

레일용접부의 용접결함검출을 위한 투과주사시스템의 구축

윤인식

경기공업대학 메카트로닉스과
(2004. 10. 18. 접수 / 2005. 1. 25. 채택)

Construction of Through Transmission Scanning System for Weld Defects Detection of Rail Weld Zone

Yun, In Sik

Department Mechatronics, Kyonggi Institute of Technology Mechatronics
(Received October 18, 2004 / Accepted January 25, 2005)

Abstract : This study proposes construction of through transmission for weld defects detection of rail weld zone from 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 distance amplitude characteristics curve (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 construction of through transmission in this study can be used for weld defects detection of rail weld zone.
Key Words : ultrasonic, through transmission scanning, weld zone, integrity, reference block, sensitivity block

1. 서론

2004년 고속철도시대의 개막으로 철도레일의 레일 용접부는 건전성의 검증이 필요하게 되었으며, 따라서 기존의 설치 레일과 향후 설치할 레일의 경우는 그 시험대에 올라 있다 할 수 있다.

특히 레일의 이음 시, 현장용접의 경우는 여러가지 변수로 인하여 레일 용접부에 결함이 많이 발생하게 된다. 따라서 용접의 기준 및 정해진 규칙을 잘 준수하여 용접을 하는 것과 함께 용접 후, 용접부에 존재하는 결함을 검출하고 평가하는 것은 시속 300km를 고속으로 주행하는 레일 전체시스템의 안전성 확보 측면에서 대단히 중요하다.

철도레일의 용접에서 주로 사용되는 테르밋 용접은 방법자체의 특성으로 인하여 슬래그 혼입, 용합 불량, 기공, 균열 등의 결함이 발생하게 되며, 발생된 결함의 진전으로 파단될 경우에는 고속으로 주행하는 열차가 탈선하여 대형사고로 이어질 가능성

이 존재한다.

특히 테르밋 용접을 적용한 레일용접부는 일반 아크 용접과는 프로세스가 상당히 다른 주물에 가까운 특성을 갖고 있어 용접부의 결함 발생이 높은 구조로서 안전성 확보에 대한 적극적인 대책이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 현재 부설중인 철도레일 용접부나 기 부설된 철도레일 용접부에 대하여 엄격하고도 주기적인 정량적 평가가 필요하다 할 수 있다. 이러한 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하기 위하여 현재 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과(1)와 초음파 탐상^{2,3)} 등과 같은 정량적 탐상평가법을 들 수 있다.

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

그러나 초음파에 의한 방법^{4,5)}은 기계·금속·토목·건축·각종 플랜트들의 건전성 평가방법 중에서 인간에게 치명적인 피폭 등의 문제점을 갖고 있

는 방사선 투과에 의한 방법을 대체하고, 실시간 결과처리의 강점을 갖고 있어 그 위력을 발휘하고 있다. 특히 초음파에 의한 레일 용접부의 건전성 평가⁶⁻⁸⁾는 안전성 확보를 가능하게 함으로서 레일용접부의 파단으로 인한 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다.

따라서 본 연구에서는 레일용접부의 용접 후, 건전성 및 안전성 확보를 위한 초음파 탐상 평가에 있어서 기존의 단편적인 결과나 편의적인 기준설정(거리진폭특성곡선의 기준)을 하여 사용하는 등 아직까지 뚜렷한 관련 규격이나 평가기준이 정해져 있지 않은 점을 고려하여 레일 용접부의 초음파 탐상 평가 기준인 두부, 저부에 대한 투과주사 시스템의 구축을 제시하고자 한다.

2. 초음파 이론

용접부 내부의 건전성 및 안전성의 확보를 위해서는 결합의 존재 유무를 평가하는 것이 필요하며, 이에 대하여 초음파의 재질 내 입사를 통하여 내부를 전파하는 음파에는 입자의 진동이 파의 진행 방향과 같은 종파와 파의 진행 방향이 수직인 횡파가 있으며, 전파하는 재질의 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.

결합 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결합으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용접부 결합을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 직사 및 횡파 사각법을 적용할 수 있다. 0.5 스킵거리내를 기준으로 하는 직사법에 대해서는 삼각 함수의 원리에 의해 다음과 같은 식들을 얻을 수 있으며, 이에 대한 원리는 Fig. 1과 같다.

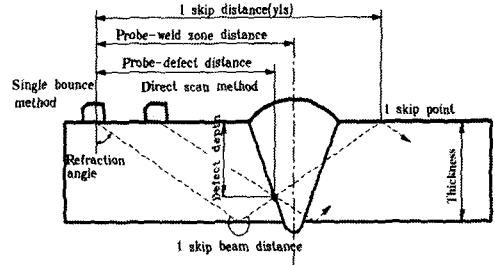


Fig. 1. Schematic of angle beam method

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

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

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

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

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($y1s$), 0.5 스킵 거리는 0.5 스킵 점까지의 거리를 말한다. 식 (6)은 1회 반사법에 의한 결합 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), 결합 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, 저부에 대하여 목돌

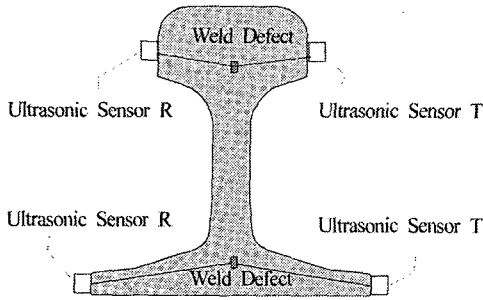


Fig. 2. Schematic of rail weld zone scan

림(tilting)을 병행하여 스캔하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 기준으로 진폭대 빔진행거리와의 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

3.2. 투과주사법의 기준설정

용접부에 사용되는 KS기준의 DACC⁹⁾는 일반적으로 Fig. 3의 STB-A1, Fig. 4의 STB-A2와 Fig. 5와 같은 대비시험편을 사용하여 초음파탐상기의 CRT상에 나타내게 된다. 그러나 투과주사법에서는 펄스에코법과는 달리 초음파빔이 투과하여 주사하게 되므로 DACC를 적용하기는 힘들며, 따라서 결함에 대한 반사원을 에코의 강도 신호로 획득하여 초음파가 결함까지 도달하여 이로부터 되돌아온 시간축(가로축)과 초음파 에너지 강도에 대한 에코축(세로축)의 기준설정이 필요하다고 할 수 있으며, 크게 7가지로 요약할 수 있다.

(1) STB-A1의 슬릿과 홀에 대하여 초음파 탐촉자를 스캔하여 획득 에코원을 최대로 한 위치에서 에코축의 강도를 마킹한다.

(2) 두부에 대하여 시험편 두부 상면의 표준 구멍(A1)으로 부터의 반사 에코 높이가 80%가 되도록 감도 조절을 한다. 이때의 에코 위치는 시간축 눈금 7-8부근이 되며, 이를 기준 감도라 한다.

(3) 저부에 대하여 시험편의 표준 구멍(A2)으로 부터의 반사 에코 높이가 80%가 되도록 감도를 조정한다. 이때의 에코 위치는 시간축 눈금 18 부근이 되며, 이 감도를 기준 감도로 한다.

(4) STB-A2의 4mm 직경의 홀(hole)을 대상으로 하여 초음파탐촉자로 스캔하면서 에코원을 최대로 한 위치에서 에코축의 강도를 마킹한다.

(5) 결함에 대한 위치를 중심으로 초음파센서의 각도를 고려하여 두 센서의 에코 획득원이 최대가 되도록 스캔을 양면에서 잘 조정한다.

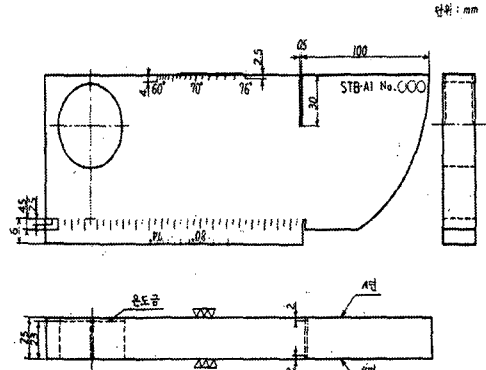


Fig. 3. STB-A1 reference block

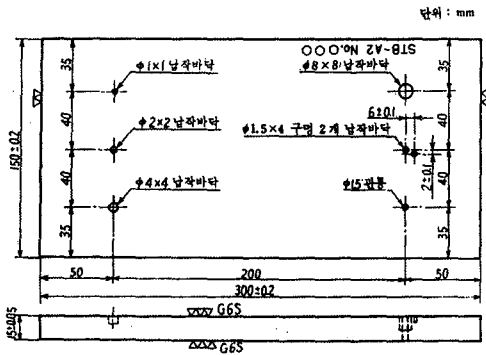


Fig. 4. STB-A2 reference block

(6) 획득한 최대 에코원을 기준으로 6 dB(데시벨) 간격으로 up-down을 하면서 에코의 움직임을 파악하고 이를 마킹 또는 저장한다.

(7) 최대 에코원에서 에코축 강도가 가장 낮아지는 시간축의 범위를 마킹하고 이에 대한 곡선을 주사범위 외의 부분에 선형화를 고려한다.

레일용접부의 정량적 결함검출 및 평가를 위해서는 대비시험편에 내재한 인공결함을 대상으로 하여 결함과 초음파 빔의 진행시간 및 강도와와의 관계를 나타내는 기준의 설정(DACC)이 필요하다. 이러한 목적에 맞는 기준 설정은 Fig. 5와 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.

투과주사식에 의한 결함과 초음파 빔의 상관관계는 펄스에코식의 경우와는 달리 에너지의 강도(초음파 에코)에 변화를 나타내며, 따라서 이에 대한

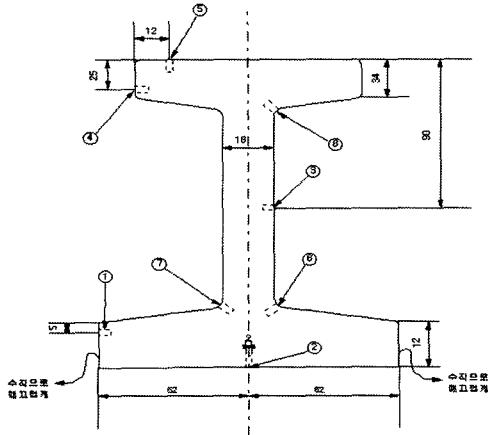


Fig. 5. Sensitivity block for defect detection evaluation

Table 1. Configuration of sensitivity block (단위:mm)

결합번호	결합크기	가공형태	가공기준
①	$\phi 3 \times 10$	드릴	용접부 중심
②	가로1×세로5×깊이3	방전	
③	$\phi 3 \times 5$	드릴	
④	$\phi 3 \times 5$	드릴	
⑤	가로1×세로5×깊이5	방전	
⑥	$\phi 3 \times 5$	엔드밀	
⑦	$\phi 3 \times 5$	엔드밀	
⑧	$\phi 3 \times 5$	엔드밀	

특성을 정량화하는 것이 대단히 중요하며, Fig. 5의 결합 ④와 ①에 대하여 에코 높이가 80%가 되는 위치를 HS와 FS감도로 하고 에코 높이에 따라 크게 4가지로 분류하고자 하였다. 즉 최대 초음파 에코를 기준으로 에코축 상(최대를 100으로 설정)의 10에서 20까지를 제일 낮은 급으로, 두 번째는 20에서 40까지를 두 번째 급으로, 세 번째는 40에서 80까지를 세 번째 급으로, 80이상을 네 번째 급으로 분류하였으며, 이로부터 DAC(초음파 에코 강도를 6dB 간격으로 3개 라인화 한 형상)를 기준으로 하는 펄스에코식에 의한 평가보다 재질내의 산란, 분산, 감쇠 등의 영향을 최소화 하여 초음파 빔의 단거리 진행에 의한 감도 및 분해능의 향상으로 더욱 정밀도 높은 레일 용접부의 건전성평가가 가능하다 할 수 있다.

3.3. 투과주사기준에 의한 레일용접성평가

레일 용접부의 두부와 저부에 대한 건전성 평가를 위해서는 실제의 레일 용접부에서 발생하는 결

함에 대한 초음파적 특성평가가 필요하며, 이를 위해서는 이러한 특성 평가가 가능한 감도시험편에 대한 초음파적 특성 평가 및 고찰을 하여야 한다. 따라서 이를 위하여 Fig. 5의 형상에 대한 시험편과 이 시험편에 대한 Table 2와 특성과의 상관관계로 나타나는 초음파적 특성을 검토하였다. 감도 시험편은 전체 8개 결합들로 구성되며, 이 중에서 복부(③번)를 제외한 두부와 저부를 대상으로 투과주사시스템 구축에 필요한 4가지 등급별의 기준설정 및 정량성에 대하여 평가하고자 하였으며, Fig. 6, 7(Fig. 5의 ②번과 ⑤번 결합에 대한 결과)은 펄스에코식에 의한 결과를, Fig. 8, 9(Fig. 5의 ②번과 ⑤번 결합에 대한 결과)는 투과주사식에 의한 결과이다. 가로축은 초음파 빔의 진행거리인 레일의 길이이며, 세로축은 반사에코원에 대한 에코축이다. 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 정보를 나타낸다. 또한 가로축의 하부에 있는 지시값 들은 레일의 길이방향으로 진행한 초음파 빔과 레일용접부 결합의 상관관계를 나타내는 값들이다. 탐상감도로게이트를 설정하여 155.9로부터 전체 정보를 획득하였으며, 에코의 강도가 34%를 지시하고 있다.

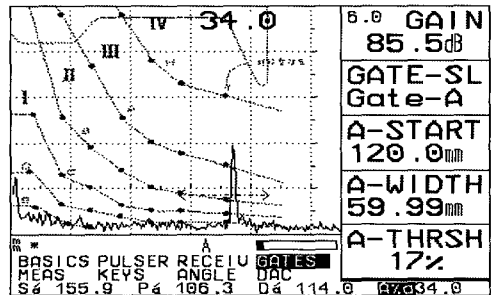


Fig. 6. Ultrasound signal of rail weld zone(flange part)

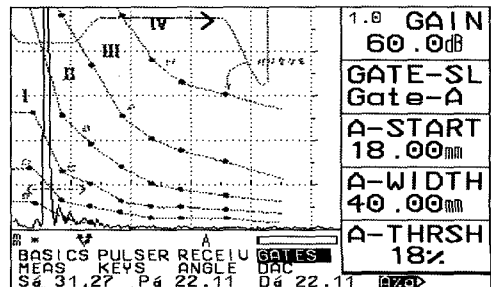


Fig. 7. Ultrasound signal of rail weld zone(head part)

Fig. 7은 레일 용접부 두부에 존재하는 결함에 대하여 획득한 초음파신호를 나타낸다. 화면상의 좌측에 에코 강도 100%이상의 신호는 게이트 시작 18 mm, 게이트 넓이 40mm, 게이트 높이가 18%로 설정하여 획득한 경우이다.

Fig. 8은 투과주사식에 의한 저부결함의 결과를 나타내며, Fig. 6의 화면과 비교할 경우, 에코의 강도를 나타내는 세로축에서 노이즈의 수준(0%를 기준함)이 많이 차이가 나며, 이는 결함에코에 포함된다는 점을 고려할 때, 게인에서 25dB 이상의 차이가 남으로써 판별에 대한 강점을 가질 수 있다. 또한 에코의 강도 측면에서도 거의 두배 정도의 차이를 나타냄을 알 수 있으며, 따라서 의사지시 등에 대한 해석시 대단히 유리하다고 할 수 있다. 다만 동일 위치의 결함에 대하여 초음파 빔의 진행거리 차이에 의한 강도의 차는 있으나 펄스에코식에 의한 거리진폭특성곡선의 적용이 필요하지 않은 점을 고려한다면, 레일용접부의 전체적인 건전성 평가시 해석이 편리하다고 할 수 있다. 에코의 강도가 62%를 지시하고 있으므로 3급으로 판정할 수 있다.

Fig. 9는 두부결함의 결과를 나타내며, 게인 60dB에 에코획득을 위한 기준을 18%로 한 결과, 에코의 강도가 110%를 지시하고 있으므로 4급으로 판정할 수 있다.

Table 2. Grade classification of defects

최대 에코 높이	등급
10%이상~20%이하	1급
20%이상~40%이하	2급
40%이상~80%이하	3급
80%이상	4급

Fig. 8, 9의 결과로부터 결함에 대한 등급분류와 이에 대한 손상도를 고려하여 건전성평가를 하기 위하여 Table 2와 같은 분류와 평가기준을 제시하였다.

Fig. 8과 Table 2에서 3급으로 나타나는 결함에 대해서는 FS 감도기준에 대하여 가로×세로×깊이가 1mm×5mm×3mm를 검출한 경우이며, 직경 3mm의 정량적인 최대 정밀도를 고려할 경우, 이보다 작은 결함에 대해서도 에코 강도 40%이상에 대해서는 3급으로 판정할 수 있다. 또한 Fig. 9와 Table 2에서 4급으로 나타나는 결함에 대해서는 HS 감도기준에 대하여 가로×세로×깊이가 1mm×5mm×5mm를 검출한 경우이며, 이보다 작은 결함에 대해서도 에코 강도 80%이상에 대해서는 4급으로 판정할 수 있다. 다만 두부의 경우는 초음파 빔의 중심이 레일 두부의 표면 하 일정 깊이까지는 존재하여야 한다는 점을 고려하면, 표면직하의 결함들에 대해서는 불감대 영역이라 할 수 있다.

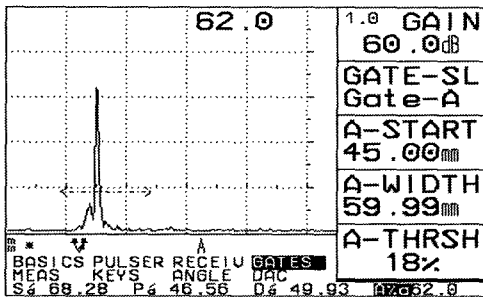


Fig. 8. Ultrasonics signal of rail weld zone(flange part)

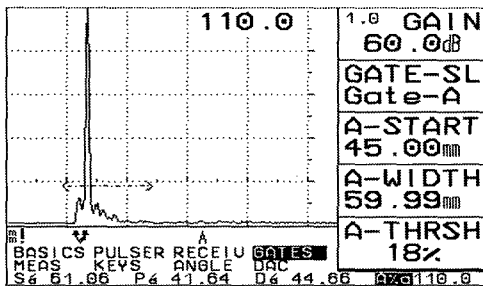


Fig. 9. Ultrasonics signal of rail weld zone(head part)

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 레일용접부의 용접성평가 분야에 있어 각광을 받는 초음파법을 이용하여 레일용접부의 두부, 저부를 대상으로 용접성 평가에 대하여 연구하였으며, 초음파 탐상기의 CRT상(화면상)에 획득한 초음파 신호들로부터 투과주사식에 의한 레일용접부의 용접에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 펄스에코식의 거리진폭특성곡선을 고려하지 않고 획득한 투과주사식 초음파 신호로부터 포인트 시간축 에코를 기준으로 레일용접부의 건전성을 평가하는 새로운 방법을 제시하였다.
- 2) 레일 용접부의 용접성 평가를 위하여 두부와 저부에 대하여 에코 수준 80%의 감도를 기준감도로 하는 기존의 평가법(초음파 에코 강도를 6dB 간격으로 3개 라인화 한 영역 평가방법)과는 다른 새로운 방법을 제시하였다.

3) 초음파 에코 높이를 노이즈 수준을 제외한 10%부터 100%사이에서 4단계로 분류하여 등급을 4단계로 판정하는 레일 용접부 평가 기준안을 새로이 제시하였다.

4) 레일 용접부의 두부에 대해서는 표면 직하 초음파 빔의 지향 특성을 고려하여 불감대 영역처리에 대한 새로운 평가 방법 및 기준의 제시가 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, 이병채, "카오스 특징추출에 의한 용접결함의 초음파 형상 인식", 한국정밀공학회 논문집, 제15권, 제6호, pp. 167~174. 1998.
- 3) 윤인식, 이 원, "프랙탈 해석을 고려한 용접결함의 초음파 형상 인식 최적화에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제22권, 제11호, pp. 1973~1982, 1998.
- 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, "레일 용접부의 용접부의 건전성 평가를 위한 고정밀 초음파진폭특성곡선의 구축", 한국산업안전학회지, 제18권, 제1호, pp. 8~13, 2003.
- 8) Yun In-Sik, Yi Won, "The Defect Detection and Nondestructive Evaluation in Weld Zone of Austenitic Stainless Steel 304 using Neural Network-Ultrasonic Waves", KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 295~306, 1998.
- 9) KS B 0817, "금속재료의 필스반사법에 따른 초음파 탐상시험방법", 한국표준협회, 2002.