

어트랙터 해석을 이용한 SA 508강의 재질열화신호의 카오스성 평가

Chaotic evaluation of material degradation signals of SA 508 Steel using the attractor analysis

고 준 빈*, 염 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. 서 론

오스테나이트계 스테인레스강은 원자력 발전, 화력 발전, 화학 플랜트의 주요 구조 재료에 널리 사용되고 있으며, 고온에서 장시간 사용됨에 따라 기계적 성질, 특히 인성이 점진적으로 저하되는 열시효 취화(thermal aging embrittlement)현상이 발생하며 구조물의 기능손상 및 원자로 전체의 안전성을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 설비의 안전성 및 잔여수명, 열화정도 등을 정량적으로 평가, 보증하는 것이 대단히 중요하다.

본 연구에서는 정밀도 높은 열화정도를 평가하기 위하여 오스테나이트계 스테인레스강의 시효온도범위인 280°C~400°C에서 시효된 SA508 CL3강에 대하여 펄스-에코법에 의한 열화재의 열화도 파형을 초음파 신호로 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 카오스성 정도를 확인하고 이로부터 초음파-카오스 해석^{(1),(2)}에 의한 오스테나이트계 스테인리스강 SA508 CL3의 열화도 평가의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 어트랙터 & 카오스 특징 추출

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.

시계열 신호에서 카오스성을 평가하기 위해서는 어트랙터를 재구성하는 것이 필요하다. 따라서 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 카오스 특징을 대표적으로 나타내는 프랙탈 차원과 리아프노프 지수를 추출하게 된다.

어트랙터 재구성 방법은 Takens의 지연 방법⁽³⁾을 사용하였다.

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

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

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

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 및 실험방법

SA508강의 열화도 시계열 신호 분석을 위한 시스템 구성은 Fig.1과 같다. 먼저 펄스 리시버(JSR사의 PR35)로부터의 신호를 처리하여 디스플레이하는 광대역의 디지털 오실로스코프(Lecroy사의 9354A), 초음파 신호를 수신하는 수직 탐촉자(Krautkrämer사의 주파수 10MHz, 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 획득하였다.

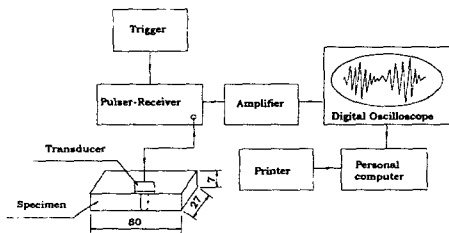


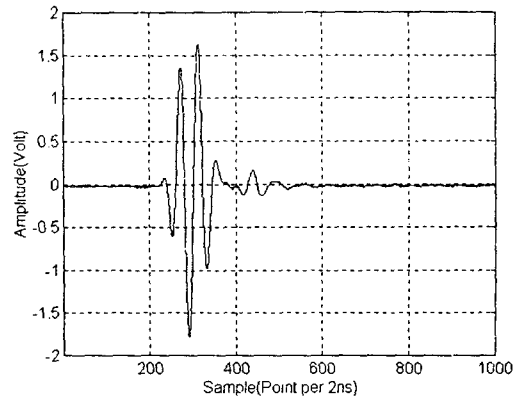
Fig. 1 Schematic diagram of data acquisition and processing

3.2 열화 시편의 초음파 신호

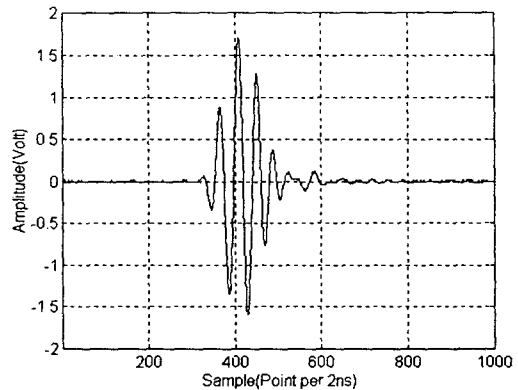
일정한 음속으로 재질 내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 열화도에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-scan법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된다.

실험에 사용된 시계열 신호는 SA508 CL.3의 단조형 오스테나이트계 스테인레스강의 밑면으로부터의 초음파 신호를 광대역 디지털 오실로스코프로 획득한 것으로 Fig. 2는 이를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 3개의 열화 시편에 대하여 scan하면서 1 point에 대하여 2ns와 500MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 1000샘플이다. (a)는 건전부, (b)는 290℃에서 48시간 유지후 공냉, (c)는 390℃에서 48시간 유지후 공냉한 시편의 펄스-에코 초음파 신호를 나타낸다. 수직

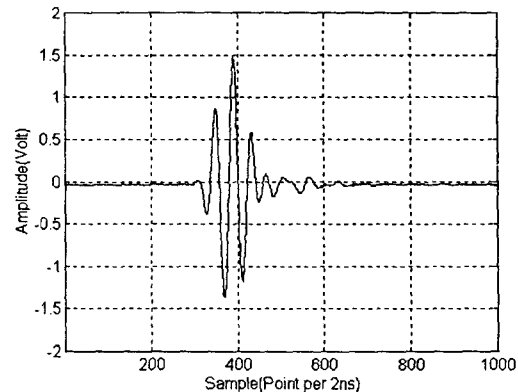
탐촉자로 저면으로부터 반사되어 수신되는 초음파 신호를 취득하여 각각의 point에 대하여 카오스 특징 추출을 하고자 하였다.



(a) In case of virgin material



(c) In case of 290℃

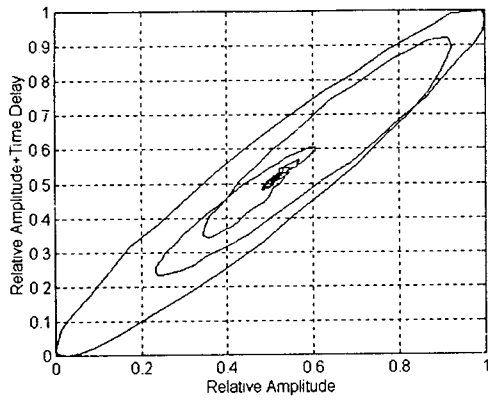


(c) In case of 390℃

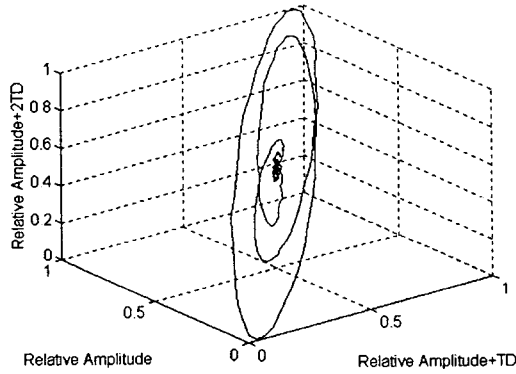
Fig. 2 Time series signal from a thermal aging specimen(SA508 CL.3)

3.3 특징 추출

Fig. 3는 건전부, Fig. 4, Fig. 5은 시효은도의 변화에 따른 재질의 열화도 시계열 데이터에 대하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다.

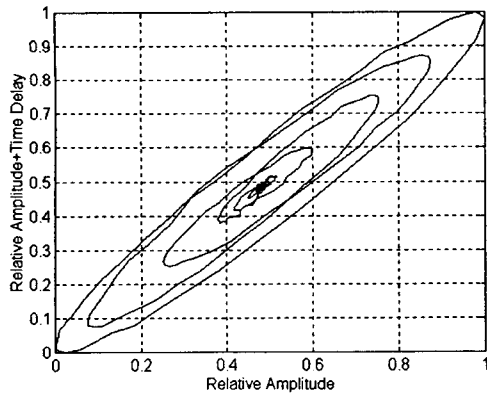


(a) 2-dimension

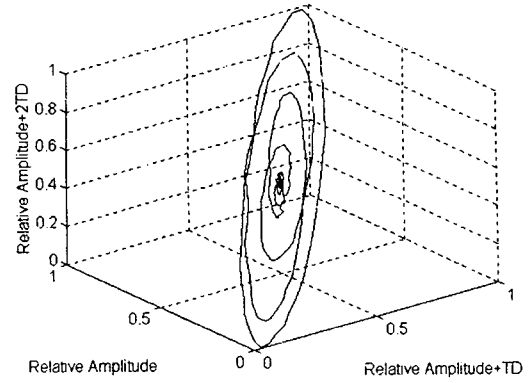


(b) 3-dimension

Fig. 3 Strange attractor analysis of virgin material

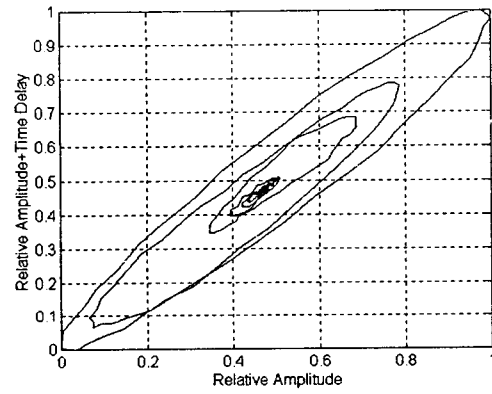


(a) 2-dimension

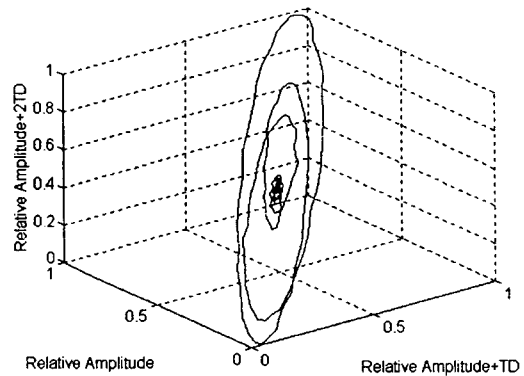


(b) 3-dimension

Fig. 4 Strange attractor analysis at 290°C



(a) 2-dimension



(b) 3-dimension

Fig. 5 Strange attractor analysis at 390°C

세 가지 경우가 모두 코스모스(점, 폐곡선, 토러스)와 대별되는 전형적인 카오스적 어트

랙터인 스트레인지 어트랙터 형태를 보이고 있다.

열화를 받지 않은 처너제의 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 진폭과 시간지연과의 상관관계에 의한 어트랙터 궤적의 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. 따라서 내부 구조에 대한 해석 및 평가로부터 대상 신호를 정량화할 수 있으며, 이에 대해서는 스트레인지 어트랙터를 3차원으로 구성하는 것으로 가능하다. 구성된 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 평가가 가능하다.

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 진폭을 고려하여 카오스 이론에 의한 정량적이고 정밀도 높은 해석을 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 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.

5. 참고문헌

- (1) I. Tsuda, T. Tahara, H. Iwanaga, 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.
- (2) M. Sano, Y. Sawada, 1985, "Measurement of the Lyapunov Spectrum Form a Chaotic Time Series," *Phy. Rev. Lett.*, Vol 55, No. 10, pp.1082~1084.
- (3) F. Takens, 1981, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), Springer, Vol. 898, P.266.