

**研究論文**

## 초공간을 고려한 SA 508강의 재질열화 시계열 신호의 카오스성 평가

고준빈\*·윤인식\*\*·오상균\*\*\*·이영호\*

### Chaotic evaluation of material degradation time series signals of SA 508 Steel considering the hyperspace

Jun-Bin Go\*, In-Sik Yun\*\*, Sang-Kyun Oh\*\*\* and Young-Ho Lee\*

**Key words** : Hyperspace(초공간), Chaos(카오스), Ultrasonic Wave(초음파), Stainless Steel(스테인리스강), Material Degradation(재질 열화), Time Delay(시간 지연), Strange Attractor(스트레인지 어트랙터), Fractal Dimension(프랙탈 차원), Lyapunov Exponent(리아프노프 지수)

#### Abstract

This study proposes the analysis method of time series ultrasonic signal using the chaotic feature extraction for degradation extent evaluation.

Features extracted from time series data using the chaotic time series signal analyze quantitatively degradation extent. For this purpose, analysis objective in this study is fractal dimension, lyapunov exponent, strange attractor on hyperspace. The lyapunov exponent is a measure of the rate at which nearby trajectories in phase space diverge. Chaotic trajectories have at least one positive lyapunov exponent.

The fractal dimension appears as a metric space such as the phase space trajectory of a dynamical system.

In experiment, fractal(correlation) dimensions, lyapunov exponents, energy variation showed values of 2.217~2.411, 0.097~0.146, 1.601~1.476 voltage according to degradation extent.

The proposed chaotic feature extraction in this study can enhances precision rate of degradation extent evaluation from degradation extent results of the degraded materials(SA508 CL. 3)

※ 1998년 7월 16일 접수

\* 정회원, 충남대학교 기계공학과

\*\* 정회원, 숭실대학원 기계공학과/대한검사기술(주)

\*\*\* 비회원, 단국대학원 기계공학과

## 1. 서 론

오스테나이트계 스테인레스강은 원자력 발전, 화력 발전, 화학 플랜트의 주요 구조 재료에 널리 사용되고 있으며, 특히, ASME SA508 CL. 3의 단조형(wrought) 오스테나이트계 스테인레스강은 가압 경수로형 원자력 발전소의 경우, 원자로 압력용기, 일차 압력경계의 주냉각수 배관, 밸브 몸체, 엘보우(ellbow) 및 펌프케이싱(casing) 등의 구조 재료로 사용되고 있다.

그러나 오스테나이트계 스테인레스강은 상기 구조물의 가동 온도 범위(280~300℃)에서 장시간 사용됨에 따라 기계적 성질, 특히 인성이 점진적으로 저하되는 열시효 취화(thermal aging embrittlement) 현상이 발생하며 구조물의 기능손상 및 전체 원자로의 안전성을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 설비의 안전성 및 잔여수명등을 정량적으로 평가, 보증하는 것이 대단히 중요하며, 이를 위해서는 결함의 종류와 재료의 열화정도를 조사할 정량적 비파괴평가(QNDE) 기술이 필요하다.

현재 널리 사용되고 있는 비파괴평가(NDE)에 의한 재료 열화진단방법으로는 표면 복제(Replica)법<sup>1)</sup>, 경도 측정법<sup>2)</sup>, 전기 저항법<sup>3)</sup>, 초음파법<sup>4~6)</sup> 등이 있다.

이중에서 표면복제법은 측정공정이 복잡해 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 다른 어느 부분보다 응력집중 정도가 큰 코너부와 같은 취약한 부위의 측정이 곤란하다.

그리고 경도측정법, 전기저항법 등은 측정개소가 매우 제한적이고 복잡하며 시험결과 도출에 많은 시간과 비용이 요구되고, 측정변수의 해석이 어려워 시험결과에 대한 신뢰성이 낮다.

이에 반해 초음파법은 측정의 간편함과 결과의 실시간 파악 등의 강점을 갖고 있어 각종 비파괴평가(NDE)중에서 가장 신뢰성이 높아 ASME code에서는 체적검사의 한 방법으로 위치하고 있다.

특히 초음파법에 의한 열화진단 방법은 고온, 고압부 재료의 열화손상에 따른 정량적 평가를 가능하게 하므로서 취성 파괴나 피로 파괴와 같은 대형 사고를 미연에 방지할 수 있어 그 중요성이 더욱 높아 가고 있다. 이러한 열화손상의 정도를 판별을 위해서는 A-scan에 의한 초음파 신호에 대하

여 파형의 특징을 대상으로 한 정량적 특징 추출(feature extraction)을 하는 것이 첫번째의 선결 과제이다. 초음파 신호 특징 추출을 위한 기존의 방법에 있어서는 주로 시간 영역(time domain)상의 가장 첫 번째 파형이나 에너지가 큰 파형을 선정하여 일반적인 특징 추출법으로 평가를 하고 있으나, 대상재의 열화에 의한 파형의 미소 변화에 대해서는 해석 및 파형 특징 추출이 어려운 등의 문제점을 갖고 있다.

이와 같이 일반적인 특징 추출법으로 열화재의 열화도를 나타내는 파형의 미소 변화에 대하여 정량적 특징을 추출하기 어려운 경우에 대하여 최근 인공지능 기법중의 하나인 카오스 해석(chaotic analysis)에 의한 방법<sup>7,8)</sup>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<sup>9)</sup> 등에 의한 인간 심박 변화율의 카오스적 연구와 김<sup>10)</sup> 등에 의한 엔드밀 가공시 공구 마멸의 카오스적 해석은 생체 역학 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 오스테나이트계 스테인레스강의 초음파 신호로부터 카오스적 정도를 확인하고, 초공간을 고려한 어트랙터의 차원으로부터 정량적 특징 추출을 하므로써 열화재의 열화도에 대하여 평가하고자 하였다.

이를 위하여 오스테나이트계 스테인레스강의 시효온도범위인 280℃~400℃에서 시효된 SA508 CL. 3강에 대하여 펄스-에코법에 의한 열화재의 열화도 파형을 초음파 신호(시계열 데이터)로 획득하였다. 이렇게 획득한 시계열 데이터에 대하여 열화도 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 재질열화(material

degradation)에 따른 비선형 시계열 신호의 카오스 성 정도를 확인하고 이로부터 초음파-카오스 해석에 의한 오스테나이트계 스테인리스강 SA508 CL3의 열화도 평가의 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 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<sup>11)</sup>을 사용하였다. 즉,  $i$ 개의 데이터가 주어졌을 때, 식 (1)과 같이 주어지는  $m$ 차원 벡터  $\bar{X}(i)$ 를 위상 공간에서 순서대로 연결시킴으로써 어트랙터가 재구성된다.

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

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

### 2.2 임베딩 차원 및 시간 지연의 결정

임베딩 차원을 결정한 FNN (false nearest neighbor) 방법을 이용하였다. FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 두 어트랙터위의 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 나눔으로써 계산된다.

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

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

$$R_m(n) = ||\hat{X}(n) - \hat{X}(q)|| =$$

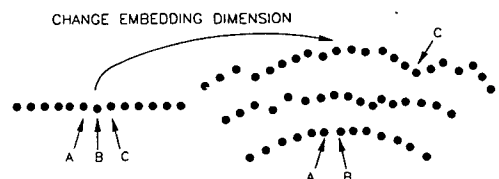


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

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

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

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

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

시간 지연은 Liebert와 Schuster<sup>12)</sup>가 제안한 상관 적분 방법을 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 Procaccia<sup>13)</sup>가 제안한 식 (5)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(r - |\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|) \quad (5)$$

여기서,  $\theta$ 는 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.

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이  $r$ 인 구를 그

리고 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 프랙탈 차원으로 나타낸다.

$$v = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (6)$$

### 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 빠르게 발산하며 어느 정도의 예측성을 가지고 있는지를 리아프노프 지수로 평가할 수 있다.

리아프노프 지수를 구하는데 있어서는 Wolf(14)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,  $\Delta t$  이후의  $t_1$ 에서 기준궤적 위의 점과 이웃궤적 사이의 거리를  $L(t_1)$ 이라 하고,  $L(t_0)$ 와  $L(t_1)$ 의 지수 비

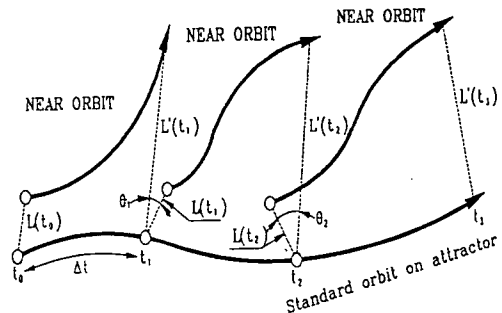


Fig. 2 Schematic for lyapunov exponent calculation

를 구한다. 셋째,  $t_1$ 에서의 최근접 이웃 점을 찾아 거리  $L(t_1)$ 을 계산한다. 넷째,  $\Delta t$  시간이 지난  $t_1$ 에서 둘째 과정을 반복하여 지수 비를 구한다. 다섯째, 위와 같은 과정을  $M$ 번 반복하여 평균 지수율을 계산하며, 최종적인 리아프노프 지수  $\lambda$ 는 식 (7)과 같다.

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

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

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 단조형 오스테나이트계 스테인레스강인 ASME SA508 CL.3이며 한국중공업(주)에서 제작하여 영광 3호기 Intermediate shell

including surveillance 재료로 사용되는 것으로서 그 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

열화도 측정용 시험편은 초음파신호의 측정시 탐촉자의 접촉이 용이하도록 표면을 수용성 절삭유를 충분히 급유하여 연삭가공후 정밀 다듬질하였으며, 양단면이 평행하고 용력축에 대해 수직이 되도록 기계 가공하였다. 다음으로 시효온도의 변화를 주며 전기로(DAESAE FURNACE Co., Ltd.)를 이용하여 무응력상태에서 시효 열처리하였으며, 열처리조건은 Table 3과 같다. 이때 시험편의 열처리시 표면이 산화되는 것을 최대한 방지하기 위하여, 시험편 주위에 생형사(Loam snad)를 충전하여 열처리시 공기가 대부분 빠져나가는 성질을 이용해 인공열화실험을 하였다.

#### 3.2 시스템의 구성 및 실험방법

SA508강의 열화도 시계열 신호 분석을 위한 시스템 구성은 Fig.3과 같다. 먼저 초음파의 발생 및 수신 역할을 하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스 플레이 하는 광대역의 디지털 오실로스코프(Lecroy사의

Table 1. Chemical composition of SA508 CL.3

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
0.21	0.23	1.35	0.007	0.002	0.93	0.21	0.51	0.02	0.03	0.005

Table 2. Mechanical properties of SA508 CL.3

Yield strength 0.2% offset (KSI)	Tensile strength (KSI)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
65	86	30	74

Table 3. Heat tretement of specimens

Smagle ID	Aging temperature	Aging time
STB000	virgin	48hr
STB001	Heating : 240℃ →Air cooling	
STB002	Heating : 290℃ →Air cooling	
STB003	Heating : 340℃ →Air cooling	
STB004	Heating : 390℃ →Air cooling	

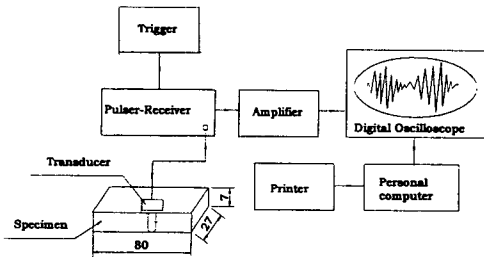


Fig. 3 Schematic diagram of data acquisition and processing

9354A), 열화시편으로부터 초음파 신호를 수신하는 수직 탐촉자(Krautkr mer사의 주파수 10MHz, 진동자 직경 : 6mm), 접촉매질(기계유) 등이며, 실험에 있어서는 오실로 스코프 CRT상에 나타나는 열화도 신호의 특성을 파악하기 위하여 최대 진폭을 기준으로 scan하면서 이에 대한 시계열 데이터 신호를 획득하여 시간 영역상의 신호 특성으로 열화도에 따른 카오스적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

### 3.3 열화 시편의 초음파 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.

열화도 측정을 목적으로 사용되는 초음파는 재질내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 밀면으로부터의 반사 에코를 얻게되며, 초음파의 파동양식은 파의 진행방향과 파동방향이 같은 종파를 사용하여 수직법을 적용하였다.

일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 열화도에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-scan법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된다. 본 연구에서는 이러한 에코의 정보로부터 열화도를 파악하기 위해서는 저면으로부터 수신되는 에코에 대하여 최대 진폭을 게이트로 걸어 획득한 신호에 대하여 정량적 평가를 하고자 하였다.

실험에 사용된 시계열 신호는 ASME SA508 CL 3의 단조형 오스테나이트계 스테인레스강의 저면으로부터의 초음파 신호를 광대역 디지털 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 4는 이를 나타낸다. 신

호 취득에 있어서 5개의 열화 시험편에 대하여 scan하면서 1 point에 대하여 2ns와 500MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 1000샘플이다. (a)는 건전부, (b)는 240℃에서 48시간 유지후 공냉, (c)는 290℃에서 48시간 유지후 공냉, (d)는 340℃에서 48시간 유지후 공냉 는 390℃에서 48시간 유지후 공냉한 시편의 펄스-에코 초음파 신호를 나타낸다. 수직 탐촉자로 저면으로부터 반사되어 수신되는 초음파 신호를 취득하여 각각의 point에 대하여 카오스 특징 추출을 하고자 하였다.

### 3.3 특징 추출

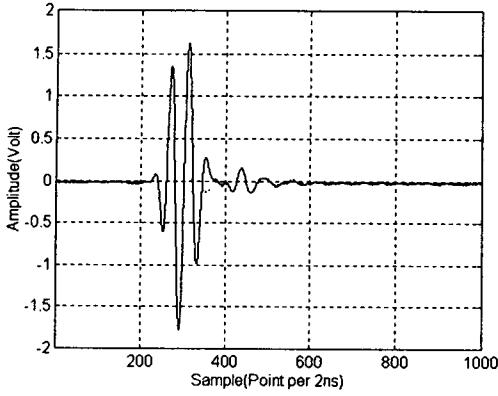
시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 1000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 2차원 및 3차원에서 스트레인지 어트랙터의 형상을 구하여 카오스에 의한 정량적 특징 추출의 가능성을 확인하고자 하였다. 카오스 특징 추출을 위해서는 어트랙터의 형상을 구하는 것이 중요하다.

고차원 어트랙터의 기하학적 평가는 적어도 초공간상에서 가능하며, 카오스적 어트랙터를 이용하므로써 열화도에 대하여 고차원 공간상에서의 정량적 해석 및 평가를 할 수 있다.

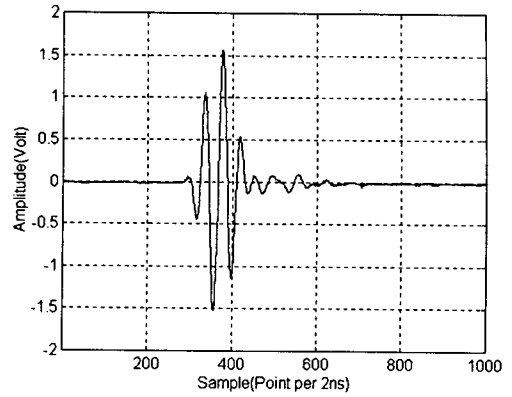
시스템 속에 내재되어 있는 카오스적 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 카오스적 어트랙터의 고찰이다. 즉 어트랙터 상의 운동은 추상적이지만 실제계의 운동을 알 수 있게 하는데 어트랙터의 형태를 기준으로 하여 루프는 시스템의 주기성, 꼬임은 변화, 빈 공간은 물리적으로 불가능한 상태를 나타낸다.

Fig. 5은 건전부, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9은 시효온도의 변화에 따른 재질의 열화도 시계열 데이터에 대하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 데이터 취득시에 어트랙터 특징 추출의 확실성을 위하여 결합 신호와 무관한 구간은 가능한 제외하거나 적절히 조절하였으며, 다섯 가지 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다.

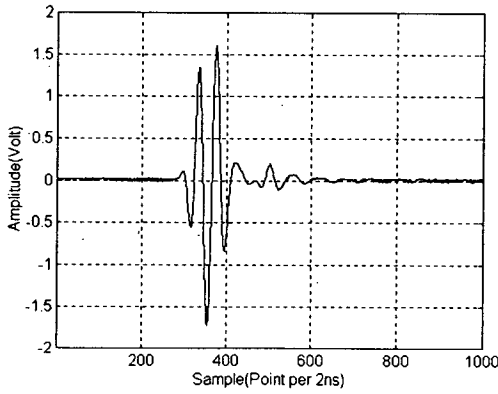
열화도와 어트랙터의 관계를 가장 정량적으로 나타내어 줄 수 있는 것은 어트랙터의 기하학적 형상 변화에 대하여 적절한 기준의 설정과 이로부터 추출되는 수치값이라 할 수 있다. 따라서 본 연구



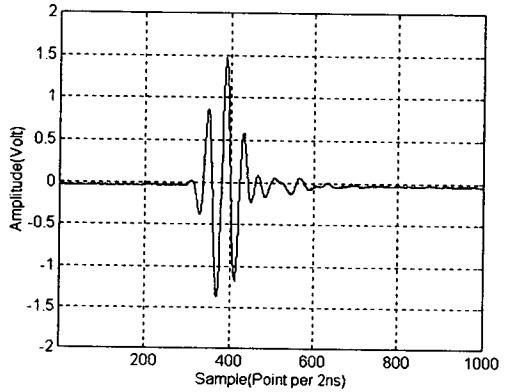
(a) In case of virgin material



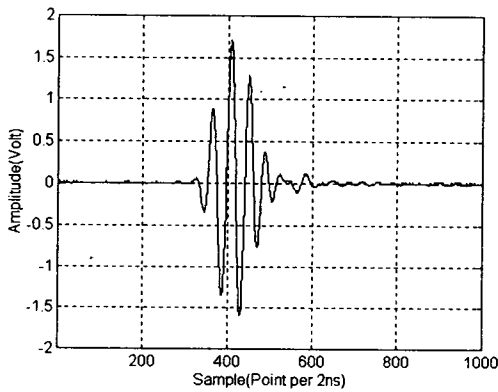
(d) In case of 340°C



(b) In case of 240°C



(e) In case of 390°C



(c) In case of 290°C

**Fig. 4** Time series signal from a thermal aging specimen (SA508 CL. 3)

에서는 이러한 어트랙터의 기하학적 형상 변화에 대하여 4개의 분포도를 수치값으로 정량화하는 방법을 제시하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다. 열화를 받지 않은 치너재의 경우는 각각의 사분면에

대하여 2사와 4사분면은 대칭을 이루고 1사와 3사분면은 2배정도의 차를 이루며 기하학적 형태를 이루고 있다. 그러나 열화도에 따라 1사와 3사분면의 기하학적 형태는 역전되어 거의 3배의 차를 보이면서 안정된 상태를 이루고 있다. 따라서 이러한 변화로부터 열화도에 관계되는 1사와 3사분면의 형태는 열화도를 평가하는 기준 파라미터로 적용할 수 있다.

전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 각각의 온도에 대한 카오스적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다.

따라서 시효온도의 변화에 따라 2, 3차원으로 구성된 스트레인지 어트랙터를 기준으로 관련 진

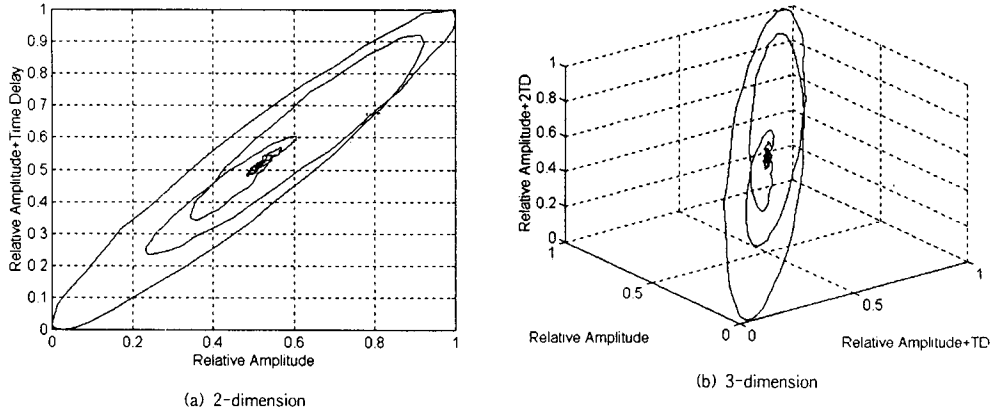


Fig. 5 Strange attractor analysis of virgin material

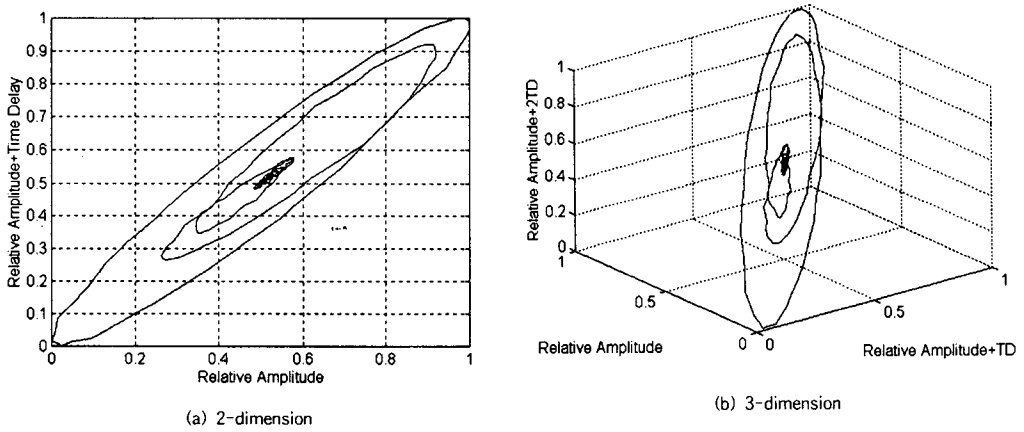


Fig. 6 Strange attractor analysis at 240°C

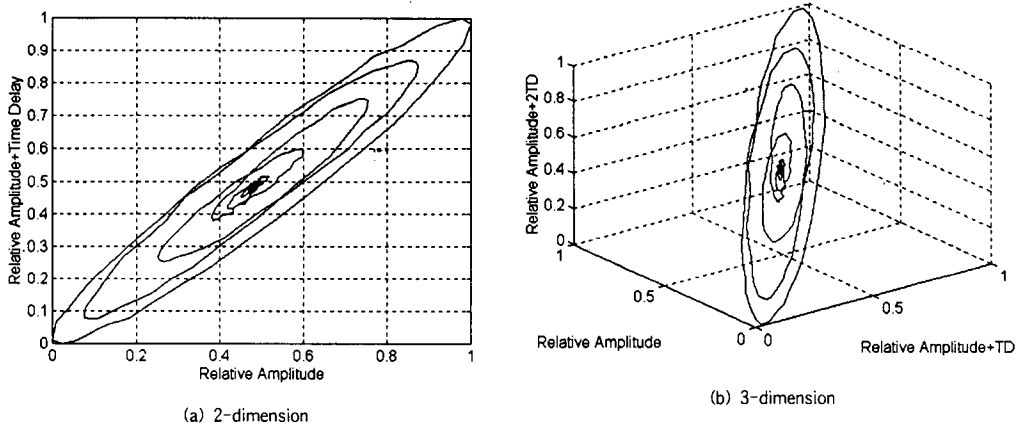


Fig. 7 Strange attractor analysis at 290°C



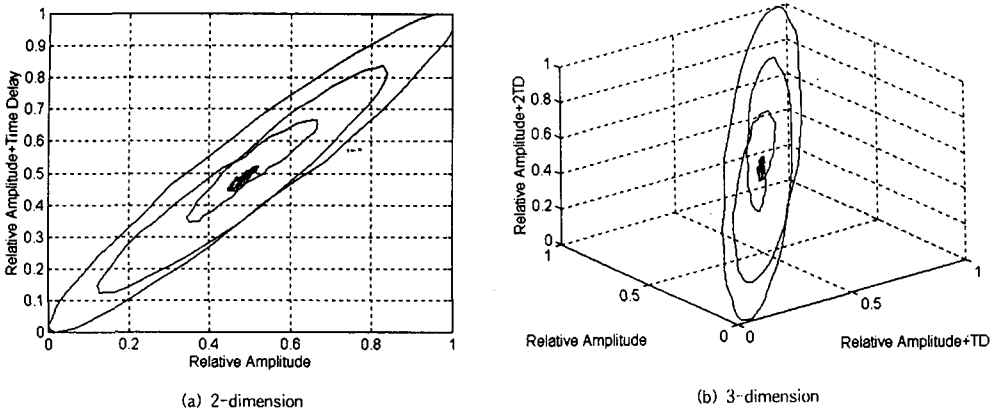


Fig. 8 Strange attractor analysis at 340°C

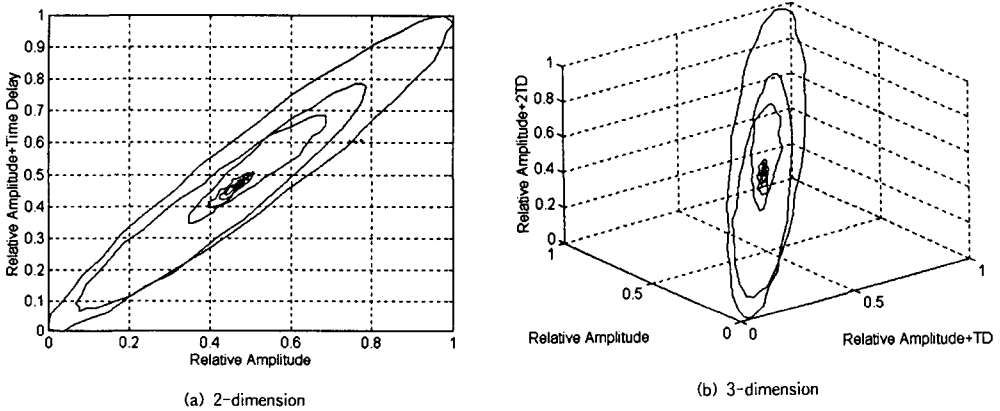


Fig. 9 Strange attractor analysis at 390°C

Table 4. Configuration point number of strange attractor quadrant

classification quadrant	virgin	240°C	290°C	340°C	390°C
1 quadrant	450	217	209	194	174
2 quadrant	165	72	74	80	88
3 quadrant	220	638	642	646	650
4 quadrant	165	73	75	80	88

폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터 궤적(스트레인지 어트랙터)의 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

카오스적 어트랙터는 대상 신호의 고유 특징을 나타내어 주는 것은 사실이나 3차원 이상의 공간

에 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 스트레인지 어트랙터를 3차원으로 구성하는 것으로 가능하다. 구성한 2차원 스트레인지 어트랙터에 있어서 각각의 시효온도에 따라 궤적이 상당히 차이가 있음을 볼 수 있으며, 이로부터 열화도에 따른 변화의 정도를 알 수 있다.

3차원 스트레인지 어트랙터에 있어서도 2차원과 거의 같은 경향을 나타내었으며 어느 정도의 궤적 차이를 볼 수 있다. 따라서 시효온도에 따른 카오스적 어트랙터의 변화로부터 정량적 열화도 평가

가 가능하다.

Table 5는 프랙탈 차원, 리아프노프 지수, 열화도에 따른 에너지의 변화에 대한 결과이다. 두 개의 대표적 카오스 특징에서는 열화의 증가에 따라 기하학적 형태와 이웃한 두 궤적의 발산 정도가 점점 커지는 경향을 나타내었으며, 펄스-에코에 의한 초음파 에너지는 반대로 감소되는 현상으로 나타났다. 따라서 이와 같이 열화도에 따른 미소한 결과들로부터 열화도 평가의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

**Table 5** Chaotic feature extraction & energy distribution

classification features	virgin	240℃	290℃	340℃	390℃
fractal dimensions	2.217	2.243	2.301	2.392	2.411
lyapunov exponents	0.097	0.114	0.129	0.132	0.146
energy distribution (Volt)	1.601	1.554	1.548	1.538	1.476

이상에서의 고찰 결과로부터 열화도에 따른 초음파 신호는 시스템이 갖는 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 결정론적인 카오스 특성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 열화도 평가를 하는데 있어서 최대 진폭(에너지)을 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.

따라서 현재의 카오스 이론이 갖는 정성적 부분-초공간 해석에 대한 연구의 미비- 등에 대한 연구가 이루어져야 하며, 향후 프랙탈 차원, 푸앙카레 맵, 리아프노프 지수에 관계되는 파라미터 설정 등에 대한 다각적인 고찰이 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 오스테나이트계 스테인레스강인 SA508 CL. 3에 대하여 A-sacn에 의한 시계열 초음파 신호로부터 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 열화도

평가에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 재질열화의 고유 특징인 스트레인지 어트랙터의 기하학적 형태, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 추출하였다. 이렇게 구한 카오스 특징들로부터 비선형성이 강한 재질열화에 따른 초음파 신호에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스트레인지 어트랙터의 궤적 변화로부터 시효온도가 변함에 따라 현저한 카오스성의 차이를 나타내었으며, 따라서 이러한 카오스성의 차이로부터 재질열화의 고유 특성을 평가할 수 있다.

(2) SA508강의 재질열화에 따른 카오스적 어트랙터의 기하학적 형태에 대하여 사분면 분포도 값으로 정량화하는 새로운 카오스 특징 추출법을 적용하였으며, 이에 대한 고찰 결과로부터 열화도 평가의 정밀도 향상에 관한 새로운 방법을 제시하였다.

(3) 정량적 카오스 특징 추출로서 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 기준으로 하여 처너재로부터 열화재까지 2.217~2.411, 0.097~ 0.146을 특징값으로 제시하였다.

(4) 카오스 특징 추출 과정에서 초공간의 평가 및 디스 플레이를 위한 고차원 푸앙카레 맵과 설정되는 여러 가지 파라미터의 영향이 열화도 평가에 영향을 주므로 향후 적절한 파라미터의 선정 기준이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

1. 김효진, 정재진 : 컴퓨터 화상처리 기법을 이용한 고온 구조물의 수명평가연구, 한국정밀공학회지, 제15권 4호, (1998), pp. 44-50
2. 庄子哲雄 : 火力 原子力および化学プラント 機器 構造部材の経年劣化と 壽命豫測, REALIZE INC., (1994), pp. 293-301.
3. 庄子哲雄 : 火力 原子力および化学プラント 機器 構造部材の経年劣化と 壽命豫測, REALIZE INC., (1994), pp. 163-176.
4. 이 원, 황영택, 정의섭, 유영철, 윤인식 : 초음파법을 이용한 용접부의 결함 검출과 평가, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), (1996), pp. 41-46.

5. 이 원, 윤인식 : 산업체 적용을 위한 초음파 검사 기술 개발에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제14권 8호, (1997), pp.49-56.
6. S. J. Song and L. W. Schmerr : Ultrasonic Flaw Classification in Weldments using Probabilistic Neural Networks, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 11, (1995), pp.395-406.
7. 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.
8. M. Sano, Y. Sawada : Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series, Phy. Rev. Lett., Vol 55, No. 10, (1985), pp.1082-1084
9. 이병채 : 시계열 데이터의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구, 대한의용 생체공학회 춘계 학술대회 논문집, (1995), pp.281-284.
10. 김정석, 강명창, 이기용, 구세진 : 엔드밀가 공시 복합계측 신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적 해석, 한국정밀공학회지, 제14권 11호, (1997), pp.93-101
11. F. Takens : Lecture Notes in Mathematics, D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, (1981), P.266
12. 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
13. P. Grassberger와 I. Procaccia : Messuring the Strangeness of Strange attractors, Physica 9D, (1983), pp.189-208
14. Alan Wolf et al : Determining Lyapunov Exponents from a Time Series, Physica 16D, (1985), pp.285-317