

신경회로망을 이용한 철도레일 용접부의 건전성평가

The Integrity Evaluation of weld zone in railway rails Using Neural Network

윤인식¹, 임미섭²

In-Sik Yun, Mee-Seub Lim

Keywords : Neural Network(신경회로망), Ultrasonic Waves(초음파), Integrity evaluation(건전성평가), Time Domain(시간영역), Frequency Domain(주파수영역), Attractor(어트랙터), Side Hole(횡공), Slit Type Crack(슬릿형 균열)

Abstract

This study proposes the neural network simulator for the integrity evaluation of weld zone in railway rails. For these purposes, the ultrasonic signals for defects(crack) of weld zone in frames are acquired in the type of time series data and echo strength. The detection of the natural defects in railway truck is performed using the characteristics of echodynamic pattern in ultrasonic signal. And then their applications evaluated feature extraction based on the time-frequency-attractor domain(peak to peak, rise time, rise slope, fall time, fall slope, pulse duration, power spectrum, and bandwidth) and attractor characteristics (fractal dimension and attractor quadrant) etc. The constructed neural network simulator agrees fairly well with the measured results of test block(defect location, beam propagation distance, echo strength, etc).

The Proposed neural network simulator in this study can be used for the integrity evaluation of weld zone in railway rails.

1. 서론

2005년 개통을 목표로 하고 있는 고속철도는 전체 공정이 진행 중에 있으며, 이중에서도 레일의 건전성 확보는 열차의 안전에 직접적인 영향을 주는 사항으로, 열차의 고속화 등으로 인하여 그 중요성이 더욱 높아지고 있다. 특히 레일 위를 차륜이 통과할 경우, 차륜으로부터 받는 무게에 의하여 레일 용접부의 두부는 수축이 되며, 저부는 연신되어 굽힘에 의한 압축 응력과 인장 응력이 동시에 발생하게 되어, 고탄소강의 성질을 갖고 있는 레일 용접부는 파단의 위험성이 커지게 된다. 따라서 건설 및 보수 후 레일 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대하여

평가하는 것은 레일 전체의 안전성 향상 및 보수·유지 최적화에 필수적이라 할 수 있다. 레일의 설치시 이루어지는 용접에 있어서 작업자의 숙련도, 주변환경 등에 따른 공정중의 여러가지 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 들어서 안락한 철도 여행과 고속 주행을 위해 철도레일의 장대화가 추진되고 있는데, 가스 압접과 테르밋 용접으로 레일 하나의 길이가 수 km에 까지 이르게 된다. 결함을 지닌 레일의 용접부는 열차의 반복적인 주행에 의한 피로 메카니즘의 지배를 받게 되어 쉽게 파손된다. 특히 레일에 있어서 2·3차 용접인 테르밋 용접은 용접의 주류를 이루는 아크 용접과는 프로세스가 상당히 다른 주물에 가까운 특성을

¹ 정회원, 경기공업대학 메카트로닉스과 교수

² 정회원, 경기공업대학 메카트로닉스과 교수

갖고 있어 용접부의 결함 발생이 높은 구조로서 취성 파괴가 일어나기 쉽다. 따라서 현재 부설된 레일의 용접부에서 파손이 자주 일어나는 것이 사실이며, 따라서 용접부에 대한 정량적 비파괴평가가 요구된다. 현재 레일 용접부 내부 결함의 검출 및 평가를 위하여 사용되고 있는 방법으로는 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 들 수 있다.

이중에서 파괴적인 방법은 내부 결함에 대하여 결함의 종류, 크기 등의 모든 정보를 가장 확실하게 알 수 있지만, 사용중의 레일에 대해서는 적용이 거의 불가능한 실정이다. 그러나 비파괴적인 방법은 파괴적인 방법의 적용 시에 가장 문제가 되는 재질의 파손 없이 대상 재질의 상태를 파악할 수 있는 유력한 방법으로 위력을 발휘하고 있으며, 이에는 방사선 투과법과 초음파법을 대표적으로 들 수 있다. 이러한 방법 중에서 방사선에 의한 방법⁽¹⁾은 작업구역 설정으로 다른 작업과의 병행이 어렵고, 필름현상을 하여야만 결과를 파악할 수 있으며, 레일의 두부와 같이 방사선 촬영 대상 부위의 두께가 두꺼울 경우, 이리듬 192로는 촬영 시간의 증가 및 분해능 저하 등의 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파에 의한 방법^{(2)~(4)}은 사용전·중에 실시하는 비파괴검사방법 중에서 체적검사방법으로 그 위력을 더해가고 있다. 특히 용접부에 대하여 A-스캔에 의한 실시간 결과 파악이 가능하고, 다른 작업과의 병행성이 뛰어나며, 작업의 간편성으로 인하여 고속작업이 가능한 등의 장점을 갖고 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 최근에는 형상인식 분야에서 우수성이 입증된 신경회로망을 이용함으로써 결함의 형상까지도 평가할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 윤^{(5)~(7)} 등에 의한 연구가 있다.

따라서 본 연구에서는 테르밋 용접으로 제작한 레일 용접부의 인공 결함(슬릿형 크랙, 횡공)에 대하여 초음파 탐상기의 CRT상과 오실로스코프로상에 나타난 초음파 결함 신호로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 시간영역과 주파수영역상에서의 특징추출과 신경회로망을 구성하여 레일 용접부의 결함에 대한 건전성 평가 가능성에 대하여 제시하고자 한다.

2. 신경회로망 이론

신경회로망은 인간의 뇌에 존재하는 생물학적 신경

세포와 이들의 연결 관계를 단순화시켜 수학적으로 모델링 함으로써 병렬 시스템인 인간의 두뇌와 같은 지능적 형태를 구현하는 것이다. 다층계층형 신경회로망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며, 패턴분류를 위하여 사용된다. 중간층과 출력층은 처리소자와 연결강도를 지니고 있으며, 노드마다의 처리소자는 강도를 곱한 각각의 입력값에 바이어스값을 더해 식(1)과 같은 시그모이드 함수 $f(x)$ 에 의해 출력을 만들어 낸다.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{\theta_0}}} \tag{1}$$

여기서 θ_0 는 활성화함수인 시그모이드 곡선의 형태를 결정하는 형태상수이다. 입력층을 제외한 각 노드에 대한 총입력은 그 전층의 모든 노드의 출력값에 강도를 곱한 값들이다. 즉, k 층의 j 노드에 대한 총 입력은 식(2)와 같이 된다.

$$net_j^k = \sum_{i=1}^m w_{ji}^k o_i^{k-1} \tag{2}$$

여기서 m 은 $(k-1)$ 번째층의 노드수, w_{ji}^k 은 $(k-1)$ 번째층의 i 번째 노드와 k 번째층의 j 번째 노드간의 연결강도, o_i^{k-1} 은 $(k-1)$ 번째층의 i 번째 노드의 출력이다. 따라서 k 층의 j 노드에서의 출력은 식(3)과 같다.

$$o_j^k = \frac{1}{1 + e^{-\frac{net_j^k + \theta_j^k}{\theta_0}}} \tag{3}$$

식(3)에서 계수 θ_j 는 바이어스값이다.

은닉층에서의 노드의 출력을 식(3)으로 계산하고 출력단에서의 출력을 계산한 후, 식(4)와 같이 주어지는 출력단에서의 각 입력패턴에 따라서 발생하는 추정치의 자승오차항을 평균으로 하는 오차 E 를 최소화하는 방향으로 입력과 출력단사이의 연결강도를 수정하는 과정을 반복한다. 일반적으로 출력값은 목표값과 같지 않고, 따라서 평균시스템 오차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (y_i - o_i)^2 \quad (4)$$

여기서 m 은 입력으로 선정된 데이터 패턴수, y_i 는 목표치, o_i 는 출력치이다.

식(4)를 연결강도 w_{ji} 에 대해서 최소화시키는 것은 최속강하(steepest-descent)방법으로 가능하며, 역전파 학습알고리즘을 이용하였다.

$$w_{ji}^k(n+1) = w_{ji}^k(n) + \Delta w_{ji}^k(n) \quad (5)$$

$$\Delta w_{ji}^k(n) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^k} \quad (6)$$

식(5)와 (6)은 단순히 현재의 강도를 최속강하 방향으로 가도록 새로운 강도를 형성하는 것으로 그 정도는 학습을 η 에 의해서 조절된다. η 가 크면 빠른 학습을 가져오나 E 가 net_j^k 에 대하여 복잡한 함수인

경우 발산할 수 있으므로 식(7)과 같은 모멘텀항을 갖는 수정된 학습식이 도입되었다.

$$\Delta w_{ji}^k(n+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^k} + \alpha \Delta w_{ji}^k(n) \quad (7)$$

여기서 α 는 모멘텀율로 ($n+1$)단계에서의 학습 강도 w_{ji} 가 n 번째 단계의 값과 심한 차이를 갖지 못하도록 이전 단계에서 추정된 w_{ji} 를 현단계에서 이용하는 비율을 나타낸다.

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Krautkrämer사의 USD-15), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스플레이 하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 2MHz, 굴절각 : 45°, 진동자 크기: 8×9mm), 접촉매질(글리세린) 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐

촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 초음파 탐상기의 CRT상 및 오실로스코프의 화면상에 나타나는 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 레일 용접부의 두부, 복부, 저부에 인공 결함(슬릿형 크랙 및 횡공)을 기계 및 방전 가공하여 최대 진폭을 기준으로 목돌림(tilting)을 병행하여 스캔하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 오실로스코프상에서 시계열 데이터로 획득하였다. 또한 Fig. 2와 Table 1에서와같은 정량적 인공결함에 대하여 초음파센서를 스캔하면서 초음파적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 결함에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-스캔법과 같은 경우는 시간축과 진폭축 상에 에코의 형태로 나타나게 된다. 시뮬레이션에 사용된 시계열 신호는 레일 용접부의 슬릿형 크랙 및 횡공에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 1.0 스킵 거리(Skip Distance) 이내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 10ns와 100MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5,000샘플이다.

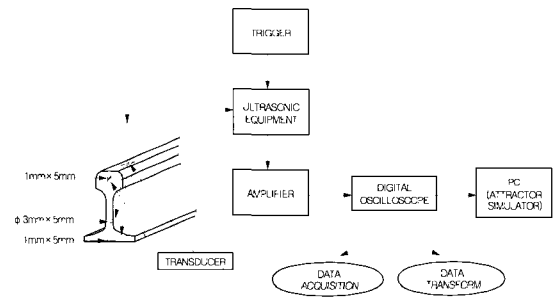


Fig. 1 Data acquisition and process system

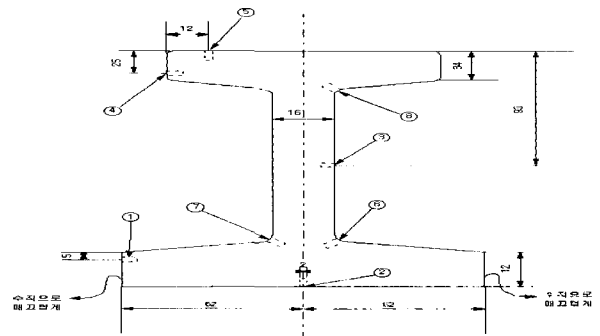


Fig. 2 Test block for defect detection

Table 1 Shape property of test block

(unit:mm)

No.	Defect size	Machining	Standard
①	$\phi 3 \times 10$	Drill	Weld zone center
②	$1 \times 5 \times 3$	EDM	
③	$\phi 3 \times 5$	Drill	
④	$\phi 3 \times 5$	Drill	
⑤	$1 \times 5 \times 5$	EDM	
⑥	$\phi 3 \times 5$	End mill	
⑦	$\phi 3 \times 5$	End mill	
⑧	$\phi 3 \times 5$	End mill	

3.2 영역별 특징 추출

용접부 결함에 대하여 초음파를 이용하여 획득한 신호는 오실로스코프상에 시간 영역상의 파형으로 나타낼 수 있으며, 이러한 파형은 푸리에 변환을 하게 되면 주파수 영역상의 특성을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 각각의 용접 결함에 대하여 시간, 주파수, 어트랙터 영역상의 신호를 대상으로 특징을 추출하였다.

시간 영역상의 대상 특징으로는 상승 시간, 상승 기울기, 피크 대 피크, 하강 시간, 하강 기울기, 펄스 폭 등의 6개 특징을, 주파수 영역상에서는 파워 스펙트럼과 대역폭 등의 2개 특징을 추출하였으며, 구체적인 추출 성분 및 방법은 Fig. 3과 같다.

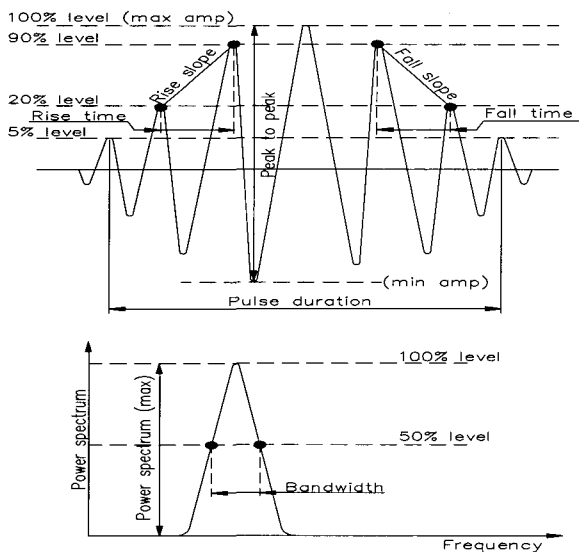


Fig. 3 Feature extraction of time and frequency domain

시간 영역상의 특징 추출에 있어서는 획득한 전체 결합 신호를 기준으로 잡음 수준(noise level)을 고려하여 임계값을 설정하였다. 펄스 폭에 대하여는 최대 진폭을 기준으로 5% 수준을, 상승 및 하강 관계에 대해서는 20%와 90% 수준을, 피크 대 피크에 대해서는 100% 수준으로 설정하였다.

3.3 신경회로망에 의한 초음파형상인식 평가

신경회로망은 몇 개의 샘플 데이터를 학습하여 미학습의 데이터에 대한 입력 정보로부터 출력 정보를 추출하는 시스템이다. 본 연구에서는 초음파 신호를 데이터로 하여 결합 분류 시스템을 구성하였으며, Table 2는 학습을 위하여 구성한 신경회로망의 구조, Table 3은 결합을 인식하도록 지정한 패턴을 나타낸다.

Table 2 Architectures of neural network for learning

Parameters	Structure
Number of input units	7~10
Number of hidden units	20
Number of output units	2
Number of hidden layers	1
Learning rate(η)	0.7
Momentum rate(α)	0.9
Shape factor(θ_0)	1.0

초음파 신호 해석의 최적화를 위해서는 주어진 패턴에 대하여 결합의 특성을 대표하는 특징을 선별하는 것이 중요하며, 시간 영역상, 주파수 영역상, 어트랙터로부터 추출한 총 10개 특징들의 학습 및 테스트 세트에 대하여 인식율의 결과를 기준으로 선정하였다.

Table 4는 특징 선택을 위하여 구성한 시스템을 나타내며, Fig. 4는 슬릿형 크랙에 대하여 실제로 획득한 데이터를 나타낸다.

각각의 특징을 1개의 시스템으로 구성하여 전체 12개의 시스템으로 시뮬레이션 한 결과, Fig. 4와 같이 A 시스템은 2종류의 결함에 대하여 전체적으로 69.9%의 인식율을, B 시스템은 69.9%의 인식율을, C-I 시스템은 거의 60%의 인식율로 나타났다. 시뮬레이션한 A~I 시스템중에서 피크 대 피크를 완전히 제외한 A, B 시스템의 경우가 인식율이 가장 높으며, 피크 대 피크가 포함된 경우에는 거의 51%의 인식율로 낮게 나타났다. 따라서 이러한 결과로부터 피크 대 피크는

패턴 인식용 특징으로는 적합치 않음을 알 수 있다.

Table 3 Relation of defects and defect shape

Defect	Defect type
Side hole	1
Slit type crack	2

Table 4 System construction of feature extraction

Type of system	Domain	Application feature	Exclusion feature	Total features
A system		8 features	not	8
B system	• time	7 features	peak-peak	8
	• frequency			
C~I system		7 features	1 feature each among 8 features	8
J system	• time	8 features	7 features+attractor quadrant	10
K system	• frequency	8 features	7 features+fractal dim	10
L system	• attractor	9 features	7 features+attractor quadrant+fractal dim	10

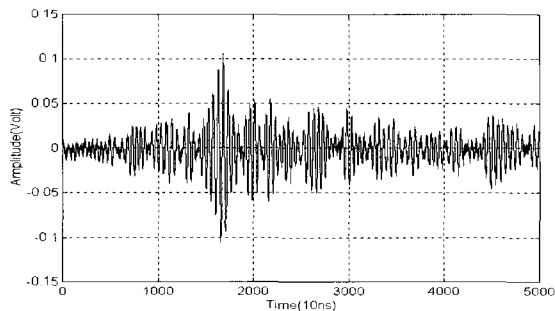


Fig. 4 Defect signal for head part (slit type crack)

테스트 대상 시스템으로는 어트랙터 특성을 고려한 J, K, L 시스템으로 하였으며, 테스트에 대한 전체 패턴 중에 횡공의 경우는 세 패턴이 에러로, 슬릿형 균열의 경우는 네 패턴이 에러로 처리되었다. 에러로 처리된 패턴들은 전반적으로 목표값과는 커다란 차이를 나타내었으며, 특히 슬릿형 균열의 경우는 인식율이 50% 대의 패턴도 존재하였다. K시스템의 경우는 횡공에 대해서는 J 시스템과 비교하여 같은 인식율을

나타내었지만, 슬릿형 균열보다 높은 인식율의 향상을 나타내었다. 또한 L 시스템의 경우도 J 시스템의 경우와 비교할 때, 횡공의 경우는 두 개, 슬릿형 균열의 경우는 한 개의 인식율 향상을 나타내었으며, 전체적인 인식율의 결과는 Fig. 6과 같다.

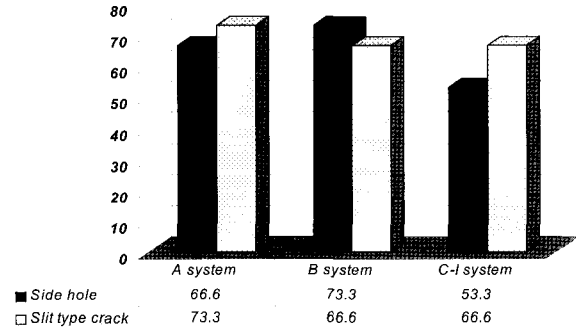


Fig. 5 Simulation results of time and frequency domain

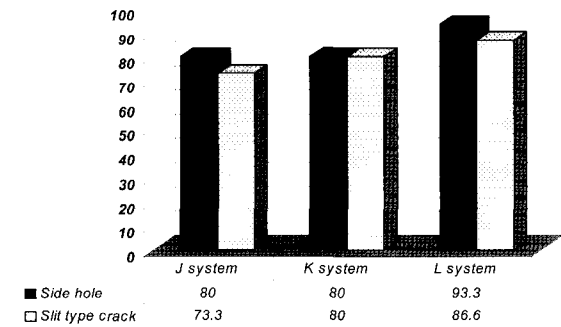


Fig. 6 Simulation results of attractor domain

이상의 결과로부터 시간 영역상과 주파수 영역상의 추출 특징을 적용하는 경우보다는 시간 영역상과 주파수 영역상에서의 적합한 특징을 선택한 후, 어트랙터의 특성을 나타내는 사분면 특징과 전체 데이터에 대한 직선 기울기를 나타내는 프랙탈 차원을 조합하여 적용한 경우가 레일용접부의 결함에 대한 형상인식 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

다만 본 연구에서 제시한 어트랙터 특성을 이용한 방법은 실무적인 차원에서는 현재의 시간-주파수 영역상의 방법보다 적용상의 번거로움, 예를 들면 어트랙터 시스템의 구성에 걸리는 시간 및 후처리 등의 시스템 링크화와 같은 분야에서 보완이 필요하다고 할 수 있으며, 따라서 이에 대한 연구가 이루어져야

할 것으로 생각한다.

6. 결 론

본 연구에서는 형상인식의 평가에 각광 받는 신경회로망을 이용하여 철도레일 용접부의 건전성에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 철도레일 용접부의 건전성평가를 위한 평가기로서 초음파신호를 시계열데이터로 획득하여 처리한 결과로부터 신경회로망을 적용하여 결함의 형상인식을 평가하는 방법을 새로이 제시하였다.

2) 획득한 초음파 결함 신호에 대하여 초음파 신호인식을 위한 적합한 특징 선택을 한 결과, 피크 대 피크는 시스템의 현저한 인식을 저하를 나타내는 부적합한 특징임을 확인하였다.

3) 시간 영역상과 주파수 영역상의 적합한 특징 선택을 한 후, 어트랙터 특성을 포함시켜 조합한 경우를 가장 우수한 신호 인식 정밀도 향상 방법으로 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Thomas, F. P., "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," Materials Evaluation, Vol.50, No.11, pp.1268~1273, 1992.
2. 윤인식, "초공간을 고려 한 SA508 강의 재질열화 시계열 신호의 카오스성 평가," 대한용접학회지, 제16권, 제6호, pp.537~547, 1998.
3. Yun In-Sik, "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.
4. 윤인식, 권성태, "초음파 파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성 평가," 한국철도학회, 제2권, 제3호, pp.77~83, 2000.
5. 윤인식, 권성태, 박덕신, "초음파 파면해석에 의한 대차 프레임의 건전성평가," 한국철도학회 2000년 추계 학술대회 논문집, pp.461~467, 2000.
6. 윤인식, 권성태, "어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제1호, pp.38~46, 1999.
7. 윤인식, 권성태, "위상공간-주파수해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가," 한국철도학회지, 제2권, 제2호, pp.21~30, 1999.