논문 한국정밀공학회지 제15권 제6호 (1998년6월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 15. No. 6. June. 1998.

카오스 특징 추출에 의한 용접 결함의 초음파 형상 인식

이 원*, 윤 인 식**, 이 병 채***

Ultrasonic Pattern Recognition of Welding Defects Using the Chaotic Feature Extraction

Won Yi*, In-Sik Yun**, Byung-Chae Lee***

ABSTRACT

The ultrasonic test is recognized for its significance as a non-destructive testing method to detect volume defects such as porosity and incomplete penetration which reduce strength in the weld zone.

This paper illustrates the defect detection in the weld zone of ferritic carbon steel using ultrasonic wave and the evaluation of pattern recognition by chaotic feature extraction using time series signal of detected defects as data. Shown in the time series data were that the time delay was 4 and the embedding dimension was 6 which indicate the geometric dimension of the subject system and the extent of information correlation.

Based on fractal dimension and lyapunov exponent in quantitative chaotic feature extraction, feature value of 2.15, 0.47 is presented for porosity and 2.24, 0.51 for incomplete penetration. The precision rate of the pattern recognition is enhanced with these values on the total waveform of defect signal in the weld zone.

Therefore, we think that the ultrasonic pattern recognition method of weld zone defects of ferritic carbon steel by ultrasonic-chaotic feature extraction proposed in this paper can boost precision rate further than the existing method applying only partial waveform.

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), Weld Zone(용접부), Nondestructive Testing(비파괴검사), Chaos(카오스), Time Delay(시간지연), Strange Attractor(스트레인지 어트랙터), Fractal Dimension(프랙털 차원), Lyapunov Exponent(리아프노프 지수), Time Series(시계열), Embedding(임베딩)

1. 서 론

산업 현장에서 두 대상재의 금속적 이음 방법으로 널리 사용되고 있는 용접(welding)은 공정중의 많은 변수로 인하여 용접부의 표면 및 내부 결함의 발생 가능성이 매우 높으며, 결함중에서도 언더컷이나 불완전 용입, 크랙 등은 현저한 응력 집중을 받게 되어 구조물의 강도 저하를 초래한다. 따라서 용접부에 존재하는 각종 결함을 검

* 숭실대학교 기계공학과
** 숭실대학교 대학원/대한검사기술(주)
*** 용인공업전문대학 의료정보시스템과

출하고 이에 대해 정량적으로 평가하는 것은 구조물 전체의 건전성 및 안정성 측면에서 대단히 중요하다.

현재 용접부 내부 결함의 검출을 위하여 널리 사용되고 있는 초음파 검사법[1]은 화학 · 화력 · 원자력 플랜트의 비파괴검사 방법중에서 방사선 투과 검사[2] 다음으로 많이 이용되고 있다. 특히 초음파에 의한 용접부의 결함 종류 판별[3]은 최근의 교량 및 구조물의 대형 사고로 인하여 그 중요성이 더욱 높아 가고 있으며, 이러한 용접부 결함의 종류 판별에 있어서는 결함으로부터의 초음파 신호인 시계열 데이터에 대한 강한 특징(strong feature)의 추출과 이에 대한 민감한 특징(sensitive features)을 결정하는 것이 첫번째의 선결 과제이다. 그러나 용접부 결함 특징 추출을 위한 시간 영역과 주파수 영역의 해석에 있어서 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 선형 신호 분석법(linear time series analysis)으로 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 시계열 데이터의 비선형성과 불규칙성이 큰 신호에 대하여 비선형 시계열 신호 분석법(nonlinear time series analysis)을 통하여 카오스 특징 추출에 의한 정밀도 높은 해석이 가능하며, 특히 이[6] 등에 의한 인간 심박 변화율의 카오스적 연구는 생체 분야에서 그 유효성이 입증되었다. 이러한 카오스 이론은 비선형 시스템에 대한 해석에 있어서 강점을 갖고 있지만 생체 분야외의 기타 공학 분야에서는 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 비선형 시계열 신호 분석시에 유용한 카오스 이론을 이용하여 용접부의 초음파 결함 신호로부터 정량적 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 시계열 데이터로 획득하였다. 이렇게 획득한 시계열 데이터에 대하여 결함으로부터의 전체 파형을 고려한 시간 지연과 임베딩 차원을 설정한 후, 스트레인지 어트랙터(strange attractor), 프랙털 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 프랙털 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[7]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 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

2.2 임베딩 차원 및 시간 지연의 결정

임베딩 차원을 결정하기 위해 Kennel[8]이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법을 이용하였다. FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트렉터위의 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 줄이고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다.

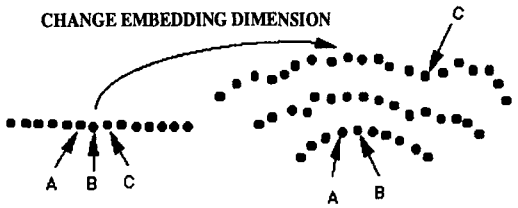


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

시간지연은 Liebert와 Schuster[9]가 제안한 상관적분 방법을 이용하여 결정하였으며 이는 시간지연의 변화에 따라 계산된 상관적분 값에서 첫 번째 국부 최소점(local minima)이 되는 점을 주어진 시계열 데이터의 시간 지연으로 결정하는 방법이다.

임베딩차원 및 시간 지연을 계산함으로서 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙털 차원 및 리아프노프 지수를 추출하여 시계열 데이터의 카오스적 특성을 정량적으로 평가 할 수 있게 된다.

2.3 프랙털 차원

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

일반 곡선의 프랙털 차원은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다

$$FD = \frac{\log(L)}{\log(d)} \tag{2}$$

여기서 L은 전체 곡선의 길이이며, d는 곡선의 직경이다.

식(2)는 원의 면적을 고려하면 식(3)과 같이 나타내어진다.

$$D = \frac{\log(L/a)}{\log[(K/a)A]} \tag{3}$$

여기서 D는 프랙털 차원, L은 전체 곡선의 길이, a는 평균거리, $K=2/\pi$, A는 잠재적으로 곡선이 채울 수 있는 원의 면적이다.

식(3)에서 상수 K를 제거하면 다음과 같은 식(4)로 된다.

$$D = \frac{\log(na/a)}{\log[((2/\pi)/a)\pi d^2]} \tag{4}$$

여기서 L은 각 샘플간의 거리를 모두 더한 전체 곡선의 길이, n은 전체 샘플 간격의 수이다.

일반적으로 d는 곡면의 지름을 이용할 수 있다.

시계열 데이터의 미묘한 변화를 감지할 수 있는 프랙털 차원에 대하여 1차 회귀선을 구하고 이 회귀선의 거리를 척도로 한 회귀선 프랙털 차원을 고려한다. 이러한 프랙털 차원은 회귀선 위에서 변동하는 신호의 전체 길이를 측정하여 회귀선의 거리로 나누어 주면 1차원을 갖는 직선에 비하여 아주 작은 거리의 증감 정도를 정량화할 수 있다. 따라서 이러한 프랙털 차원은 진폭의 변동과 주기의 변동을 민감하게 정량화할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙털 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procassia가 제안한 식(5)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\Theta(r - |\overline{X}(i) - \overline{X}(j)|) \tag{5}$$

여기서, Θ는 step function이며, $\overline{X}(i)$와 $\overline{X}(j)$는 i와 j 번째 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 상관 적분을 계산함으로서 프랙털 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(6)과 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙털 차원으로 나타낸다.

$$\upsilon = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \tag{6}$$

본 연구에서는 시계열 신호의 특징으로 프랙털 차원과 이로부터 결정되는 y절편 값을 초음파 형상 인식의 대상 특징으로 평가 및 검토하고자 하였다.

2.4 리아프노프 지수

리아프노프 지수는 재구성된 어트랙터의 발산 또는 수

렴에 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[10]의 방법을 사용하였으며, 구하는 과정으로는 Fig. 2와 같은 어트랙터상의 궤적을 가정하여 크게 다섯 단계로 이루어진다.

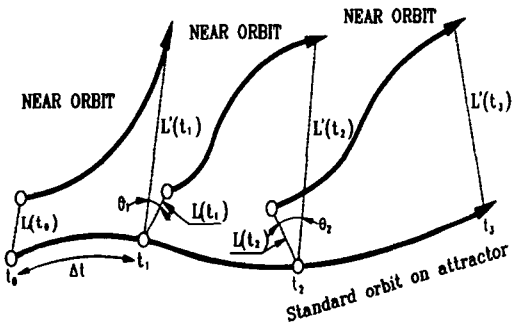


Fig. 2 Schematic for lyapunov exponent calculation

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 지수 비를 구한다. 셋째, t_1에서의 최근접 이웃 점을 찾아 거리 $L(t_1)$을 계산한다. 넷째, Δt시간이 지난 t_2에서 둘째 과정을 반복하여 지수 비를 구한다. 다섯째, 위와 같은 과정을 M번 반복하여 평균 지수율을 계산하며, 최종적인 리아프노프 지수 λ는 식 (7)과 같다.

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

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 시험편 및 실험 방법

본 연구에 사용된 주요 기기는 초음파 신호를 송수신하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 디지털 오실로스코프(Lecroy 사의 9354A), 결함 신호를 수신하는 횡파 사각 탐촉자 (krautkrämer 사의 주파수 4MHz, 굴절각 : 70°, 진동자 크기: 8×9mm), 접촉매질(기계유)[11] 등이며, 실험에 있어서는 사각 탐촉자의 굴절각, 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 오실로스코프의 CRT상에 나타나는 결함 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 3 및 Table 1과 같은 정량적

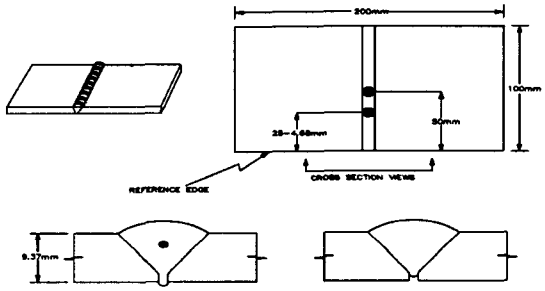


Fig. 3 Configuration of welding defects

Table 1 Property and configuration welding defects

(unit : mm)

Defect Type	Start of Defect	Total Defect Length	Defect Depth	
			Height	Below Surface
Single Gas Pore	25~4.68	1.56	1.56	1.38
Incomplete Penetration	50	4.16	1.56	surface

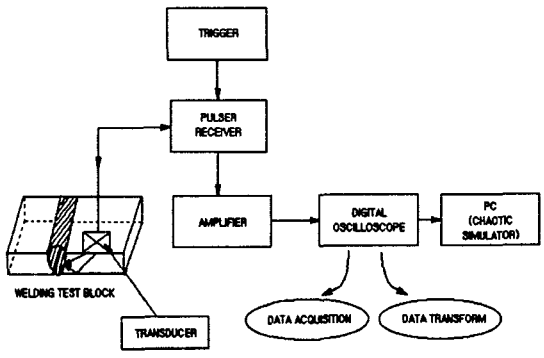
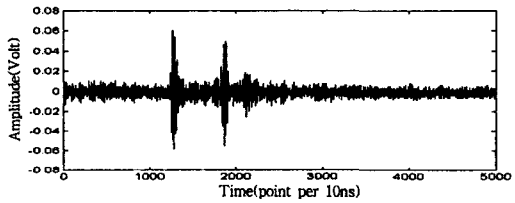


Fig. 4 Schematic of data acquisition and processing

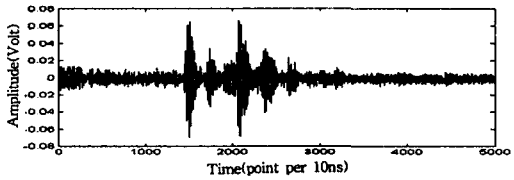
결함을 내재하고 있는 시험편(Flaw Manufacturing Tech. 사 제작)을 이용하여 기공 및 불완전 용입의 용접부 결함에 대하여 Fig. 4와 같은 구성으로 시계열 데이터를 신호로 획득하여 시간 영역상의 신호 특성 분석으로 결함에 대한 초음파 형상 인식을 정량적으로 평가하고자 하였다.

3.2 맞대기 용접부에 대한 시계열 신호

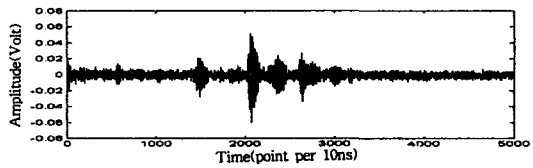
실험에 사용된 시계열 신호는 페라이트계 탄소강 용접부의 기공과 불완전 용입에 대한 결함 신호이며, 용접부로부터 0.5 스킵 거리(Skip Distance) ~ 1.0 스킵 거리내를 이동하면서 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 5는 이를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 한 결함당 23 point에 대하여 10ns와 100MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5000샘플이다. (a), (b)는 용접부내의 기공 결함에 대한 신호, (c), (d)는 불완전 용입에 대한 결함 신호를 나타낸다. 횡파 사각 탐촉자를 용접부에 최대한 근접시켜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



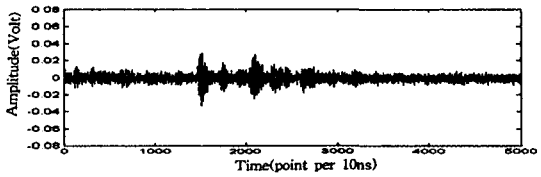
(a) Defects signal within 0.5 Skip(porosity)



(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

3.3 특징 추출

시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 4000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 임베딩 차원, 시간지연, 스트레인지 어트랙터의 분포도, 프랙털 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, 프랙털 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 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, 이산화 신호의 샘플링 오차나 양자화 오차에 의한 영향이 커질수 있고 너무 크면 최적값을 찾기 어려워 많은 반복 시뮬레이션을 하여 최적의 평가 임계치를 100으로 설정할

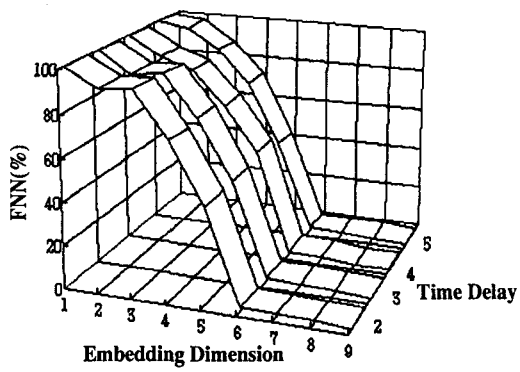


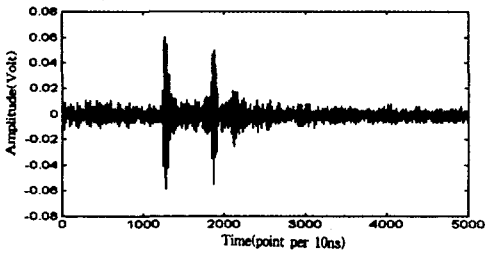
Fig. 6 Determination of embedding dimension

수 있었으며, 또한 시간 지연의 설정은 4로 나타났다.

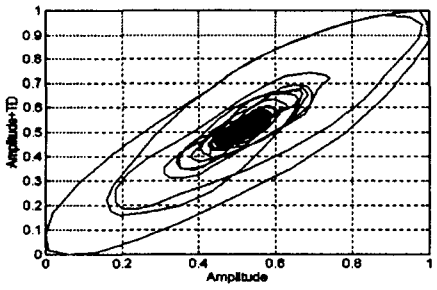
임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0[%]로 떨어지는 것으로부터 불완전 용입에 대한 초음파 결함 신호에 관계되는 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

시스템 속에 내재되어 있는 카오스적 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 카오스적 어트랙터의 고찰이다.

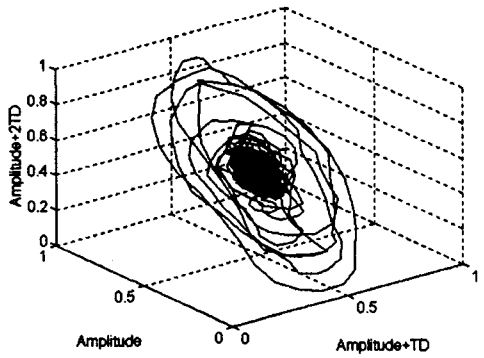
Fig. 7과 Fig. 8은 용접부의 기공과 불완전 용입 결함에 대한 시간 영역상의 파형과 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플중에 처음과 마지막 500샘플씩은 결함 신호와 무관하여 4000샘플씩을 적용하였으며, 두 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다. 기공의 신호 및 어트랙터의 궤적과 불완전 용입이 나타내는 결과는 전



(a) Defects signal from weld zone

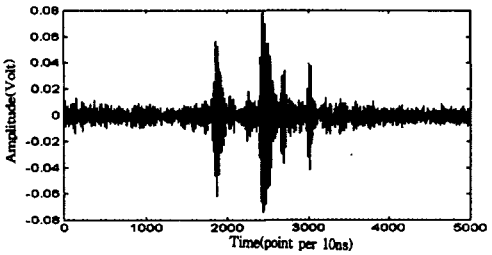


(b) Two dimension strange attractor

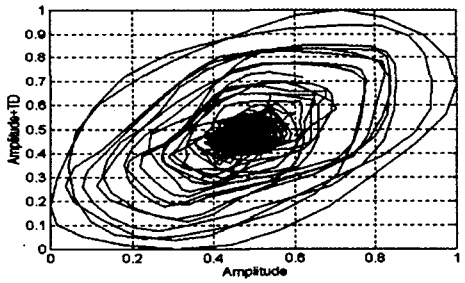


(c) Three dimension strange attractor

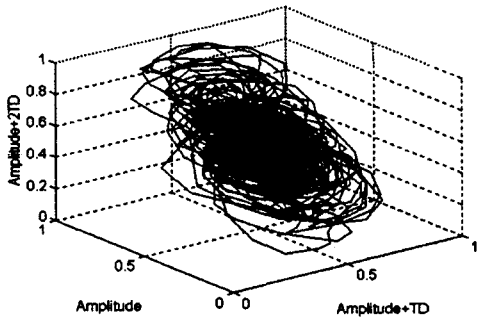
Fig. 7 Strange attractor analysis of porosity



(a) Defects signal from weld zone



(b) Two dimension strange attractor



(c) Three dimension strange attractor

Fig. 8 Strange attractor analysis of incomplete penetrant

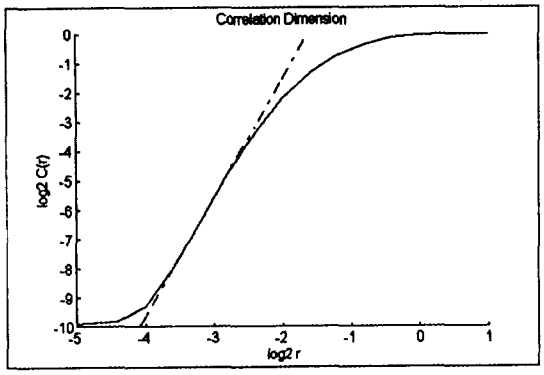


Fig. 9 Determination of fractal dimension

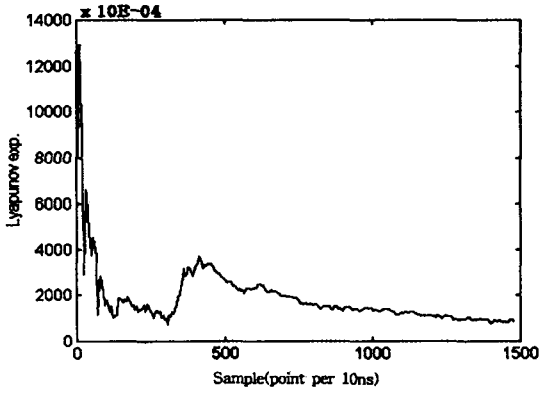


Fig. 10 Determination of lyapunov exponent

반적으로 상당히 차이가 있음을 볼 수 있는데 이는 각각의 결함에 대한 카오스적 특징을 나타낸다고 볼 수 있으며, 이로부터 같은 재질의 용접부라도 결함의 종류에 따라 스트레인지 어트랙터의 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

2차원으로 구성한 스트레인지 어트랙터를 기준으로 진폭과 시간지연과의 상관 관계로 나타나는 어트랙터의 궤적으로부터 전체 점들의 중심으로부터 1사분면과 2사분면의 분포도를 구하여 카오스성의 정도를 파악하고 이를 카오스 특징의 하나로 분류하고자 하였다.

결정된 임베딩 차원과 데이터를 적용하여 구한 시간지연을 이용하여 용접부에 대한 프랙털 차원, y절편, 리아프노프 지수를 계산하였으며, Fig. 9, Fig. 10은 이러한 결과를 나타낸다.

재구성된 어트랙터의 기하학적 형태는 프랙털 차원으로 규정할 수 있으며, 시스템의 내재된 특성을 나타내어 주므로, 결함 신호의 카오스적인 정도에 따라 프랙털 차원이 달라진다. Fig. 9는 용접부의 기공 결함에 대하여 스피어-카운팅(sphere counting)으로 프랙털 차원을 계산한 결과로서, 프랙털 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 기울기와 y절편을 구하였으며, 이렇게 하여 구한 프랙털 차원은 기공의 경우가 평균 2.15, y절편 값은 5.93, 불완전 용입의 경우는 2.24, 6.27로 나타났다.

Fig. 10은 용접부의 0.5 스킵 내의 기공 결함 신호에 대하여 위상 공간상에서 이웃한 궤도의 발산 정도를 평가하는 리아프노프 지수의 결과를 나타내고 있다.

이때 사용한 파라미터로서 Δt는 5샘플, M은 280으로 설정하였으며, 계산된 값들을 기준으로 최종적인 리아프노프 지수는 수렴되어지는 마지막 데이터들 중 10개씩을 평균하여 결정하였다.

Table 2 Results of ultrasonic pattern recognition by chaotic analysis

Chaotic analysis				Evaluation of defect type	
Fractal -dim	Strange -attractor distribution diagram	Y-value	Lyapunov exp.		
2.15	0.53-0.90	5.93	0.47	Porosity	
2.24	0.62-0.93	6.27	0.51		Incomplete penetrant

전체 시뮬레이션 결과, 기공의 경우에는 최대 값을 기준으로 평균 0.47, 불완전 용입의 경우는 0.51로 나타났으며, 따라서 이러한 카오스 특징을 이용하므로서 용접부 결함 시계열 데이터의 초음파 결함 신호 해석에 대한 정밀도를 높일수 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. 따라서 이러한 특성들로부터 본 연구에서는 4가지의 카오스 특징들을 추출하였으며 그 구체적인 결과는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 초음파 형상 인식을 하는데 있어서 파형 특징 추출 등의 난점을 해결하기 위하여 카오스 이론에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

카오스 이론은 현재 세계적으로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으나 이론적인 뒷받침이 따라주지 못하고 있는 실정이다. 따라서 향후 임베딩 차원, 프랙털 차원, 시간지연, 리아프노프 지수에 관계되는 파라미터 설정 등에 대한 다각적인 고찰이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 용접부 결함 신호인 시계열 초음파 신호로부터 결함 평가와 초음파 형상 인식에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 특징인 프랙털 차원, y절편 그리고 리아프노프 지수, 스트레인지 어트랙터의 분포도를 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) 카오스 특징 추출에 의한 초음파 형상 인식 방법을 사용함으로써 시간영역상의 전체 파형에 대한 정확한 파형 해석의 가능성을 확인하였다.

(2) 페라이트계 용접부의 0.5 스킵과 1.0 스킵거리내를 대상으로 한 용접 결함(기공, 불완전 용입)의 시계열 결함 신호는 카오스성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

(3) 스트레인지 어트랙터에 의한 어트랙터 분포도로부터 새로운 카오스 특징 추출 방법을 제안하였으며, 이로부터 기공과 불완전 용입의 어트랙터 분포도에서 0.53~0.93의 정량적 특징값을 추출하였다.

(4) 카오스 특징 추출 과정에서 임베딩 차원, 시간 지연, Δt, M그리고 추출구간 설정 등으로 주어지는 파라미터의 영향이 초음파 형상 인식에 영향을 주므로 향후 적절한 파라미터 선정 기준이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 이 원, 황영택, 정의섭, 유영철, 윤인식, "초음파법을 이용한 용접부의 결함 검출과 평가," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(Ⅰ), pp. 41~46, 1996.
2. Thomas F. Perrone, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," Journal of the American Society for Nondestructive Testing, Vol. 50, 11, pp. 1268~1273, 1992.
3. 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.
4. 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 pp. 312~332, 1992.
5. M. Sano, Y. Sawada, "Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series," Phy. Rev. Lett., Vol 55, No. 10, pp. 1082~1084, 1985.
6. 이병채, "시계열 데이타의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 281~284, 1995.
7. F. Takens, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, P. 266, 1981.
8. M. B. Kennel et al, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction," Physical Reviews A, Vol. 45, pp. 2403-3411, 1992.
9. 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.
10. Alan Wolf et al, "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series," Physica 16D, pp. 285-317, 1985.
11. 윤인식, 이성식, 김영환, 이정기, 김호철, "접촉식 초음파 시험에서 접촉매질의 영향에 관한 고찰," 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 206 ~211, 1996.