

상관차원을 이용한 회전기계의 간극 진단

Diagnosis on the Clearance of Rotating Machinery using Correlation Dimension

박상문* · 최연선**

Sang-Moon Park and Yeon-Sun Choi

Key Words : Correlation Dimension(상관차원), Delay Time(지연시간), Embedding Dimension(매립차원), Clearance(간극), Fault Diagnosis(고장진단)

ABSTRACT

The correlation dimension of a nonlinear method for the diagnosis on the clearance of rotating machinery is introduced in this paper. The correlation dimension can provide some intrinsic information of an underlying dynamic system by reconstructing measured scalar time series. Vibration signals measured from a rotor with different operating conditions are analyzed using the correlation dimension. The results show that the correlation dimension method can identify the magnitude of the clearance of a rotor and the lubricating condition.

1. 서 론

기계시스템을 설치할 때 오류가 있거나 장기간 사용하게 되면 하중에 의한 변형, 마모 등에 의해 기계 부품사이에는 간극(clearance)이 발생하게 된다. 간극은 부품 상호간에 마찰과 충격을 유발하여 기계시스템의 복잡한 진동을 발생시킴으로써 기계의 성능과 수명을 단축시키게 된다. 물론 이러한 간극이 기계시스템에서 발생하지 않도록 보수 및 유지에 만전을 기해야 되나 기계 작동 중 발생하는 급작스러운 상황은 대처하기가 어려울 뿐만 아니라, 이러한 간극은 기계를 장기간 운전하면서 서서히 발생하는 것으로써 적정 간극 유지 및 보수는 결코 쉽지 않은 과제이다. 그러나 간극으로 인한 기계의 고장과 성능 저하 및 수명 단축은 산업현장의 주요 과제로서 결코 간과할 수 없는 문제이다.

회전기계와 관련하여 기존의 고장진단 기법은 신호패턴 인식에 기초한 경우가 대부분으로 정렬불량, 회전마멸(rubbing) 등 회전기계의 비선형적인 결함을 기술하기에는 한계가 있다. 현재 주로 사용되고 있는 회전기계의 고장진단은 시간영역 응답에 대한 주파수 분석, 캡스트럼(cepstrum), 스펙트로그램(spectrogram)과 같은 푸리에 급

수에 기초한 신호처리 기법에 많이 의존하고 있다. 그러나 최근 비선형 동역학 이론에 근거한 새로운 기법들이 발표되고 있다. Peng⁽¹⁾은 FFT 스펙트럼과 변형된 time-frequency 분석을 통하여 회전마멸 발생 여부를 판단하였으며, Wang⁽²⁾은 의사 위상선도(pseudo phase portrait)를 이용하여 기어 결함에 관한 연구를 수행한 바 있다. Logan⁽³⁾은 상관차원(correlation dimension)을 이용하여 실험으로 획득한 비선형 시계열(nonlinear time series)로부터 결함이 있는 베어링의 고장진단이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 축과 축받침(pedestal) 사이 간극에 의한 회전기계의 결함신호를 비선형 기법인 상관차원 해석을 이용하여 간극의 크기, 간극 내 윤활상태를 진단할 수 있음을 보였다.

2. 끌개 재구성

카오스 응답은 비선형적이고 불규칙적이다. 이러한 카오스 응답은 일견 무질서하게 보이나 일정한 규칙성을 지니고 있다. 따라서 카오스 응답을 해석하면 해당 동역학계를 정량적으로 분석할 수 있다. 그러나 카오스 응답 특성상 초기조건에 민감하고 응답의 변화가 비선형적으로 다양하고 급격하게 변화하므로 해석하기는 쉽지 않다.

비선형 시계열 해석은 그 신호가 가지고 있는 결정론적 규

* 정회원, 성균관 대학 기계공학과 대학원

** 책임저자, 정회원, 성균관 대학 기계공학과

E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr

Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

칙성을 찾아내는 것으로서 대표적인 방법이 상관차원 해석이다. 상관차원 해석을 위해서는 비선형 시계열 데이터를 재구성해야 한다. 이러한 위상공간을 재구성하는 방법이 끌개 재구성(attractor reconstruction)이다. 여기서 끌개(attractor)란 서로 다른 상태에서 출발하여 같은 시간 변화를 나타내는 궤도에 수렴하는 점근적 궤도를 끌개라 하며 끌개 재구성이란 비선형 시계열 신호를 n 차원 위상공간으로 표현하는 것을 말한다. 끌개를 재구성하기 위해서는 무엇보다도 지연시간과 매립차원을 결정하는 것이 중요하다.

2.1 지연시간

데이터가 시간에 따라 1차원 값을 가질 경우, 즉 스칼라양일 경우, 이를 위상공간에 표현하는 방법이 time delay embedding method 이다. 이 이론은 Packard⁽⁴⁾에 의해 제안되었으며, Takens⁽⁵⁾가 수학적 기초를 정립하였다. 시스템의 상태 변수를 정확히 측정하는 것은 정확한 시스템 해석을 위한 기반이다. 그러나 일반적으로 어떤 시스템으로부터 필요한 모든 상태 변수를 측정하는 것은 불가능하다. 이때에 유용하게 사용될 수 있는 것이 바로 Takens의 정리이다.

하나의 시간에 종속되는 시계열 데이터 $x(t)$ 가 있다면 m 차원의 위상공간 내에 다음과 같은 좌표를 가지는 궤적(trajecory)을 만들 수 있다.

$$\tilde{x}_t = \{x_t, x_{t+\tau}, x_{t+2\tau}, x_{t+3\tau}, \dots, x_{t+(m-1)\tau}\} \quad (1)$$

여기서 τ 는 지연시간(time delay)이다. 이 정리로부터 시스템에서 하나의 상태 변수만을 측정해도 시스템의 끌개를 구성할 수 있고, 이로부터 필요한 정보를 끄집어낼 수 있다. 즉 재구성된 궤도가 끌개를 형성하면 m 차원 위상공간에서 변형된 끌개가 나타난다. 끌개를 정확히 표현하기 위해 위상공간의 차원은 끌개가 가지는 차원 이상이어야 한다. 위상공간의 차원이 가지는 의미는 계의 운동을 표현하는데 필요한 변수의 수이다.

위상공간 재구성에 있어서 적절한 지연시간의 결정은 매우 중요하다. 지연시간 τ 의 값은 원칙적으로 정해져 있지 않다. 그러나 유한한 양의 실험 데이터에 대해서 지연시간 τ 의 선택은 위상공간에 재구성된 궤적에 영향을 준다. 따라서 스칼라 시계열에서 m 차원 위상공간을 재구성하기 위해서는 시계열 데이터의 관계를 조사하여 상호 독립적인 좌표를 설정하여야 한다.

지연시간을 설정하는 방법으로는 자기상관 함수 값이 첫 번째로 최소가 되는 시간을 지연시간으로 설정하는 자기상관 함수(ACF) 방법과 Fraser⁽⁶⁾가 제안한 시계열 데이터의 상호 의존성을 고려하여 확률 분포에 의해 평균 상호정보량이 첫 번째로 최소가 되는 시간을 지연시간으로 설정하는

평균상호정보량(average mutual information, AMI) 방법, 그리고 데이터의 속성을 바탕으로 주관적이고 경험적으로 지연시간을 설정하는 GRE(geometry-based reconstruction expansion) 방법 등이 있다. 자기상관함수에 의해 결정된 지연시간은 데이터의 선형적인 의존성을 계산하기 때문에 비선형적인 데이터의 지연시간을 구하기에 적합하지 않고, 주관적이고 경험적인 GRE 법은 경험이 없이 쉽게 쓸 수 있는 방법이 아니다. 여기서 평균상호정보량에 의한 지연시간 결정은 두 개의 변수들의 일반적인 의존성을 측정하므로 비선형 데이터들의 지연시간을 결정하기에 적합하다. 본 연구에서는 위상공간을 재구성하기 위한 지연시간을 평균상호정보량(average mutual information, AMI) 방법을 사용하였다.

2.2 매립차원

매립차원은 저차원 공간으로 끌개를 투영시켰을 때, 끌개의 궤도가 겹쳐지지 않기 위해서 필요한 좌표계의 수이고 끌개가 겹쳐지지 않는 가장 저차원 정수이다. 같은 동역학적 계에서 측정된 두 개의 데이터 집합에서 반드시 같은 매립차원 d 을 갖는다고 할 수 없다. 이것은 각각의 시간지연에 의해 본래의 동역학적 변수와는 서로 다른 비선형 결합을 하기 때문이다. 또한 매립차원 $d=3$ 은 본래의 3차원을 나타내는 것이 아니다. 여기서 3차원은 본래 $\{x(t), y(t), z(t)\}$ 좌표의 비선형적으로 연관된 시간지연좌표 $\{x(n), x(n+\tau), x(n+2\tau)\}$ 를 나타낸다. 시계열 데이터로부터 어떻게 m 값, 즉 매립차원을 적절하게 선택할 것인가가 문제이다. 매립차원은 그 계를 이루는 동역학의 국소적 차원과는 다르다. 임의의 계로부터 측정된 측정값들의 동역학적 특성을 이해하기 위해서 그 동역학적 정보를 반영하는 끌개를 구성해야 하고, 그 끌개를 담고 있는 매립차원을 정확히 구할 필요가 있다. Takens의 매립이론에 의하면 매립차원을 m 이라 하고 매립공간 내에 만들어지는 끌개의 차원을 d_a 라 하면 충분조건으로 $m \geq 2d_a + 1$ 을 만족시켜야 한다.

매립차원을 설정하는 방법으로는 끌개 차원에 접근함에 따라 거짓 이웃의 수가 점점 줄어드는 성질을 이용하는 최근접 거짓이웃(false nearest neighbor, FNN) 방법과 매립차원을 변화시키면서 각 차원에 따른 비선형 예측오차를 계산하여 최소가 되는 차원을 매립차원으로 결정하는 비선형 예측오차(nonlinear prediction error, NPE) 방법이 있다.

본 연구에서는 매립차원을 결정하는 대표적인 방법인 Kennel⁽⁷⁾이 제안한 최근접 거짓이웃(false nearest neighbor, FNN) 방법을 적용하였다. 최근접 거짓이웃 방법은 데이터의 크기와 잡음에 민감하지 않아 최근 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. FNN이란, 임의의 매립차원에서는

두 끝개 위의 점이 근접이웃이지만 매립차원이 한 차원 증가될 경우에는 근접이웃이 되지 않는 점을 말한다. 이 방법은 끝개 차원 이하에서는 위상공간 궤적 상의 가장 가까운 이웃 점들의 대부분이 거짓 이웃이 되지만, 끝개 차원에 접 근함에 따라 거짓이웃의 수가 점점 줄어드는 성질을 이용한 것이다. FNN 비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 개수를 세어 이를 끝개의 전체 점의 수로 나눔으로써 계산된다. 본 연구에서는 차원을 증가시키면서 거짓이웃의 비율을 조사하여 FNN 비율이 첫 번째 0이 되는 차원을 시계열 데이터의 최소 매립차원으로 결정하였다.

3. 간극 실험

회전기계에서는 케이스와 같이 움직이지 않는 고정부와 회전자 등 운동하는 부분이 있고, 이 사이에 간극이 존재한다. 운전 중 회전부의 운동이 커지면 고정자와 접촉할 수 있다. 또한 베어링과 축 사이는 변형, 마모 등에 의해 헐거움이 발생할 수 있고 운전 중 축은 베어링과 접촉하게 된다. 본 연구에서는 저널 베어링의 간단한 형태인 부싱(bushing)과 축 사이의 간극에 의한 진동 특성을 연구하였다. 이를 위해 Fig. 1과 같은 Bently Nevada Co.의 RK-4 rotor kit을 이용하여 부싱과 축 사이의 간극에 의한 진동을 실험을 통하여 측정하였다. 부싱 지름을 0.1 mm 씩 증가시키면서 축과 부싱사이의 간극을 조절하였으며 건마찰과 윤활, 두 조건 하에서 가속도 신호를 각각 획득하였다. 축과 부싱사이의 마찰에 따른 진동 특성은 부싱 케이스인 하우징으로 전파된다. 따라서 하우징에 가속도계를 부착한 후, 위험속도 근처인 1580 rpm 상태에서 신호를 획득하였다. 이와 같이 측정된 신호는 A/D(NI 707E, National Instrument) 변환을 거쳐 컴퓨터에 저장한 후, 상용프로그램인 MATLAB을 이용하여 분석하였다.

건마찰 상태에서 실험으로부터 얻은 간극별 가속도 신호에 대한 주파수 특성을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 고유진동수인 158 Hz 성분이 크기의 차이는 있으나 간극크기에 따라 같은 주파수 성분을 가진다. Fig. 2(b)는 윤활상태에서 간극별

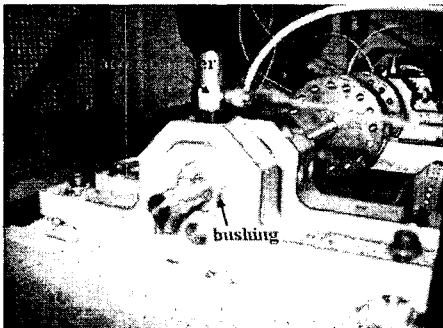


Fig. 1 Experimental apparatus, RK-4 Rotor Kit

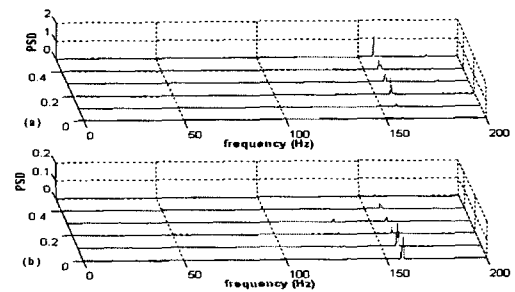


Fig. 2 Power spectrums of the signals of rotating machine with different clearance conditions; (a) dry-friction (b) lubrication

가속도 신호에 대한 주파수 특성이다. 회전성분 이외에 고유진동수인 158 Hz 성분이 나타나고 있다. 또한 0.2 mm, 0.3 mm 간극에서 고유진동수 이외에 다양한 성분이 나타나고 있다. 그러나 간극크기에 따라 일정한 규칙을 찾아보기 어렵다. 이와 같이 간극 크기별, 윤활 유무는 주파수 분석으로 한계가 있음을 알 수 있다.

4. 비선형 시계열 데이터

자연계는 불규칙하고 예측이 불가능한 것처럼 보이지만 내면에는 그 현상을 지배하는 질서가 숨어 있다. 이와 같이 어떤 질서를 가지나 복잡하고 불규칙해 보이는 자연현상을 카오스라고 한다. 카오스는 어떤 질서에 의해 움직이는 결정론적 특성을 가지면서도 자체의 비선형성 때문에 조그마한 변화에도 완전히 다른 거동을 일으킨다. 자연 현상에서 나타나는 불규칙하고 무질서한 시계열(time series) 자료를 분석하는 도구로서의 카오스 이론의 효용성은 암호해독, 기상예측 등 여러 분야에서 이용되고 있다.

카오스 역학은 초기 조건에 민감한 비선형 동역학계를 다루는 이론으로 위상공간상에서 프랙탈 차원(fractal dimension)의 이상한 끌개(strange attractor)를 가지는 계로 특징지어진다. 본 연구에서는 카오스 이론에서 시계열 자료를 분석하는 방법을 회전기계 진동 신호에 적용하여 신호의 카오스적인 성질을 분석하고 결함을 예측하는데 그 목적이 있다.

비선형 동역학 및 카오스 분석을 하기 위하여 시스템에서 획득된 데이터는 먼저 전처리 과정을 거쳐야 한다. 이후 해당 비선형 시계열 데이터로부터 지연시간(delay time)과 매립차원(embedding dimension)을 계산하여 m 차원 위상공간에 표시하고 이로부터 상관차원(correlation dimension)을 계산하게 된다.

4.1 데이터 전처리

데이터는 회전요소 이외에 많은 잡음을 가지고 있다. 본래

의 순수한 카오스 응답은 백색 잡음과 같이도 보인다. 카오스 궤도는 연속적이어야 하고, 또한 비주기적이기 때문에 신호를 비선형 방법으로 분석하기에는 적절하지 않다. 따라서 비선형 분석에 적합하도록 데이터를 LPF(Low Pass Filtering)를 통과 하도록 한다.

4.2 시계열 분석

비선형 카오스신호를 분석하는데 있어서 우선 데이터의 비선형성을 조사해야 한다. 즉 데이터의 nonstationary, non-Gaussian white noise, 측정 과정에서 비선형성의 개입 여부, 그리고 결정론적이지 않은 비선형성이 포함되었는지를 검토해야 한다. 회전기계 결합신호는 복잡한 상호작용에 의해 비선형 또는 카오스 동역학과 밀접한 관계를 맺고 있다. 본 연구에서는 지연시간을 이용하여 끌개를 2차원 평면에 사상시켜 정성적 방법인 리턴맵(return map)을 그렸으며 지연시간과 매립차원을 입력 파라미터로 이용하여 상관차원값을 구하였다. 리턴맵이란 연속적인 측정값들 사이의 관계를 나타내는 2차원 그래프로 비선형계에서 얻어지는 데이터를 분석하는 기본적인 방법이다. 다른 이름으로 scatter plot, first-return map, Poincare return map이라 부른다. 시간 t 에서의 데이터와 $t + \tau$ 에서의 데이터로 구성되는 임의의 쌍을 $(x_t, x_{t+\tau})$ 라고 하면, 이것을 하나의 좌표로 구성하여 2차원 평면에 하나의 점으로 표현할 수 있으며, τ 는 지연시간으로 정의된다. Fig. 3은 윤활 유무에 따른 리턴 맵을 나타낸다. 시계열의 시간적 연관성에 따라 τ 가 결정되며, 시계열 데이터가 결정론적인 성질을 가지고 있다면 시계열의 최대와 최소로 만들어지는 2차원 평면 안에서 어떤 구조를 가진다. 그러나 시계열 데이터가 완전히 무작위로 나타나면 시계열의 최대와 최소로 만들어지는 2차원 평면 안에 골고루 퍼진 모양을 나타낸다.

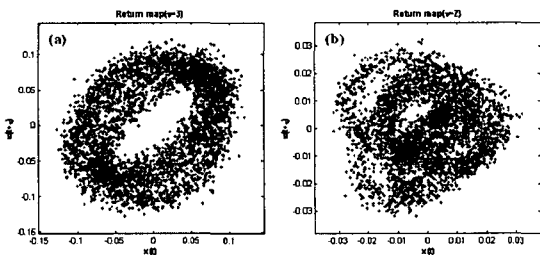


Fig. 3 Return maps for different operating conditions: (a) dry-friction (b) lubrication

5. 상관차원

5.1 상관차원 정의

상관차원은 위상공간 상에 있는 끌개의 프랙탈 차원으로

끌개의 기하학구조 및 국소적 분포를 정량화하는 양이다. 상관차원은 상태공간에 재구성된 계가 카오스 특성인 이상한 끌개를 가지는 경우 모든 점들이 끌개 안에 있기 때문에 공간적으로 상관성을 가지는 원리를 이용하여 시계열 자료의 카오스 특성을 판별하는 방법으로 Grassberger와 Procaccia⁽⁸⁾가 제안하였다.

일반적인 상태공간의 차원은 그 계의 미분방정식의 수와 관계있고, 반면 프랙탈 차원은 데이터 점들 또는 궤적들에 의해 점유되는 상태공간의 영역으로 정의된다. 따라서 상관차원이 큰 계일수록 복잡한 구조를 가지며, 상관차원은 원래 동역학계의 자유도 수의 근사값을 제공한다. 즉 상관차원은 상관적분을 이용한 프랙탈 차원의 근사값으로 동역학계의 특성을 정의할 수 있는가를 나타낸다.

5.2 상관차원 알고리즘

시계열 분석에 사용되는 상관차원은 카오스 끌개가 자기 유사적이고, 프랙탈 차원으로 표현될 수 있다는 아이디어에서 출발한다. 만약 시계열이 끌개상의 동역학적 계로부터 왔다면 매립에 의해 시계열로부터 만들어진 궤적은 본래 끌개와 같은 위상적인 성격을 가진다. 그러나 시계열이 무한히 길고 잡음이 없는 경우에 효과적으로 적용된다는 한계가 있다. 시계열의 데이터 수가 유한하고 잡음이 섞여 있는 경우에 대하여 Theiler⁽⁹⁾는 Grassberger와 Procaccia의 상관차원 알고리즘을 수정하였다. 본 연구에서는 재구성된 끌개로부터 상관차원을 구하기 위하여 Theiler의 상관적분 계산식을 이용하였다. 여기서 끌개 상의 임의의 2개의 벡터 거리 $|x_i - x_j|$ 가 r 이하가 되면 상관적분을 계산하게 되는데, 상관적분의 계산식은 식 (2)와 같다.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{2}{N^2} \sum_{i=1}^{N-k} \sum_{j=i+k}^N \Theta(r - |x_i - x_j|) \right] \quad (2)$$

이와 같이 끌개 상의 임의의 점을 중심으로 반지름 r 인 구를 만들어 그 구속에 포함되는 점의 개수를 표준화시킨 값을 상관적분이라고 한다. 여기서 N 은 데이터 수, k 는 차단 매개 변수, x_i, x_j 는 상태공간의 좌표, $\Theta(\cdot)$ 는 히비사이드 계단 함수(Heaviside step function)를 나타낸다. 또한 r 의 값이 작을 경우 식 (3)와 같은 지수법칙이 성립한다.

$$C(r) \propto r^{D_2} \quad (3)$$

상관적분은 추계학적(stochastic) 과정과 카오스적인 결정계를 구별하는 척도로 쓰인다. 추계학적 과정에서는 위상공간이 2차원이면 $C(r)$ 이 r^2 에 비례하고 3차원이면 r^3 에 비례한다. 그러나 카오스적인 결정계에서는 r^{D_2} 에서 D_2 가 위상

공간의 차원에 비례하지 않고 위상공간의 차원이 어느 이상이 되면 D_2 의 값이 더 이상 커지지 않는다. 차원 증가에 따른 D_2 값의 증가가 멈춰지는 차원보다 한 차원 높은 차원이 끝개를 찾을 수 있는 위상공간, 즉 매립의 최소 차원이 된다. 끝개 상의 특성이 결정되는 것으로부터 식(4)와 같은 $\log r$ 대 $\log C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 상관차원 D_2 로 나타낸다.

$$\log C(r) = \lim_{r \rightarrow 0} (D_2 \log r) \quad (4)$$

시계열 데이터 개수가 유한한 경우에 극한은 형성되지 않으며, 실제의 경우에는 $C(r)$ 와 r 에 대해서 log-log 그림을 그려 축척 관계를 보이는 영역에서의 직선의 기울기를 읽어 내어 구한다.

일반적으로 임의의 계의 매립차원 D_G 값이 정수가 아닌 소수차원 값을 가지면 계는 위상공간 끝개가 프랙탈 구조를 가지며, 동역학은 카오스 특성을 보인다. 어떤 시계열이 추계학적 특성을 가질 경우, 매립차원 m 이 증가하면 상관차원은 이에 비례하여 같이 증가하지만 카오스 특성을 가진다면 상관차원은 매립차원이 증가하여도 더 이상 비례하여 증가하지 않고 특정 차원에 수렴한다.

5.3 상관차원을 이용 고장진단

축과 부상사이 간극 및 윤활 유무에 따라 획득한 시계열 데이터를 분석에 사용하였다. 평균상호정보량을 이용한 시간 지연으로부터 m 을 2차원에서 10차원까지 1차원씩 증가시켜 거짓근접 이웃으로 구한 매립차원 근처에서의 상관차원 값을 산출하였다. 이때 상관차원 값인 기울기가 일정한 부분, 즉 국부적인 기울기 변화가 작은 부분을 값으로 선택하였다. 실제 이러한 방법을 이용하여 상관차원을 찾는 것에 대해, 기울기가 일정한 부분이 확연히 구분되는 무작위수 시계열과 카오스 시계열이 아니고서는 주관적이나 경험적인 면을 배제하기 힘들다. Fig. 4는 0.2 mm 간극 윤활상태에서 측정된 시계열 데이터를 평균상호정보량(AMI) 방법을 적용하여

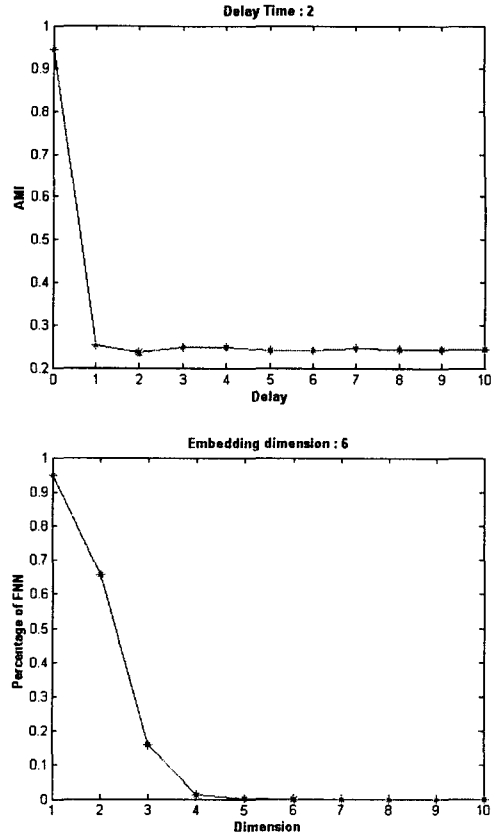


Fig. 4 Delay time and embedding dimension at 0.2mm clearance with lubrication condition

얻은 결과로써 지연시간은 2의 값을 갖는다. 또한 같은 시계열을 최근접 거짓이웃(FNN) 방법을 적용하여 매립차원을 결정하면 6의 값을 갖는다. 간극 및 윤활 유무에 따른 지연 시간과 매립차원을 정리하면 Table 1과 같다. 또한 간극 및 윤활 유무에 따른 상관차원 지수를 정리하면 Fig. 5와 같다. 간극이 증가할수록 상관차원 값이 작아지며 건마찰 상태와

Table 1. Delay time, embedding dimension scores

Clearance (mm)	dry-friction		lubrication	
	τ	m	τ	m
0.0	2	7	3	6
0.1	2	7	2	7
0.2	3	5	2	6
0.3	2	6	2	6
0.4	3	6	2	6
0.5	3	5	1	8

τ : delay time, m : embedding dimension

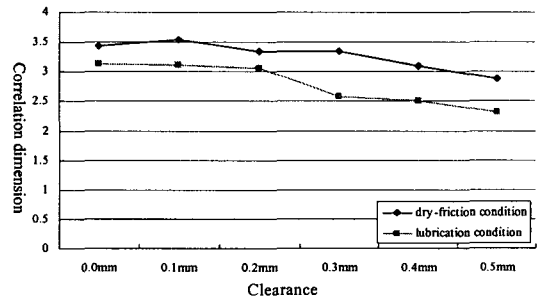


Fig. 5 The correlation dimension of different operating conditions

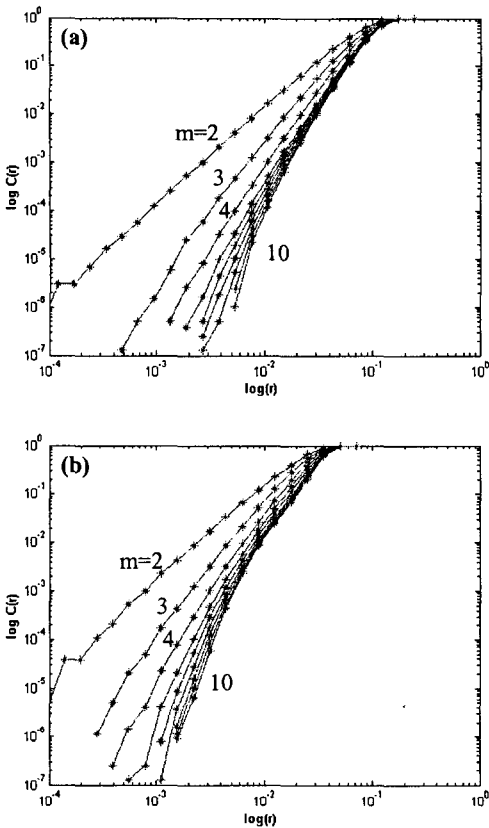


Fig. 6 Correlation integral of the signals for different operating conditions; (a) dry-friction (b) lubrication

비교해 상대적으로 작은 상관차원을 가짐을 알 수 있다. Fig. 6은 건마찰과 윤활 상태, 축과 부상사이의 간극 0.2 mm에서의 상관차원 분석 결과로써 매립차원이 증가하면서 상관차원은 FNN 방법으로 구한 최소 매립차원 $m = 5, 6$ 에 각각 수렴하고 있으며 이것은 시계열이 카오스 특성을 보이고 있음을 나타낸다.

6. 결론

본 연구에서는 지연시간과 매립차원을 이용하여 정량적 방법인 상관차원 값을 구하였다. 간극이 없는 상태에서 간극이 증가할수록 차원 값이 작아짐을 확인할 수 있었으며 건마찰 상태보다는 윤활상태가 상대적으로 작은 상관차원 값을 가짐을 확인하였다. 이러한 끌개의 특징을 이용함으로써 회전기계 결합신호에 대한 시간영역에서의 해석 어려움을 해결할 수 있으며, 결합 여부에 대한 상태를 정량적으로 평가하는 것이 가능하다. 이상에서의 고찰 결과로부터 비선형성을 나타내는 결합신호에 대한 시계열 데이터는 시스템의 고유한 성질에 지배되며, 이러한 거동은 끌개의 특성으로 나타나게

된다. 따라서 카오스이론을 이용한 시계열 자료의 분석은 시계열 자료를 분석하는 새로운 방법론과 새로운 관점을 제공할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 육성(R05-2003-000-11632-0) 지원으로 수행 하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Peng, Z. K., 2003, "Detecting of the Rubbing-caused Impacts for Rotor-Stator Fault Diagnosis using reassigned Scalogram," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 19, No. 2, pp. 391-409.
- (2) Wang, W. J. and Lin, R. M., 2003, "The Application of Pseudo-phase Portrait in Machine Condition Monitoring," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 259, No. 1, pp. 1-16.
- (3) Logan, D. and Mathew, J., 1996, "Using The Correlation Dimension for Vibration Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10, No. 3, pp. 241-250.
- (4) Parkard, N. H., Crutchfield, J. P., Parmer, J. D. and Shaw, R. S., 1980, "Geometry from a Time Series," *Physical Review Letters*, Vol. 45, No. 9, pp. 712-716.
- (5) Takens, F., 1981, "Detecting Strange Attractors in Turbulence," *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 898, pp. 336-381.
- (6) Fraser, A. M., Swinney, H. L., 1986, "Independent co-coordinates for Strange Attractors from Mutual Information," *Physical Review A33*, pp. 1134.
- (7) Kennel, M. B., 1992, "Determining Embedding Dimension for Phase-space Reconstruction using a Geometrical Construction," *Physical Review A*, Vol. 45, No. 6, pp. 3403-3411.
- (8) Grassberger, P., Procaccia, I., 1983, "Characterization of Strange Attractors," *Physical Review Letters*, Vol. 50, pp. 346-9.
- (9) Theiler, J., 1987, "Efficient Algorithm for Estimating the Correlation Dimension from a Set of Discrete Point," *Physical Review A*, Vol. 36, No. 9.