研究論文

오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 초음파 형상 인식 평가를 위한 카오스 시뮬레이터의 구축

이 원* · 윤 인 식** · 장 영 권***

Construction of chaos simulator for ultrasonic pattern recognition evaluation of weld zone in austenitic stainless steel 304

Won Yi*, In-Sik Yun** and Young-Kwon Chang***

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)

Abstract

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

Features extracted from time series data using the chaos time series signal analyze quantitatively weld 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 chaosity resulting from distance shifts such as 0.5 and 1.0 skip distance. Such differences in chaosity enables the evaluation of unique features of defects in the weld zone.

In quantitative chaos feature extraction, feature values of 4.511 and 0.091 in the case of side hole and 4.539 and 0.115 in the case of vertical hole were proposed on the basis of fractal dimension and Lyapunov exponent.

Proposed chaos feature extraction in this study can enhances ultrasonic pattern recognition results from defect signals of weld zone such as side hole and vertical hole.

※ 1998년 5월 25일 접수

* 비회원, 숭실대학교 기계공학과

** 정회원, 숭실대학교 대학원/대한검사기술(주)

*** 비회원, 생산기술연구원 산업기술시험평가연구소

1. 서 론

고온의 아크 열원에 의해 모재와 용가재의 용융으로 형성된 용접부(weld zone)는 열변형의 불균일로 인장과 압축의 잔류 응력이 동시에 작용하는 구조상, 전체적으로 불안정한 상태를 나타내게 된다. 특히 고온 고압의 가혹한 환경하에 사용되는 배관 용접부내의 체적 결함은 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 필수적이라 할 수 있다.

최근 내식 및 내열의 우수성으로 인하여 화학 플랜트와 원자력 플랜트에서 후육 배관 라인에 오스테나이트계 스테인리스강의 사용이 점점 증가하면서 용접후 용접부에 대한 정량적 비파괴 평가(Quantitative Non-Destructive Evaluation : QNDE)의 중요성이 더욱 높아지게 되었다.

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

이중에서 방사선 투과에 의한 방법은 여러 산업 분야에서 가장 폭넓게 사용되고 있지만, 대상재의 두께 증가에 따른 감도의 저하, 촬영한 필름 현상에 의한 결과 파악의 지연, 인체피폭 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[3,4]은 결함의 종류에 따른 용접부의 정량적 강도 평가를 가능하게 하므로서 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 첫번째의 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 다르다는 점, 또한 후육 대상재일 경우 재질내 초음파 빔거리의 증가로 인하여 에너지의 현저한 감소를 나타내어 결함 정보를 쉽게 판단할 수 없는 점, 노이즈(noise) 수준을 고려한 임계치의 설정과 결함으로부터의 초음파 신호중 해석이 가능한 부분 파형만을 적용하는 단점으로 인하여 정밀도가 낮아지는 등의 많은 문제점을 갖고 있다. 이와 같이 일반적인 특징 추출법으로 전체 파형을 고려한 정량적 특징을 추출하기 어려운 경우에 대하여 최근 인공지능 기법중의 하나인 카오스 해석(chaos 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 카오스적 연구와 김[8] 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸의 카오스적 해석은 생체 역학 분야와 공구 마멸의 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 카오스 이론은 비선형 해석 및 평가에 있어서 강점을 갖고 있지만 생체 분야 및 특정 공학 분야에 도입이 시작되는 초기 단계로 그 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 카오스 이론을 이용하여 용접부의 초음파 결함 신호로부터 카오스적 정도를 확인하고, 초공간을 고려한 어트랙터의 차원으로부터 정량적 특징 추출을 할 수 있는 카오스 시뮬레이터를 구축하여 초음파 형상 인식에 대하여 평가하고자 하였다.

이를 위하여 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 결함(횡공, 수직공)에 대하여 1.0 스킵거리 이내를 대상으로 횡파 사각법에 의한 초음파 결함 신호를 최대 에너지와 최대 에너지의 50%를 고려하여 시계열 데이터로 획득하였다. 이렇게 획득한 시계열 데이터에 대하여 결함으로부터의 전체 파형을 고려한 시간 지연(time delay)과 임베딩

차원(embedding dimension)을 설정한 후, 초공간적 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 평가하여 본 연구에서 구축한 카오스 시뮬레이터에 의한 초음파 형상 인식의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 초공간과 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 정량화하게 된다.

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, i개의 데이터가 주어졌을 때, 식 (1)과 같이 주어지는 m차원 벡터 $\bar{X}(i)$를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로서 어트랙터가 재구성된다.

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

여기서 $x(i)$는 주어진 시계열 데이터이며, m은 임베딩 차원을, τ는 시간 지연을 나타낸다.

2.2 임베딩 차원 및 시간 지연의 결정

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

FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터 위의 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.

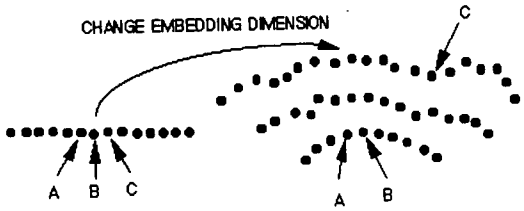


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

시간 지연 τ를 이용한 어트랙터 상의 점은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, FNN에 대한 평가임계값을 구하는 과정은 식(3), 식(4) 및 식(5)와 같다.

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

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

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

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

여기서 $\hat{X}(n)$은 기준점, $\hat{X}(q)$은 최근접 이웃점, R_{tol}는 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 point)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩 차원 및 시간 지연을 계산함으로서 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 Procassia가 제안한 식(6)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

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

여기서, θ는 계단 함수이며, $\bar{X}(i)$와 $\bar{X}(j)$는 i와 j번째 어트랙터를 구성하는 점이다. 또한, N은 데이터의 수, r은 반지름, 그리고 $|\bar{X}(i)-\bar{X}(j)|$는 두 점사이의 유클리디안 거리를 나타낸다.

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로서 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이 r인 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(V)으로 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 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 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, Δt 이후의 t_1에서 기준궤적 위의 점과 이웃궤적 사이의 거리를 $L'(t_1)$이라 하고, $L(t_0)$와 $L'(t_1)$의 지수 비를 구한다. 셋째, t_1에서의 최근접 이웃 점을 찾아 거리 $L'(t_1)$을 계산한다. 넷째, Δt 시간이 지난 t_1에서 둘째 과정을 반복하여 지수 비를 구한다. 다섯째, 위와 같은 과정을 M번 반복하여 평균 지수율을 계산하며, 최종적인 리아프노프 지수 λ는 식(7)과 같다.

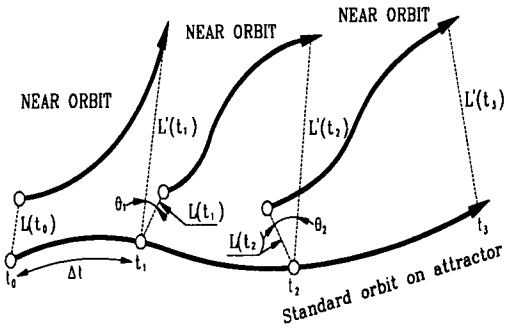


Fig. 2 Schematic for lyapunov exponent calculation

$$\lambda = \frac{1}{M\Delta t}\sum_{k=1}^{M}\log_2\frac{L'(t_k)}{L(t_{k-1})} \tag{7}$$

여기서, M은 반복 횟수, $\Delta t = t_{k-1} - t_k$ 이다. 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 디스 플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자(krautkrämer사의 상용 주파수 4MHz, 굴절각 : 70°), 접촉매질 등이다. 실험을 하는데 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 오실로스코프의 CRT상에 나타나는 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 3과 같은 시험편을 기계 및 방전 가공하였으며, Fig. 4는 실제의 시험편 형상을 나타낸다.

횡공 및 수직공(ø3mm×30mm)의 용접부 결함에 대하여 Fig. 5와 같은 구성으로 최대 진폭을 기준으로 Fig. 6과 같이 목돌림(tilting)을 병행하여 scan하면서 최대 진폭과 50% 진폭에 대한 시계열 데이터를 신호로 획득하여 시간 영역상의 신호 특성 분석으로 결함에 대한 초음파 형상 인식을 정량적으로 평가하고자 하였다.

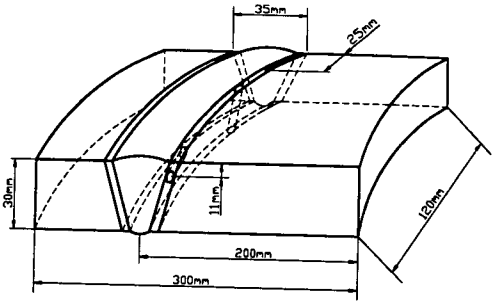


Fig. 3 Configuration of welding defects

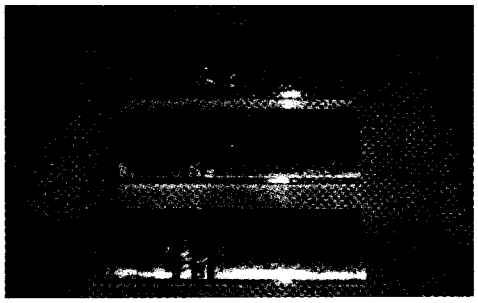


Fig. 4 Photograph of welding defect test blocks

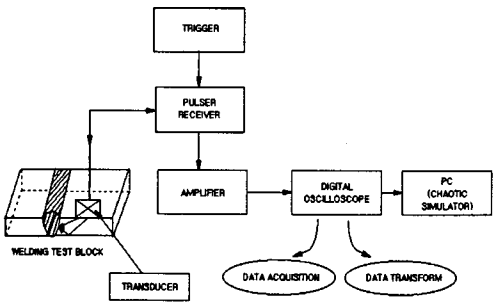


Fig. 5 Schematic of data acquisition and processing

3.2 맞대기 용접부의 초음파 결함 신호

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

종파의 음속 C_l과 횡파의 음속 C_s는 식(8)과 식(9)로 나타낼 수 있다.

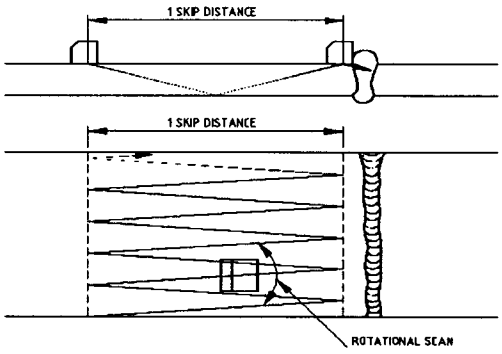


Fig. 6 Schematic of ultrasonic scan for defect detection

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)G}{\rho}} \quad (8)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9)$$

여기서 E는 종탄성 계수, k는 체적 탄성 계수, G는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ는 밀도, ν는 푸와송비이다.

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속으로 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 진폭과 50% 낮은 진폭을 기준으로 목돌림을 하여 정량적 평가를 하여야 한다. 그러나 기존에는 관찰자의 주관성이 포함된 파형의 형태와 최대 진폭을 기준으로 하였으나, 최대 진폭 50%에 대한 결함 에코를 평가 대상에 포함시키는 것은 결함의 형상을 파악하고 결정하는데 대단히 중요하다.

시뮬레이션에 사용된 시계열 신호는 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 횡공 및 수직공에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 0.5 스킵 거리(Skip Distance)~1.0 스킵 거리내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 7은 전체적인 신호의

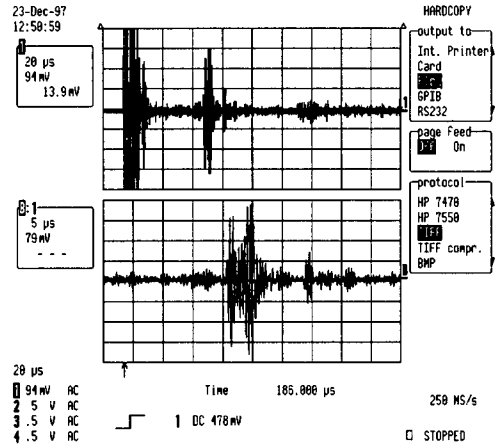


Fig. 7 Schematic of full signal of weld defect

형태를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 결함당 22~25 point에 대하여 40ns와 250MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5000샘플이다.

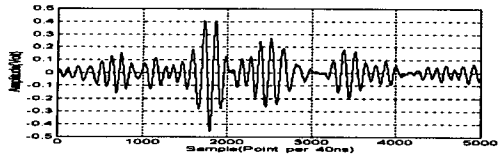
Fig. 8에서 (a), (b)는 용접부내의 횡공 결함, (c), (d)는 수직공 결함으로 0.5 스킵 거리와 1.0 스킵 거리 근방에서의 결함 신호를 나타낸다. 횡파 사각 탐촉자를 용접부에 최대한 근접시켜 scan하면서 결함 신호를 취득하여 각각의 point에 대하여 최적의 특징 추출을 하고자 하였다.

3.3 특징 추출

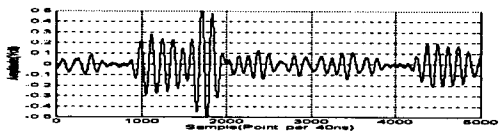
시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 4000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 임베딩 차원, 시간 지연, 스트레인지 어트랙터의 형상, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 구하여 카오스에 의한 정량적 특징 추출의 가능성을 확인하고자 하였다.

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.

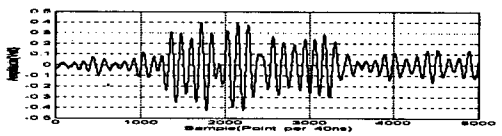
최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, Fig. 9는 불완전 용입결함에 대하여 임베딩 차원을 설정한 결과이다. x축은 임베딩 차원, y축은 FNN의 비, z축은 시간 지연을 나타낸다. FNN 방법을 이용하여 임베딩 차원을 설정하는데



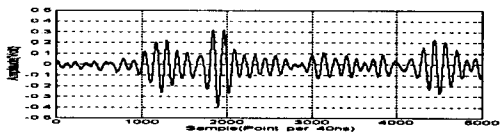
(a) Defects signal from nearby 0.5 Skip(side hole)



(b) Defects signal from nearby 1.0 Skip(side hole)



(c) Defects signal from nearby 0.5 Skip(vertical hole)



(d) efects signal from nearby 1.0 Skip(vertical hole)

Fig. 8 Time series signal from weld defect

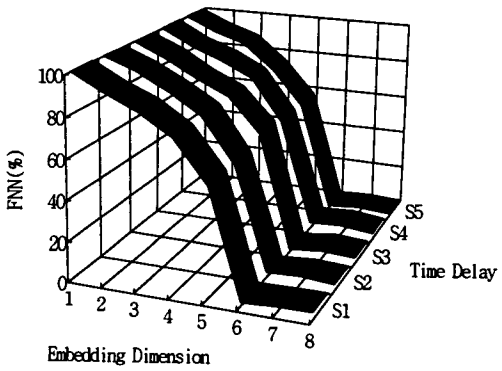


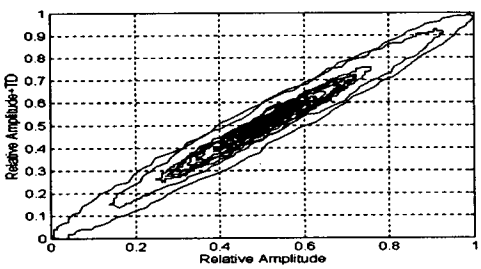
Fig. 9 Determination of embedding dimension

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 커질 수 있고 너무 크면 최적값을 찾기 어려워 많은 반복 시뮬레이션을 하여 최적의 평가 임계치를 100으로 설정할 수 있었으며, 또한 시간 지연의 설정은 2로 나타났다.

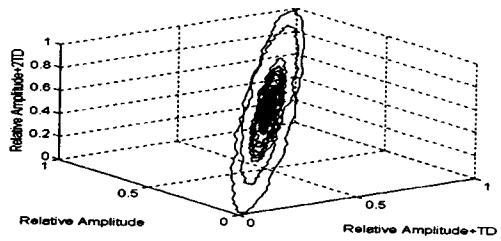
임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0(%)로 떨어지는 것으로부터 원공 결함에 대한 초음파 결함 신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다. 따라서 고차원 어트랙터의 기하학적 평가는 적어도 초공간상에서 가능하며, 카오스적 어트랙터를 이용하므로서 해석 대상 결함에 대하여 고차원 공간상에서의 정량적 해석 및 평가를 할 수 있다.

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

Fig. 10, Fig. 11, 및 Fig. 12는 각각 용접부의 횡공과 수직공에 대하여 스킵 거리별로 scan 하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타내었다. 전체 5000샘플중에 결함 신호와 무관한

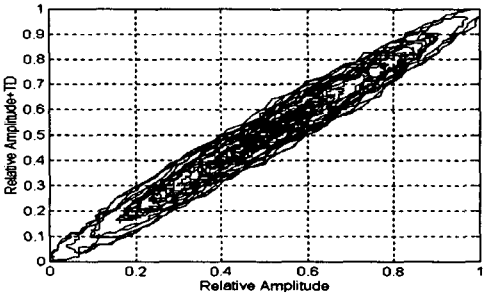


(a) Two dimension strange attractor

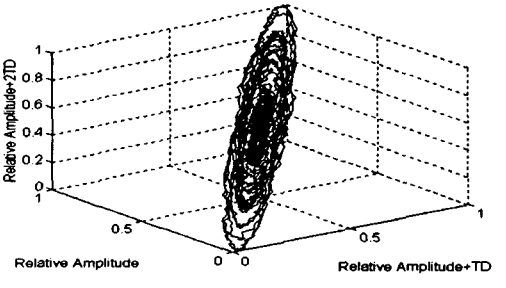


(b) Three dimension strange attractor

Fig. 10 Strange attractor analysis from nearby 0.5 Skip(side hole)

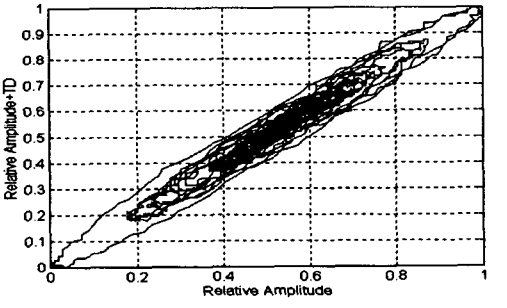


(a) Two dimension strange attractor

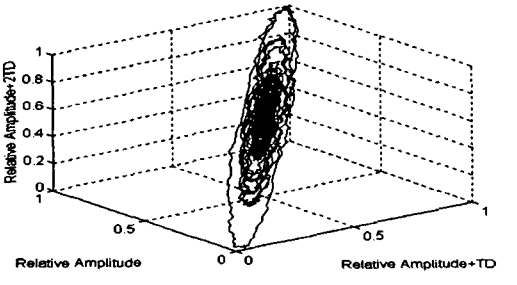


(b) Three dimension strange attractor

Fig. 11 Strange attractor analysis from nearby 0.5 Skip (vertical hole)



(a) Two dimension strange sttractor



(b) Three dimension strange attractor

Fig. 12 Strange attractor analysis from nearby 1.0 Skip (side hole)

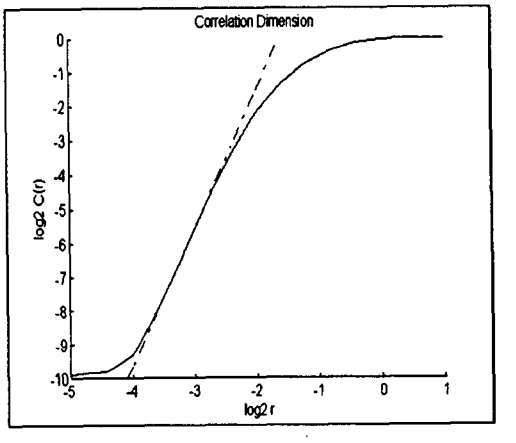


Fig. 13 Determination of fractal dimension

구간은 샘플을 적절히 조절하여 4000샘플씩을 적용하였으며, 세가지 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다. 0.5 스킵 거리와 1.0 스킵 거리 근방에서의 결함 특성인 어트랙터의 궤적 변화는 상당히 차이가 있으나 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 결함에 대한 카오스적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다.

수직공의 경우가 횡공보다 어트랙터의 궤적 변화가 더욱 심하며, 에너지의 특성도 상당히 큰 차이를 나타내었으며, 따라서 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결함의 종류에 따라 2차원으로 구성한 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 나타나게 된다. 그러나 내부 구조에 대한 해석 및 평가로부터 대상 신호를

정량화할 수 있으며, 이에 대해서는 스트레인지 어트랙터를 3차원으로 구성하는 것으로 가능하다. 구성한 3차원 스트레인지 어트랙터에 있어서도 2차원과 거의 같은 경향을 나타내었으며, 1.0 스킵 거리와 0.5 스킵 거리 근방에서의 어트랙터의 특성을 비교하여 보면 가장 큰 에너지를 갖는 진폭의 크기 정도가 거의 같으나 두 번째부터는 커다란 변화를 보이며 궤적을 형성하고 있으며, 따라서 이러한 원형 결함들의 스킵 거리에 따른 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. 13, Fig. 14 및 Fig. 15에 각각 결과를 나타내었다.

재구성된 어트랙터의 기하학적 형태는 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 결함 신호의 카오스적인 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 되고 이러한 특성은 시스템의 혼돈도로 평가할 수 있다.

Fig. 13은 용접부의 횡공 결함에 대하여 스피어-

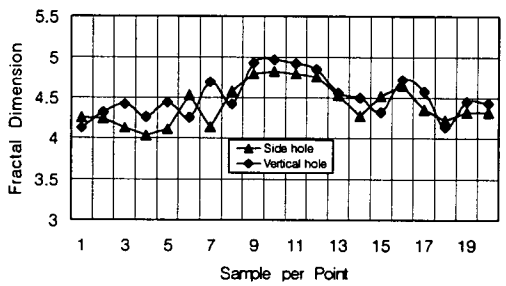


Fig. 14 Fractal dimensions according to sample points

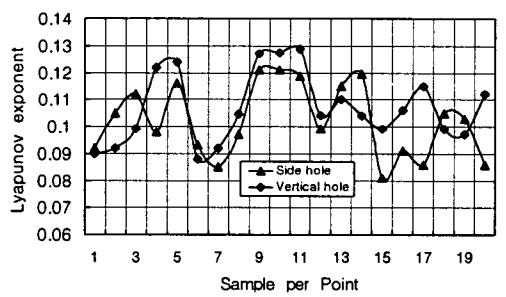


Fig. 15 Lyapunov dimensions according to sample points

카운팅(sphere counting)으로 프랙탈 차원을 계산한 결과로서, 프랙탈 차원은 반지름 r이 증가할수록 선형적으로 증가하며 커지게 되고 일정 한계에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 포화하게 된다. 따라서 반지름 r의 증가와 함께 나타난 직선 구간을 직선 회귀시켜 차원을 구하였으며, 전체적인 결과는 Fig. 13, Fig. 14, Table 1과 같다.

Table 1. Fractal dimensions of signals in welding defects

Condition of signals		Fractal dimensions	
Kind of welding defects	Position	Value per point	Mean value (Σall point/number)
Side hole	nearby 0.5 skip	4.256	4.511
	within 0.5 skip	4.577	
	nearby 0.5 skip	4.763	
	within 1.0 skip	4.642	
	nearby 1.0 skip	4.319	
Vertical hole	nearby 0.5 skip	4.265	4.539
	within 0.5 skip	4.425	
	nearby 0.5 skip	4.854	
	within 0.5 skip	4.725	
	nearby 0.5 skip	4.430	

용접부에서 scan이 가능한 전체 부분에 대하여 결함당 20~25 point를 0.5 스킵과 1.0 스킵 거리를 기준으로 하여 프랙탈 차원을 구한 결과, 횡공은 평균 4.511, 수직공은 평균 4.539의 정량적 프랙탈 특징값을 나타내었다. 전반적으로 수직공의 경우가 횡공의 경우보다는 높은 값을 나타내었으며, 이로부터 같은 재질내의 결함이라도 결함의 종류에 따라 카오스성의 정도가 달라짐을 알 수 있다.

Fig. 15 및 Table 2는 용접부의 결함 신호에 대하여 위상 공간상에서 이웃한 궤도의 발산 정도를 평가하는 리아프노프 지수의 결과를 나타내고 있다.

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

전체 시뮬레이션 결과, 횡공의 경우에는 평균 0.091, 수직공의 경우는 평균 0.115로서 프랙탈 차원에 대한 고찰 결과와 거의 비슷하게 나타났으며, 전체적으로 0.5 스킵거리 근방에서 높은 값들을

Table 2. Lapunov exponent of signals in welding defects

Condition of signals		Lyapunov exponents	
Kind of welding defects	Position	Value per point	Mean value (Σall point/number)
Side hole	nearby 0.5 skip	0.082	0.091
	within 0.5 skip	0.097	
	nearby 0.5 skip	0.099	
	within 1.0 skip	0.091	
	nearby 1.0 skip	0.086	
Vertical hole	nearby 0.5 skip	0.132	0.115
	within 0.5 skip	0.125	
	nearby 0.5 skip	0.104	
	within 0.5 skip	0.106	
	nearby 0.5 skip	0.112	

나타내었다. 따라서 이러한 카오스 특징을 이용하므로서 용접부 결함 시계열 데이터의 초음파 결함 형상 인식 해석에 대한 정밀도를 높일 수 있다고 생각된다.

이상에서의 고찰 결과로부터 강한 비선형성을 나타내는 용접부의 횡공과 수직공에 대한 초음파 결함 시계열 데이터(프랙탈 차원과 리아프노프 지수 값이 강한 비선형성을 나타냄)는 결함이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 결정론적인 카오스 특성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 초음파 형상 인식을 하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 최대 진폭의 50%를 고려하여 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 그리스어의 의미로는 천지 창조 이전의 완전한 무질서를 의미하지만 카오스 이론에서는 완전한 무질서가 아닌 겉으로 보기에는 무질서하면서 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 푸앙카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구의 미비-에 대한 연구가 심도있게 이루어져야 하며, 향후 임베딩 차원, 프랙탈 차원, 시간 지연, 리아프노프 지수에 관계되는 파라미터 설정 등에 대한 다각적인 고찰이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 오스테나이트계 스테인리스강 304 용접부의 횡공 및 수직공 결함에 대하여 시계열 초음파 결함 신호로부터 초음파 형상 인식에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 고유 특징인 초공간적 스트레인지 어트랙터, 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) 전체 파형을 고려한 초음파 결함 신호(횡공과 수직공)의 카오스적 특징 추출 및 이에 대한 고찰 결과로부터 초음파 형상 인식 정밀도 향상의 새로운 방법을 제시하였다.

(2) 초공간적 스트레인지 어트랙터의 궤적 변화로부터 같은 종류의 결함이라도 0.5 스킵과 1.0 스킵 거리에 따른 거리 변화에 대하여 현저한 카오스성의 차이를 나타내었으며, 이러한 카오스성의 차이로부터 용접부 결함의 고유 특성을 평가할 수 있다.

(3) 정량적 카오스 특징 추출로서 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 기준으로 하여 횡공의 경우는 4.511, 0.091, 수직공의 경우는 4.539, 0.115를 정량적 특징값으로 제시하였다.

(4) 추출한 프랙탈 차원과 리아프노프 지수는 0.5 스킵 거리 근방에서 전체적으로 높은 값들을 나타내었으며, 이러한 두 개의 카오스 특징값으로부터 용접부의 0.5 스킵 거리 근방 결함 신호에 대하여 혼돈도를 정량적으로 제시할 수 있다.

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, 황영택, 정의섭, 유영철, 윤인식, "초음파법을 이용한 용접부의 결함 검출과 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(A), (1996), pp. 41-46
3. 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, "오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 결함 검출과 비파괴 평가," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A), (1997), pp. 236-241
4. 이 원, 윤인식, 정성관, 김정기, "프랙탈 해석을 고려한 용접 결함의 초음파 형상 인식 최적화에 관한 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A), (1998), pp. 288-293
5. I. Tsuda, T. Tahara, 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 (1992), pp. 312-332
6. M. Sano, Y. Sawada, "Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series," Phy. Rev. Lett., Vol 55, No. 10, (1995), pp. 1082-1084
7. 이병채, "시계열 데이타의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, (1995), pp. 281-284
8. 김정석, 강명창, 이기용, 구세진, "엔드밀가공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석," 한국정밀공학회지, 제14권 11호, (1997), pp. 93-101
9. F. Takens, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, (1981), pp. 266
10. M. B. Kennel et al, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction," Physical Reviews A, Vol. 45, (1992), pp. 2403-3411
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, (1989), pp. 107-111
12. Alan Wolf et al, "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series," Physica 16D, (1985), pp. 285-317