과로 두가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 용접 결합에 대한 초음파적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 x축과 y축을 기준으로 한 타원형의 형상이며, 안쪽에서 바깥쪽으로 궤적이 휘돌아나오는 4개의 궤적으로 사분면 포인트는 3사분면에서 최대 1,322, 1사분면에서 최소 1,172로 나타났다.

Fig. 7은 x축과 y축을 기준으로 Fig. 5와는 달리 45도와 225도로 기울어진 타원형의 형상이며, 안쪽에서 바깥쪽으로 궤적이 휘돌아 나오는 3개의 궤적과 엉켜 있는 나머지 궤적으로 3사분면에서 최대 2,264, 4사분면에서 최소 307로 나타났다.

같은 용접 결합이라도 크기에 따라 어트랙터를 비교하였을 경우, 형상과 에너지 변화에 있어서 모

두 커다란 차이를 나타내었으며, 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결합의 크기에 따라 2차원으로 구성된 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터의 궤적 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다. 재구성된 어트랙터의 기하학적 형상은 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 결합 신호의 특성 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 된다. 구성된 어트랙터로부터 프랙탈 특징을 추출하였으며, Table 3은 이러한 결과를 나타낸다. ①의 경우, 0.5스킵거리에서는 0.87, 1.0스킵거리에서는 0.72를 나타내었다. ②의 경우, 0.5스킵거리에서는 1.00, 1.0스킵거리에서는 0.93을 나타내었다.

①과 ②를 비교할 때, ②의 경우가 모두 높은 값을 나타내었으며, 각각의 경우에 있어서는 0.5스킵거리가 1.0 스킵거리보다는 높은 값을 나타내었다.

이상의 결과로부터 초음파 파형만으로 결합에 대한 정량적 평가를 하는 A-Scan의 파형만으로 동일 결합의 크기에 의한 형상 인식이 어려운 점을 고려하면, 프랙탈 값과 어트랙터 사분면 특징추출은 기공의 두 가지 결합에 대하여 티타늄 용접부의 안전성을 확보하기 위한 정밀도 높은 형상인식 특징추출기의 한 방법으로 사용될 수 있다. 다만 본 연구에서의 결과는 기공이 크기 차이에 의한 결과이므로 모든 기공들에 대해서는 기계가공을 할 수 있는 인공결합의 가능정도, 자연결합에 대한 분석, 내외삽에 의한 결과도출 및 평가 등이 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 티타늄 용접부의 용접 결합을 평가하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 초음파 빔거리를 고려하여 어트랙터 사분면과 프랙탈 차원에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

어트랙터 사분면과 프랙탈 차원의 특징추출은 용접 결합의 형상 인식 분류기 구성용 특징 추출을 위하여 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다.

따라서 위상공간상에서 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 초공간 해석에 대한 연구와 사분면 분포도 외에 평가가 가능한 특징 추출법의 개발 등에 대한 부분이 지속적으로 연구되어 보완된다면, 향후 신호해석 및 패턴인식 등의 여러 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

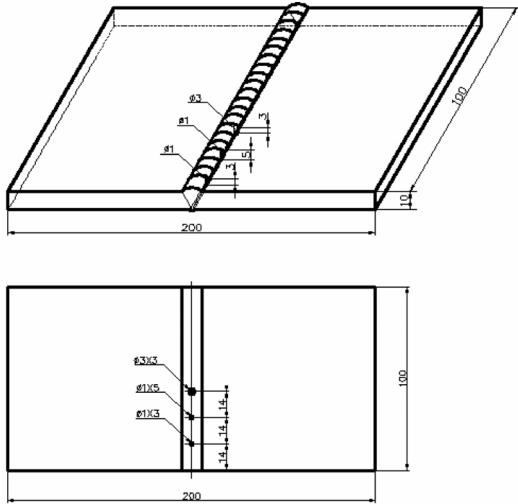


Fig. 5. Titanium welding sample.

Table 1. Configuration of titanium welding sample

결함번호	결함크기	가공형태	가공기준
①	$\phi 1 \times 3$	방전	용접부 중심
②	$\phi 3 \times 3$	방전	

단위: mm

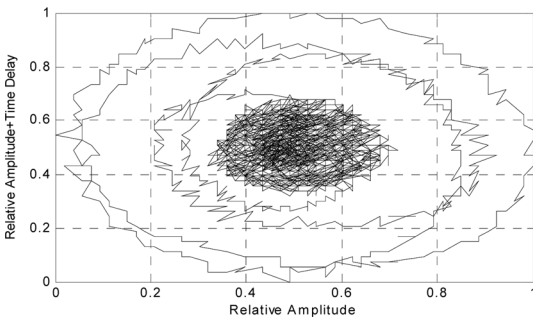


Fig. 6. Two dimensional attractor($\phi 1 \times 3$).

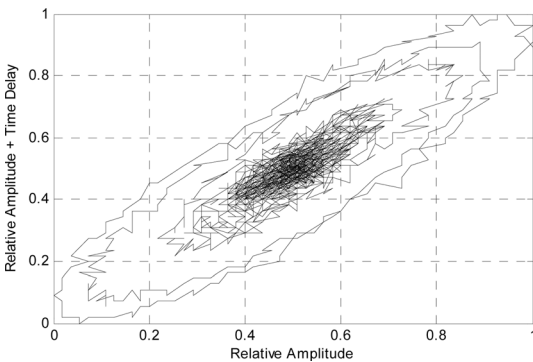


Fig. 7. Two dimensional attractor($\phi 3 \times 3$).

Table 2. Attractor quadrant features

Defects size	Quadrant	One quad.	Two quad.	Three quad.	Four quad.
$\phi 1 \times 3$ mm		1,172	1,246	1,322	1,260
$\phi 3 \times 3$ mm		1,986	443	2,264	307

Table 3. Fractal dimensions for weld defects

Hole size	Distance	0.5 skip	1.0 skip
$\phi 1 \times 3$ mm		0.87	0.72
$\phi 3 \times 3$ mm		1.00	0.93

4. 결론

본 연구에서는 용접부의 안전성 평가분야에서 각광을 받는 초음파 신호를 이용하여, 티타늄 용접부의 기공결함(방전가공)을 대상으로 형상인식 특징추출에 의한 안전성 평가에 대하여 연구하였다. 획득한 초음파 파형으로 어트랙터를 구축한 후, 어트랙터 사분면 특징과 프랙탈 값들로부터 티타늄 용접부에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 티타늄 용접부의 기공결함에 대하여 획득한 초음파 에코 파형의 신호처리 및 평가의 결과로부터 어트랙터 사분면 분포도와 프랙탈을 형상인식 특징추출법으로 제시하였다.
- 2) 티타늄 용접부의 $\phi 1 \times 3$ mm 기공결함에 대한 어트랙터 사분면 분포도에 있어서 3사분면이 최대 1,322, 1사분면이 최소 1,172를 특징 추출 형상인식 값으로 제시하였다.
- 3) 티타늄 용접부의 $\phi 3 \times 3$ mm 기공결함에 대한 어트랙터 사분면 분포도에 있어서 3사분면이 최대 2,264, 4사분면이 최소 307을 특징 추출 형상인식 값으로 제시하였다.
- 4) 티타늄 용접부의 $\phi 1 \times 3$ mm, $\phi 3 \times 3$ mm 기공결함에 대한 프랙탈은 0.5스킵거리에서는 0.87, 1.00을 1.0스킵거리에서는 0.72, 0.93을 특징 추출 형상인식 값으로 제시하였다.

참고문헌

- 1) 이용태, 이종형, “티타늄 가공기술”, 청문각, pp. 141~151, 2002.
- 2) Thomas F. Perrone, 1992, “Principles of Radiographic

- Film Interpretation of Pipeline Welds”, Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, 11, pp. 1268~127, 1992.
- 3) 윤인식, “레일용접부의 건전성평가를 위한 고정밀 초음파진폭특성곡선의 구축”, 산업안전학회지, 제 18권, 제1호, pp. 8~13, 2003.
 - 4) 윤인식, 이종대, “비철금속의 절삭성 평가를 위한 카오스 시뮬레이터의 구축”, 한국안전학회지, 제 18권, 제3호, pp. 22~28, 2003.
 - 5) 윤인식, “레일용접부의 용접결함 검출을 위한 투과주사시스템의 구축”, 한국안전학회지, 제20권, 제1호, pp. 30~35, 2005.
 - 6) 윤인식, 박희동, 이 원, “레일용접부의 건전성평가를 위한 고정밀 초음파진폭특성곡선의 구축”, 한국안전학회지, 제23권, 제4호, pp. 7~12, 2008.
 - 7) 윤인식, 박희동, 이 원, “티타늄의 초음파진폭특성곡선을 이용한 용접결함평가에 관한 연구”, 한국비파괴검사학회 2008년도 춘계학술 대회논문집, pp. 291~293, 2008.
 - 8) 윤인식, 박희동, 이 원, “티타늄의 초음파거리진폭 특성곡선에 관한 연구”, 한국정밀공학회 2008년도 춘계학술 대회논문집, pp. 799~800, 2008.
 - 9) 윤인식, 박희동, 이 원, “초음파거리진폭특성 곡선을 이용한 티타늄 용접부의 기공결함평가”, 한국정밀공학회 2009년도 추계학술 대회논문집, pp. 529~530, 2009.