

상관차원을 이용한 회전기계의 간극 진단

Diagnosis on the Clearance of Rotating Machinery Using Correlation Dimension

박 상 문* · 최 연 선†

Sang-Moon Park and Yeon-Sun Choi

(2005년 1월 7일 접수 : 2005년 6월 14일 심사완료)

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

ABSTRACT

The correlation dimension can provide some intrinsic information of an underlying dynamic system by reconstructing measured nonlinear time series. The vibration signals measured from a rotor with different clearance sizes between shaft and bushing were analyzed using the correlation dimension. The results showed that the correlation dimension can identify the size of the clearance of a rotor and the lubricating condition, which can not be analyzed by frequency spectrum or wavelet. The magnitude of the correlation dimension became smaller as the clearance larger and as the lubrication condition better.

1. 서 론

기계시스템을 설치할 때 오류가 있거나 장기간 사용하게 되면 하중에 의한 변형, 마모 등에 의해 기계 부품 사이에는 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 것으로서 적정 간극 유지 및 보수는 결코 쉽지 않은 과제이다.

회전기계와 관련하여 기존의 고장진단 기법은 신

호 패턴 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 급수에 기초한 신호처리 기법에 많이 의존하고 있다. 그러나 최근 비선형 동역학 이론에 근거한 새로운 기법들이 발표되고 있다. Peng⁽¹⁾은 FFT 스펙트럼과 변형된 시간-주파수 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. 이 연구에서는 축과 부싱(bushing) 사이 간극에 의한 회전기계의 결함신호를 비선형 기법인 상관차원 해석을 이용하여 간극의 크기와 간극 내 윤활유의 존재 유무를 파악할 수 있음을 보였다.

† 책임저자 : 정희원, 성균관대학교 기계공학과
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr
Tel : (031)290-7440, Fax : (031)290-5849

* 정희원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

2. 간극 실험

회전기계에서는 케이스와 같이 움직이지 않는 고정부와 회전자 등 운동하는 부분이 있고, 이 사이에 간극이 존재하며 운전 중 회전부의 운동이 커지면 고정자와 접촉할 수 있다. 이 연구에서는 저널 베어링의 간단한 형태인 부싱(bushing)과 축 사이의 간극에 의한 진동 특성을 연구하였다. 이를 위해 Fig. 1의 RK-4 rotor kit 실험 장치를 이용하였다. 부싱지름을 0.5 mm 까지 0.1 mm씩 증가시키면서 축과 부싱사이의 간극을 조절하였으며 건마찰과 윤활 상태에서 Fig. 2와 같이 가속도 신호를 각각 획득하였다. 여기서 건마찰 상태란 기름 성분 제거용 스프레이와 마른 형질을 이용하여 윤활유를 제거한 상태를 의미한다.

가속도계는 부싱 케이스인 하우징에 부착하였으며 로터의 위험속도 근처인 1580 rpm을 운전조건으로 하였다. 이와 같이 측정된 신호는 A/D 변환을 거쳐

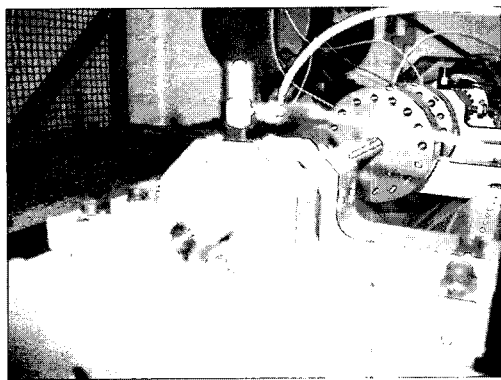


Fig. 1 Experimental apparatus, RK-4 rotor kit

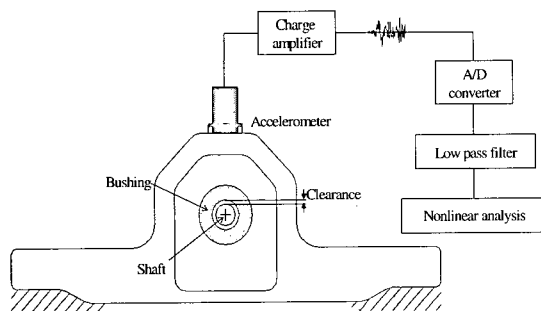
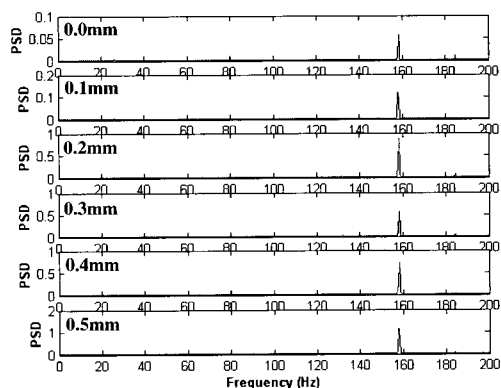


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up

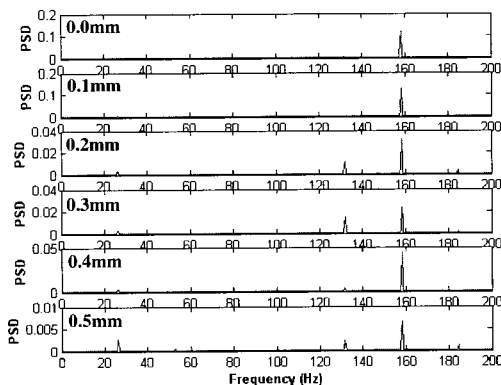
컴퓨터에 저장한 후, MATLAB을 이용하여 분석하였다.

건마찰 상태에서 실험으로부터 얻은 간극별 가속도 신호에 대한 주파수 특성을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 로터 지지부의 고유진동수인 158 Hz 성분이 크기의 차이는 있으나 간극의 크기가 달라도 같은 주파수 성분을 보이고 있다. Fig. 3(b)는 윤활상태에서의 간극 크기별 가속도 신호에 대한 주파수 특성이다. 회전 성분 이외에 158 Hz 성분이 나타나고 있으며 0.2 mm와 0.3 mm 간극에서 고유진동수 이외에 몇몇 주파수 성분이 나타나고 있다. 그러나 이러한 정도로는 간극의 크기 및 윤활상태를 구분하기에는 한계가 있다.

다우베치 3 웨이블릿(Daubechies 3 wavelet)을 이용하여 간극별 가속도 신호를 분석하면 Fig. 4와 같다. 건마찰 상태에서 간극이 증가할수록 회전주파수



(a) Dry-friction



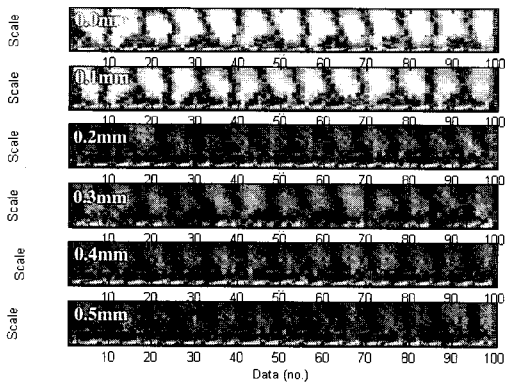
(b) Lubrication

Fig. 3 Power spectrums of the signals of rotating machine with different clearance conditions

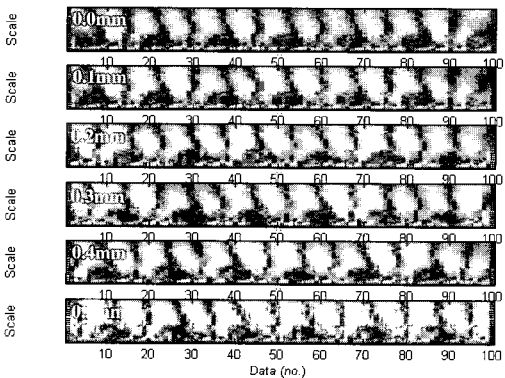
성분이 뚜렷해짐을 알 수 있다. 그러나 이 성분이 회전기계 불평형에 의한 성분인지 간극에 의한 성분인지는 판단하기 어렵다. 또한 윤활 여부도 건마찰 상태에 비해 명암의 차이는 보이나 확실하지가 않다. 여기에서 측정된 신호를 비선형 시계열(nonlinear time series)데이터로 취급하여 비선형 분석을 해 볼 필요가 있다.

3. 비선형 시계열 데이터

혼돈운동은 초기조건에 민감한 운동으로 위상공간 상에서 프랙탈 차원(fractal dimension)의 이상한 끌개(strange attractor)를 가진다. 이 연구에서는 간극이 있는 회전기계의 진동신호를 혼돈운동으로 보고 즉 비선형 시계열 데이터로 취급하여 분석해 보고자 한다.



(a) Dry-friction



(b) Lubrication

Fig. 4 Wavelet analysis for the signals with different clearance conditions

혼돈운동에 의한 카오스 신호는 일견 백색 잡음과 같이 보인다. 그러나 내재적 규칙성을 가지고 있는 운동으로 잡음과는 구분되어야 한다. 따라서 비선형 시계열 분석을 하기 전에 신호로부터 잡음을 추출하기 위해 저역통과필터(low pass filter)를 통과하도록 한다. 이 연구에서는 로터 지지부의 고유진동수 158 Hz 보다 큰 회전 성분의 6배수인 185 Hz 이상을 잡음으로 보고 필터링을 하였다.

카오스 신호를 분석하기 위해서는 우선 데이터의 비선형성을 조사해야 한다. 이 연구에서는 회전기계의 가속도 신호를 2차원 평면에 사상시킨 리턴맵(return map)을 Fig.5와 같이 그려 보았다. 리턴맵은 시간 t 에서의 데이터와 $t + \tau$ 에서의 데이터로 구

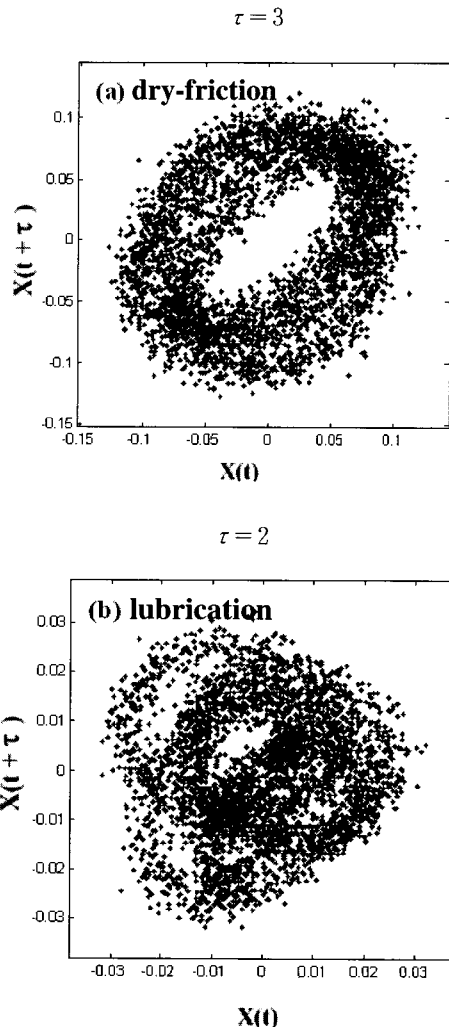


Fig. 5 Return maps for different operating conditions

성되는 임의의 쌍 $(x_i, x_{i+\tau})$ 을 2차원 평면에 하나의 점으로 표현한 도표이다. τ 는 두 데이터 사이의 지연시간이다. τ 에 따라 리턴맵의 형상이 달라질 수 있으나 Fig. 5는 윤활 유무에 따라 다른 형상을 보이고 있다.

4. 끌개 재구성

비선형 시계열 해석은 그 신호가 가지고 있는 결정론적 규칙성을 찾아내는 것으로서 리턴맵과 같이 비선형 시계열 데이터를 재구성해야 한다. 1차원 비선형 시계열 신호를 시간지연좌표(time-delay coordinate)를 이용하여 위상공간에 적절히 재구성하는 과정을 끌개 재구성이라 한다. 이 이론은 Packard⁽⁴⁾에 의해 제안 되었으며, Takens⁽⁵⁾가 수학적 기초를 정립하였다.

비선형 시계열 신호 $(x(j), j=1, \dots)$ 를 m 의 차수와 τ 의 지연시간으로 재구성할 때 재구성된 벡터 $\vec{X}(i)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1^T \\ X_2^T \\ \vdots \\ X_i^T \\ \vdots \\ X_{j+1}^T \\ \vdots \\ X_{N-1}^T \\ X_N^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ x_i & x_{i+\tau} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{i+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdot & \cdot & \cdot & \vdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 m 은 매립차원(embedding dimension)을, τ 는 지연시간(delay time)을 나타낸다. 위와 같이 재구성된 벡터는 m 차원 공간에서 한 점을 형성하고, i 를 변화시키면 궤도(trajjectory)를 나타낼 수 있고 원래의 고차원 역학계의 궤도를 매끄럽게 변형(diffomorphism)한 것이 된다. 즉 재구성된 궤도가 끌개를 형성하면 변형된 끌개가 나타난다. 끌개를 재구성하기 위해서는 무엇보다도 지연시간과 매립차원을 결정하는 것이 중요하다.

4.1 지연시간

끌개 재구성 시 지연시간 τ 에 따라 재구성된 궤적이 달라진다. 일반적으로 지연시간을 너무 작게 설정하면 위상공간에 재구성된 m 차원 상태 벡터(state vector)들의 상호관련성이 커져서 끌개가 대각선 방향으로 분포하고, 반대로 지연시간을 너무 크게 설정하면 위상공간 상태벡터들의 관련성이 없어져 끌개가 전체 위상공간에 퍼지게 된다.

지연시간을 결정하는 방법으로는 자기상관함수가 첫 번째로 최소가 되는 시간을 지연시간으로 설정하는 자기상관 함수(ACF) 방법과 Fraser⁽⁶⁾가 제안한 시계열 데이터의 상호 의존성을 고려하여 확률 분포에 의해 지연시간을 설정하는 평균상호정보량(average mutual information, AMI) 방법, 그리고 데이터의 속성을 바탕으로 주관적이고 경험적으로 지연시간을 설정하는 GRE(geometry-based reconstruction expansion) 방법 등이 있다. 평균상호정보량에 의한 지연시간 결정은 두 개의 변수들의 일반적인 의존성을 측정하므로 비선형 데이터들의 지연시간을 결정하기에 적합하다. 평균상호정보량은 Fig. 6에서 x 축 상의 i 번째 구간에 있던 점들이 시간 τ 후에 y 축 전체 구간에 가장 고르게 퍼지게 하는 τ 값을 지연시간으로 결정하는 방법이다. 여기서 $P(i)$ 는 전체 히스토그램(histogram)의 i 번째 열에 시계열의 한 점이 있을 확률이다. 이 연구에서는 위상공간을 재구성하기 위한 지연시간을 평균상호정보량이 첫 번째로 최소가 되는 시간으로 결정하는 평균상호정보량(average mutual information, AMI) 방법을 사용하였다.

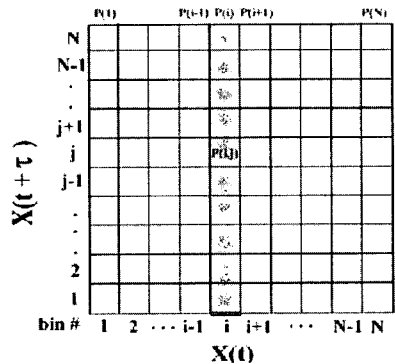


Fig. 6 Algorithm of average mutual information

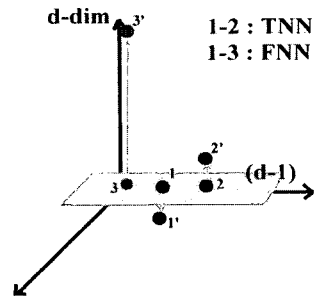


Fig. 7 Algorithm of false nearest neighbor

4.2 매립차원

측정된 시계열 데이터로부터 재구성되는 m 차원 위상공간을 만들 수 있다. 시계열 데이터로부터 어떻게 m 의 값 즉, 매립차원을 적절하게 선택할 것인가가 문제이다. 만약 매립차원을 적절한 매립차원보다 작게 선택하였다면, 이로부터 만들어지는 궤도들은 많은 중첩들이 나타날 것이며, 따라서 궤도들이 서로 교차하게 될 것이다.

매립차원을 결정하는 방법으로는 Kennel⁽⁷⁾이 제안한 끌개 차원에 접근함에 따라 거짓 이웃의 수가 점점 줄어드는 성질을 이용하는 최근접 거짓이웃(false nearest neighbor, FNN) 방법이 있다. 즉 Fig. 7에서 점 1과 2는 $d-1$ 차원에서 가장 가까운 이웃이고, 차원을 한 차원 올린 d 차원에서도 여전히 가까운 참 이웃(true nearest neighbor)이다. 반면, 점 1과 3은 $d-1$ 차원에서 가장 가까운 이웃이지만 차원을 하나 올린 d 차원에서는 기준거리보다 많이 떨어져 거짓 이웃이 된다. FNN 비는 주어진 각 데이터에서 FNN의 개수를 세어 이를 끌개의 전체 점의 수로 나눈 것으로서 계산된다. 매립차원은 위상공간의 차원을 증가시키면서 거짓이웃의 비율을 조사하여 FNN 비율이 첫 번째 0이 되는 차원을 시계열 데이터의 최소 매립차원으로 결정하는 방법이다.

5. 상관차원

5.1 상관차원 정의

상관차원은 위상공간 상에 있는 끌개의 기하학적 구조를 정량화하는 양이다. 상관차원은 상태공간에 재구성된 비선형계가 혼돈운동의 특성인 이상한 끌개(strange attractor)를 가지는 경우 모든 점들이 끌개 안에 있기 때문에 공간적으로 상관성을 가지는 원리를 이용하여 비선형 시계열 신호의 카오스 특성을 판별하는 방법으로 Grassberger와 Procaccia⁽⁸⁾가 제안하였다.

상관차원이 큰 계일수록 복잡한 구조를 가지며 상관차원은 원래 동역학적 계의 자유도(degree of freedom) 수의 근사값을 제공한다.

5.2 상관차원 알고리즘

상관차원은 카오스 끌개가 자기 유사적이고, 프랙탈 차원으로 표현될 수 있다는 아이디어에서 출발하

였다. 1차원 비선형 시계열 신호가 어떤 n 차원의 비선형 동역학 계에서 측정된 신호라면 매립에 의해 만들어진 궤적도 본래 n 차원의 비선형 동역학과 같은 위상적 성격을 가진다고 가정한다. 시계열의 데이터 수가 유한하고 잡음이 섞여 있는 경우에 대하여 Theiler⁽⁹⁾는 Grassberger와 Procaccia의 상관차원 알고리즘을 수정하여 다음과 같은 계산식을 제안하였다. 즉 τ 지연시간과 m 매립차원으로 재구성된 끌개의 2개 벡터 거리 $|x_i - x_j|$ 가 r 이하가 몇 개인가를 세는 식 (2)의 상관적분을 계산한다.

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

이와 같이 끌개 상의 임의의 점을 중심으로 반지름 r 인 구(sphere)를 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 각각 나타낸다. 또한 r 의 값이 작을 경우 식 (3)와 같은 지수법칙이 성립한다.

$$C(r) \propto r^D \quad (3)$$

상관적분은 대상 신호가 추계학적(stochastic) 과정의 결과인지 아니면 카오스적인 동역학적 신호인지를 구별하는 척도로도 쓰인다. 추계학적 과정에서는 위상공간이 2차원이면 $C(r)$ 이 r^2 에 비례하고 3차원이면 r^3 에 비례한다. 그러나 카오스적인 결정계에서는 r^D 에서 D 가 위상공간의 차원에 비례하지 않고 위상공간의 차원이 어느 이상이 되면 D 는 더 이상 커지지 않는다. 차원 증가에 따른 D 값의 증가가 멈춰지는 차원보다 한 차원 높은 차원이 끌개를 찾을 수 있는 위상공간, 즉 매립의 최소 차원이 된다. 끌개 상의 특성이 결정되는 것으로부터 식 (4)와 같은 $\log r$ 대 $\log C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선을 구하여 상관차원 D 로 나타낸다.

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

시계열 데이터 개수가 유한한 경우에 극한은 형성되지 않으며, 실제의 경우에는 $C(r)$ 와 r 에 대해서 $\log\text{-}\log$ 도표를 그려 축척 관계를 보이는 영역에서의

직선의 기울기를 읽어내어 구한다. 일반적으로 임의의 계의 매립차원이 정수가 아닌 소수 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.

6. 상관차원을 이용한 고장진단

축과 부상 사이의 간극 및 윤활 유무에 따라 획득한 시계열 데이터를 끌개 재구성과 상관차원 분석에 사용하였다. 평균상호정보량을 이용한 지연시간을 계산하고 m 을 2차원에서 10차원까지 1차원씩 증가시켜 최근접 거짓 이웃법으로 매립차원을 구하고 재구성된 위상공간 상에서 상관차원 값을 산출하였다. 이때 상관차원 값인 기울기가 일정한 부분, 즉 국부적인 기울기 변화가 작은 부분을 택하였다.

Fig. 8는 0.2 mm 간극과 윤활상태에서 측정한 시계

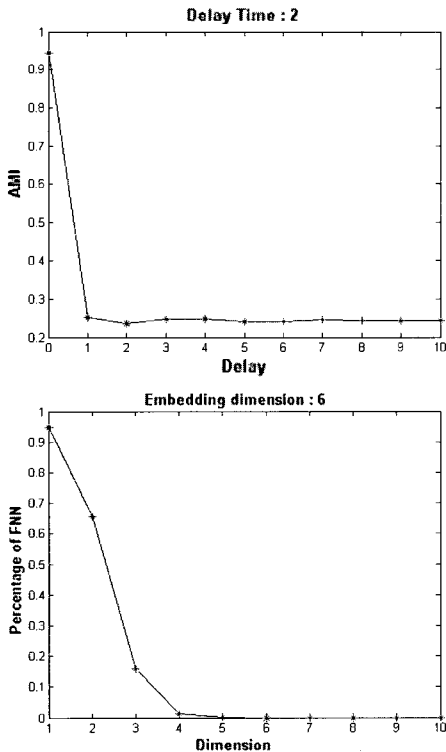


Fig. 8 Delay time and embedding dimension for 0.2 mm clearance with lubrication condition

열 데이터를 평균상호정보량(AMI) 방법을 적용하여 얻은 결과로써 지연시간은 2의 값을 갖는다. 또한 같은 시계열을 최근접 거짓 이웃(FNN) 방법을 적용하여 매립차원을 결정하면 6의 값을 갖는다. 같은 방법으로 간극 및 윤활 유무에 따른 지연시간과 매립차원을 정리하면 Table 1과 같다. Fig. 9은 윤활 상태에서 축과 부상사이의 간극 0.2 mm에서의 상관차원 분석 결과로써 매립차원이 증가하면서 상관차원은 최근접

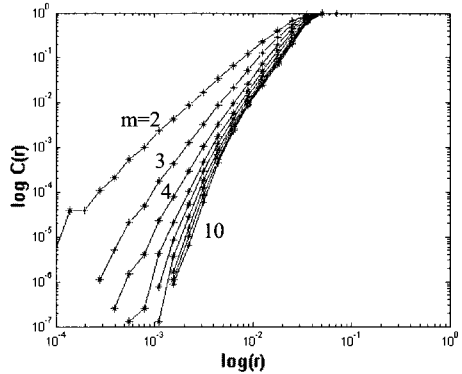


Fig. 9 Correlation integral of the signals for lubrication condition

Table 1 Delay time and embedding dimensions

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

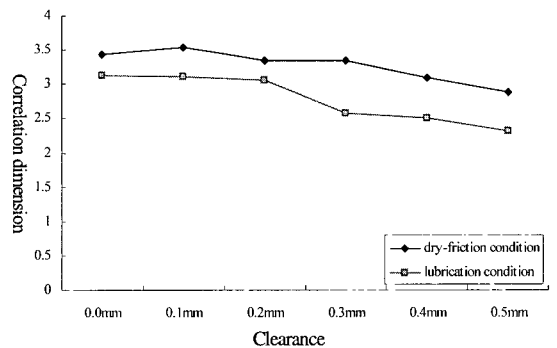


Fig. 10 Correlation dimensions for different operating conditions

거짓 이웃(FNN) 방법으로 구한 최소 매립차원 6에 수렴하고 있으며, 이것은 시계열이 카오스 특성을 보이고 있음을 의미한다. 같은 방법으로 간극 및 윤활 유무에 따른 상관차원을 계산하면 Fig. 10과 같다. 분석 결과 간극이 증가할수록 상관차원이 작아지며 건마찰 상태와 비교해 상대적으로 작은 상관차원을 가짐을 알 수 있다. 간극이 증가하면 상관차원이 작아지는 것은 간극 증가로 인하여 회전축이 부싱의 내부 표면을 따라 더욱 안정적인 궤도를 가짐을 의미하며 같은 조건, 윤활 상태에서 상대적으로 작은 상관차원을 가지는 것은 축과 부싱사이의 윤활로 인하여 부품상호간의 마찰에 따른 충격 효과가 감소되었음을 의미한다.

7. 결 론

이 연구에서는 회전기계에서 축과 부싱 사이에 간극이 있는 경우 건마찰과 윤활 상태에서 진동신호를 측정하여 간극의 크기와 윤활유의 존재 여부를 진단하고자 하였다. 이를 위해 주파수 분석 및 웨이블릿 분석을 시도하였으나 간극의 크기와 윤활 여부는 판정할 수 없었다. 이에 측정된 신호를 비선형 시계열 신호로 보고 상관차원 분석을 시도하였다. 이를 위해 먼저 측정된 비선형 시계열 신호에 평균상호정보량법을 이용하여 지연시간을 계산하고 최근접 거짓이웃법을 이용하여 매립차원을 계산하여 끌개를 재구성하였다. 다음 재구성된 위상공간상에서 상관차원을 구하였다.

상관차원 분석 결과 간극이 증가할수록 상관차원이 작아짐을 확인할 수 있었으며, 건마찰 상태보다는 윤활상태가 상대적으로 작은 상관차원 값을 가짐을 확인하였다. 이는 간극이 증가함에 따라 회전축이 부싱의 내부 표면을 따라 안정적인 궤도를 가짐을 의미하며, 윤활 상태는 부품상호간의 마찰과 충격이 감소되었음을 의미한다.

후 기

이 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-ordinates for Strange Attractors from Mutual Information," *Physical Review A*, Vol. 33, 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. 346~349.
- (9) Theiler, J., 1987, "Efficient Algorithm for Estimating the Correlation Dimension from a Set of Discrete Point," *Physical Review A*, Vol. 36, No. 9.