

레일용접부의 건전성평가를 위한 고정밀 초음파 거리진폭특성곡선의 구축

윤인식

경기공업대학 메카트로닉스과
(2002. 7. 18. 접수 / 2003. 2. 19. 채택)

Construction of High-Precision Ultrasonics Distance Amplitude Characteristics Curve for Integrity Evaluation of Rail Weld Zone

In-Sik Yun

Department of Mechatronics, Kyonggi Institute of Technology
(Received July 18, 2002 / Accepted February 19, 2003)

Abstract : This study proposes integrity evaluation method of weld zone in rails using high precision distance amplitude characteristics curve(DACC) and ultrasonic signals. For these purposes, the ultrasonic signals for defects(porosity and crack) of weld zone in rails are acquired in the type of time series data and echo strength. 6 lines in the DACC indicated damage evaluation standard of weld zone in rails. 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 high precision DACC in this study can be used for integrity evaluation of weld zone in rails.

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

1. 서 론

최근 고속철도시대의 개막을 앞두고 있는 시점에서 철도레일은 장대화과 더불어 레일 용접부의 건전성 확보가 반드시 필요한 사항이라 할 수 있다. 그러나 레일의 설치 시 이루어지는 현장용접에 있어서 공정 중의 여러 가지 변수로 인하여 레일 용접부에는 결함이 많이 발생하게 된다. 따라서 용접 후, 용접부에 존재하는 결함을 검출하고 평가하는 것은 레일의 건전성 및 안전성 측면에서 대단히 중요하다.

최근 저소음화와 고속 주행을 위해 철도레일의 장대화 추진으로 가스 압접과 테르밋 용접으로 레일 하나의 길이가 수 km에 까지 이르게 되었다. 그러나 내부기공, 슬래그 혼입, 융합불량, 균열 등의 결함을 지닌 레일의 용접부는 열차의 반복적인 주행에 의한 피로 메카니즘의 지배를 받게 되어 응력 집중 유발로 파단에 이르게 된다. 특히 레일에 있어

서 테르밋 용접은 일반 아크 용접과는 프로세스가 상당히 다른 주물에 가까운 특성을 갖고 있어 용접부의 결함 발생이 높은 구조로서 취성파괴가 일어나기 쉽다. 따라서 현재 부설중인 철도레일 용접부나 기부설된 철도레일 용접부에 대하여 정량적인 평가가 필요하다 할 수 있다. 이러한 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하기 위하여 현재 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과¹⁾와 초음파 탐상²⁻³⁾ 등과 같은 정량적 탐상평가법을 들 수 있다.

이중에서 방사선 투과(감마선이나 X선을 조사)에 의한 방법은 여러 산업 분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있지만, 방사선 피폭의 위험성, 실시간 결과처리의 불가능 등과 같은 많은 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파(압전체로 발생시킨 20,000Hz 이상의 음파)에 의한 방법⁴⁻⁵⁾은 토목·건축·화학·화력·원자력 플랜트의 건전성 평가방법 중에서 인간

에게 치명적인 피폭 등의 문제점을 갖고 있는 방사선 투과에 의한 방법을 대체하고, 실시간 결과처리의 강점을 갖고 있어 그 위력을 발휘하고 있다. 특히 초음파에 의한 레이 용접부의 건전성 평가⁶⁻⁸⁾는 안전성 확보를 가능하게 함으로서 피로파괴와 같은 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다.

레이 용접 후에 이루어지는 용접성 평가에 있어서 실시간 결과처리 등의 강점을 갖고 있는 초음파 탐상의 정량화는 대단히 중요하며, 이에 대한 국내 및 국외의 동향을 살펴보면, 단편적인 결과나 편의적인 기준설정을 하여 사용하는 등 아직까지 뚜렷한 관련 규격이나 평가기준이 정해져 있지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 용접부의 초음파 탐상평가 기준인 거리진폭특성곡선(DACC-3라인)에 대하여 두부, 복부, 저부 각각의 진폭대 빔진행거리를 변수로 하는 고정밀 DACC(6라인)를 구축함으로써 레이 용접부의 테르트 용접부 용접성에 대한 고정밀 평가기준을 제시하였다.

2. 초음파 이론

고체 내부를 전파하는 음파에는 입자의 진동 방향의 진행 방향과 같은 종파와 파의 진행 방향이 수직인 횡파가 있으며, 전파하는 재료의 종류 및 특성에 따라 음속이 결정된다.

종파의 음속 C_l 과 횡파의 음속 C_s 는 식(1)과 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.

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결함으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용접부 결함을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 횡파 사각법을 적

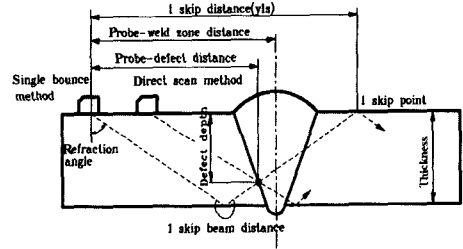


Fig. 1. Schematic of angle beam method

용할 수 있다. 0.5 스킵빔거리내를 기준으로 하는 직사법에 대해서는 삼각 함수의 원리에 의해 다음과 같은 식들을 얻을 수 있으며, 이에 대한 원리는 Fig. 1과 같다.

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

$$y = W \sin \theta \quad (4)$$

$$d = W \cos \theta \quad (5)$$

$$d' = 2t - W \cos \theta \quad (6)$$

여기서 스킵(skip)점이라는 것은 사각 탐상에서 빔중심축이 저면에서 반사하여 탐상면에 도달하는 점을 말하며, 빔거리(W)는 초음파빔이 이동한 거리, 1 스킵 거리(1 skip distance)는 탐촉자의 입사점으로부터 1 스킵점까지의 거리(y/s), 0.5 스킵 거리는 0.5 스킵 점까지의 거리를 말한다. 식(6)은 1회 반사법에 의한 결함 깊이를 나타내는데, 이는 재질내를 진행하는 초음파 빔이 0.5 스킵 빔거리를 넘어가게 되면 판두께를 2배로 가상하여 구하게 되는 거리이다. 따라서 0.5 스킵이내에서는 직사법에 대한 메카니즘의 지배를, 0.5 스킵~1.0스킵내에서는 1회반사법에 대한 메카니즘의 지배를 받게 된다.

3. 실험 및 결과

3.1. 시스템의 구성 및 실험방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Krautkrämer사의 USD-15), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 2MHz, 굴절각: 45°, 진동자 크기:

8×9mm), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 초음파 탐상기의 CRT상 및 오실로스코프의 화면상에 나타나는 결합 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같은 레일 용접부의 두부, 복부, 저부에 대하여 목돌림(tilting)을 병행하여 스캔하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 기준으로 진폭대 빔진행거리와의 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

3.2. 일반 DACC의 작성

용접부에 사용되는 KS기준의 DACC는 일반적으로 Fig. 3의 STB-A1과 Fig. 4의 STB-A2라는 대비시험편을 사용하여 초음파탐상기의 CRT상에 나타내게 된다. DACC를 작성할 경우의 주요한 사항은 아래와 같이 크게 5가지로 요약할 수 있으며, Fig. 5는 이러한 기준에 의하여 작성된 일반 DACC를 나타낸다. 그림에서 가로축은 시간축이고 세로축은 에코축을 나타낸다. 가로축은 125로 하였으며, 세로축은 에코의 강도를 100%로 설정하여 대비시험편들의 반사에코원과의 상관관계를 이용하였다.

(1) STB-A1의 a위치에서 초음파 탐촉자를 스캔하여 100R의 반사에코원을 최대로 한 위치에서 탐촉자의 입사점 위치와 시간축을 결정한다.

(2) STB-A2의 4mm 직경의 홀(hole)을 대상으로 하여 0.5스킵내를 초음파탐촉자로 스캔하면서 반사에코원을 최대로 한 위치에서 마킹한 후, 6 데시벨 간격으로 두 번 반복하여 마킹을 한다.

(3) 0.5 스킵에서 마킹한 후, 1.0스킵내를 초음파 탐촉자로 스캔하면서 반사에코원을 최대로 한 위치에서 마킹한 후, 6데시벨 간격으로 두 번 반복하여 마킹을 한다.

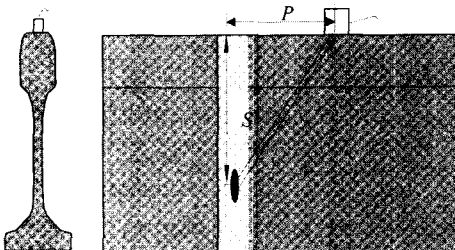


Fig. 2. Schematic of rail weld zone scan

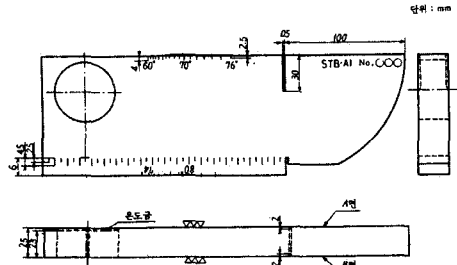


Fig. 3. STB-A1 reference block

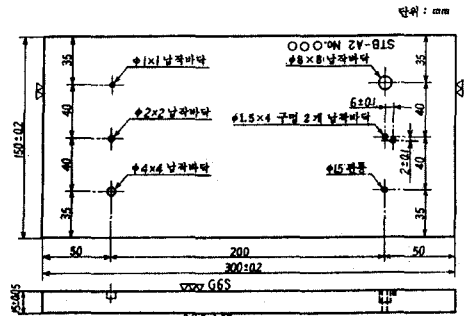


Fig. 4. STB-A2 reference block

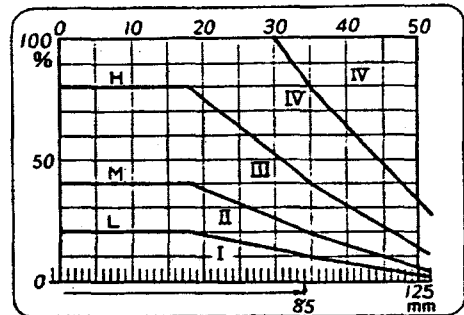


Fig. 5. General DACC

(4) 1.0 스킵에서 마킹한 후, 1.5스킵내를 초음파 탐촉자로 스캔하면서 반사에코원을 최대로 한 위치에서 마킹한 후, 6dB(데시벨) 간격으로 두 번 반복하여 마킹을 한다.

(5) 0.5~1.5 스킵한 전체에 대하여 탐상기의 CRT상에 나타나도록 선형화한다. 이때 1.5 스킵이상의 범위에 대해서는 1.5스킵을 연장한 선상으로 하여 스캔시에 이를 고려하도록 한다.

3.3. 고정밀 DACC의 작성

레일용접부의 정량적 결합검출 및 평가를 위해서는 기준의 설정이 필요하다. 이러한 목적에 맞는 기

준 설정은 Fig. 6과 같은 대비시험편을 이용하게 되며, 대비시험편의 요구특성으로는 초음파빔 진행거리의 변화가 없는 가능한 동일재 또는 유사재에 의한 용접성이 확보되어야 하며, 감도 및 초음파센서의 교정관계도 여기에 포함된다. 따라서 수직과 사각에 의한 레일용접부와 초음파의 상관관계를 우선적으로 파악하는 것이 필요하다.

Table 1은 이러한 특성을 나타내며, 센서타입, 부위, 음속을 측정에 대한 결과이다. 센서타입에서 수직은 약 5,800m/s, 사각은 약 3,000m/s로 나타나는 것은 초음파의 특성상 수직인 종파와 사각인 횡파의 빔 진행에 대한 속도의 차이라고 할 수 있다. 또한 같은 타입의 센서에 있어서도 상면부와 측면부에서 음속이 다르게 나타나는 것은 레일의 가공시 압연의 방향에 따른 미소한 재질특성의 차이로 할 수 있다. 고정밀 DACC의 작성에 있어서 주요한 사항은 아래와 같이 크게 5가지를 들 수 있으며, 이를 기준으로 작성한 고정밀 DACC는 Fig. 7과 같다.

(1) 레일 두부로부터 수직거리 145mm에 표준구멍(가상)을 설정하고, 직사에 의한 에코가 최대가 되는 위치에서 에코 반사율이 60%가 되도록 감도 조절을 한다. 이때의 에코 선단위치를 눈금판 상에 플로트하며, 이때의 감도를 H선에 대한 H기준 감도로 한다.

(2) 계인을 조정하여 설정한 H 기준감도에서 6dB 만큼 감도를 내리고 이때의 에코 높이(에코선단 위치)를 눈금판상에 플로트한다. 또한 6dB감도를 내려 같은 형태로 플로트 한다. 에코 높이가 최소 5%를 넘을 때까지 이를 반복한다.

(3) 탐촉자를 이동하여 (2)에서 설정한 각 감도에 대하여 결합수직거리가 다른 표준 구멍의 직사에 의한 에코 높이를 눈금판상에 플로트한다.

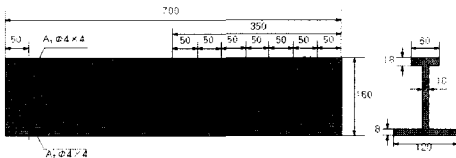


Fig. 6. Reference block for high precision construction

Table. 1. Relationship of rails and ultrasonics

센서 타입	부위	음속
수 직	두부 윗면부	5,822m/s
	옆면부	5,792m/s
사 각	두부 윗면부	2,963m/s
	옆면부	2,868m/s

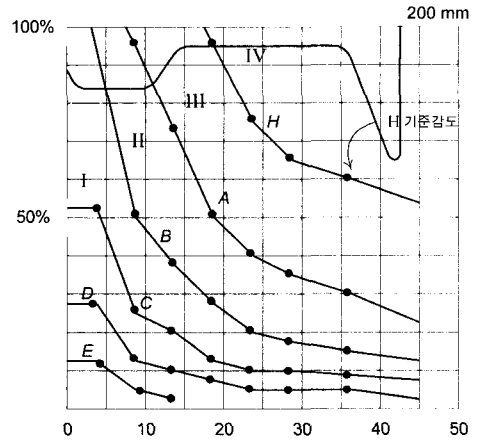


Fig. 7. High precision DACC

(4) 결합 수직 거리가 다른 표준 구멍에 대해 에코 높이의 플롯 점을 각 감도별로 직선으로 연결하여 시간축상 눈금 35이상은 45까지 직선을 연장한다.

(5) 시간축 눈금 8 이내는 8눈금에 대한 에코높이의 플롯 점과 같은 높이의 선으로 한다. H 기준 감도의 선을 H선, H선에서 6dB 낮은 선을 A선, A선에서 6dB 낮은 선을 B선, B선에서 6dB 낮은 선을 C선, C선에서 6dB 낮은 선을 D선, D선에서 6dB 낮은 선을 E선으로 한다.

이상과 같은 기준으로 구해진 곡선들을 종합하여 고정밀 DACC라고 하며, 레일용접부의 결합검출 및 평가의 기준으로 한다.

작성한 고정밀 DACC는 일반 DACC와는 달리 시간축 자체가 레일의 두부면으로부터 초음파 빔진행거리가 되며, 이는 일반 DACC의 0.5스킵~1.5스킵만에 의한 시간축 근사 곡선군과는 다른 2배의 곡선군으로 구성된다. 따라서, 이러한 고정밀 DACC는 3개의 곡선군만에 의한 평가에 비해 정밀도 높은 레일용접부의 건전성평가가 가능하다 할 수 있다.

3.4. 고정밀 DACC에 의한 레일용접성평가

레일 용접부의 건전성 평가를 위해서는 실제의 레일 용접부에서 발생하는 결합에 대한 모델링이 필요하고, 따라서 이러한 목적에 부합되는 감도시험편에 대한 고찰을 위하여 Fig. 8, Table 2와 같은 감도 시험편에 대한 초음파적 특성을 검토하였다. 감도 시험편의 전체 8개 결합들에 대하여 구성한 고정밀 DACC를 이용하여 정량적인 결합의 검출 가능성을 확인하였으며, Fig. 9는 레일저부의 결합에 대한 결과이다.

가로축은 일반 DACC와는 다른 빔의 진행거리인 레일의 깊이이며, 세로축은 반사에코원에 대한 에코 축이다. 우측 세로축의 지시값들은 위 순서별로 감도를 제어하는 게인값, 신호를 평가하기 위한 게이트의 종류, 3개의 지시값(A-START, A-WIDTH, A-THRSH)은 대상신호를 획득하는데 필요한 게이트의 정보이다.

또한 가로축의 하부에 있는 지시값 들은 레일의 깊이방향으로 진행된 초음파 빔과 레일용접부 결합의 상관관계를 나타내는 값들이다. 6dB 높은 탐상 감도로 올려 스캔하면서 결합인지를 확인한 후, 게이트를 설정하여 155.9로부터 전체 정보를 획득하였으며, 에코의 강도가 34%로 판별하는 것은 어렵지 않음을 알 수 있다. Fig. 10은 레일 용접부 두부에 존재하는 결함에 대하여 획득한 초음파신호를 나타냈다. 화면상의 좌측에 에코 강도 100%이상의 신호는 게이트 시작 18mm, 게이트 넓이 40mm, 게이트 높이 18%로 설정하여 획득한 경우로서, 가능한 최대 에코반사율을 얻고자 초음파와 결합의 지향성 및 방향성을 조절하였으며, 탐상감도 6dB를 적용하였다.

감도 시험편 중 레일 저부와 두부에 대하여 샘플링 한 결과와, 6개에 대한 결과(실제 레일 용접시에 나타날 수 있는 형상보다 기준을 높여 가상한 것)들로부터 본 연구에서 제시한 고정밀 DACC의 기준이 대단히 정밀하다는 사실을 알 수 있다.

이상의 결과들로부터 고정밀 DACC의 작성 및 적용을 하여 레일 용접부의 용접성에 대하여 평가하고자 하였다.

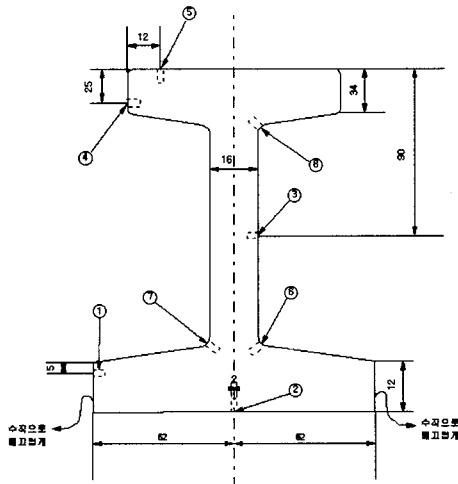


Fig. 8. Sensitivity block for defect detection evaluation

Table 2. Configuration of sensitivity block

결합번호	결합크기	가공형태	가공기준
①	φ3×10	드 릴	용접부 중심
②	가로1×세로5×깊이3	방 전	
③	φ3×5	드 릴	
④	φ3×5	드 릴	
⑤	가로1×세로5×깊이5	방 전	
⑥	φ3×5	엔드밀	
⑦	φ3×5	엔드밀	
⑧	φ3×5	엔드밀	

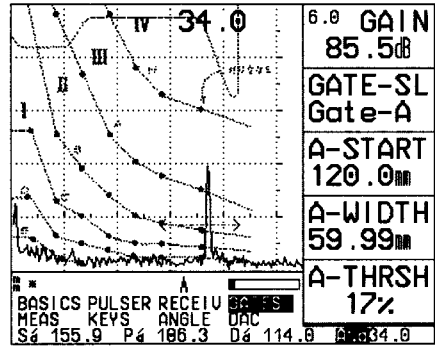


Fig. 9. Ultrasonics signal of rail weld zone(fringe part)

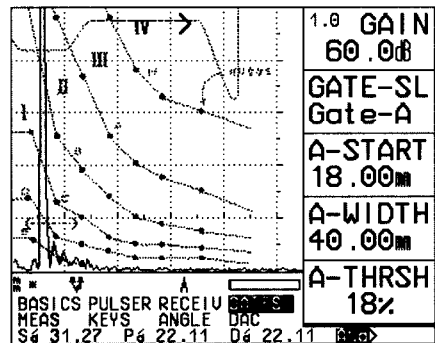


Fig. 10. Ultrasonics signal of rail weld zone(head part)

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 용접부의 용접성평가 분야에서 각 광을 받는 초음파 신호를 이용하여 레일용접부의 두부, 복부, 저부를 대상으로 용접성 평가에 대하여 연구하였다.

초음파 탐상기의 CRT상에 고정밀 DACC 시스템을 구축한 후, 획득한 초음파 신호들로부터 레일용접부의 용접에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 세로축을 에코강도, 가로축을 초음파 빔의 진행에 의한 깊이로 하는 고정밀 DACC를 작성하여 시간영역상의 실시간 초음파 신호평가로부터 레일의 손상도를 평가하는 새로운 방법(6라인형 고정밀 DACC법)을 제시하였다.

2) 레일 용접부의 용접성 평가를 위하여 감도를 제어하는 계인의 변화에 대하여 6dB~3dB를 적용하여 정밀도를 높이는 실용적인 방법을 제시하였다.

3) 대비시험편, 감도시험편, 범용 초음파탐상기로 이루지는 실용적인 고정밀 레일 용접부 건전성 평가 초음파시스템을 새로운 방법을 제시하였다.

4) 레일 용접부에 대한 용접특성상 저부는 센서 스캔범위를 넓히는 차원에서 고분해능형의 소형 초음파센서의 적용이 필요하며, 이에 대해서는 기존 센서와는 크기가 작은 형태의 컴포지트(composite)형 센서의 개발이 필요하다고 생각한다.

참고문헌

1) Thomas F. Perrone, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, 11, pp. 1268~1273, 1992.

2) 윤인식, 이 원, 정의섭, 유영철, "신경회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가," 대한기계학회논문집, 제21권, 제4호, pp. 586~595, 1997.

3) 윤인식, 이 원, "산업체 적용을 위한 초음파검사 기술 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권, 제8호, pp. 49~56, 1997.

4) 윤인식, 이 원, "초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함검출 분류최적화," 대한용접학회지, 제16권, 제3호, pp. 192~201, 1998.

5) 윤인식, 이 원, 권성태, "어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제1호, pp. 38~46, 1999.

6) Song, S. J. and Schmerr, L. W., "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments Using Probabilistic Neural Networks," Journal of Non-destructive Evaluation, Vol. 11, pp. 69~77, 1992.

7) 윤인식, 박원규, 정의섭, "초음파센서의 거리진폭특성(DAC)을 이용한 철도레일 용접부의 용접성 평가," 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-D호, pp. 113~120, 2002.

8) 심철무, 주영상, 홍순신, 장기욱, "형상인식을 이용한 압력용기 용접부 결함특성 분류," 비파괴검사학회지, 제13권, 제2호, pp.1~18, 1993.