

폴리에틸렌 배관재의 건전성 평가를 위한 어트랙터 시스템의 구축

황영택*, 오승규*, 이 원**

Construction of Attractor System by Integrity Evaluation of Polyethylene Piping Materials

Hwang Yeong Taik*, Oh Seung Kyu*, Yi Won**

Key Words: Polyethylene(폴리에틸렌), Piping Materials(배관재), Time Delay(시간 지연), Strange Attractor(스트레인지 어트랙터), Fractal Dimension(프랙탈 차원), Ultrasonic Waves(초음파)

Abstract

This study proposes analysis and evaluation method of time series ultrasonic signal using attractor analysis for fusion joint part of polyethylene piping. Quantitatively characteristics of fusion joint part is analysed features extracted from time series. Trajectory changes in the attractor indicated a substantial difference in fractal characteristics. These differences in characteristics of fusion joint part enables the evaluation of unique characteristics of fusion joint part. In quantitative fractal feature extraction, feature values of 4.291 in the case of debonding and 3.694 in the case of bonding were proposed on the basis of fractal dimensions. In quantitative quadrant feature extraction, 1,306 point in the case of bonding(one quadrant) and 1,209 point(one quadrant) in the case of debonding were proposed on the basis of fractal dimensions.

Proposed attractor feature extraction can be used for integrity evaluation of polyethylene piping material which is in case of bonding or debonding.

기호설명

- v : 프랙탈 차원
- Θ : 계단 함수
- m : 임베딩 차원
- τ : 시간 지연

1. 서론

최근 도시가스의 누설로 인한 일련의 사고로 현재의 강관을 폴리에틸렌(Polyethylene:PE) 배관으로 대체하는 비율이 점점 높아지고 있다.

PE 배관은 토중에 직접 매설하여도 부식이 되지 않는 점, 접합이 간단하다는 점, 가스의 차단이 쉽다고 하는 점 등의 장점을 갖고 있는 반면에, 용착 이음시 대상이음재의 면취, 열악한 작업 조건 등의 여러 가지 변수로 인하여 국소 미용착 부위의 발생이 자주 일어날 뿐만 아니라, 사용중 탈착으로 인한 가스 누출의 위험성을 내포하고 있다. 따라서 PE 배관재에 대하여 용착부의 건전성을 확보하기 위한 정량적 비파괴 평가(Quantitative Non-Destructive Evaluation : QNDE)는 전체 시스템의 안전성 측면에서 공학적으로 대단히 중요하다.

현재 용착부의 건전성 평가를 위하여 사용되고 있는 비파괴적 방법⁽¹⁾으로는 탐상 결과의 실시간 파악 등의 장점을 갖고 있는 초음파 탐상법⁽²⁾이 있다. 초음파에 의한 방법은 일반적인 파괴역학적 시험과는 달리 대상재의 두께에 따른 시간축

* 정회원, 숭실대학교 대학원
** 정회원, 숭실대학교 기계공학과

의 설정과 탐색자 특성의 교정으로 신속하고도 간단하게 건전성을 평가할 수 있다. 특히 초음파로 획득한 용착부의 신호에 대하여 최근 비선형 신호 해석에서 우수성이 입증된 프랙탈 해석을 이용함으로써 용착부의 고유 특성을 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다⁽³⁾.

프랙탈 해석에 의한 방법은 전체 파형으로부터 신호가 갖는 고유의 성질을 시계열 데이터로 하여 계의 상태 공간(state space) 내에 내재한 특성을 평가하게 되며, 이러한 특성을 파악하고, 해석하는 프랙탈 특징 추출로부터 용착부의 건전성 평가에 대한 정밀도를 향상시킬 수 있다.

특히 이⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 등에 의한 연구에서 프랙탈 해석은 그 유효성이 입증되었다. 이러한 어트랙터 재구성(attractor reconstruction)으로부터의 특징 추출은 전체 파형의 평가에 있어서 강점을 갖고 있지만, 생체 분야 및 특정 공학 분야 외에는 적용이 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우선 결합이 존재하는 PE 배관재의 용착부에 대하여 얻어진 초음파 신호를 오실로스코프상에 나타내어 그 특성을 파악하였다. 그리고, 시계열 데이터로 이루어진 전체 파형에 대하여 어트랙터 상의 사분면 특징 2개와 공간상의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원을 추출하여 건전 용착부와 미용착부에 대한 초음파적 특성을 구분하였다. 다음은 결합에 대한 초음파 신호의 프랙탈 해석을 이용한 특성 및 해석의 결과로부터 PE 배관재의 건전성 평가 가능성에 대하여 제시하고자 하였다.

2. 프랙탈 해석

해석 대상 시계열 신호에 대한 프랙탈 구조와 고유 특성을 평가하기 위해서는 어트랙터의 재구성과 프랙탈 차원을 구하는 것이 필요하다. 임베딩 차원과 시간 지연에 의한 어트랙터의 재구성으로 프랙탈 외적 구조를 나타나게 된다. 어트랙터 재구성이란 시계열 신호를 위상공간으로 표현하는 것을 말하며, 어트랙터 재구성 방법은 Takens⁽⁶⁾의 지연 방법을 사용하였다. 즉, i 개의 데이터가 주어졌을 때, 식(1)과 같이 주어지는 m 차원 벡터 $\bar{X}(i)$ 를 위상공간에서 순서대로 연결시킴으로써 어트랙터가 재구성된다. 여기서 $x(i)$ 는 주어진 시계열 데이터이며, m 은 임베딩

차원(embedding dimension)을, τ 는 시간 지연(time delay)을 나타낸다.

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

임베딩 차원을 결정하기 위해 Kennel⁽⁷⁾이 제안한 FNN(false nearest neighbor)방법을 이용하였다. FNN이란, Fig. 1과 같이 임의의 임베딩 차원에서는 어트랙터 위의 두점이 최근접 이웃점(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 구하고 이를 어트랙터의 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다.

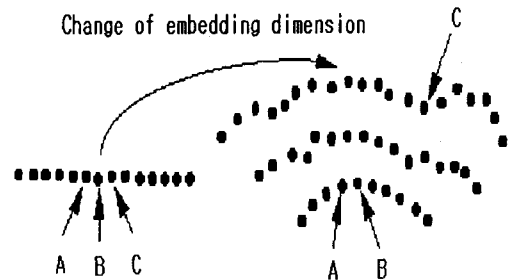


Fig. 1 Concept of false nearest neighbor

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

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

기준점 $\hat{X}(n)$ 과 최근접 이웃점 $\hat{X}(q)$ 는 식(3)과 같이 설정한다.

$$\hat{X}(q) = [x(q), x(q+\tau), x(q+2\tau), \dots, x(q+(m-1)\tau)] \quad (3)$$

기준점 $\hat{X}(n)$ 과 최근접 이웃점 $\hat{X}(q)$ 사이의 유클리디안 거리는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m(n) = \|\hat{X}(n) - \hat{X}(q)\| = \sqrt{\sum_{k=0}^{m-1} \{x(n+kr) - x(q+kr)\}^2} \quad (4)$$

$$R_{m+1}(n) = \sqrt{R_m^2(n) \{x(n+mr) - x(q+mr)\}^2} \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2(n) - R_m^2(n)}{R_m^2(n)}} = \frac{|x(n+mr) - x(q+mr)|}{R_m(n)} > R_{thr} \quad (6)$$

여기서 R_{thr} 는 FNN에 대한 평가 임계 값이다.

시간지연은 Liebert와 Schuster⁽⁸⁾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 계산함으로써 어트랙터를 재구성할 수 있으며, 프랙탈 차원을 추출하여 시계열 데이터의 기하학적 특성을 평가할 수 있게 된다. 프랙탈 차원은 정수 값이 아닌 실수로 표현되며 신호의 성질과 변화의 정도에 따라 그 값이 달라진다. 따라서, 어트랙터의 고유한 특성으로 프랙탈 차원을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 재구성된 어트랙터로부터 프랙탈 차원을 구하기 위하여 Gressberger와 Procassia⁽⁹⁾가 제안한 식(7)을 이용한 상관적분 방법을 사용하였다.

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(r - |\bar{X}(i) - \bar{X}(j)|) \quad (7)$$

여기서, θ 는 계단함수(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.

또한 $\theta(t)$ 의 조건으로는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (8)$$

이 방법은 어트랙터상의 각 점에서 상관 적분을

계산함으로써 프랙탈 차원을 결정하게 된다. 어트랙터상의 한 점을 중심으로 반지름이 r 인 구를 그리고 구 내부점의 수를 구하는 과정을 어트랙터 상의 각 점에서 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다.

어트랙터상의 특성이 결정되는 것으로부터 식(9)와 같은 $\log_2 r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 프랙탈 차원(v)으로 나타낸다.

$$v = \frac{\log_2 C(r)}{\log_2 r} \quad (9)$$

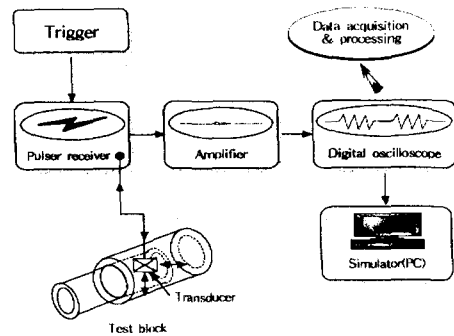


Fig. 2 Schematic diagram of data acquisition and processing

3. 실험 및 결과

3.1 시스템의 구성 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), 결합 신호를 수신하는 수직 탐촉자(krautkrämer사의 주파수 2MHz, 진동자 크기: ϕ 10mm), 접촉매질(기계유) 등이다. 실험에 있어서는 수직 탐촉자의 주파수, 시험편의 두께와 성질 등의 상관 관계에 의하여 오실로스코프의 화면상에 나타나는 결합 신호의 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 Fig. 2와 같이 시스템을 구성하여 겹치기 이음의 용착부와 미용착부에 대하여 수직 탐촉자를 이용하여 스캔하면서 최대 진폭과 최대 진폭의 10%를 용착 및 미용착까지의 스캔범위로 설정하였다.

최대 진폭을 중심으로 스캔하여 용착 및 미용착을 대표하는 신호를 시계열 데이터로 획득하여 시간 영역상의 신호 특성 분석으로 용착부의 건전성을 정량적으로 평가하고자 하였다.

3.2 겹치기 용착 이음의 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_l 과 횡파의 음속 C_s 는 식(10)과 식(11)로 나타낼 수 있다.

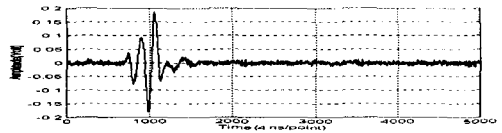
$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{K+(4/3)G}{\rho}} \quad (10)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (11)$$

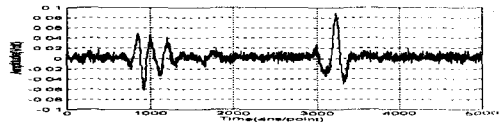
여기서 E 는 종탄성 계수, K 는 체적 탄성 계수, G 는 횡탄성 계수 또는 전단 탄성 계수, ρ 는 밀도, ν 는 푸와송비이다.

결함 검출을 목적으로 사용되는 초음파는 재질 내를 일정한 음속을 갖고 진행하여 결함으로부터의 반사 에코를 얻게 된다. 용착부의 탈착 상태 평가를 대상으로 하는 경우, 초음파의 수직입사에 의한 펄스-에코식의 수직법을 적용할 수 있다. 일정한 음속으로 재질내를 진행하는 펄스-에코형의 초음파는 용착부에 관한 정보를 갖게 되며, 현재 널리 이용되고 있는 A-스캔법과 같은 경우는 시간축과 진폭축상에 에코의 형태로 나타나게 된다. 시물레이션에 사용된 시계열 신호는 폴리에틸렌 배관재의 겹치기 이음에 대한 신호로써 최대진폭을 중심으로 스캔하면서 오실로스코

프로 획득한 것으로 Fig. 3은 탈착이 되었을 경우에 대한 전체적인 신호의 형태를 나타낸다. 신호 취득에 있어서 4ns와 250MHz로 샘플링하였으며, 총 데이터의 크기는 5000샘플이다. Fig. 3의 1 화면은 트리거로부터 가장 좌측의 메인방(main bang)과 용착부 및 용착부를 투과한 전체를 포함하는 신호이며, A 화면은 해석 대상 신호만을 확대하여 1칸당 500포인트로 하여 $2\mu s$ (1포인트당 4 ns)로 설정하여 전체에 대해서는 $20\mu s$ 로 신호를 획득하였다.



(a) Ultrasonic signal in case of debonding



(b) Ultrasonic signal in case of bonding

Fig. 4 Time series signal of fusion joint part

Fig. 4에서 (a)는 탈착되었을 경우에 대한 신호이며, (b)는 탈착이 되지 않은 건전부위에 대한 신호를 나타낸다.

3.3 프랙탈 & 어트랙터 사분면 특징추출

시계열 신호에 대하여 어트랙터를 재구성 한 후, 특징 추출을 위한 추출 구간을 각각의 데이터에 대하여 3,000샘플로 설정하였으며, 이에 대하여 어트랙터의 사분면 형상, 프랙탈 차원을 구하여 어트랙터에 의한 용착부 탈착상태의 정량적 특징 추출을 하고자 하였다.

어트랙터 특징 추출의 가장 첫 번째 단계로서 어트랙터의 형상과 시스템의 특성을 결정짓는 임베딩 차원을 구하는 것이 중요하며, 프랙탈 차원을 설정하기 위해서는 최적의 시간 지연과 최소 임베딩 차원의 설정이 중요하다.

Fig. 5는 항공 결함 신호의 시계열 데이터에 대하여 정보간의 상관관계를 나타내는 시간 지연

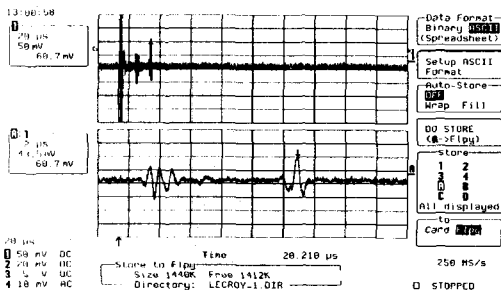


Fig. 3 Full signal of fusion joint of PE piping materials

을 설정한 결과이다. 시간지연은 어트랙터의 형상에 가장 큰 영향을 주게 되는 점을 고려하여 가능한 시계열 데이터의 설정 샘플들이 전체 어트랙터를 구성할 수 있도록 하였으며, 최적 값은 2로 나타났다.

최소 임베딩 차원의 설정은 FNN 방법을 이용하였으며, Fig. 6은 용착부와 비용착부를 고려한 신호에 대하여 임베딩 차원을 설정한 결과이다. x 축은 임베딩 차원, y 축은 FNN의 비, z 축은 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, 신호 오차에 의한 영향이 커질 수 있고 너무 크면 최적값을 찾기 어려워 많은 반복 시뮬레이션을 하여 최적의 평가 임계치를 100으로 설정할 수 있었으며, 임베딩 차원이 6에서 FNN 비율이 0%로 떨어지는 것으로부터 어트랙터의 기하학적 차원은 6차원으로 생각할 수 있다.

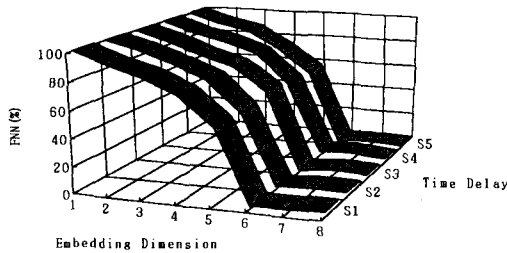


Fig. 5 Determination of embedding dimension

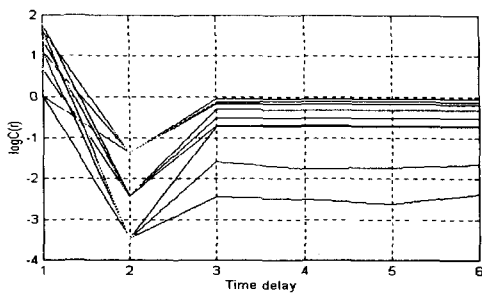


Fig. 6 Determination of time delay

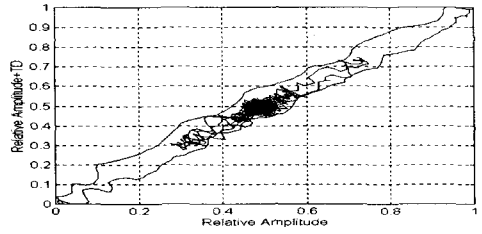


Fig. 7 2-dimensional attractor in case of debonding

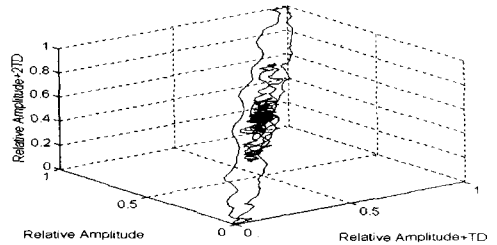


Fig. 8 3-dimensional attractor in case of debonding

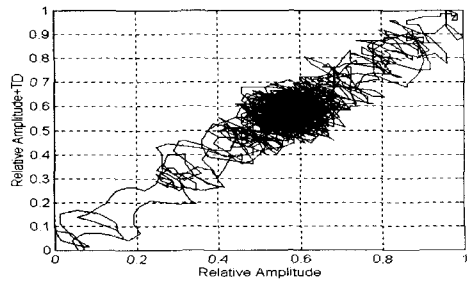


Fig. 9 2-dimensional attractor in case of bonding

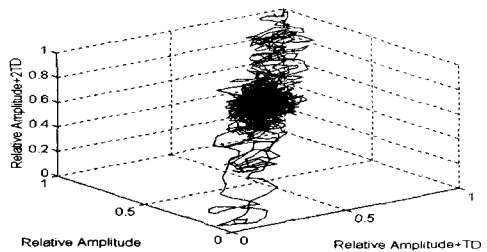


Fig. 10 3-dimensional attractor in case of bonding

용착부에 내재되어 있는 특성을 가장 쉽고 간단하게 확인할 수 있는 방법중의 하나가 재구성된 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. 7과 Fig. 8은 탈착된 용착부로부터 반사되어 돌아온 신호에 대하여 2차원, 3차원으로 어트랙터를 구성한 결과를 나타낸다. 전체 5000샘플 중에 결합 신호와 무관한 구간은 샘플을 적절히 조절하여 3,000샘플씩을 적용하였으며, 두가지 경우가 모두 전반적으로 높은 에너지를 갖는 부분에서 변화를 동반하면서 커다란 궤적을 그리며 안정한 상태를 이루고 있으며, 이는 탈착된 부분에 대한 초음파적 특징을 나타낸다고 볼 수 있다. 시계열 데이터에서는 5개의 링잉(ringing)이 나타났으나, 2차원과 3차원 어트랙터를 재구성하였을 경우의 궤적은 무차원화한 최대값을 기준으로 2개로 나타났다. 또한 2개 이상의 궤적에 대해서는 심한 변화를 동반하며 안쪽으로 휘돌아 들어가는 형상을 나타내고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 용착이 잘 된 경우에 대한 신호에 대한 결과이다. 에너지의 감소와 변화 상태는 탈착된 용착부에서의 신호와 거의 같으나, 궤적 형상은 상당히 다르게 나타남을 알 수 있다. 시계열 데이터에서는 용착부에서 3개의 링잉과 용착부를 투과하여 되돌아온 신호는 1개의 링잉으로 나타났으며, 2차원과 3차원 어트랙터상의 궤적이 탈착된 용착부보다 더욱 심한 궤적 변화를 동반하며 안쪽으로 휘돌아 들어가는 형상을 나타내었다.

용착부에 대하여 탈착된 상태와 용착된 상태를 어트랙터 재구성하여 비교하였을 경우, 형상과 에너지 변화에 있어서 모두 커다란 차이를 나타내었으며, 이로부터 같은 재질의 용착부라도 용착의 상태에 따라 2차원으로 구성된 어트랙터를 기준으로 관련 진폭과 시간지연과의 상관 관계에 의한 어트랙터의 궤적 형상은 다르게 나타남을 알 수 있다.

2차원 어트랙터는 대상 신호의 고유 특징을 나타내어 주는 것은 사실이나 어트랙터의 형상을 가장 저차원으로 보여 주게 되며, 따라서 어트랙터의 차원을 높여 고찰하는 것이 필요하다.

구성한 3차원 어트랙터에 있어서 용착된 경우가 가장 큰 궤적의 변화를 나타내었으며, 에너지의

크기 및 갯수가 다른 특성을 나타내었다. 따라서 이러한 어트랙터의 궤적 변화로부터 용착부의 건전성 평가가 가능하다.

결정된 임베딩 차원 및 시간지연을 적용하여 용접부에 대한 프랙탈 차원과 어트랙터의 사분면 특징을 추출하였으며, Table 1은 이러한 결과를 나타낸다.

재구성된 어트랙터의 기하학적 형상은 프랙탈 차원으로 규정할 수 있으며, 결합 신호의 특성 정도에 따라 프랙탈 차원이 달라지게 되고, 또한 재구성된 어트랙터상의 사분면 특징으로 평가할 수 있다. 어트랙터의 기하학적 구조를 나타내는 프랙탈 차원에 있어서 용착된 경우가 3.694, 탈착된 경우가 4.291로 나타났으며, 따라서 탈착된 경우가 더 복잡한 프랙탈 구조임을 알 수 있다. 이러한 프랙탈 차원으로부터 용착이 된 경우가 건전한 상태라는 것을 고려한다면, 프랙탈 차원 3.694는 건전성을 나타내는 프랙탈 차원 기준이 되며, 이로부터 폴리에틸렌 배관계의 건전한 상태와 불건전한 상태를 파악할 수 있다.

Table 2는 어트랙터 사분면 특징 추출을 한 결과로서, 위상 공간상으로 재구성한 어트랙터에 대하여 각각의 축을 어트랙터 상의 중심으로 이동하여 사분면 상의 점들을 카운팅하였다. 1사분면과 3사분면을 기준으로 하였을 경우에는 용착된 경우가 더 많이 분포되어 있었으며, 2사분면과 4사분면의 경우는 탈착된 경우가 더 많은 분포를 형성하고 있었다.

Table 1 Fractal dimensions of fusion joint part

Case	Case of bonding	Case of debonding
Dimension		
Fractal dimensions	3.694	4.291

Table 2 Attract characteristics of fusion joint part

Quadrant	One quad.	Two quad.	Three quad.	Four quad.
Part				
Case of bonding	1,306	152	1,380	158
Case of debonding	1,209	242	1,233	276

따라서 이러한 어트랙터의 특징을 이용함으로써 폴리에틸렌 배관 용착부 신호에 대한 시간 영역상(time domain)에서의 해석의 어려움을 해결할 수 있으며, 건전성 여부에 대한 상태를 정량

적으로 평가하는 것이 가능하다.

이상에서의 고찰 결과로부터 비선형성을 나타내는 폴리테일렌 배관 용착부에 대한 초음파 시계열 데이터(프랙탈 차원이 비선형성을 나타냄)는 용착부의 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 어트랙터의 특성으로 나타나게 된다.

본 연구에서는 배관 용착부의 건전성을 평가하는데 있어서 최대 진폭(에너지)과 최대 진폭의 10%를 고려하여 스캔한 시계열 데이터를 이용하여 어트랙터 특징 추출에 의한 정량적이고도 정밀도 높은 해석을 하고자 하였다.

어트랙터 해석은 저자들이 카오스 이론 중에 포함되어 있는 프랙탈 차원 평가 부분을 위상 공간상의 기하학적 구조와 형상 분포도로 확장시킨 분야로 현재 세계적으로 그 적용 범위가 확대되어 가고 있으며, 우리나라에서도 여러 공학 분야에 접목을 시도하는 초기 단계에 있다.

따라서 현재의 어트랙터 이론이 갖는 정성적 부분인 어트랙터의 내부를 고차원으로 해석할 수 있는 푸앙카레 맵과 같은 초공간 해석에 대한 연구와 임베딩 차원, 시간 지연에 관계되는 파라미터 설정의 최적화 등에 대한 부분이 지속적으로 연구되어 보완된다면, 향후 21세기에는 비선형 공학 해석의 분야에 있어서 그 위력을 발휘할 것으로 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 신호 해석분야에서 각광을 받는 어트랙터 해석을 이용하여 폴리테일렌 배관의 용착부를 대상으로 시계열 초음파 결합 신호에 대하여 연구하였다. 프랙탈성을 갖는 시계열 데이터로부터 신호의 고유 특징인 초공간적 어트랙터의 사분면과 프랙탈 차원을 추출하였다. 이렇게 구한 특징들로부터 비선형성이 강한 용착부의 초음파 신호에 대하여 정량적이면서 정밀도 높은 평가를 하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전체 파형을 고려한 초음파 신호(용착과 탈착)에 대하여 어트랙터 재구성에 의한 2차원 어트랙터로부터 각각의 사분면 점들을 카운팅하는 새로운 특징 추출 방법을 제시하였다.
- (2) 어트랙터의 궤적을 기준으로 같은 재질이라도 용착부의 특성에 따라 현저한 궤적변화를 나타내었으며, 이러한 차이로부터 용착부의 건전성

을 평가할 수 있다.

- (3) 용착부의 건전성 평가를 위하여 프랙탈 차원을 추출한 결과, 용착의 경우는 3.694, 탈착의 경우는 4.291을 프랙탈 특징값으로 제시하였다.
- (4) 어트랙터의 형상을 결정짓는 사분면 특징 추출에서는 용착된 경우가 1사분면 (1,306)과 3사분면(1,380)에서 탈착된 경우보다 높게 나타났으며, 2사분면(242)과 4사분면(276)의 경우는 탈착된 경우가 높은 분포도를 형성하였다.

참고 문헌

- (1) Thomas F. Perrone, 1992, "Principles of Radiographic Film Interpretation of Pipeline Welds," *Journal of the American Society for Nondestructive Testing*, Vol. 50, 11, pp.1268~1273.
- (2) 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, 1997, "신경 회로망을 이용한 초음파 에코의 예측 및 평가," *대한기계학회 논문집*, 제21권 제4호, pp.586~595.
- (3) 이 원, 윤인식, 이병채, 1998, "카오스 특징 추출에 의한 용접 결함의 초음파 형상 인식," *한국정밀공학회지*, 제15권 제6호, pp.167~174.
- (4) 이병채, 1995, "시계열 데이터의 혼돈도 분석 알고리즘에 관한 연구," *대한의용생체공학회 춘계학대회 논문집*, pp.281~284.
- (5) 강명창,이기용,구세진, 1997, "엔드밀가공시 복합 계측신호를 이용한 공구 마멸의 카오스적해석," *한국정밀공학회지*, 제14권 11호, pp.93 ~101.
- (6) Takens F., 1981, "Lecture Notes in Mathematics," D. A. Rand and L. S. Young(eds.), *Springer*, Vol. 898, pp.266.
- (7) Kennel M. B. et al, 1992, "Determining Embedding Dimension for Phase Space Reconstruction using Geometrical construction," *Physical Reviews A*, Vol. 45, pp.2403~3411.
- (8) Liebert W. and Schuster H. G. ,1989, "Proper Choice of The Time Delay for The Analysis of Chaotic Time Series," *Physics Letters A*, Vol.142, pp.107~111.
- (9) Grassberger P. and Procaccia I., 1983, "Characterization of Attractors," *Rev. Lett.*, Vol.50, No.5, pp.346~349.