6dB Drop법에 의한 용접 결함 초음파 신호의 카오스성 평가

이 원*· 윤 인 식**

(1998년 2월 4일 접수)

Chaoticity Evaluation of Ultrasonic Signals in Welding Defects by 6dB Drop Method

Won Yi and In-Sik Yun

Key Words: Chaos(카오스), Ultrasonic Wave(초음파), Weld Zone(용접부), Degradation(열화), Time Delay(시간지연), Strange Attractor(스트레인지 어트랙터), Fractal Dimension(프랙탈 차원), Lyapunov Exponent(리아프노프 지수)

Abstract

This study proposes the analysis and evaluation method of time series ultrasonic signal using the chaotic feature extraction for ultrasonic pattern recognition. Features extracted from time series data using the chaotic time series signal analysis quantitatively welding defects. For this purpose, analysis objective in this study is fractal dimension and Lyapunov exponent. Trajectory changes in the strange attractor indicated that even same type of defects carried substantial difference in chaoticity resulting from distance shifts such as 0.5 and 1.0 skip distance. Such differences in chaoticity enables the evaluation of unique features of defects in the weld zone. In experiment, fractal(correlation) dimension and Lyapunov exponent extracted from 6dB ultrasonic defect signals of weld zone showed chaoticity. In quantitative chaotic feature extraction, feature values(mean values) of 4.2690 and 0.0907 in the case of porosity and 4.2432 and 0.0888 in the case of incomplete penetration were proposed on the basis of fractal dimension and Lyapunov exponent. Proposed chaotic feature extraction in this study enhances ultrasonic pattern recognition results from defect signals of weld zone such as vertical hole.

1. 서 론

모재와 용가재의 용융으로 형성된 용접부(weld zone)는 용착금속과 모재가 포함된 6~7개의 서로 다른 취약한 조직으로 이루어져 있어 인장과 압축이 동시에 작용하는 등 구조적으로 불안정한 상태를 나타내게 된다. 특히 용접부내의 체적결함인 기공(porosity), 불완전 용입(incomplete penetration) 등은 응력집중에 의한 강도 저하를 초래하여 피로파괴, 손상과정으로의 열화(degradation)에 직접적 원인이 되기도 한다. 따라서 용접부에 존재하는 각종 결함을 검출하고 이에 대해 정량적으로 평가하는 것은 구조물 전체의 건전성 및 안전성측면에서 대단히 중요하다.

현재 용접부 내부 결함의 검출을 위하여 널리 사용되고 있는 방법으로는 방사선 투과[1]와 초음파 탐상[2] 등과 같은 비파괴 검사법을 들 수 있다.

초음파 탐상은 화학·화력·원자력 플랜트의 비파괴검사 방법중에서 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[3]은 정량적 강도평가를 가능하게 함으로서 피로파괴와 같은 대형사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 이러한 용접부 결함의 종류 판별에 있어서는 결함으로부터의 초음파 신호에 대한 정량적 특징 추출(feature extraction)과 추출한 특징으로부터 초음파와의 관계를 해석하는 것이 첫

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

** 회원, 대한검사기술(주)

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 전압(peak - to - peak voltage), 하강 시간(fall time), 하강 기울기(fall slope), 펄스 폭(pulse duration) 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 신뢰도가 낮아지는 등의 문제점을 갖고 있다. 이와 같이 일반적인 신호 분석법으로 전체파형을 고려한 정량적 특징을 추출하기 어려운 경우에 대하여 최근 인공지능 기법중의 하나인 카오스 해석(chaotic analysis)에 의한 방법[4,5]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 신뢰도 높은 해석이 가능하다.

특히 이[6] 등에 의한 인간 심박 변화율의 카오스적 연구와 김[7] 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸의 카오스적 해석은 생체역학 분야와 공구 마멸의 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 카오스 이론은 비선형 시스템에 대한 해석에 있어서 강점을 갖고 있지만 생체 분야 및 특정 공학 분야 외에는 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 비선형 시계열 신호 분석시에 유용한 카오스 이론을 이용하여 용접부 결함 검출 및 판별을 위하여 사용하고 있는 6dB drop 법에 의한 초음파 결함 신호로부터 카오스적 정도를 확인하고, 정량적 특징 추출을 하므로서 초음파 형상 인식에 대하여 평가하고자 하였다.

이를 위하여 페라이트계 탄소강 용접부의 결함(기공, 불완전 용입)에 대하여 0.5 스킵(skip)이내와 1.0 스킵 거리를 대상으로 횡파 사각법에 의한 초음파 결함 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. 카오스 특징 추출

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(상관차원)과 리아프노프 지수를 추출하게 된다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상공간으로 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[8]을 사용하였다. 즉, i개의 데이터가 주어졌을 때 식 (1)과 같이 주어지는 m차원 벡터 $\overline{X}(i)$를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로서 어트랙터가 재구성된다.

$$\begin{aligned}
\overline{X}(1) &= (x(1), x(1+\tau), x(1+2\tau), \cdots, x(1+(m-1)\tau)) \\
\overline{X}(2) &= (x(2), x(2+\tau), x(2+2\tau), \cdots, x(2+(m-1)\tau)) \\
&\vdots \\
\overline{X}(i) &= (x(i), x(i+\tau), x(i+2\tau), \cdots, x(i+(m-1)\tau))
\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $x(i)$는 주어진 시계열 데이터이며, m은 임베딩 차원(embedding dimension)을, τ는 시간지연(time delay)을 나타낸다.

2.2 임베딩 차원 및 시간 지연의 결정

임베딩 차원을 결정하는 방법으로는 상관차원에 따라 최소 임베딩 차원을 결정할 수 있는 fill factor 알고리즘[9]을 이용하는 방법과 Kennel[10]이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법이 있는데, 본 연구에서는 정확도가 더 높다고 알려져 있는 FNN 방법을 이용하였다.

FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서

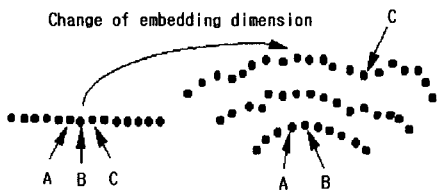


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor.

는 어트랙터위의 두 점이 최근접 이웃점(nearest neighbor)이지만 임베딩 차원이 한 차원 증가될 경우에는 근접점이 되지 않는 점을 말하며 임베딩 차원을 증가시키면서 FNN비를 계산하여 FNN비가 0 퍼센트 근처일 때의 임베딩 차원을 찾아 그 시계열 데이터의 임베딩 차원으로 결정한다. FNN비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 갯수를 구하고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다.

시간지연 τ를 이용한 어트랙터상의 점은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}(n)=[x\{n\},x\{n+\tau\},x\{n+2\tau\},\cdots,x\{n+(m-1)\tau\}] \quad (2)$$

기준점 $\hat{X}(n)$과 최근접 이웃점 $\hat{X}(q)$ 사이의 유클리디안 거리는 식 (3)과 같다.

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

여기서 k는 어트랙터의 점, τ는 시간지연이다.

임베딩 차원이 m에서 $m+1$로 한 차원 증가할 경우, 식 (4), 식 (5)와 같이 된다.

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

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

여기서 R_{tol}는 FNN에 대한 평가 임계값이다.

시간지연은 Liebert와 Schuster가 제안한 상관적분 방법[11]을 이용하여 결정하였으며 이는 시간지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩차원 및 시간지연을 계산함으로서 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원 및 리아프노프 지수를 추출하여 시계열 데이터의 카오스적 특성을 정량적으로 평가할 수 있게 된다.

2.3 프랙탈 차원

프랙탈 차원은 시계열 신호에 대하여 재구성된 어트랙터의 기하학적 특징을 표현한다. 프랙탈 차원은 정수값이 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 Procassia가 제안한 식 (6)을 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

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

여기서, Θ는 계단함수(step function)이며, $\overline{X}(i)$와 $\overline{X}(j)$는 i와 j번째 어트랙터를 구성하는 점이다. 또한, N은 데이터의 수, r은 반지름, 그리고 $|\overline{X}(i)-\overline{X}(j)|$는 두 점사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관적분을 계산함으로서 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이 r인 구를 그리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터상의 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 차원으로 나타낸다.

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

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 나타

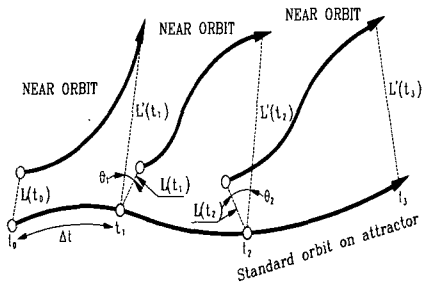


Fig. 2 Schematic for Lyapunov exponent calculation.

내어 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 Wolf[12]의 방법을 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, Δt이후의 t_1에서 기준궤적 위의 점과 이웃궤적 사이의 거리를 $L'(t_1)$이라 하고, $L(t_0)$와 $L'(t_1)$의 지수비를 구한다. 셋째, t_1에서의 최근접 이웃 점을 찾아 거리 $L(t_1)$을 계산한다. 넷째, Δt시간이 지난 t_1에서 둘째 과정을 반복하여 지수비를 구한다. 다섯째, 위와 같은 과정을 M번 반복하여 평균 지수율을 계산하며, 최종적인 리아프노프 지수 λ는 식 (8)과 같다.

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

여기서 M은 반복 횟수, $\Delta t = t_{k-1} - t_k$, k는 시간 상태이다. 이렇게 구해진 리아프노프 지수는 M이 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 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(LeCroy 사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 경사각 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70° , 진동자 크기 : 8×9mm), 접촉매질(기계유)[13] 등이며, 실험에 있어서는 경사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관관계에 의하여 오실로스코프의 CRT상에 나타나는 결함신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 3 및 Table 1과 같은 인공결함을 내재하고 있는 시험편(Flaw Manufacturing Tech. 사 제작)을 이용하여 기공 및 불완전 용입의 용접부 결함에

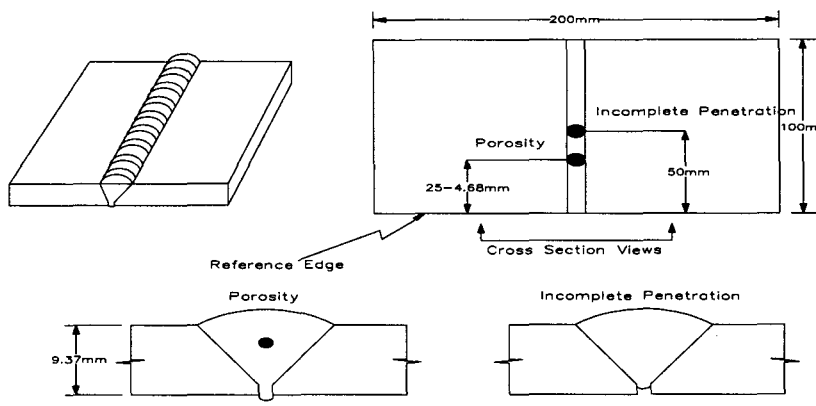


Fig. 3 Configuration of welding defects.

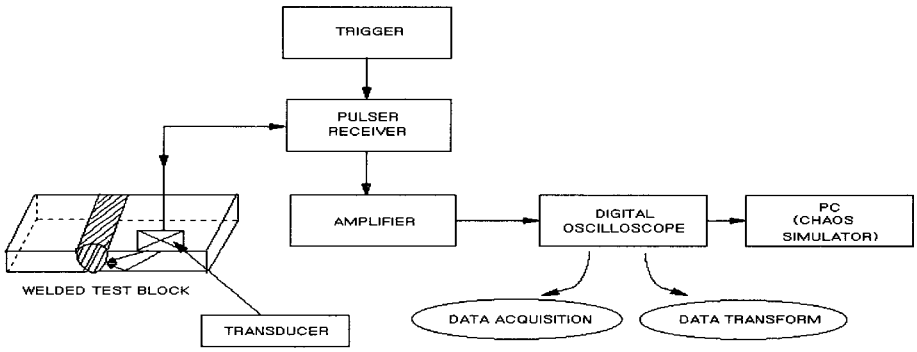


Fig. 4 Schematic of data acquisition and processing.

Table 1 Properties and configurations of welding defects.

(unit : mm)

defect type	start of defect	total defect length	defect depth	
			height	below surface
porosity	25	1.56	1.56	3.12
incomplete penetration	50	4.16	1.56	surface

대하여 Fig. 4와 같은 구성으로 최대진폭을 기준으로 scan하면서 50% 진폭을 설정하고 이에 대한 시계열 데이터를 신호로 획득하여 시간영역상의 신호 특성 분석으로 결함에 대한 초음파 형상인식을 정량적으로 평가하고자 하였다.

3.2 6dB drop법에 의한 맞대기 용접부의 초음파 신호

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 초음파는 결함 형상에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-scan법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 나타나게 된다. 이러한 결함의 형상을 파악하기 위해서는 scan을 하여 결함을 찾은 후, 최대 진폭으로부터 50% 낮은 진폭을 기준으로 목돌림(tilting)을 하여 정량적 평가를 하여야 한다. 그러나 기존에는 관찰자의 주관성이 포함된 파형의 형태와 진폭을 파라미터로 평가하고 있으며, 따라서 6dB drop법에 의한 초음파 신호의 정량적인 해석은 결함의 형상을 파악하고 결정하기 위한 선결 과제라 할 수 있다.

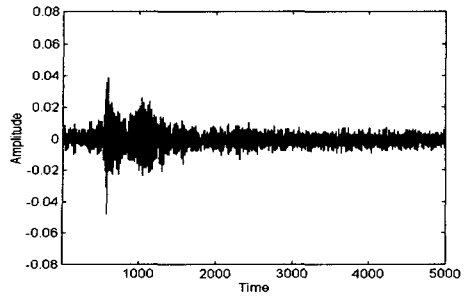
실험에 사용된 시계열 신호는 페라이트계 탄소강 용접부의 기공과 불완전 용입에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 0.5 스킵 거리(skip distance)~1.0 스킵 거리내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 5는 이를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 한 결함당 23~25 point에 대하여 10ns와 100MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5000샘플이다. (a), (b)는 용접부내의 기공 결함에 대한 신호, (c), (d)는 불완전 용입에 대한 결함신호를 나타낸다. 횡파 사각 탐촉자를 용접부에 최대한 근접시켜 scan하면서 결함신호를 취득하여 각각의 point에 대하여 최적의 특징 추출을 하고자 하였다.

3.3 특징 추출

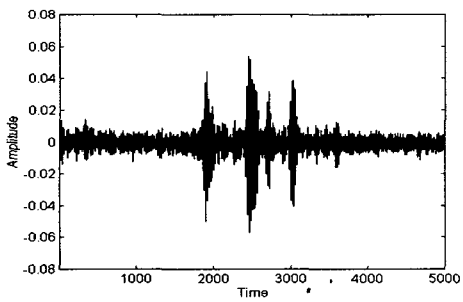
시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 3000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 임베딩 차원, 시간지연, 스트레인지 어트랙터의 형상, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 구하여 카오스에 의한 정량적 특징 추출의 가능성을 확인하고자 하였다.

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

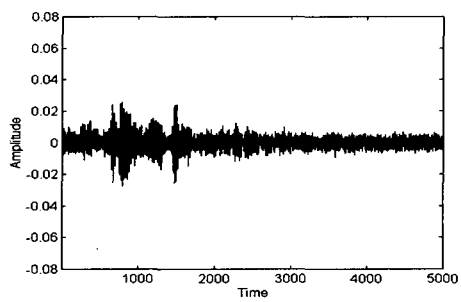
최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, Fig. 6은 불완전 용입에 대하여 임베딩 차원을 설정한 결과이다. x축은 임베딩 차원, y축은 FNN의 비, z축은 시간지연을 나타낸다. FNN 방법을 이용하여 임베딩 차원을 설정하는데 있어서는 평가 임계치의 설정이 필요하며, 이를 위하여 재구성된 어트랙터에 대해 평가 임계치를 변화시켜 가면서 최적의 값을 구하고자 하였다.



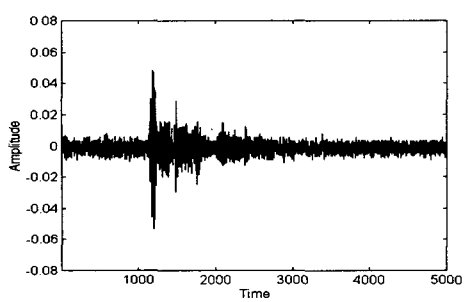
(a) Defects signal within 0.5 skip(porosity)



(b) Defects signal within 0.5~1.0 skip(porosity)



(c) Defects signal within 0.5 skip(IP)



(d) Defects signal within 0.5 ~1.0 skip(IP)

Fig. 5 Time series signal from welding defects (6dB standard).

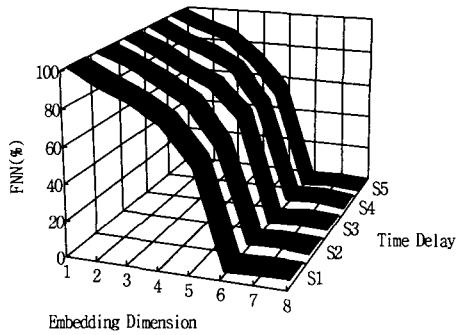
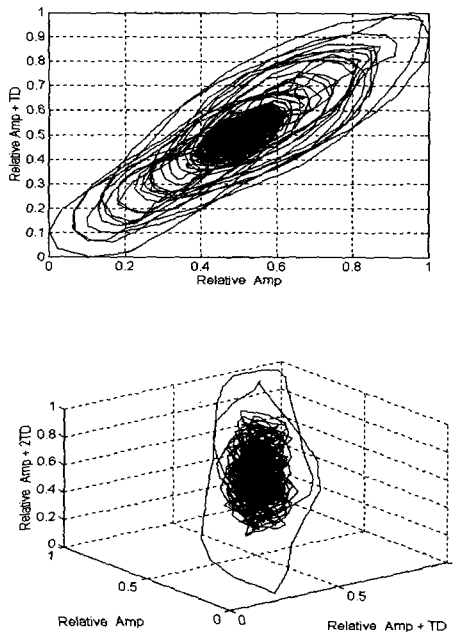


Fig. 6 Determination of embedding dimension.

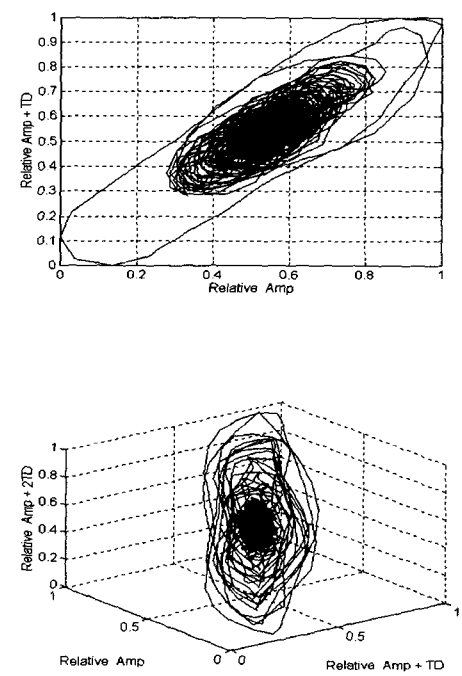
일반적으로 평가 임계치를 10이하로 설정할 경우 이산화 신호의 샘플링 오차나 양자화 오차에 의한 영향이 커질수 있고 너무 크면 최적값을 찾기 어려워 많은 반복 시뮬레이션을 하여 최적의 평가 임계치를 100으로 설정할 수 있었으며, 또한 시간지연의 설정은 2로 나타났다.

임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0퍼센트로 떨어지는 것으로부터 불완전 용입에 대한 초음파 결함 신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

결함신호 속에 내재되어 있는 카오스적 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 카오스적 어트랙터의 고찰이다. 즉 어트랙터상의 운동은 추상적이지만 실제계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성, 꼬임은 변화, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다. Fig. 7과 Fig. 8은 용접부의 기공과 불완전 용입 결함에 대하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플중에 결함 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3000샘플씩을 적용하였으며, 두 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다. 기공의 신호 및 어트랙터의 궤적과 불완전 용입이 나타내는 결과는 전반적으로 상당히 차이가 있으며, 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 결함에 대한 카오스적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결함의 종류에 따라 2, 3차원으로 구성한 스트레인지 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관관

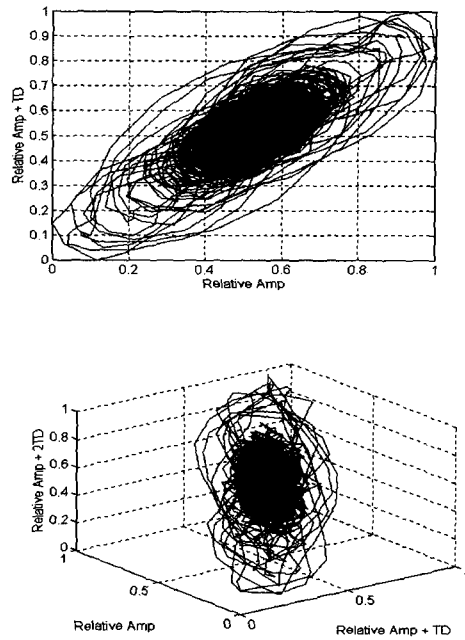


(a) 2-3 dimensional strange attractor (0.5skip)

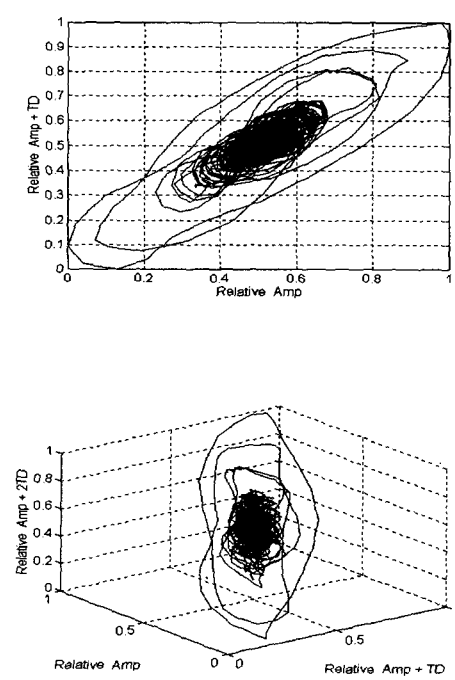


(b) 2-3 dimensional strange attractor (1.0skip)

Fig. 7 Strange attractor in case of porosity.



(a) 2-3 dimensional strange attractor (0.5skip)



(b) 2-3 dimensional strange attractor (1.0skip)

Fig. 8 Strange attractor in case of incomplete penetration.

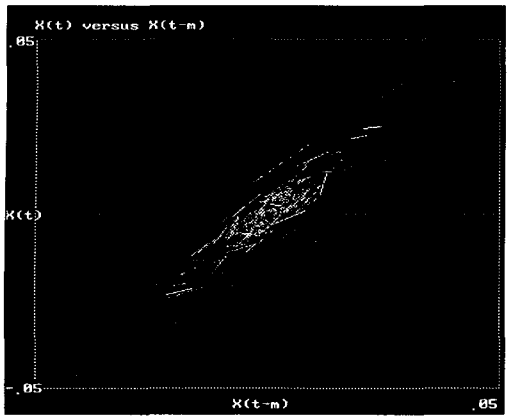


Fig. 9 2D-Phase space reconstruction by Poincare section.

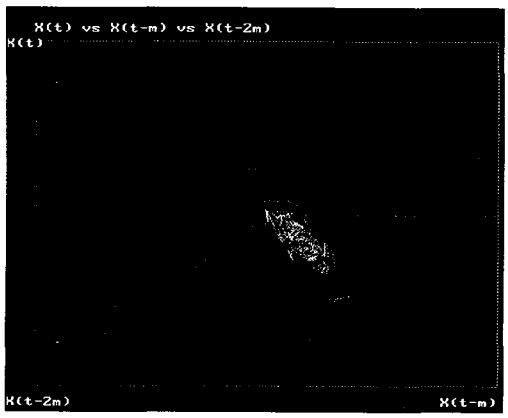


Fig. 10 3D-Phase space reconstruction by Poincare section.

계에 의한 어트랙터의 궤적으로부터 스트레인지 어트랙터의 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다. 카오스적 어트랙터는 대상신호의 고유특징을 나타내어 주는 것은 사실이나 3차원 이상의 공간에 대해서는 대단히 복잡한 경로를 통해 감아 들어가면서 밖에서는 보이지 않는 내적인 구조가 되어 난해하고 어지러운 궤적으로 나타나게 된다.

따라서 내부 구조에 대한 해석 및 평가로부터 대상 신호를 정량화할 수 있으며, 이에 대해서는 어트랙터를 가로지르는 단면을 취하는 것(푸앙카레 단면화)으로 가능하다. Fig. 9와 Fig. 10은 0.5 스킵 거리 근방에서의 불완전 용입 결함에 대하여 2차원과 3차원으로 푸앙카레 단면을 취한 결과를 나타낸다.

여기서 m은 시계열 신호에 대한 시간지연이며,

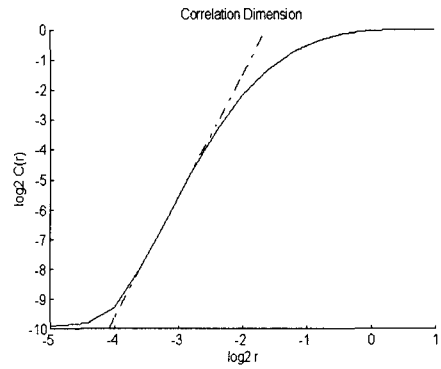


Fig. 11 Determination of fractal dimension.

어트랙터상의 선분은 이전의 위치에서 각각의 포인트들에 대한 변위를 동적으로 나타낸다.

Fig. 9와 Fig. 10에서의 푸앙카레 사상에 의한 어트랙터의 구조는 두 경우 모두 높은 에너지를 갖는 외측의 궤적으로부터 내측으로 휘돌아 들어가는 형상으로 되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 스트레인지 어트랙터의 외적형상과 내부구조를 파악하므로서 대상신호의 동적 궤적특성을 파악할 수 있다.

재구성된 어트랙터의 기하학적 형태는 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 결함신호 속에 내재된 특성을 나타내게 되므로 카오스적인 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라진다. 따라서 scan 대상부 각각에 대하여 한 개씩의 프랙탈 차원값을 갖게 되며, 이러한 프랙탈 차원값이 커질수록 어트랙터의 기하학적 구조는 복잡하다는 것을 의미한다.

Fig. 11은 용접부의 기공 결함에 대하여 스피어 카운팅(sphere counting)으로 프랙탈 차원을 계산한 결과로서, 프랙탈 차원은 반지름 r이 증가할 수록 선형적으로 증가하며 커지게 되고 일정 한계에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 포화하게 된다. 따라서 반지름 r의 증가와 함께 나타난 직선구간을 직선 회귀시켜 차원을 구하였으며, 전체적인 결과는 Table 2와 같다.

Table 2에서 프랙탈 차원을 구하기 위한 조건으로는 기공과 불완전 용입의 경우 모두 4 point를 0.5 스킵과 1.0스킵 거리를 기준으로 하였고 나머지 한 point는 0.5스킵점 근방에서 얻어진 결과로, 기공은 평균 4.2690, 불완전 용입은 평균 4.2432의 정량적 프랙탈 특징값을 나타내었다. 전반적으로 기공의 경

Table 2 Fractal dimensions of all signals in welding defects(6dB drop method).

Condition of signals			Fractal dimensions	
Kind of welding defects	Position	Tilting	Value per point	Mean value
Porosity	within 0.5 skip	about 5°	4.6510	4.2924
	within 0.5 skip	about 10°	4.1496	
	nearby 0.5 skip	about 10°	4.6086	
	within 1.0 skip	about 10°	3.9918	
	within 1.0 skip	about 5°	4.0614	
Incomplete penetration	within 0.5 skip	about 5°	4.3102	4.1640
	within 0.5 skip	about 10°	4.4022	
	nearby 0.5 skip	about 10°	4.2385	
	within 1.0 skip	about 10°	3.9462	
	within 1.0 skip	about 5°	3.9231	

Table 3 Lyapunov exponents of all signals in welding defects(6dB drop method).

Condition of signals			Lyapunov exponent	
Kind of welding defects	Position	Tilting	Value per point	Mean value
Porosity	within 0.5 skip	about 5°	0.1165	0.0966
	within 0.5 skip	about 10°	0.0923	
	nearby 0.5 skip	about 10°	0.0986	
	within 1.0 skip	about 10°	0.1012	
	within 1.0 skip	about 5°	0.0745	
Incomplete penetration	within 0.5 skip	about 5°	0.1028	0.0896
	within 0.5 skip	about 10°	0.0915	
	nearby 0.5 skip	about 10°	0.0975	
	within 1.0 skip	about 10°	0.0810	
	within 1.0 skip	about 5°	0.0754	

우가 불완전 용입의 경우보다는 높은 값을 나타내었으며, 이로부터 같은 재질내의 결함신호라도 결함의 종류에 따라 카오스성의 정도가 달라짐을 알 수 있다.

Table 3은 용접부의 결함신호에 대하여 위상공간상에서 이웃한 궤도의 발산 정도를 평가하는 리아프노프 지수의 결과를 나타낸다. Table 3에서 리아프노프 지수값이 클수록 이웃한 궤도의 발산이 커지게 되고, 이는 카오스성이 더 커진다는 것을 의미한다.

리아프노프 지수를 구하기 위하여 파라미터들을 알맞게 설정한 후, 계산된 값들을 기준으로 최종적인 리아프노프 지수는 수렴되어지는 마지막 데이터들 중 10개씩을 평균하여 결정하였다.

전체 시뮬레이션 결과, 기공의 경우에는 평균 0.0907, 불완전 용입의 경우는 평균 0.0888로서 프랙탈 차원에 대한 고찰 결과와 거의 비슷하게 나타났으며, 따라서 이러한 카오스 특징을 이용하므로서 용접부 결함 시계열 데이터의 초음파 결함신호 해석에 대한 신뢰도를 높일 수 있다고 생각된다.

이상에서의 고찰 결과로부터 강한 비선형성을 나타내는 용접부의 기공과 불완전 용입에 대한 초음파 신호는 시스템이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 결정론적인 카오스 특성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 초음파 형상 인식을 하는데 있어서 6dB drop법에 의한 초음파 신호를 최대 진폭(에너지)의 50%를 고려하여 카오스 이론에 의한 정량적이고도 신뢰도 높은 해석을 하고자 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 페라이트계 탄소강 용접부에 대하여 6dB drop법에 의한 시계열 초음파 결함신호로부터 초음파 형상인식에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 고유 특징인 스트레인지 어트랙터, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 추출하였다. 이렇게 구한 카오스 특징들로부터 비선형성이 강한 용접부의 초음파 결함신호에 대하여 정량적이면서 신뢰도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 최대 진폭의 50%를 기준으로 한 6dB drop법으로 초음파 결함신호의 카오스적 특징 추출 및 이에 대한 고찰 결과로부터 기존의 특징 추출과는 다른 초음파 형상인식 신뢰도 향상의 새로운 방법을 제시하였다.

(2) 2차원, 3차원 스트레인지 어트랙터의 궤적 변화로부터 같은 종류의 결함이라도 0.5스킵 거리와 1.0스킵 거리 등의 거리 변화에 대하여 서로 다른 카오스성을 나타내었으며, 이러한 카오스성의 차이로부터 용접부 결함의 고유 특성을 평가할 수 있다.

(3) 정량적 카오스 특징 추출로서 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 기준으로 하여 기공의 경우는 평균 4.2690, 0.0907, 불완전 용입의 경우는 평균 4.2432, 0.0888을 결함 특징값으로 제시하였다.

(4) 페라이트계 탄소강 용접부의 기공 및 불완전

용입 결함 검출에 관련되는 임베딩 차원은 6으로 나타났으며, 이에 대하여 푸앙카레 단면화로 인한 2 차원적 평가의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

(1) Thomas, F. P., 1992, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," *Materials Evaluation*, Vol. 50, 11, pp. 1268~1273.

(2) 이 원, 황영택, 정의섭, 유영철, 윤인식, 1996, "초음파법을 이용한 용접부의 결함 검출과 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(Ⅰ), pp. 41~46.

(3) Song, S. J. and Schmerr, L. W., 1995, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments using Probabilistic Neural Networks," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 11, pp. 395~406.

(4) Tsuda, I., Tahara, T. and Iwanaga, H., 1992, "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.

(5) Sano, M. and Sawada, Y., 1985, "Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series," *Phy. Rev. Lett.*, Vol 55, No. 10, pp. 1082~1084.

(6) 이병채, 1995, "시계열 데이타의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 281~284.

(7) 김정석, 강명창, 이기용, 구세진, 1997, "엔드밀 가공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석," 한국정밀공학회지, 제14권 11호, pp. 93~101.

(8) Takens, F., 1981, "Lecture Notes in Mathematics," Rand, D. A. and Young,L. S.(eds.), Springer, Vol. 898, p. 266.

(9) 장재호, 이병채, 이명호, 1994, "생체 카오스의 최적 어트랙터 재구성에 관한 연구," 대한의용생체공학회 추계학술 대회 논문집, Vol. 16, No. 2, pp. 142~146.

(10) Kennel, M. B., et al., 1992, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical Construction," *Physical Reviews A*, Vol. 45, pp. 2403~3411.

(11) Liebert, W. and Schuster, H. G., 1989, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," *Physics Letters A*, Vol. 142, pp. 107~111.

(12) Wolf, A., et al., 1985, "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series," *Physica 16D*, pp. 285~317.

(13) 윤인식, 이성식, 김영환, 이정기, 김호철, 1996, "접촉식 초음파 시험에서 접촉매질의 영향에 관한 고찰," 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 206~211.