

위상공간-주파수 영역을 고려한 레일 용접부의 결함 평가

Defect evaluations of weld zone in rails considering phase space-frequency domain

윤인식^{*1}(Yun, In-Sik), 권성태^{*2}(Kwon, Sung-Tae), 장영권^{*3}(Chang, Young-Kwon)
정우현^{*4}(Chung, Woo-Hyun), 이찬석^{*5}(Lee, Chan-Suk)

Key Words : *Attractor*(어트랙터), *Time Delay*(시간지연), *Embedding Dimension*(임베딩차원), *Phase Space*(위상공간), *Fractal Dimension*(프랙탈차원)

ABSTRACT

This study proposes the analysis and evaluation method of time series ultrasonic signal using the phase space-frequency domain. Features extracted from time series signal analyze quantitatively characteristics of weld defects. For this purpose, analysis objectives in this study are features of time domain and frequency domain. 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 phase space-frequency domain method in this study can integrity evaluation for defect signals of rail weld zone such as side hole and crack.

1. 서 론

1990년대 초 고속철도의 국내 도입으

- *¹ 정회원, 대한검사기술(주) 특수검사부
- *² 정회원, 한국철도연구원 차량연구부 선임연구원
- *³ 정회원, 생산기술연구원 산업기술시험평가연구소
- *⁴ 정회원, 강원산업(주) 기술부
- *⁵ 정회원, 한진중공업 연구개발부

로 현재 21세기 개통을 목표로 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 급힘에 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 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.

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 적용시에 가장 문제가 되는 재질의 파손 없이 대상 재질의 상태를 파악할 수 있는 유력한 방법으로 위력을 발휘하고 있으며, 이에선 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)~(3)}은 사용전·중에 실시하는 비파괴검사방법 중에서 체적검사방법으로 그 위력을 더해가고 있다. 특히 용접부에 대하여 A-스캔에 의한 실시간 결과 파악이 가능

하고, 다른 작업과의 병행성이 뛰어나며, 작업의 간편성으로 인하여 고속작업이 가능한 등의 장점을 갖고 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 최근에는 형상인식 분야에서 우수성이 입증된 위상공간 해석을 이용함으로써 결함의 형상까지도 평가할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 이^{(4)~(6)} 등에 의한 연구가 있다.

위상공간 해석에 의한 방법은 전체 파형으로부터 신호가 갖는 고유의 성질을 시계열 데이터로 하여 계의 위상공간 내에 내재한 특성을 평가하게 되는데, 이러한 특성에 주파수 영역의 해석을 부가함으로써 레일 용접부의 형상인식에 대한 평가 및 정밀도 향상이 가능하다.

특히 이⁽⁷⁾ 등에 의한 인간 심박 변화율의 연구와 김⁽⁸⁾ 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸에 대한 위상공간-주파수 해석 평가는 생체역학 분야와 공구 마멸의 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 두영역상의 특징 추출은 전체 파형의 평가에 있어서 강점을 갖고 있지만 생체 분야 및 특정 공학 분야 외에는 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 테트릿 용접으로 제작한 레일 용접부의 인공 결함(슬릿형 크랙, 횡공)에 대하여 초음파 탐상기의 화면상과 오실로스코프로상에 나타난 초음파 결함 신호로부터 그 특성을 파악하고, 시계열 데이터에 의한 전체 파형으로부터 위상공간 영역에서의 사분면 특징 4개와 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원의 추출 및 FFT(고속 푸리에 변환)를 하여 레일 용접부의 부위별(두부, 복부, 저부)결함에 대한 초음파적 특성 및 특징 추출의 결

부터 위상공간-주파수 해석을 이용한 레일 용접부의 건전성 평가 가능성에 대하여 제시하고자 한다.

2. 위상공간 해석 (Phase space analysis)

위상공간 해석을 위해서는 시계열 신호로부터 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상 공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens의 지연 방법⁽⁹⁾을 사용하였다. 즉, i 개의 데이터가 주어졌을 때, 식 (1)과 같이 주어지는 m 차원 벡터 $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결 시킴으로서 어트랙터가 재구성된다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 어트랙터상의 사분면 특징을 구할 수 있다.

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

여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩차원(embedding dimension)을, τ 는 시간지연(time delay)을 나타낸다.

임베딩 차원을 결정하는데 있어서는 Kennel이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법⁽¹⁰⁾을 이용하였다.

FNN이란, 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 찾아 그 시계열 데이터의 임베딩 차원으로 결정한다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 갯수를 줄이고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다. 이렇게 하여 구성된 어트랙터는 Fig. 1과 같은 잡음(noise)과 구별이 되며, 전체 위상공간 내에서 일정한 궤적을 이루게 된다.

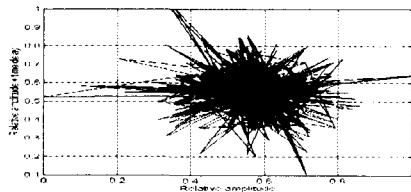


Fig. 1 Attractor reconstruction of noise

시간 지연은 Liebert와 Schuster가 제안한 상관적분 방법⁽¹¹⁾을 이용하여 결정하였으며 이는 시간 지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima point)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩 차원 및 시간 지연을 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원을 추출하여 시계열 데이터의 기하학적 특성을 평가 할 수 있게 된다. 프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procaccia가 제안한 식 (2)를 이용한 상관적분 방법⁽¹²⁾을 사용

하였다.

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

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 점사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

또한 $\theta(t)$ 의 조건으로는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \begin{cases} 1(t \geq 0) \\ 0(t < 0) \end{cases} \quad (3)$$

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이 r 인 구를 그리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터 상의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

어트랙터상의 특성이 결정되는 것으로부터 식(4)와 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원(v)으로 나타낸다.

$$v = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (4)$$

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 초음파 탐상기

(Krautkrämer사의USD-15), 초음파 탐상기로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결합 신호를 수신하는 횡파사각 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 같이 레일 용접부의 두부, 복부, 저부에 인공 결합(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 획득하여 결합에 대한 초음파적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

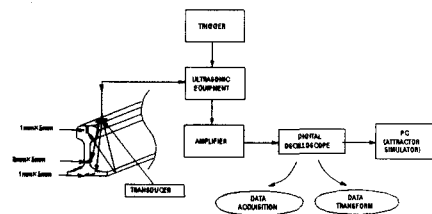


Fig.2 Schematic of data acquisition and processing

3.2 레일 용접부의 초음파 결합 신호

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 결합에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-스캔법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된

다. 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. 3은 용접부의 두부에 존재하는 슬릿형 크랙 결함에 대한 신호로서 오실로스코프로 획득한 결함 신호이다.

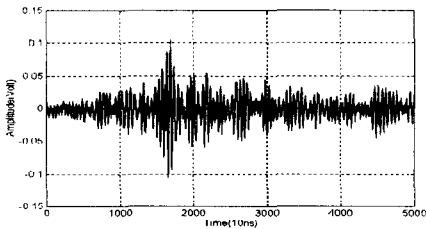


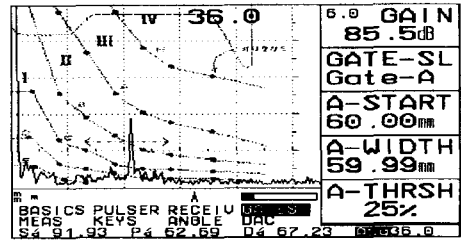
Fig. 3 Defect signal for head part (slit type crack)

Fig. 4와 Fig. 5는 용접부의 복부와 저부에 존재하는 횡공 결함 및 슬릿형 크랙 결함에 대한 신호로서, (a)는 복부 91mm 지점과 저부 147mm 지점에 위치한 결함에 대하여 정량적 결함검출 기준인 거리진폭특성곡선을 작성하여 검출한 초음파 탐상기 상의 신호이며, (b)는 오실로스코프로 획득한 결함 신호이다

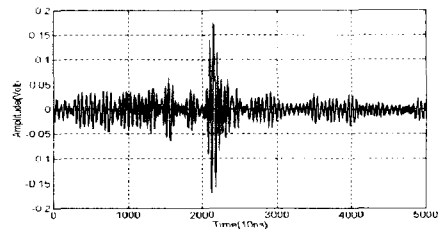
3.3 특징 추출 및 평가

시계열 신호에 대하여 어트랙터를 재구성한 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.

어트랙터 특징 추출의 가장 첫 번째

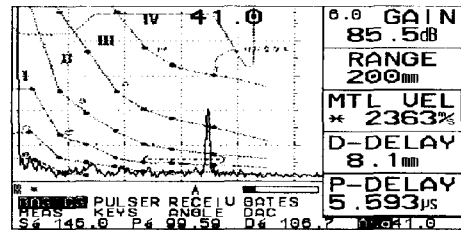


(a) defect signal on ultrasonic equipments

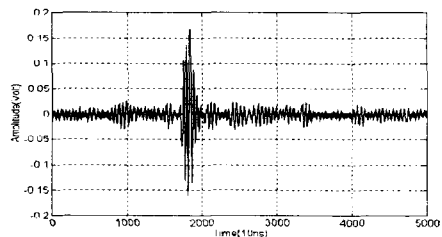


(b) defect signal on oscilloscope

Fig. 4 Defect signals for part of web(side hole)



(a) defect signal on ultrasonic equipments



(b) Defect signal on oscilloscope

Fig. 5 Defect signals for part of flange (slit type crack)

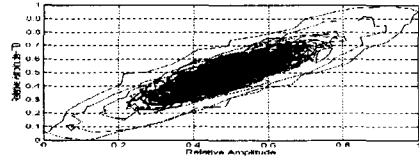
단계로서는 어트랙터의 형상과 시스템의 특성을 결정짓는 임베딩 차원을 구하는 것이 중요하며, 프랙탈 차원을 설정하기 위해서는 최적의 시간 지연과 최소 임베딩 차원의 설정이 중요하다.

항공 결함 신호의 시계열 데이터에 대하여 정보간의 상관관계를 나타내는 시간 지연을 설정하고자 하였다. 특히 시간지연은 어트랙터의 형상에 가장 큰 영향을 주게 되는 점을 고려하여 가능한 시계열 데이터의 설정 샘플들이 전체 어트랙터를 구성할 수 있도록 하였으며, 최적 값은 2로 나타났다. 최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, FNN 비율이 6에서 0으로 떨어지는 것으로부터 어트랙터의 기하학적 차원에 관계되는 임베딩 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

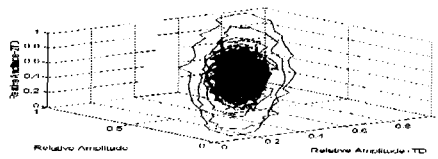
용접 결함 속에 내재되어 있는 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 어트랙터의 고찰이다. 즉 어트랙터 상의 운동은 추상적이지만 실제계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성, 꼬임은 변화, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다.

Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8은 용접부의 횡공과 슬릿형 크랙에 대하여 스킵 거리 별로 스캔하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플 중에 결함 신호와 관련된 구간을 고려하여 기준 샘플을 3,000으로 설정하였으며, 세가지 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.

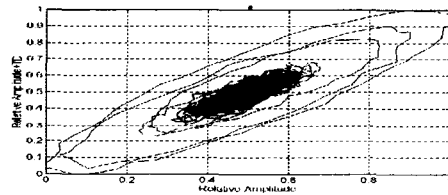


(a) Two dimensional attractor

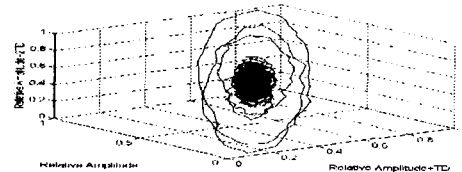


(b) Three dimensional attractor

Fig. 6 Attractor reconstruction for part of head signal(crack)



(a) Two dimensional attractor

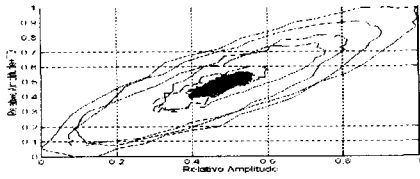


(b) Three dimensional attractor

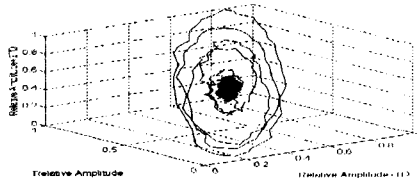
Fig. 7 Attractor reconstruction for part of web signal(side hole)

두부와 저부(크랙)의 경우가 복부(횡공)보다 어트랙터에 대한 궤적 변화가 현저하게 많으며, 에너지의 특성도 차이를 나타내었다.

또한 같은 용접 결함(크랙)인 두부와 저부에 대한 어트랙터를 비교하였을 경



(a) Two dimensional attractor



(b) Three dimensional attractor

Fig. 8 Attractor reconstruction for part of flange signal(crack) 우, 형상과 에너지 변화에 있어서 모두 커다란 차이를 나타내었으며, 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결함의 종류에 따라 2차원으로 구성된 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터의 궤적 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

2차원 어트랙터는 대상 신호의 고유 특징을 나타내어 주는 것은 사실이나, 어트랙터의 형상을 가장 저차원으로 보여 주게 되며, 따라서 어트랙터의 차원을 높여 고찰하는 것이 필요하다.

구성한 3차원 어트랙터에 있어서 두부의 경우가 가장 큰 궤적의 변화를 나타내었으며, 복부와 저부에 대한 어트랙터의 특성을 비교하였을 경우, 동일 결함임에도 궤적의 변화와 에너지의 크기 및 갯수가 다른 특성을 나타내었다. 따라서 이러한 동일 용접 결함들의 위치 변화에 따른 어트랙터의 궤적 변화로부터 레일 용접부의 결함 평가가 가능하다. 결정된 임베딩 차원 및 시간지연을 적용하여 용접부에 대한 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

Table 1 Fractal dimensions for weld defects

Part	Part of head	Part of web	Part of flange
Fractal dimensions	3.848	4.102	3.711

Table 2 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

있다. 복부의 경우가 가장 프랙탈 차원이 높게 나타났으며, 저부의 경우가 가장 낮게 나타났다. Table 2는 어트랙터 사분면 특징 추출을 한 결과로서, 위상 공간상으로 재구성한 어트랙터에 대하여 각각의 축을 어트랙터 상의 중심으로 이동하여 사분면 상의 점들을 계산하였다. 1사분면을 기준으로 하였을 경우에는 복부가 가장 많이 분포되어 있었으며, 2사분면의 경우는 저부가, 3사분면의 경우는 두부가, 4사분면의 경우는 저부가 가장 많은 분포를 형성하고 있었다.

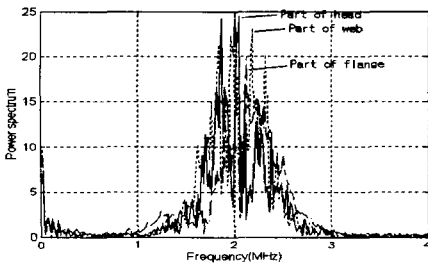


Fig. 9 Results of FFT(superposition)

위상공간 상에서의 어트랙터 사분면 분포도와 함께 주파수 영역에서의 파워 스펙트럼(power spectrum) 및 중심 주파수(center frequency)의 변화 등에 관한 고찰로 용접 결함의 특성을 평가할 수 있으며, 이에 대해서는 향후 용접 결함 형상인식 분류기 구성시에 특

징들로 사용될 수 있다. Fig. 9는 두 부, 복부, 저부에 대하여 FFT한 결과를 나타낸다.

파워스펙트럼에 있어서는 복부, 두부, 저부의 순서로 높게 나타났으며, 중심 주파수에 있어서는 초음파 탐촉자의 공칭주파수인 2MHz를 고려하였을 경우, 복부의 경우가 가장 가깝게 나타났으며, 두부와 저부는 그 차이가 거의 비슷하였다. 전체적으로 처음의 주파수 형태와는 달리 왜도가 심하였으며, 결함의 존재 위치에 따라서도 파워스펙트럼 차이가 현저함을 알 수 있었다.

Table 3은 Fig. 9에 대하여 중심주파수의 변화, 주파수 대역폭, 파워스펙트럼을 정량화하여 나타낸 결과이다. 결함 신호에 대한 에너지의 강도를 나타내는 파워 스펙트럼의 경우는 복부, 두부, 저부의 순서로 높게 나타났으며, 주파수 대역폭은 복부의 경우가 가장 넓은 분포로 나타내었다. 또한 중심 주파수의 변화는 공칭 주파수 2MHz에 대하여 초음파 빔 거리가 길어질수록 이동하여 높아지는 경향을 나타내었다.

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

본 연구에서는 레일 용접부의 용접 결함을 평가하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 최대 진폭의 50%를 고려하여

Table 3 Results of FFT

Part	Part of head	Part of web	Part of flange
Change of center frequency(MHz)	2.14	2.13	2.16
Bandwidth	21.78	25.25	16.19
Power spectrum	24.21	24.49	19.89

위상공간-주파수 영역에서의 해석에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

위상공간-주파수 해석은 프랙탈 차원 평가 부분을 용접 결함 형상인식 분류기 구성용 특징 추출을 위하여 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 현재 세계적으로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 우리나라에서도 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다.

따라서 위상공간상에서 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 푸앙카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구와 사분면 분포도 외에 평가가 가능한 특징 추출법의 개발 등에 대한 부분이 지속적으로 연구되어 보완된다면, 향후 21세기에는 신호해석 및 패턴인식 등의 여러 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 용접부 결함 평가에 도입이 시도되고 있는 위상공간-주파수 해석을 이용하여 레일 용접부의 횡공 및 슬릿형 크랙 결함을 대상으로 시계열 초음파 결함 신호에 대하여 연구하였다. 프랙탈성을 갖는 시계열 데이터를 FFT 하여 파워스펙트럼과 중심주파수의 변화 정도를 살펴보았으며, 신호의 고유 특징인 초공간적 어트랙터의 사분면 분포도와 프랙탈 차원을 추출하였다. 이렇게 구한 특징들로부터 비선형성이 강한 용접부의 초음파 결함 신호에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 레일 용접부로부터 받은 시계열 초음파 결함신호에 대하여 FFT를 한 결과, 파워스펙트럼에 있어서는 복부, 두부, 저부의 순서로 높게 나타났으며, 중심주파수에 있어서는 초음파 탐촉자의 공칭주파수(2MHz)에 대하여 복부의 경우가 가장 가깝게 나타났으며, 저부는 그 차가 가장 크게 나타났다.

(2) 전체 파형을 고려한 초음파 결함 신호(횡공과 크랙)에 대하여 어트랙터 재구성에 의한 2차원 어트랙터로부터 각각의 사분면 점들을 계산하는 새로운 특징 추출 방법을 제시하였다.

(3) 정량적 용접 결함의 특징으로 프랙탈 차원을 추출한 결과, 두부의 경우(크랙)는 3.848, 복부의 경우는 4.102, 저부의 경우는 3.711을 프랙탈 특징값으로 제시하였다.

(4) 어트랙터의 형상을 결정짓는 사분면 특징 추출에서는 1사분면의 경우는 복부(1229)가, 2사분면의 경우는 저부(305)가 가장 높은 분포도를 형성하였다.

참 고 문 헌

- (1) Thomas F. Perrone, 1992, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, 11, pp.1268~1273.
- (2) 이 원, 윤인식, 1998, "초음파와 신경망을 이용한 오스테나이트계

- 스테 인리스강 304 용접부의 결함 검출 및 평가,” 대한용접학회지, 제16권 제3호, pp.192~201.
- (3) 이 원, 윤인식, 1998, “신경회로망을 이용한 오스테나이트계 스테인리스 강 304 용접부의 결함 검출 분류 최적 화,” 한국정밀공학회지, 제15권 제7 호, pp.149~159.
- (4) 이 원, 윤인식, 이병채, 1998, “카오스 특징 추출에 의한 용접 결함의 초음파 형상 인식,” 한국정밀공학회지, 제15권 제6호, pp.167~174.
- (5) Yi Won and Yun In Sik, 1998, “The defect detection and nondestructive evaluation in weld zone of austenitic stainless 304 using neural network-ultrasonic waves,” KSME International Journal, Vol.12, No.6, pp.295~306.
- (6) 윤인식, 민경주, 나성훈, 권성태, 임성진, 1998, “어트랙터 해석을 이용한 레일 용접부의 결함 평가,” 한국철도학회, 1998년도 추계학술대회논문집, pp.87~95.
- (7) 이병채, 1995, “시계열 데이터의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구,” 대한의용생체공학회 춘계학술대회논문집, pp.281~284.
- (8) 김정석, 강명창, 이기용, 구세진, 1997, “엔드밀가공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석,” 한국정밀공학회지, 제14권 11호, pp.93~101.
- (9) F. Takens, 1981, “Lecture Notes in Mathematics,” D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, pp.266.
- (10) M. B. Kennel et al, 1992, “Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction,” Physical Reviews A, Vol. 45, pp.2403~2411.
- (11) W. Liebert and H. G. Schuster, 1989, “Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series,” Physics Letters A, Vol. 142, pp.107~111.
- (12) P. Grassberger and I. Procaccia, 1983, “Characterization of Attractors,” Rev. Lett., Vol. 50, No.5, pp.346~349.