

초공간을 고려한 슬래그 혼입 용접 결함 시계열 신호의 카오스성 평가

이 원*, 윤인식**

Chaotic Evaluation of Slag Inclusion Welding Defect Time Series Signals Considering the Hyperspace

Won Yi*, In-Sik Yun**

ABSTRACT

This study proposes the analysis and evaluation of method of time series of ultrasonic signal using the chaotic feature extraction for ultrasonic pattern recognition.

The features are extracted from time series data for analysis of weld defects quantitatively. For this purpose, analysis objectives in this study are fractal dimension, Lyapunov exponent, and strange attractor on hyperspace.

The Lyapunov exponent is a measure of rate in which phase space diverges nearby trajectories. Chaotic trajectories have at least one positive Lyapunov exponent, and the fractal dimension appears as a metric space such as the phase space trajectory of a dynamical system.

In experiment, fractal(correlation) dimensions and Lyapunov exponents show the mean value of 4.663, and 0.093 relatively in case of learning, while the mean value of 4.926, and 0.090 in case of testing in slag inclusion(weld defects) are shown. Therefore, the proposed chaotic feature extraction can be enhancement of precision rate for ultrasonic pattern recognition in defecting signals of weld zone, such as slag inclusion.

Key Words :Hyperspace(초공간), Chaos(카오스), Ultrasonic Wave(초음파), Weld Zone(용접부), Slag Inclusion(슬래그 혼입), Time Delay(시간 지연), Strange Attractor(스트레인지 어트랙터), Fractal Dimension(프랙탈 차원), Lyapunov Exponent(리아프노프 지수)

1. 서론

모재와 용가재의 용융으로 형성된 용접부(weld zone)

는 용착금속과 용착금속으로부터 모재에 이르기까지 6~7개의 서로 다른 취약한 조직인 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)으로 이루어져 있어 인장, 압축이 동시

* 숭실대학교 기계공학과
** 숭실대원/대한검사기술(주)

에 작용하는 구조상, 전체적으로 불안정한 상태를 나타내게 된다. 특히 용접부내의 체적 결합인 슬래그 혼입(slag inclusion)은 교량에서의 박스 거더(box girder)와 같이 반복 응력이 주기적으로 작용하게 되면 응력 집중에 의한 강도 저하를 초래하여 피로 파괴의 직접적 원인이 되기도 한다. 따라서 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하는 것은 구조물 전체의 건전성 및 안정성 측면에서 대단히 중요하다.

현재 용접부 내부 결함의 검출을 위하여 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과⁽¹⁾와 초음파 탐상^{(2),(3)} 등과 같은 비파괴 검사법을 들 수 있다.

이중에서 방사선 투과에 의한 방법은 여러 산업 분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있지만, 대상체의 두께 증가에 따른 감도의 저하, 촬영한 필름 현상에 의한 결과 파악의 지연, 피폭 등과 같은 많은 문제점을 내포하고 있다.

그러나 초음파 탐상은 탐상 결과의 실시간 파악과 인간에게 치명적인 피폭 등의 문제점을 갖고 있는 방사선 투과에 의한 방법을 대체하고, 결함의 방향성에 대하여 이를 보완하는 방법으로 그 위력을 발휘하고 있다.

특히 초음파에 의한 용접부의 결함 종류 판별⁽⁴⁾은 결함의 종류에 따른 정량적 강도 평가를 가능하게 하므로써 취성 파괴나 피로 파괴와 같은 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 이러한 용접부 결함의 종류 판별을 위해서는 A-scan에 의한 초음파 결함 신호에 대하여 결함 형상 인식의 정량적 특징 추출(feature extraction)을 하는 것이 첫 번째의 선결 과제이다. 용접부 결함 특징 추출을 위한 기존의 방법에 있어서는 주로 시간 영역(time domain)상의 가장 첫 번째 파형이나 에너지가 큰 파형을 선정하여 상승 시간(rise time), 상승 기울기(rise slope), 피크-피크(peak-to-peak), 하강 시간(fall time), 하강 기울기(fall slope), 펄스 폭(pulse duration)과 주파수 영역(frequency domain)상의 대역폭(bandwidth), 파워 스펙트럼(power spectrum)등을 대상으로 하고 있으나, 결함의 종류에 따라 파형이 각각 다르며, 또한 노이즈(noise) 수준을 고려한 임계치의 설정과 결함으로부터의 초음파 신호중 해석이 가능한 부분 파형만을 적용하는 단점으로 인하여 정밀도가 낮아지는 등의 문제점을 갖고 있다. 이와 같이 일반적인 특징 추출법으로 전체 파형을 고려한 정량적 특징을 추출하기 어려운 경우에 대하여 최근 인공지능 기법중의 하나인 카오스 해석(chaotic analysis)에 의한 방법^{(5),(6)}이 주목을 받고 있다.

카오스를 이용한 해석은 대상 신호가 갖는 고유의 성질을 시계열 데이터로 하여 계의 상태 공간내에 내재한 특성을 평가하게 되며, 이러한 특성을 파악하고, 해석하는 카오스 특징 추출로부터 정밀도 높은 해석이 가능하다.

특히 이⁽⁷⁾ 등에 의한 인간 심박 변화율의 프랙탈 및 리아프노프지수 평가에 대한 연구와 김⁽⁸⁾ 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸의 프랙탈 특성 평가에 의한 카오스적 해석은 생체 역학 분야와 공구 마멸의 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 카오스 이론은 비선형 시스템에 대한 해석이 있어서 감점을 갖고 있지만 생체 분야 및 특정 공학 분야 외에는 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 비선형 시계열 신호 분석시에 응용한 카오스 이론을 이용하여 용접부의 초음파 결합 신호로부터 카오스적 정도를 확인하고, 초공간을 고려한 어트랙터의 차원으로 부터 정량적 특징 추출을 하므로써 초음파 형상 인식에 대하여 평가하고자 하였다.

이를 위하여 페라이트계 탄소강 용접부의 결합(슬래그 혼입)에 대하여 0.5 스킵(skip)이내와 1.0 스킵 거리를 대상으로 횡파 사각법에 의한 초음파 결합 신호를 최대 에너지와 최대에너지의 50%를 고려하여 시계열 데이터로 획득하였다. 이렇게 획득한 시계열 데이터에 대하여 결함으로부터의 전체 파형을 고려한 시간 지연과 임베딩 차원을 설정한 후, 스트레인지 어트랙터(strange attractor), 프랙탈 차원(fractal dimension), 리아프노프 지수(Lyapunov exponent) 등의 카오스 특징 추출에 의한 고찰 결과로부터 결함의 종류와 위치에 따른 결함 신호의 카오스성 정도를 평가하고 이로부터 초음파 형상 인식의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 초공간 & 카오스 특징 추출

유클리드 기하학에서 0차원은 점, 1차원은 선, 2차원은 평면, 3차원은 체적으로 나타낼 수 있다. 그러나 비선형성이 크고 시스템에 관여하는 변수가 3개 이상이 되는 대상에 대하여는 3차원 이상의 고차원 공간 해석(high dimension space analysis)이 필요하며, 이에 대해서는 초공간(hyperspace)이라는 고차원 상태 공간을 가상한 카오스적 어트랙터의 고찰 및 평가로부터 가능하다.

카오스는 상태 공간중에 내재한 간단한 법칙의 반복에서 생성되는 결정론적 역학계에 나타나는 비주기적 거동으로 주요 특징은 크게 3가지로 나타낼 수 있다.

1) 결정론적인 비교적 간단한 방정식에 의해 기술된다.

2) 간단한 방정식의 특성을 갖고도 대단히 복잡한 거동을 나타낸다.

3) 어떤 시간적 범위를 제외하고는 결정론적인 예언이 불가능하다.

이러한 카오스의 특성을 해석하는데에는 어트랙터의 재구성, 시간 지연과 임베딩 차원의 설정 등으로부터 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 정량화 하게 된다.

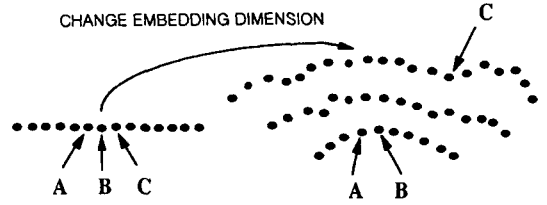


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

2.1 어트랙터 재구성

시계열 신호에서 카오스성을 평가하기 위해서는 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 카오스 특징을 대표적으로 나타내는 프랙탈 차원(상관 차원)과 리아프노프 지수를 추출하게 된다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상 공간으로 표현하는 것을 말하며, 서로 다른 상태에서 출발하여 같은 시간 변화를 나타내는 궤도에 수렴하는 점근적 궤도를 어트랙터라 하고 특히 카오스 특징을 나타내는 어트랙터를 스트레인지 어트랙터라 한다.

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 연 결시킴으로서 어트랙터가 재구성된다.

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

여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩 차원(embedding dimension)을, τ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

2.2 임베딩 차원 및 시간 지연의 결정

임베딩 차원을 결정하기 위해 Kennel이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법⁽¹⁰⁾을 이용하였다. FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터 위의 점이 근접점(nearest neighbor)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 세어 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다.

시간 지연 τ 를 이용한 어트랙터 상의 점은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}(n) = (x(n), x(n+\tau), x(n+2\tau), \dots, x(n+(n-1)\tau)) \quad (2)$$

$$R_m(n) = \|\hat{X}(n) - \hat{x}(q)\| = \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} [x(n+k\tau) - x(q+k\tau)]^2} \quad (3)$$

$$R_{m+1}(n) = \sqrt{R_m^2(n) + [x(n+m\tau) - x(q+m\tau)]^2} \quad (4)$$

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2(n) - R_m^2(n)}{R_m^2(n)}} = \frac{|x(n+m\tau) - x(q+m\tau)|}{R_m(n)} > R_{tot} \quad (5)$$

여기서 $\hat{X}(n)$ 은 기준점, $\hat{X}(q)$ 은 최근접 이웃점, R_{tot} 은 FNN에 대한 평가 임계 값이다.

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)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩 차원 및 시간 지연을 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원 및 리아프노프 지수를 추출하여 시계열 데이터의 카오스적 특성을 정량적으로 평가 할 수 있게 된다.

2.3 프랙탈 차원

프랙탈 차원은 시계열 신호에 대하여 재구성된 어트랙터의 기하학적 특징을 표현한다. 프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 카오스적인 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을

구하기 위하여 Grassberger와 Procaccia가 제안한 식 (6)을 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \Theta(r - |\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|) \quad (6)$$

여기서, Θ 는 step function이며, $\bar{X}(i)$ 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.

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(7)과 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원 ν 으로 나타낸다.

$$\nu = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (7)$$

2.4 리아프노프 지수

리아프노프 지수는 재구성된 어트랙터의 발산 또는 수렴에 대한 평균 지수율로서 0과 같거나 작게 되면 근접한 두 어트랙터는 수렴하게 되고, 0보다 큰 양수일 경우에는 카오스적임을 의미하게 된다.

카오스 시스템은 초기값에 민감한 의존성을 나타내어 매우 근접한 초기값에서 출발한 두 궤적이 처음에는 서로 비슷한 궤적을 그리다가 시간에 따라 빠르게 발산하여 완전히 다른 궤적을 그리게 된다. 따라서 두 궤적이 시간에 따라 어느 정도의 빠르기로 발산하며 어느 정도의 예측성을 가지고 있는지를 리아프노프 지수로 평가할 수 있다.

리아프노프 지수를 구하는데 있어서는 Wolf의 방법⁽¹²⁾을 사용하였으며, 구하는 과정으로는 Fig. 2와 같은 어트랙터상의 궤적을 가정하여 크게 다섯 단계로 이루어진다.

첫째, 어트랙터의 기준궤적으로부터 $L(t_0)$ 만큼 떨어져 있는 최근접 이웃 점을 정한다. 둘째, Δt 이후의 t_1 에서 기준궤적 위의 점과 이웃궤적 사이의 거리를 $L'(t_1)$ 이라고 하고, $L(t_0)$ 와 $L'(t_1)$ 의 지수 비를 구한다. 셋째, t_1 에서의 최근접 이웃 점을 찾아 거리 $L(t_1)$ 을 계산한다. 넷째, Δt 시간이 지난 t_1 에서 둘째 과정을 반복하여 지수

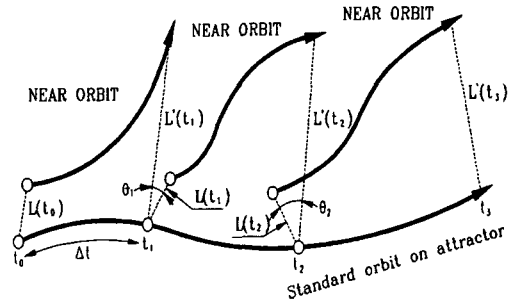


Fig. 2 Schematic for lyapunov exponent calculation

비를 구한다. 다섯째, 위와 같은 과정을 M 번 반복하여 평균 지수율을 계산하며, 최종적인 리아프노프 지수 λ 는 식(8)과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{M\Delta t} \sum_{k=1}^M \log_2 \frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \quad (8)$$

여기서, M 은 반복 횟수, $\Delta t = t_{k-1} - t_k$ 이다. 이렇게 구한 리아프노프 지수는 M 이 커짐에 따라 하나의 값으로 수렴하게 된다.

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기로는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스 플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 결합 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70°, 진동자 크기: 8×9mm), 접촉매질(기계유)⁽¹³⁾ 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 오실로스코프의 CRT상에 나타나는 결합 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 3 및 Table 1과 같은 정량적 결합을 내재하고 있는 시험편(Flaw Manufacturing Tech. 사 제작)을 이용하여 슬래그 혼입의 용접부 결합에 대하여 Fig. 4와 같은 구성으로 최대 진폭을 기준으로 scan하면서 50% 진폭을 설정하고 이에 대한 시계열 데이터를 신호로 획득하여 시간 영역상의 신호 특성 분석으로 결합에 대한 초음파 형상 인식을 정량적으로 평가하고자 하였다.

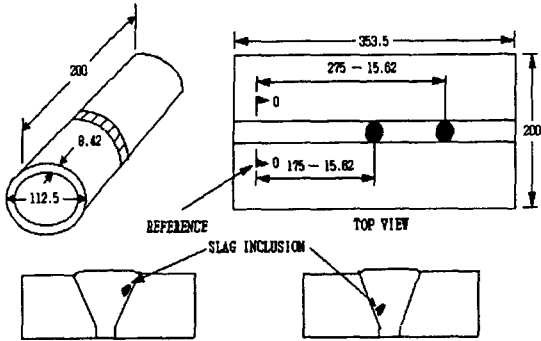


Fig. 3 Configuration of welding defects

Table 1 Property and configuration welding defects

defect type	start of defect to reference	total defect length	defect depth	
			height	below surface
slag Inclusion(learn)	175-15.6	6.25	3.125	3.125
slag Inclusion(test)	275-15.6	12.5	3.125	6.25

(unit : mm)

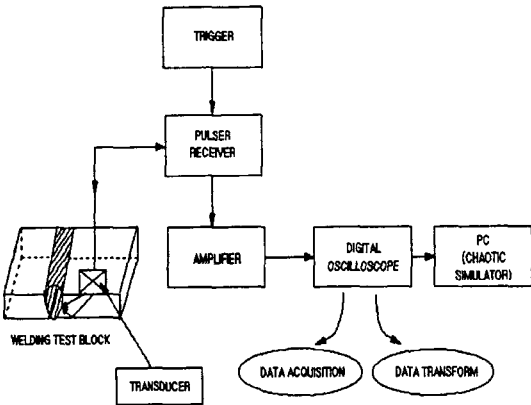


Fig. 4 Schematic of data acquisition and processing

3.2 맞대기 용접부의 초음파 결함 신호(슬래그 혼입)

고체 내부를 전파하는 음파에는 입자의 진동이 파의 진행 방향과 같은 종파와 파의 진행 방향이 수직인 횡파가 있으며, 전파하는 재료의 종류 및 특성에 따라 음속이 결

정된다.

종파의 음속 C_l 과 횡파의 음속 C_s 는 식(9)와 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)G}{\rho}} \quad (9)$$

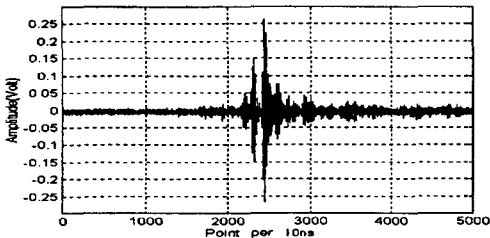
$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10)$$

여기서 E 는 종탄성 계수, K 는 체적 탄성 계수, G 는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ 는 밀도, ν 는 푸아송 비이다.

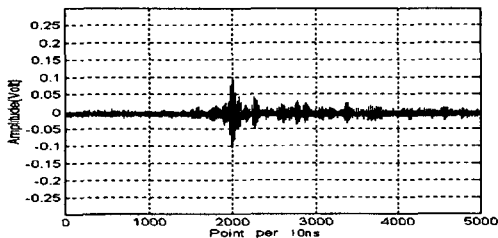
결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결함으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용접부 결함을 대상으로 하는 경우, 탐촉자의 굴절각에 의한 횡파 사각법을 적용할 수 있다.

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 결함 형상에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-scan법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된다. 이러한 에코의 정보로부터 결함의 형상을 파악하기 위해서는 scan을 하여 결함을 찾은 후, 최대 진폭으로부터 50% 낮은 진폭을 기준으로 모듈림(tilting)을 하여 정량적 평가를 하여야 한다. 그러나 기존에는 관찰자의 주관성이 포함된 파형의 형태와 진폭을 파라미터로 평가하고 있으며, 따라서 6dB drop법에 의한 초음파 신호를 최대 진폭을 기준으로 한 신호에 포함시키는 것은 결함의 형상을 파악하고 결정하는데 대단히 중요하다.

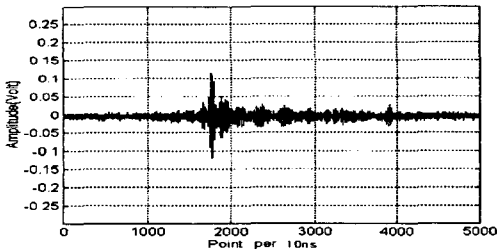
실험에 사용된 시계열 신호는 페라이트계 탄소강 용접부의 슬래그 혼입에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 0.5 스킵 거리(skip distance) ~ 1.0 스킵 거리내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 5는 이를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 한 결함당 25 ~ 30 point에 대하여 10ns와 100MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5000샘플이다. (a)는 용접부내의 슬래그 혼입 결함에 대하여 0.5 스킵 이내의 가장 가까운 거리, (b)는 0.5 스킵 거리에서, (c)는 1.0 스킵 거리에서의 결함 신호를 나타낸다. 횡파 사각 탐촉자를 용접부에 최대한 근접시켜 scan하면서 결함 신호를 취득하여 각각의 point에 대하여 최적의 특징 추출을 하고자 하였다.



(a) Defect signal within 0.5 skip



(b) Defect signal at 0.5 skip



(c) Defect signal within 1.0 skip

Fig. 5 Time series signal from weld defects (slag inclusion)

3.3 특징 추출

시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 3000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 임베딩 차원, 시간 지연, 스트레인지 어트랙터의 형상, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 구하여 카오스에 의한 정량적 특징 추출의 가능성을 확인하고자 하였다.

카오스 특징 추출의 가장 첫 번째 단계로서 어트랙터의 형상과 시스템의 특성을 결정짓는 임베딩 차원을 구하는 것이 중요하며, 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 설정하기 위해서는 최적의 시간 지연과 최소 임베딩 차원의 설정이 중요하다.

최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, Fig. 6은 불완전 용입에 대하여 임베딩 차원을 설정

한 결과이다. x축은 임베딩 차원, y축은 FNN의 비, z축은 시간 지연을 나타낸다. FNN 방법을 이용하여 임베딩 차원을 설정하는데 있어서는 평가 임계치의 설정이 필요하며, 이를 위하여 재구성된 어트랙터에 대해 평가 임계치를 변화시켜 가면서 최적의 값을 구하고자 하였다. 일반적으로 평가 임계치를 10이하로 설정할 경우, 신호 오차에 의한 영향이 커질수 있고 너무 크면 최적값을 찾기 어려워 많은 반복 시뮬레이션을 하여 최적의 평가 임계치를 100으로 설정할 수 있었으며, 또한 시간 지연의 설정은 4로 나타났다.

임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0(%)로 떨어지는 것으로부터 슬래그 혼입에 대한 초음파 결합 신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다. 따라서 고차원 어트랙터의 기하학적 평가는 적어도 초공간상에서 가능하며, 카오스적 어트랙터를 이용하므로 해석 대상 결합에 대하여 고차원 공간상에서의 정량적 해석 및 평가를 할 수 있다.

시스템 속에 내재되어 있는 카오스적 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 카오스적 어트랙터의 고찰이다. 즉 어트랙터 상의 운동은 추상적이지만 실제 계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성을, 꼬임은 변화를, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 용접부의 슬래그 혼입 결합에 대하여 스킵 거리별로 scan 하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플중에 결합 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3000샘플씩을 적용하였으며, 세가지 경우가 모두 전형적

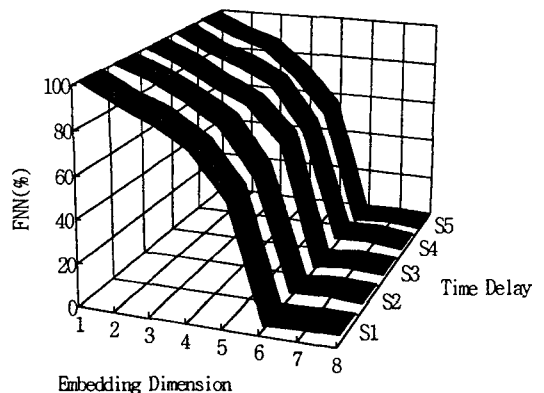
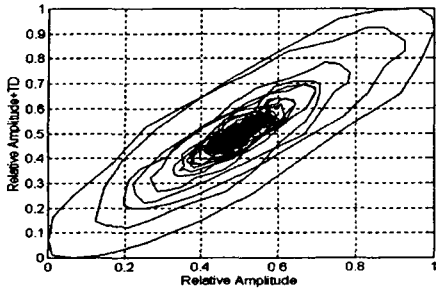
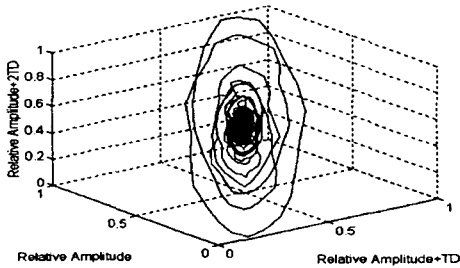


Fig. 6 Determination of embedding dimension

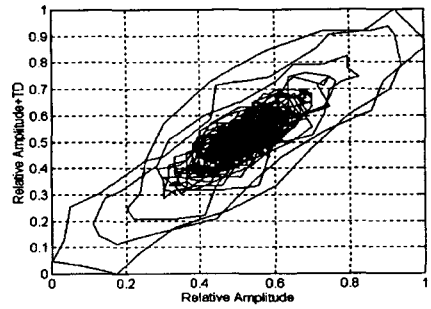


(a) 2-Dimensional strange attractor

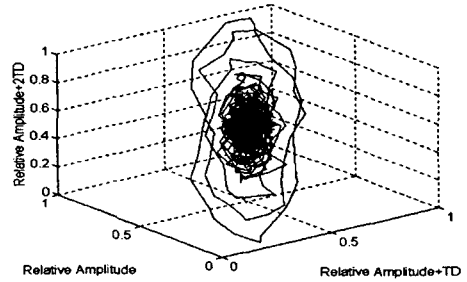


(b) 3-Dimensional strange attractor

Fig. 7 Strange attractor analysis within 0.5 skip



(a) 2-Dimensional strange attractor

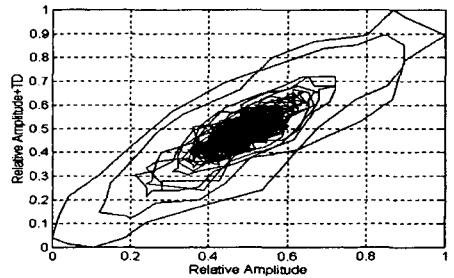


(b) 3-Dimensional strange attractor

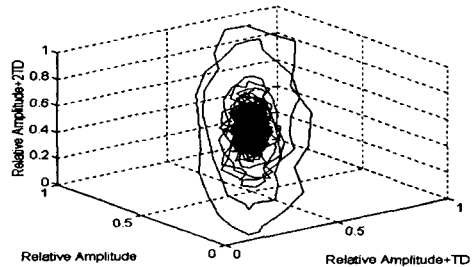
Fig. 8 Strange attractor analysis at 0.5 skip

인 카오스적 어트랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다. 0.5 스킵 거리 이내와 0.5 스킵 거리 이상에서의 결합 특성인 어트랙터의 궤적 변화는 상당히 차이가 있으나 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 결합에 대한 카오스적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결합의 종류에 따라 2, 3차원으로 구성된 스트레인지 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터의 궤적(스트레인지 어트랙터)의 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

카오스적 어트랙터는 대상 신호의 고유 특징을 나타내어 주는 것은 사실이나 3차원 이상의 공간에 대해서는 대단히 복잡한 경로를 통해 감아 들어가면서 밖에서는 보이지 않는 내적인 구조가 되어 난해하고 어지러운 궤적으로 나타내게 된다. 따라서 내부 구조에 대한 해석 및 평가로부터 대상 신호를 정량화할 수 있으며, 이에 대해서는 스트레인지 어트랙터를 3차원으로 구성하는 것으로 가능하다. 구성된 2차원 스트레인지 어트랙터에 있어서 0.5 스킵



(a) 2 Dimensional strange attractor



(b) 3-Dimensional strange attractor

Fig. 9 Strange attractor analysis at 1.0 skip

킵 거리내에서의 궤적이 0.5 스킵 거리 이상에서의 궤적과 상당히 차이가 있음을 볼 수 있으며, 이로부터 0.5 스킵 거리 이상에서의 결합에 내재된 변화의 정도를 알 수 있다.

3차원 스트레인지 어트랙터에 있어서는 관련 진폭에 대하여 시간 지연의 배수함으로 위상 공간상에 3개의 정보로서 결합의 특성이 나타나게 된다. 어트랙터 차원인 임베딩 차원이 6차원이므로 구성되는 3차원 어트랙터 상에 나타나는 궤적은 1, 2, 3의 계열과 4, 5, 6의 계열이 같은 시간 변화화 동일한 궤적을 형성하게 된다. 즉 위상 공간상에 시계열 데이터의 첫 번째부터 여섯 번째까지를 한 개의 군으로 하여 어트랙터의 형상에 관여되는 시간지연을 고려한 간격으로 궤적을 형성하게 된다.

따라서 3차원 어트랙터는 2차원 어트랙터와는 달리 용접 결합의 카오스적 특성을 어트랙터 단면이 아닌 형상적으로 볼 수 있으며, 어트랙터로부터 3개의 정보를 알 수 있게 되어 이로부터 궤적의 안정성 등을 2차원보다는 정량적으로 평가하게 된다.

이와 같은 특성으로 구성된 3차원 스트레인지 어트랙터는 2차원과 거의 같은 경향을 나타내었으며, 0.5 스킵 거리와 1.0 스킵 거리에서의 2차원 결과로는 그 변화의 정도가 미미하지만, 3차원에서는 어느 정도의 궤적 차이를 볼 수 있다. 따라서 슬래그 혼입 결합의 스킵 거리에 따라 가장 외측에서 안쪽으로 휘돌아 들어가는 궤적의 정도와 수에 의한 카오스적 어트랙터의 변화로부터 정량적 초음파 형상 인식의 평가가 가능하다.

결정된 임베딩 차원과 데이터를 적용하여 구한 시간지연을 이용하여 용접부에 대한 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 계산하였으며, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 이러한 결과를 나타낸다.

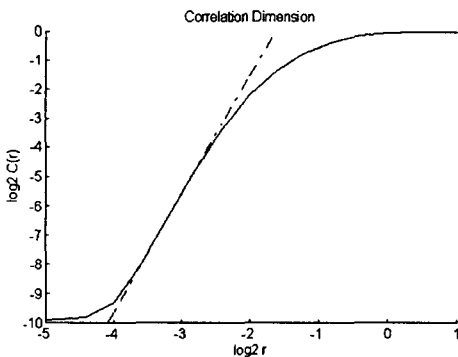


Fig. 10 Determination of fractal dimension

재구성된 어트랙터의 기하학적 형태는 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 시스템의 내재된 특성을 나타내므로, 결합 신호의 카오스적인 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라진다. Fig. 10은 용접부의 슬래그 혼입 결합에 대하여 스피어-카운팅(sphere counting)으로 프랙탈 차원을 계산한 결과로서, 프랙탈 차원은 반지름 r 이 증가할수록 선형적으로 증가하며 커지게 되고 일정 한계에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 포화하게 된다. 따라서 반지름 r 의 증가와 함께 나타난 직선 구간을 직선 회귀시켜 차원을 구하였으며, 전체적인 결과는 Fig. 11, Table 2와 같다.

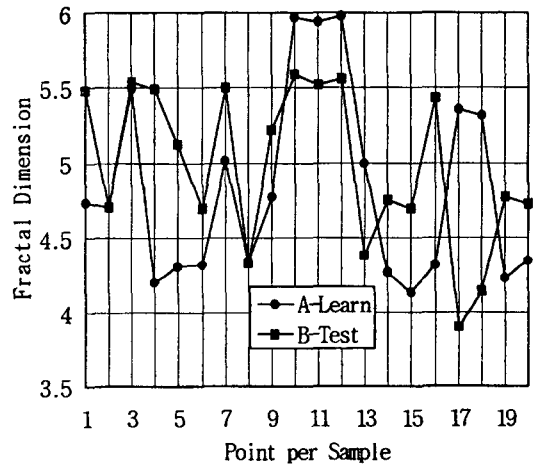


Fig. 11 Fractal dimensions according to sample points

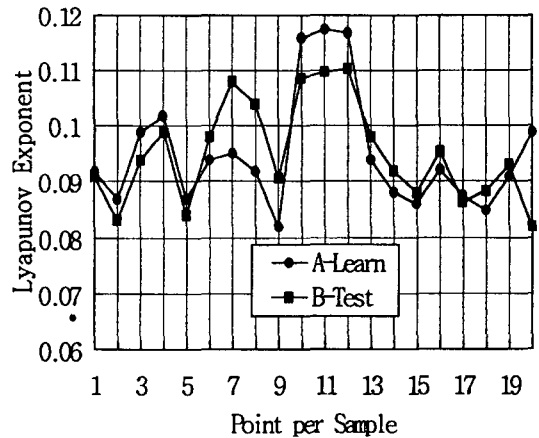


Fig. 12 Lyapunov exponents according to sample points

Table 2 Fractal dimensions & Lapunov exponent of signals in weld defects

condition of signals		fractal dimension		lyapunov exponent	
kind of welding defects	position	value per point	mean value	value per point	mean value
slag inclusion (learn)	within 0.5 skip	4.734	4.663	0.092	0.093
	within 0.5 skip	4.304		0.087	
	nearby 0.5 skip	5.792		0.104	
	within 1.0 skip	4.134		0.086	
	within 1.0 skip	4.351		0.099	
slag inclusion (test)	within 0.5 skip	5.282	4.926	0.091	0.090
	within 0.5 skip	5.405		0.084	
	nearby 0.5 skip	4.725		0.108	
	within 1.0 skip	4.699		0.088	
	within 1.0 skip	4.724		0.082	

Table 2에서 프랙탈 차원을 구하기 위한 조건으로는 25~30 point를 0.5 스킵과 1.0 스킵 거리를 기준으로 하였으며, 슬래그 혼입 결함의 학습과 테스트의 두 종류에 대하여 전체 point중에 0.5 스킵을 중심으로 2개씩 선택한 결과, 프랙탈 차원은 4.663, 4.926로 나타났다. 또한 용접부의 결함 신호에 대하여 위상 공간상에서 이웃한 궤도의 발산 정도를 평가하는 리아프노프 지수의 추출에 있어서는 파라미터들을 알맞게 설정하여 계산된 값들을 기준으로 수렴되어지는 마지막 데이터들 중 10개씩을 평균하여 결정된 결과 0.093, 0.090으로 나타났으며, 이로부터 같은 종류의 결함이라도 카오스성의 정도가 달라짐을 알 수 있다. 여기서 같은 슬래그 결함에 대하여 학습과 테스트로 분류한 것은 향후 형상 인식 분류기(신경회로망 시스템)의 구성시 입력 대상 특징으로 하기 위해서이다.

Fig. 11, Fig. 12는 프랙탈 차원과 리아프노프 지수의 전체적인 시뮬레이션 결과로 스킵 거리에 따른 분포 정도를 나타낸다.

두 경우 모두 0.5 스킵 거리이내로부터 1.0 스킵 거리 근방까지를 기준으로 하였으며, 전체적인 분포도에서 어느 정도의 변화는 있으나 0.5 스킵 거리(10~12 point)에서 초공간상의 복잡한 기하학적 구조와 이웃한 궤도의 발산 정도가 가장 높게 나타났다.

이러한 결과로부터 슬래그 혼입 용접 결함에 대해서는 다른 용접 결함과는 달리 형상 인식 평가시에 0.5 스킵거리 근방에서 프랙탈 차원과 리아프노프 지수가 높은 특이성을 나타내게 되어 쉽게 슬래그 혼입 결함 형상이라는 것을 알 수 있다.

따라서 이러한 카오스 특징을 이용하므로써 용접부 결함 시계열 데이터의 초음파 결함 신호 해석에 대한 정밀도를 높일 수 있다고 생각된다.

이상에서의 고찰 결과로부터 강한 비선형성을 나타내는 용접부의 슬래그 혼입 결함에 대한 초음파 신호는 시스템이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 결정론적인 카오스 특성으로 나타내게 된다.

본 연구에서는 초음파 형상 인식을 하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 최대 진폭의 50%를 고려하여 초공간과 카오스 이론에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

카오스 이론은 현재 세계적으로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 우리나라에서도 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다.

카오스는 그리스의 의미로는 천지 창조 이전의 완전한 무질서를 의미하지만 카오스 이론에서는 완전한 무질서가 아닌 겉으로 보기에는 무질서하지만 내적으로는 강한 규칙성을 갖고 있는 현상을 대상으로 하기 때문에 비선형 공학 해석의 분야에 있어서 향후 21세기에는 이론적 발전과 더불어 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

따라서 현재의 카오스 이론이 갖는 정성적 부분-스트레인지 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 푸앙 카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구의 미비-등에 대한 연구가 이루어져야 하며, 향후 임베딩 차원, 프랙탈 차원, 시간 지연, 리아프노프 지수에 관계되는 파라미터 설정 등에 대한 다각적인 고찰이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 페라이트계 탄소강 용접부에 대하여 A-sacn에 의한 시계열 초음파 결함 신호로부터 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 초음파 형상 인식에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 슬래그 혼입 결함의 고유 특징인 스트레인지 어트랙터의 구조, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 추출하였다. 이렇게 구한 카오스 특징들로부터 비선형성이 강한 용접부의 초음파 결함 신호에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 스트레인지 어트랙터의 궤적 변화로부터 같은 종류

의 용접 결합이라도 스킵 거리 변화에 따라 현저한 카오스성의 차이를 나타내었으며, 따라서 이러한 카오스성의 차이로부터 용접부 결합의 고유 특성을 평가할 수 있다.

- (2) 정량적 카오스 특징 추출로서 0.5~1.0 스킵 거리에 대한 프랙탈 차원과 리아프노프 지수의 평가에 있어서 슬래그 혼입 학습 결합의 경우는 4.663, 0.093, 테스트의 경우는 4.926, 0.090을 특징값으로 제시하였다.
- (3) 페라이트계 탄소강 용접부내의 슬래그 혼입에 대한 초음파 결합 신호로부터 카오스적 특징 추출 및 이에 대한 고찰 결과로부터 초음파 형상 인식 정밀도 향상의 새로운 방법을 제시하였다.
- (4) 카오스 특징 추출 과정에서 초공간의 평가 및 디스플레이를 위한 고차원 푸앙카레 맵과 설정되는 여러 가지 파라미터의 영향이 초음파 형상 인식에 영향을 주므로 향후 적절한 파라미터의 선정 기준이 필요하다.

참 고 문 헌

1. F. Perrone Thomas, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, 11, pp. 1268~1273, 1992.
2. 이 원, 황영택, 정의섭, 유영철, 윤인식, "초음파법을 이용한 용접부의 결합 검출과 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 I), pp. 41~46, 1996.
3. 이 원, 윤인식, "산업체 적용을 위한 초음파 검사 기술 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권 8호, pp. 49~56, 1997.
4. S. J. Song and L. W. Schmerr, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments using Probabilistic Neural Networks," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 11, pp. 395

~406, 1995.

5. I. Tsuda, T. Tahara and H. Iwanaga, "Chaotic Pulsation in Human Capillary Vessels and Its Dependence on Mental and Physical Conditions," International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 2, No. 2 pp. 312~332, 1992.
6. M. Sano and Y. Sawada, "Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series," Phy. Rev. Lett., Vol 55, No. 10, pp. 1082~1084, 1985.
7. 이병채, "시계열 데이터의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 281~284, 1995.
8. 김정석, 강명창, 이기용, 구세진, "엔드밀가공시 복합 계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석," 한국정밀공학회지, 제14권 11호, pp. 93~101, 1997.
9. F. Takens, "Lecture Notes in Mathematics," Springer, Vol. 898, P.266, 1981.
10. M. B. Kennel et al., "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical Construction," Physical Reviews A, Vol. 45, pp. 2403~3411, 1992.
11. W. Liebert and H. G. Schuster, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," Physics Letters A, Vol. 142, pp. 107~111, 1989.
12. Alan Wolf et al., "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series," Physica 16D, pp. 285~317, 1985.
13. 윤인식, 이성식, 김영환, 이정기, 김호철, "접촉식 초음파 시험에서 접촉매질의 영향에 관한 고찰," 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 206~211, 1996.