

# 초음파메카트로닉스시스템과 어트랙터를 이용한 레일 용접부의 결함 평가

## Defect evaluations of weld zone in rails using ultrasonic-mechatronics system and attractor

윤인석\*, 한준영\*\*, 장철섭\*\*, 박성두\*\*\*, 고준빈\*\*\*\*, 황영택\*\*\*\*\*, 오승규\*\*\*\*\*, 이 원\*\*\*\*\*

\*경기공업대학 메카트로닉스과, \*\*인천기능대학 산업설비과, \*\*\*천안공업대학 용접기술과,  
\*\*\*\*충남대학교 기계과, \*\*\*\*\*삼척산업대학교 정밀기계과, \*\*\*\*승실대학교

### 1. 서론

레일의 건전성은 열차의 안전에 직접적인 영향을 주는 부분으로, 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, 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ) 등에서 파단 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.

현재 레일 용접부 내부결함의 검출 및 평가를 위하여 사용되고 있는 최적의 방법으로는 초음파법을 들 수 있으며, 이러한 초음파에 의한 방법<sup>1),2)</sup>은 사용전·중에 실시하는 비파괴검사방법 중에서 체적검사방법으로 상당히 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 용접부의 정량적 결함검출을 가능하게 함으로써 피로파괴와 같은 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 최근에는 형상인식 분야에서 우수성이 입증된 어트랙터 해석(Attractor Analysis)을 이용함으로써 결함의 형상까지도 평가할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 윤<sup>3)~6)</sup> 등에 의한 연구가 있다.

따라서, 본 연구에서는 테르밋 용접으로 제작한 레일 용접부의 인공결함(슬릿형 크랙, 횡공)에 대하여 초음파 탐상기 CRT상의 거리진폭특성곡선과 오실로스코프로상에 나타난 초음파 결함 신호로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 어트랙터 상의 사분면 특징 4개를 구하여 레일 용접부의 부위별(두부, 복부, 저부)결함에 대한 초음파적 특성 및 형상 해석의 결과로부터 구성한 초음파메카트로닉스 시스템과 어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 건전성 평가 가능성에 대하여 제시하고자 한다.

### 2. 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Krautkrämer사의 USD-15), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결함신호를 수신하는 횡과 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 결함신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 1과 같이 레일 용접부의 두부, 복부, 저부에 인공결함(슬릿형 크랙 및 횡공)을 기계 및 방전가공하여 최대

진폭을 기준으로 스캔(scan)하면서 초음파 탐상기의 CRT 상에 나타난 최대 진폭 에코를 오실로스코프 상에서 시계열 데이터로 획득하여 결함에 대한 초음파적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

레일 용접부의 정량적 결함검출을 위해서는 검출기준의 설정이 필요하다. 이러한 목적에 맞는 기준 설정은 대비시험편을 이용하게 되며, 감도 및 탐촉자의 교정관계도 여기에 포함된다. 결함 수직거리 100mm인 표준구멍의 직사에 의한 에코가 최대가 되는 위치에서 에코 높이가 50~70%가 되도록 감도 조정을 한 후, 결함 수직 거리가 다른 표준 구멍에 대해 에코 높이의 플롯 점을 각 감도별로 직선으로 연결하여 연장한다. 또한, 시간축 눈금 5 이내는 5 눈금의 에코 높이의 플롯 점과 같은 높이의 선으로 한다. H 기준 감도의 선을 H선, H선에서 3dB 낮은 선을 A선, A선에서 3dB 낮은 선을 B선, B선에서 3dB 낮은 선을 C선, C선에서 3dB 낮은 선을 D선, D선에서 3dB 낮은 선을 E선으로 한다. 이렇게 하여 구해진 Fig. 2와 같은 곡선군을 거리진폭특성곡선이라고 하며, 레일 용접부의 결함검출기준으로 설정하였다.

시계열 신호에 대하여 어트랙터를 재구성 한 후, 특징 추출을 위한 추출 구간을 각각의 데이터에 대하여 3,000 샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 어트랙터의 사분면 형상을 구하여 어트랙터에 의한 용접결함의 정량적 특징 추출을 하고자 하였다.

어트랙터 특징 추출의 가장 첫 번째 단계로서 어트랙터의 형상과 시스템의 특성을 결정짓는 임베딩 차원을 구하는 것이 중요하며, 프랙탈 차원을 설정하기 위해서는 최적의 시간지연과 최소 임베딩 차원의 설정이 중요하다.

최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, 횡공결함에 대한 초음파 결함신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

용접결함 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.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 용접부의 횡공과 슬릿형 크랙에 대하여 스킵 거리별로 scan 하여 2차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000 샘플 중에 결함신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3,000샘플씩을 적용하였으며, 세가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 용접결함에 대한 초음파적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다.

두부와 저부(크랙)의 경우가 복부(횡공)보다 어트랙터에 대한 궤적 변화가 현저하게 많으며, 에너지의 특성도 차이를 나타내었다. 또한 같은 용접결함(크랙)인 두부와 저부에 대한 어트랙터를 비교하였을 경우, 형상과 에너지 변화에 있어서 모두 커다란 차이를 나타내었으며, 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결함의 종류에 따라 2차원으로 구성된 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관관계에 의한 어트랙터의 궤적 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

Table 1은 어트랙터 사분면 특징 추출을 한 결과로서, 위상 공간상으로 재구성한 어트랙터에 대하여 각각의 축을 어트랙터 상의 중심으로 이동하여 사분면 상의 점들을 counting 하였다. 1사분면을 기준으로 하였을 경우에는 복부가 가장 많이 분포되어 있었으며, 2사분면의 경우는 저부가, 3사분면의 경우는 두부가, 4사분면의 경우는 저부가 가장 많은 분포를 형성하고 있었다.

따라서, 어트랙터의 특징을 이용함으로써 레일 용접부 결함신호에 대한 시간 영역상(time domain)에서의 해석의 어려움을 해결할 수 있으며, 정량적으로 평가하는 것이 가능하다.

이상에서의 고찰 결과로부터 용접부의 횡공과 크랙에 대한 초음파 결합 시계열 데이터는 결합이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 어트랙터의 특성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 레일 용접부의 용접결합을 평가하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 최대 진폭의 50%를 고려하여 어트랙터 특징 추출에 의한 정량적이고도 정밀도가 높은 해석을 하고자 하였다.

어트랙터 해석은 저자들이 카오스 이론 중에 포함되어 있는 프랙탈 차원 평가 부분을 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 현재 세계적으로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 우리나라에서도 여러 공학분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다.

따라서 현재의 어트랙터 이론이 갖는 정성적 부분인 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 푸앙카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구와 임베딩 차원, 시간지연에 관계되는 파라미터 설정의 최적화 등에 대한 부분이 지속적으로 연구되어 보완된다면, 향후 21세기에는 비선형 공학해석의 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 최근 용접부 결합평가에 각광 받는 어트랙터 해석을 이용하여 레일 용접부의 횡공 및 슬릿형 크랙 결합을 대상으로 시계열 초음파 결합신호의 해석에 대하여 연구하였다. 프랙탈성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 고유 특징인 초공간적 어트랙터의 사분면에 대한 분포도의 형상을 구하였다. 이렇게 구한 형상들로부터 용접부의 초음파 결합신호에 대하여 정량적이면서 정밀도가 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 레일 용접부의 결합 평가 및 건전성을 평가할 수 있는 거리진폭특성곡선(DAC)의 기준과 결합과의 상관성을 나타내는 초음파특성기준을 제시하였다.
- (2) 전체 파형을 고려한 초음파 결합신호(횡공과 크랙)에 대하여 어트랙터 재구성에 의한 2차원 어트랙터로부터 각각의 사분면 점들을 counting 하는 새로운 특징 추출 방법을 제시하였다.
- (3) 어트랙터의 궤적을 기준으로 같은 종류의 결합이라도 위치 변화에 따른 현저한 궤적 변화를 나타내었으며, 이러한 차이로부터 용접부 결합의 고유특성을 평가할 수 있다.
- (4) 어트랙터의 형상을 결정짓는 사분면 특징 추출에서는 1사분면의 경우는 복부(1229)가, 2사분면의 경우는 저부(305)가 가장 높은 분포도를 형성하였다.

#### 참고문헌

- (1) 고준빈, 윤인식, “초공간을 고려한 SA508 강의 재질열화 시계열 신호의 카오스성 평가,” 대한용접학회지, 제16권, 제6호, pp.537~547, 1998.
- (2) 윤인식, 이 원, “산업체 적용을 위한 초음파 검사 기술 개발에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제14권, 제8호, pp.49~56, 1997
- (3) 윤인식, 이 원, 이병채, “카오스 특징 추출에 의한 용접 결합의 초음파 형상 인식,” 한국정밀공학회지, 제15권, 제6호, pp.167~174, 1998
- (4) 윤인식, 이 원, “초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결합 검출 분류 최적화,” 대한용접학회지, 제16권, 제3호, pp.192~201, 1998
- (5) 윤인식, 고준빈, 박성두, “레일 용접부의 결합 검출을 위한 어트랙터의 구성 및 해석에 관한 연구,” 대한용접학회지, 제18권, 제5호, pp.617~623, 2000.
- (6) 윤인식, 권성태, 장영권, 정우현, 이찬석, “위상공간-주파수해석을 이용한 레일 용접부의 결합 평가,” 한국철도학회지, 제2권, 제2호, pp.21~30, 1999.

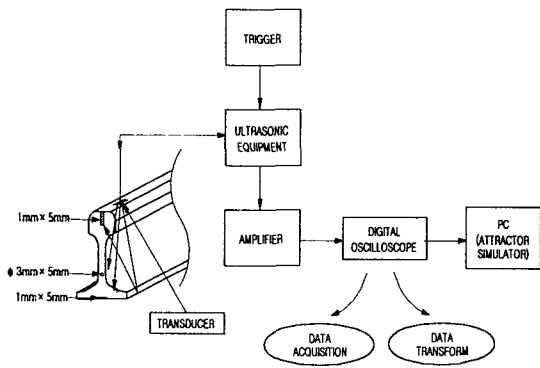


Fig. 1 Schematic of data acquisition and processing

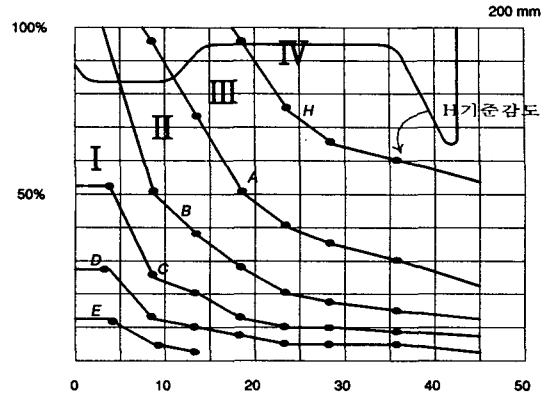


Fig. 2 The constructed DAC curve

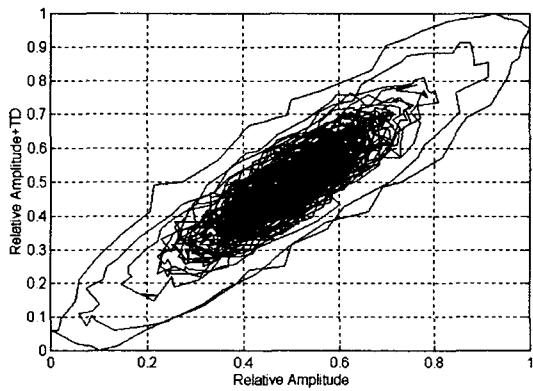


Fig. 3 Attractor reconstruction for part of head signal (crack)

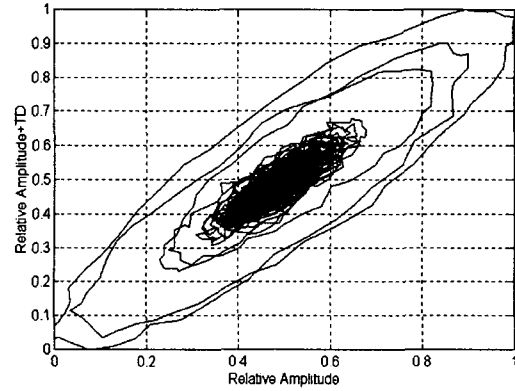


Fig. 4 Attractor reconstruction for part of web signal (side hole)

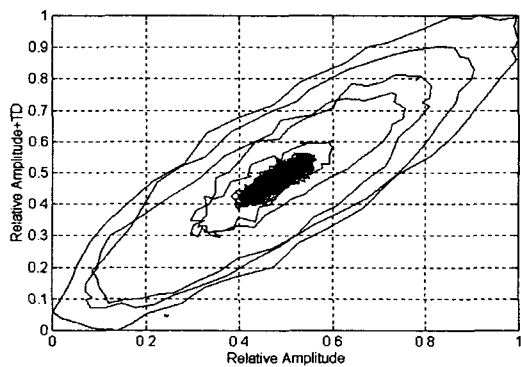


Fig. 5 Attractor reconstruction for part of flange signal (crack)

Table 1 Attractor quadrant features for weld defects

Part \ Quadrant	One quad.	Two quad.	Three quad.	Four quad.
Part of head(point)	1,202	256	1,282	260
Part of web(point)	1,229	262	1,243	266
Part of flange(point)	1,151	305	1,238	306