

# AISI304 스테인레스강 열화제의 초음파 파워스펙트럼과 카오스 특징추출

Ultrasonic power spectrum & Chaos feature extraction  
of AISI304 Stainless steel Degradation Material

고 준 빈\*, 옴 동 빈\*, 이 영 호\*\*, 오 상 균\*\*\*

\* 충남대학교 기계공학과(대학원)

\*\* 충남대학교 기계공학과

\*\*\* 단국대학교 기계공학과(대학원)

Jun-Bin Ko\*, Dong-Bin Yoem\*, Young-Ho Lee\*\*, Sang-kyun Oh\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam University(Graduate School)

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam University

\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Dankook University(Graduate School)

## 1. 서론

고온 및 고압하에서 장시간 사용하게 되는 재료는 열화(degradation)현상으로 기능손상 및 설비의 안전성을 저하시키게 된다. 최근에는 재료의 열화진단을 위한 정량적 비파괴평가(QNDE)기술로 초음파법<sup>(1), (2)</sup>과 인공지능 기법을 응용하고 있다.

일반적으로 초음파 신호 특징 추출을 위한 방법으로 시간 영역(time domain)상이나 주파수 영역(frequency domain)상 특징을 대상으로 하고 있으나, 노이즈(noise)수준을 고려한 임계치의 설정과 초음파 신호중 해석이 가능한 부분 파형만을 적용하는 단점으로 인하여 정밀도가 낮아지는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 비선형 시계열 신호 분석시에 유용한 카오스 이론을 이용하여 AISI 304강의 초음파 신호로부터 카오스적 정도를 확인하고, 초공간을 고려한 어트랙터의 차원으로 부터 정량적 특징 추출을 함으로서 초음파 현상 인식에 대하여 평가하고자 하였다.

## 2. 어트랙터 재구성 & 프랙탈 차원

### 2.1 어트랙터 재구성

시계열 신호에서 카오스성을 평가하기 위해서

는 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.

### 2.2 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 연구에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Grassberger와 Procaccia<sup>(3)</sup>가 제안한 식 (1)를 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

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

여기서,  $\theta$ 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.

### 3. 실험

AISI 304강의 열화에 따른 시계열 신호 분석을 위한 시스템 구성은 초음파의 발생 및 수신 역할을 하는 펄서 리시버(JSR사의 PR35), 펄서 리시버로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 광대역의 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 열화시편으로부터 초음파 신호를 수신하는 수직 탐촉자(Panamerrics사의 주파수 15MHz, 진동자 직경: 6mm), 접촉매질(기계유) 등이며, 실험에 있어서는 오실로스코프 CRT상에 나타나는 열화도 신호의 특성을 파악하기 위하여 최대 진폭을 기준으로 scan하면서 이에 대한 시계열 데이터 신호를 획득하여 시간 영역 상의 신호 특성으로 열화도에 따른 카오스적 특성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

### 4. 특징추출

#### 4.1 주파수 영역상의 특징추출

열화재에 대하여 오실로스코프로 획득한 초음파 신호는 시간 영역상의 파형으로 나타낼 수 있으며, 이러한 파형은 푸리에 변환을 하게 되면 주파수 영역상의 특성을 갖게 된다. 따라서 본 연구에서는 각각의 열화재에 대하여 획득한 시계열 데이터를 푸리에 변환하여 파워 스펙트럼과 중심 주파수를 기준으로 한 주파수의 대역폭을 특징으로 추출하였다. Fig.2는 AISI304강의 시계열신호로부터 추출한 열화재의 파워스펙트럼을 나타내었다.

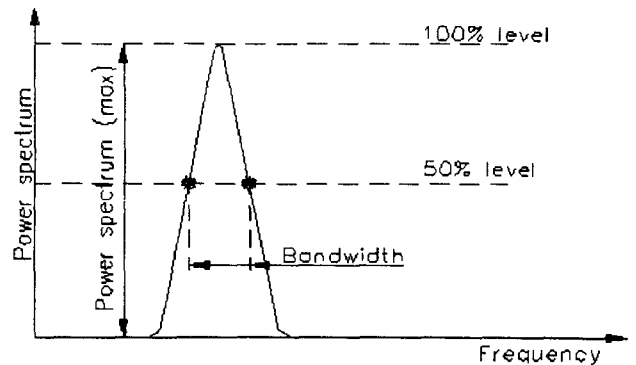
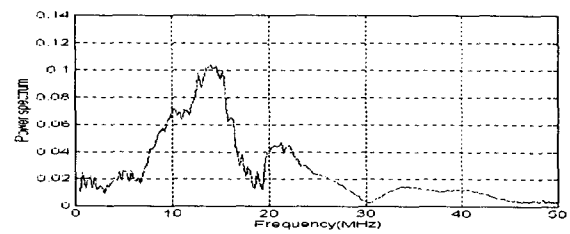
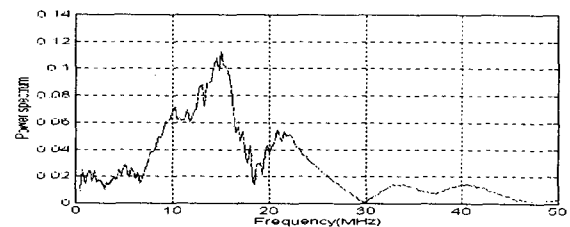


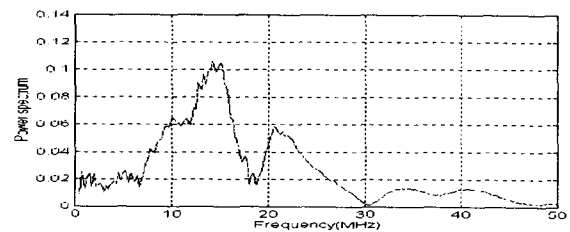
Fig.1 Schematic of feature extraction



(a) in case of virgin material



(b) in case of 60hr



(c) in case of 120hr

Fig.2 A spectrum of first back wall echo(AISI304)

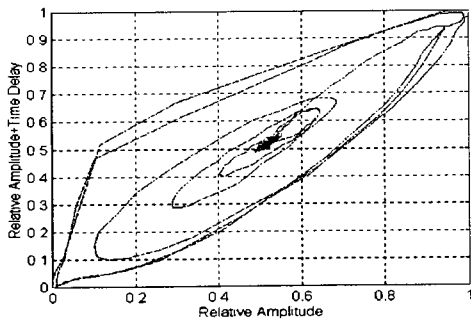
#### 4.2 카오스 특징 추출

시계열 신호의 특징 추출을 위한 추출 구간은 각각의 데이터에 대하여 2500샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 2차원 및 3차원에서 스트레인지어트랙터의 형상을 구하여 카오스에 의한 정량적 특징 추출의 가능성을 확인하고자 하였다. 카오스 특징 추출을 위해서는 어트랙터의 형상을 구하는 것이 중요하다.

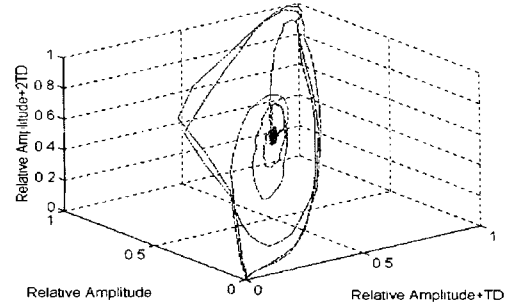
고차원 어트랙터의 기하학적 평가는 적어도 초공간 상에서 가능하며, 카오스적 어트랙터를 이용하므로써 열화도에 대하여 고차원 공간상에서의 정량적 해석 및 평가를 할 수 있다.

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

Fig.3은 처녀재, Fig.4는 680°C에서 60시간 시효된 열화재의 초음파 신호 시계열 데이터에 대하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 데이터 취득시에 어트랙터 특징 추출의 확실성을 위하여 열화신호와 무관한 구간은 가능한 제외하거나 적절히 조절하였으며, 세 가지 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트랙터인 스트레인지어트랙터 형태를 보이고 있다

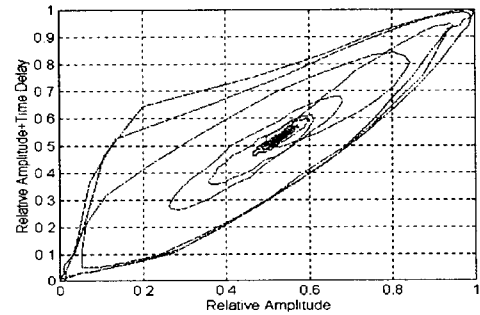


(a) 2-dimension

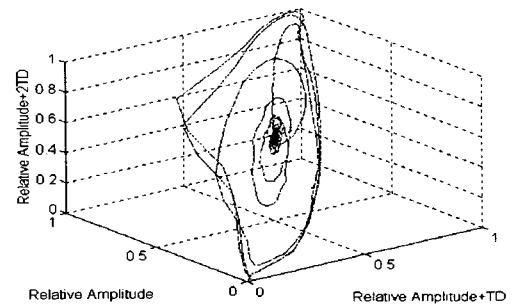


(b) 3-dimension

Fig.3 Strange attractor analysis of virgin material(AISI304)



(a) 2-dimension



(b) 3-dimension

Fig.4 Strange attractor analysis at 680°C and 60hr(AISI304)

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 연구에서는 이러한 어트랙터의 기하학적 형상 변화에 대하여 4개의 분포도를 수치값으로 정량화하는 방법을 제시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 2는 프랙탈 차원, 리아프노프 지수에 대한 결과이다. 두 개의 대표적 카오스 특징에서는 열화의 증가에 따라 기하학적 형태와 이웃한 두 궤적의 발산 정도가 점점 커지는 경향을 나타내었다. 따라서 이와 같이 열화도에 따른 미소한 결과들로부터 열화도 평가의 정밀도를 향상 시킬 수 있다.

Table 1 Configuration point number of strange attractor quadrant of AISI304

classification quadrant	virgin	60hr	120hr
1 quadrant	1122	1252	1272
2 quadrant	160	155	169
3 quadrant	1059	939	891
4 quadrant	159	154	168

Table 2 Chaotic feature extraction of AISI304

classification features	virgin	60hr	120hr
correlation dimensions	3.905	3.837	4.211
lyapunov exponents	0.062	0.078	0.054

## 5. 결론

본 연구에서는 고온에서 사용되는 재료인 AISI 304 스테인레스강에 대하여 A-scan에 의한 시계열 초음파 신호로부터 최근 결정론적 비선형 동적 해석 및 평가에 각광 받는 카오스 이론을 이용하여 열화 평가에 대하여 연구하였다. 카오스성을 갖는 시계열 데이터로부터 재질열화의 고유 특징인 스트레인지 어트랙터의 기하학적 형태, 프랙탈 차원, 리아프노프 지수를 추출하였다.

스트레인지 어트랙터의 궤적 변화로부터 열화 따라 현저한 카오스성의 차이를 나타내었으며, 따라서 이러한 카오스성의 차이로부터 재질열화의 고유 특성을 평가할 수 있다.

## Reference

- (1) Hiroaki FUKUHARA "Current of Nondestructive Diagnosis for Damaged Materials", J. of JSNDI, Vol.46, No.3, 1997, pp.150~156.
- (2) S. Matsubara, Y. Yokono and T. Imanka, "Diagnosis of Material Degradation by Ultrasonic Wave", J. of JSNDI, Vol.46, No.3, 1997, pp.185-187.
- (3) P. Grassberger and I. Procaccia, "Characterization of Attractors", Phys. Rev. Lett., Vol.50, No.5, pp.346-349, Jan., 1983