

레일 용접부의 결함 검출을 위한 어트랙터의 구성 및 해석에 관한 연구

윤인식* · 고준빈** · 박성두***

* 대한검사기술(주)

** 충남대학교 기계공학과 대학원

*** 천안공업대학 용접기술과

Defect Evaluations of Weld Zone in Rails Using Attractor and Distance Amplitude Characteristics Curve

In-Sik Yun*, Jun-Bin Ko** and Sung-Du Park***

*Korea Inspection & Engineering Co., Ltd., Seoul 137-060, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University Graduate School, Taejon 306-764, Korea

***Dept. of Welding Technology, Chonan National Technical College, Chonan 330-245, Korea

Abstract

This study proposes the analysis and evaluation method of time series ultrasonic signal using the attractor analysis. Features extracted from time series signal analyze quantitatively characteristics of weld defects. For this purpose, analysis objective in this study is fractal dimension and attractor quadrant feature. Trajectory changes in the attractor indicated a substantial difference in fractal characteristics resulting from distance shifts such as parts of head and flange even though the types of defects are identified. 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 3.848 in the case of part of head(crack) and 4.102 in the case of part of web(side hole) and 3.711 in the case of part of flange(crack) were proposed on the basis of fractal dimensions.

Proposed attractor analysis and DAC in this study can enhance the precision rate of ultrasonic evaluation for defect signals of rail weld zone such as side hole and crack.

(Received May 17, 2000)

Key Words : Attractor, Distance amplitude characteristicscurve, Ultrasonic waves, Rail weld zone, Time delay, Embedding dimension

1. 서 론

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 상부는 수축이 되며, 하부는 연신되어 굽힘에 의한 압축 응력과 인장 응력이 동시에 발생하게 되어, 열영향부(Heat Affected

Zone : HAZ) 등에서의 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 내부 결함의 검출 및 평가를 위하여 사용되고 있는 방법으로는 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법을 들 수 있다. 이 중에서 파괴적인 방법은 내부 결함에 대하여 크기, 위치, 종류 등의 모든 정보를 가장 확실하게 알 수 있지만, 사용 중의 레일에 대해서는 적용이 거의 불가능한 실정이다.

그러나, 비파괴적인 방법은 파괴적인 방법의 적용시 가장 문제가 되는 재질의 손상 및 파손없이 대상 재질의 상태를 파악할 수 있는 유력한 방법으로 위력을 발휘하고 있으며, 이에는 방사선 투과법과 초음파법을 대표적으로 들 수 있다. 방사선에 의한 방법¹⁾은 인간에게 피폭을 주게 되며, 실시간 결과 처리가 어렵고, 레일의 상부와 같이 방사선 촬영 대상 부위의 두께가 두꺼울 경우, 이리듬 192로는 촬영 시간의 증가와 함께 분해능 저하 등의 문제점을 내포하고 있다. 그러나, 초음파에 의한 방법^{2,3)}은 사용 전과 중간에 실시하는 비파괴검사방법 중에서 체적검사방법으로 상당히 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 용접부의 정량적 결함 검출을 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, 이^{4,5)} 등에 의한 연구가 있다.

어트랙터에 의한 방법은 전체 파형으로부터 신호가 갖는 고유의 성질을 시계열 데이터로 하여 계의 상태 공간 내에 내재한 특성을 평가하게 되며, 이러한 특성을 파악하고, 해석하는 어트랙터 특징 추출로부터 용접부의 형상 인식에 대한 평가가 가능하다.

특히, 이⁶⁾ 등에 의한 인간 심박 변화율의 연구와 김⁷⁾ 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸에 대한 어트랙터의 평가는 생체역학 분야와 공구 마멸의 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 어트랙터로부터의 특징 추출은 전체 파형의 평가에 있어서 강점을 갖고 있지만 생체 분야 및 특정 공학 분야 외에는 적용이 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 테르밋 용접으로 제작한 레일 용접부의 인공 결함(슬릿형 크랙, 횡공)에 대하여 초음파 탐상기 CRT상의 거리진폭특성곡선과 오실로스코프상에 나타난 초음파 결함 신호로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 어트랙터 상의 사분면 특징 2개와 공간상의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원을 추출하여 레일 용접부의 부위별(상부, 중간부, 하부)결함에 대한 초음파적 특성 및 형상 해석의 결과로부터 어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 건전성 평가 가능성에 대하여 제시하고자 한다.

2. 어트랙터 재구성

어트랙터 특징 추출을 위해서는 시계열 신호로부터 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 임베딩 차원과

시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 어트랙터상의 사분면 특징을 구할 수 있다.

어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상 공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens의 지연 방법(8)을 사용하였다. 즉, i 개의 데이터가 주어졌을 때, 식(1)과 같이 주어지는 m 차원 벡터 $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로써 어트랙터가 재구성된다.

$$\begin{aligned} \bar{X}(1) &= [x(1), x(1+\tau), x(1+2\tau), \dots, x(1+(m-1)\tau)] \\ \bar{X}(2) &= [x(2), x(2+\tau), x(2+2\tau), \dots, x(2+(m-1)\tau)] \\ &\vdots \\ \bar{X}(i) &= [x(i), x(i+\tau), x(i+2\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)] \end{aligned} \quad (1)$$

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)방법⁹⁾을 이용하였다. FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터위의 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 찾아가 그 시계열 데이터의 임베딩 차원으로 결정한다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 갯수를 줄이고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로써 계산된다.

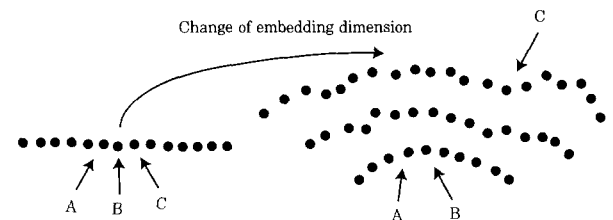


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

프랙탈 차원은 정수값이 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 Procaccia가 제안한 식(2)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

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

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 점 사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

어트랙터상의 특성이 결정되는 것으로부터 식(3)과 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원(ν)으로 나타낸다.

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

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기(Krautkr mer사의 USD-15), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkr mer사의 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 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같이 레일 용접부의 상부, 중간부, 하부에 인공 결함(슬릿형 크랙 및 횡공)을 기계 및 방전 가공하여 최대 진폭을 기준으로 스캔(scan)하면서 초음파 탐상기의 CRT상에 나타난 최대 진폭 에코를 오실로스코프상에서 시계열 데이터로 획득하여 결함에 대한 초음파적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

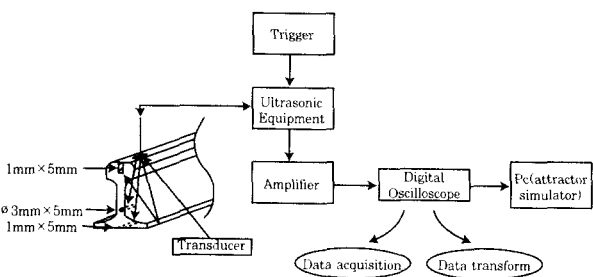


Fig. 2 Schematic of data acquisition and processing

3.2 거리진폭 특성곡선의 설정(DAC)

레일 용접부의 정량적 결함검출을 위해서는 검출기준의 설정이 필요하다. 이러한 목적에 맞는 기준 설정은 Fig.3에서와 같은 대비시험편을 이용하게 되며, 감

도 및 탐촉자의 교정관계도 여기에 포함된다. DAC 작성에 있어서 주요한 사항은 아래와 같이 크게 4가지를 들 수 있으며, 이를 기준으로 작성한 DAC는 Fig. 4와 같다.

- (1) 결함수직거리 140mm인 표준구멍의 직사에 의한 에코가 최대가 되는 위치에서 에코 높이가 50~70%가 되도록 감도 조절을 한다. 이때의 에코 선단위치를 눈금판 상에 플로트하며, 이 때의 감도를 H 기준 감도로 한다.
- (2) 게인을 조정하여 H 기준감도에서 3~6dB만큼 감도를 내리고, 이 때의 에코 높이(에코선단 위치)를 눈금판상에 플로트한다.
- (3) 탐촉자를 이동하여 (2)에서 설정한 각 감도에 대하여 결함수직거리가 다른 표준 구멍의 직사에 의한 에코 높이를 눈금판상에 플로트한다.
- (4) 결함 수직 거리가 다른 표준 구멍에 대해 에코 높이의 플로트 점을 각 감도별로 직선으로 연결하여 연장한다. 또한 시간축 눈금 5이내는 5눈금의 에코높이의 플로트 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. 이상과 같은 기준으로 구해진 곡선군을 거리 진폭 특성곡선이라고 하며, 레일 용접부의 결함검출기준으로 한다 Fig.4 에서 I, II, III, IV는 결함에 따라 나타나는 에코의 영역을 나타낸다.

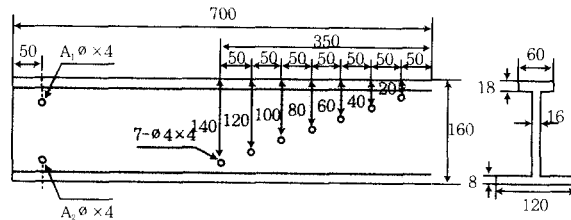


Fig. 3 Reference block for DAC curve construction

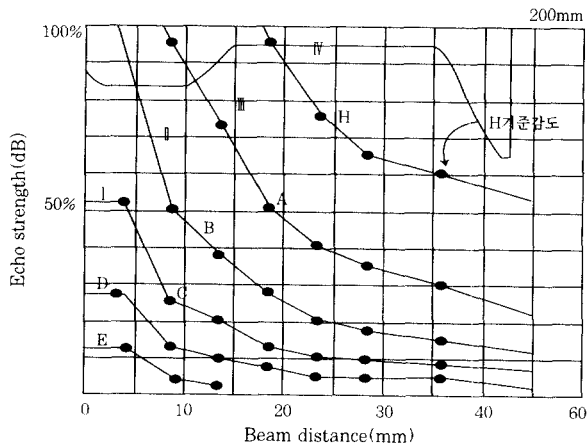


Fig. 4 The constructed DAC curve

3.3 레일 용접부(테르밋 용접)의 초음파 결함 신호

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질 내를 일정한 음속으로 진행하여 결함이 존재하는 위치에서 에코가 반사되게 된다. 현재 널리 이용되고 있는 A-scan법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게된다. 용접부 결함을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 횡파 사각법을 적용할 수 있다.

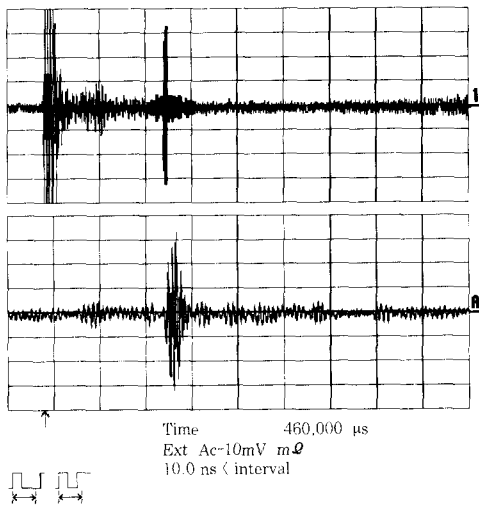


Fig. 5 Schematic of full signal of weld defects

시뮬레이션에 사용된 시계열 신호는 작성한 Fig.4를 기준으로 빔거리에 따라 획득한 레일 용접부의 슬릿형 인공결함 및 횡공에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 1.0 스킵 거리(Skip Distance) 이내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 5은 전체적인 신호의 형태를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 10ns와 100MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5,000샘플이다.

Fig. 6은 용접부의 두부에 존재하는 슬릿형 결함에 대한 신호로서 오실로스코프로 획득한 결함 신호이다.

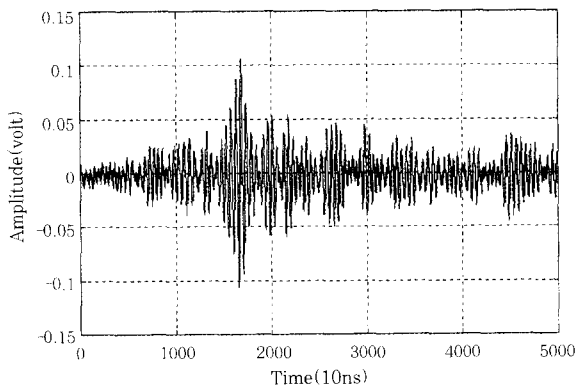
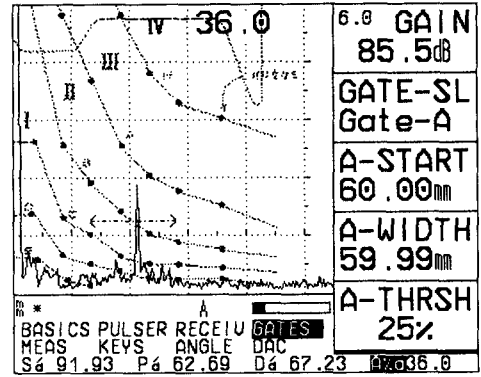
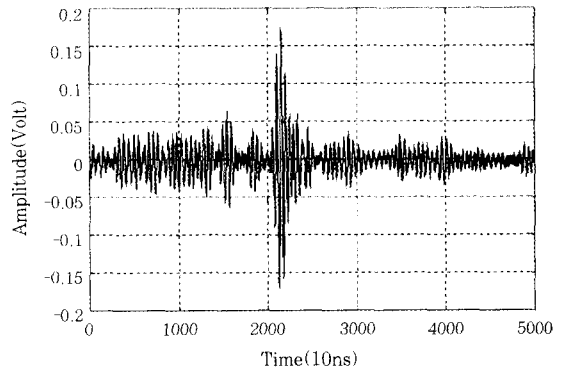


Fig. 6 Defect signal for head part(slit type crack)

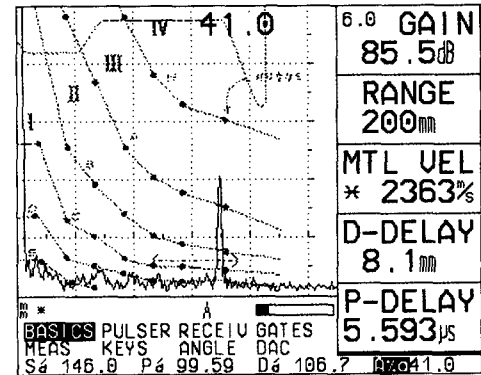


(a) Defect signal on ultrasonic equipments

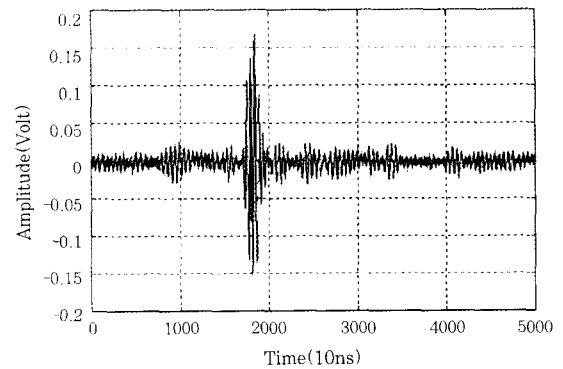


(b) Defect signal on oscilloscope

Fig. 7 Defect signals for part of web (side hole)



(a) Defect signal on ultrasonic equipments



(b) Defect signal on oscilloscope

Fig. 8 Defect signals for part of flange (slit type crack)

Fig. 7과 Fig. 8는 용접부의 복부와 저부에 존재하는 횡공 결함 및 슬릿형 인공결함에 대한 신호로서, (a)는 중간부 91mm 지점과 하부 147mm 지점에 위치한 결함에 대하여 정량적 결함검출 기준인 거리진폭 특성곡선을 작성하여 검출한 초음파 탐상기 상의 신호이며, (b)는 오실로스코프로 획득한 결함 신호이다.

3.3 어트랙터 특징 추출 및 평가

시계열 신호에 대하여 어트랙터를 재구성 한 후, 특징 추출을 위한 추출 구간을 각각의 데이터에 대하여 3,000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 어트랙터의 사분면 형상, 프랙탈 차원을 구하여 어트랙터에 의한 용접 결함의 정량적 특징 추출을 하고자 하였다. Fig.9은 횡공 결함 신호의 시계열 데이터에 대하여 정보간의 상관관계를 나타내는 시간 지연을 설정한 결과이다. 시간지연은 어트랙터의 형상에 가장 큰 영향을 주게 되는 점을 고려하여 가능한 한 시계열 데이터의 설정 샘플들이 전체 어트랙터를 구성할 수 있도록 하였으며, 최적 값을 2로 나타냈다. 최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, Fig. 10은 횡공에 대하여 임베딩 차원을 설정한 결과이다. x 축은 임베딩 차원, y 축은 FNN의 비, z 축은 시간 지연을 나타낸다. 임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0[%]로 떨어지는 것으로부터 횡공 결함에 대한 초음파 결함 신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

용접 결함의 종류와 결함별 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 어트랙터의 고찰이다. Fig.11, Fig. 12, Fig 13은 용접부의 횡공과 슬릿형 크랙에 대하여 스킵 거리별로 스킵 하여 2차원,으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플중에 결함 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3,000샘플씩을 적용하였으며, 세

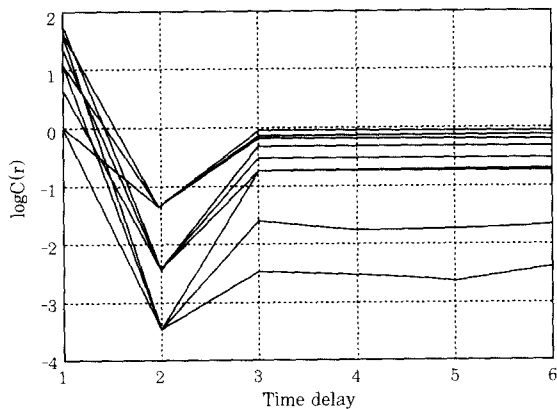


Fig. 9 Determination of time delay

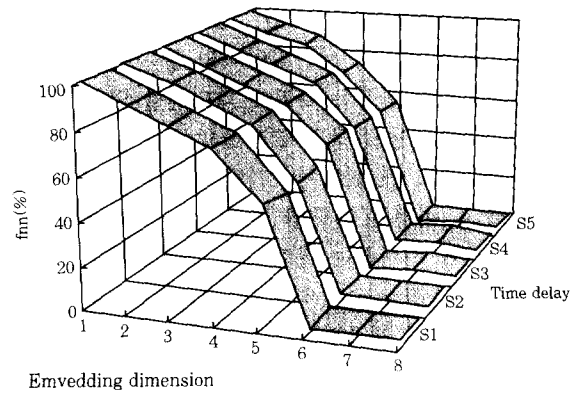


Fig. 10 Determination of embedding dimension

가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 용접 결함에 대한 초음파적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다.

상부와 하부(크랙)의 경우가 중간부(횡공)보다 어트랙터에 대한 궤적 변화가 현저하게 많으며, 에너지의 특성도 차이를 나타내었다. 또한 같은 용접 결함(크랙)인 상부와 하부에 대한 어트랙터를 비교하였을 경우, 형상과 에너지 변화에 있어서 모두 커다란 차이를 나타내었으며, 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라

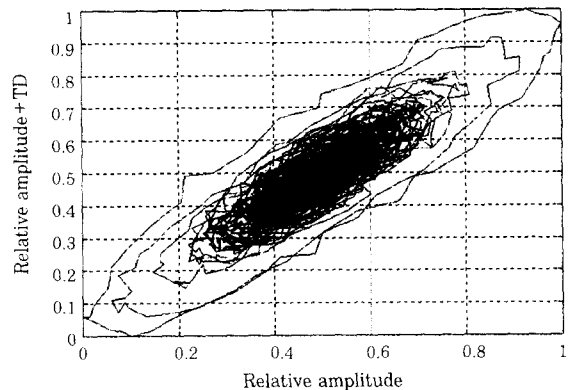


Fig. 11 Attractor reconstruction for part of head signal(crack)

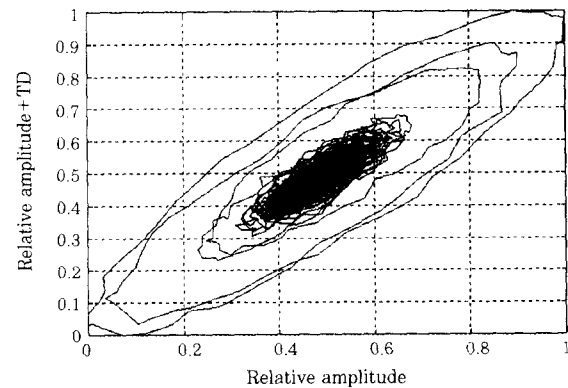


Fig. 12 Attractor reconstruction for part of web signal(side hole)

도 결함의 종류에 따라 2차원으로 구성된 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터의 궤적 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

따라서 이러한 동일 용접 결함들의 위치 변화에 따른 어트랙터의 궤적 변화로부터 레일 용접부의 결함 평가가 가능하다. 결정된 임베딩 차원 및 시간지연을 적용하여 용접부에 존재하는 결함과 프랙탈 차원과 어트랙터의 사분면 특징을 추출하였으며, Table 1은 이러한 결과를 나타낸다. 재구성된 어트랙터의 기하학적 형상은 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 결함 신호의 특성 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 되고, 또한 재구성된 어트랙터상의 사분면 특징으로 평가할 수 있다. 중간부의 경우가 가장 프랙탈 차원이 높게 나타났으며, 하부의 경우가 가장 낮게 나타났다.

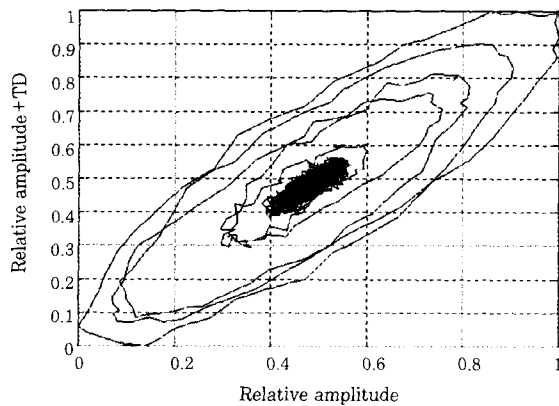


Fig. 13 Attractor reconstruction for part of flange signal(crack)

Table 1 Fractal dimensions for weld defects

Part Dimension	Part of head (crack)	Part of web (side hole)	Part of flange (crack)
Fractal dimensions	3.848	4.102	3.711

Table 2 Attractor quadrant features for weld defects

Quadrant Part	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

Table 2는 어트랙터 사분면 특징 추출을 한 결과로서, 위상 공간상으로 재구성한 어트랙터에 대하여 각각의 축을 어트랙터 상의 중심으로 이동하여 사분면

상의 점들의 수를 구하였다. 1사분면을 기준으로 하였을 경우에는 중간부가 가장 많이 분포되어 있었으며, 2사분면의 경우는 하부가, 3사분면의 경우는 상부가, 4사분면의 경우는 저부가 가장 많은 분포를 형성하고 있었다.

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

이상에서의 고찰 결과로부터 강한 비선형성을 나타내는 용접부의 횡공과 크랙에 대한 초음파 결함 시계열 데이터(프랙탈 차원이 강한 비선형성을 나타냄)는 결함이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 어트랙터의 특성으로 나타나게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 용접부 결함 평가에 각광 받는 어트랙터 해석을 이용하여 레일 용접부의 횡공 및 슬릿형 크랙 결함을 대상으로 시계열 초음파 결함 신호의 해석에 대하여 연구하였다. 프랙탈성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 고유 특징인 초공간적 어트랙터의 사분면과 프랙탈 차원을 추출하였다. 이렇게 구한 특징들로부터 용접부의 초음파 결함 신호에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 레일 용접부의 결함 평가 및 건전성을 평가할 수 있는 거리진폭특성곡선(DAC)의 기준과 결함과의 상관성을 나타내는 초음파특성기준을 제시하였다.
- (2) 전체 파형을 고려한 초음파 결함신호(횡공과 크랙)에 대하여 어트랙터 재구성에 의한 2차원 어트랙터로부터 각각의 사분면 점들을 계산하는 새로운 특징 추출 방법을 제시하였다.
- (3) 어트랙터의 궤적을 기준으로 같은 종류의 결함이 라도 위치 변화에 따른 현저한 궤적 변화를 나타내었으며, 이러한 차이로부터 용접부 결함의 고유 특성을 평가할 수 있다.
- (4) 정량적 용접 결함의 특징으로 프랙탈 차원을 추출한 결과, 상부의 경우(크랙)는 3.848, 중간부의 경우는 4.102, 하부의 경우는 3.711을 프랙탈 특징값으로 제시하였다.
- (5) 어트랙터의 형상을 결정짓는 사분면 특징 추출에서는 1사분면의 경우는 중간부(1229)가, 2사분면의 경우는 하부(305)가 가장 높은 분포도를 형성하였다.

참 고 문 헌

1. Thomas F. Perrone, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds." *Journal of the American Society for Nondestructive Testing*, Vol. 50, 11(1992), pp.1268~1273.
2. 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, "신경회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가," 대한기계학회 논문집, 제21권, 제4호(1997), pp.586~595.
3. 고준빈, 윤인식, "초공간을 고려한 SA508 강의 재질열화 시계열 신호의 카오스성 평가," 대한용접학회지, 제16권, 제6호(1998), pp.537~547.
4. 이 원, 윤인식, "산업체 적용을 위한 초음파 검사 기술 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권, 제8호(1997), pp.49~56.
5. 이 원, 윤인식, "초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함 검출 분류 최적화," 대한용접학회지, 제16권, 제3호(1998), pp.192~201.
6. 이병채, "시계열 데이터의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집(1995), pp.281~284.
7. 김정석, 강명창, 이기용, 구세진, "엔드밀가공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석," 한국정밀공학회지, 제14권 11호(1997), pp.93~101.
8. F. Takens, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898(1981), pp.266.
9. M. B. Kennel et al, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction," *Physical Reviews A*, Vol. 45(1992), pp.2403~3411.