

상관차원에 의한 볼베어링 고장진단

Fault Diagnosis of Ball Bearing using Correlation Dimension

김진수* · 최연선†

Jin Soo Kim and Yeon Sun Choi

Key Words : Correlation Dimension(상관차원), Delay Time(지연시간), Pseudo-Phase Space(의사위상공간), Embedding Dimension(매립차원), Average Mutual Information(평균상호정보량), False Nearest Neighbor(거짓 최근접 이웃), Nonlinear Characteristics(비선형 특성)

ABSTRACT

The ball bearing having faults generally shows, nonlinear vibration characteristics. For the effective method of fault diagnosis on ball bearing, non-linear diagnostic methods can be used. In this paper, the correlation dimension analysis based on nonlinear timeseries was applied to diagnose the faults of ball bearing. The correlation dimension analysis shows some intrinsic information of underlying dynamical systems, and clear the classification of the fault of ball bearing.

1. 서 론

베어링은 축을 지지하거나 마찰이 발생하는 부분에서 회전이나 미끄럼이 원활하게 이루어지도록 하는 기계요소로서 기계 산업 모든 분야에 걸쳐 널리 활용되고 있다. 베어링에 이상이 발생할 경우 예상치 못한 과도한 진동, 소음이 발생할 수 있으므로 베어링의 상태를 점검하고 정상적인 형태를 유지시켜 주는 것은 기계의 안전 운전을 위해 매우 중요한 일이다.

베어링에 의한 결함은 기계계에 진동과 소음을 발생시키며, 또한 기계요소의 결함에 의한 진동과 소음은 베어링을 통해서 케이스로 전파된다. 베어링에 결함이 생기면 결함부위에 따라 특정 주파수의 진동이 발생하며, 복잡한 비선형 진동 특성이 관찰된다.

현재 주로 사용되고 있는 회전기계에 대한 상태 감시 시스템 및 고장진단은 선형 이론에 기초한 신호처리 기법에 상당히 의존하고 있다. 그러나 보다 효과적인 고장진단을 위해서 비선형 진단 기법을 사용해 볼 수 있다.

Jiang⁽¹⁾는 비선형 신호처리 기법의 하나인 상관차원(correlation dimension)을 적용하여 기어박스의 고장진단에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Logan⁽²⁾은 결함이 있는 베어링에서 발생한 진동신호를 분석, 상관차원을 이용하여 베

어링의 고장진단이 가능함을 제시하였다. Wang 등⁽³⁾은 상관차원을 이용하여 대형 회전기계에서의 고장진단을 수행하였다.

이를 위해 본 연구에서는 정상 베어링과 결함을 가진 베어링을 각각 준비하고 각 부품을 장착한 후 정상 구동상태에서의 진동신호를 측정하였다. 이렇게 얻어진 진동신호를 비선형 기법인 상관차원 해석을 통한 베어링의 고장진단을 시도하였다.

2. 베어링 고장진단 실험

베어링 고장진단 실험을 위해 Spectra사에서 제작한 Fig. 1의 회전체 고장진단 시뮬레이터(fault simulator)를 사용하였다. 베어링의 결함을 구현하기 위하여 외륜과 내륜에 결함을 가한 베어링을 각각 하나씩 준비하고, 정상 베어링을 장착하고 측정된 가속도 신호와 결함에 의한 베어링의 가속도 신호를 각각 측정하였다. 베어링 결함에 의한 진동은 베어링을 통해서 케이스로 전파된다. 따라서 베어링의 결함을 진단하기 위한 일반적인 방법인 베어링 케이스 위에 가속도계(B&K 4371)를 부착한 후, 3000 rpm의 정상 구동상태에서 가속도신호를 측정하였다. 측정된 가속도신호는 FFT Analyzer(ONOSOKKI CF-350/930)를 사용하여 직접 분석하거나, A/D Board(NI Labview 6.1)에 신호를 저장한 후, 상용 프로그램인 MATLAB⁽⁴⁾을 이용하여 분석하였다.

실험에 사용된 베어링의 설계인자를 Table 1에 나타내었으며, 이로부터 계산된 베어링의 내륜·외륜 결함 특성 주

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

파수는 Table 2에 나타내었다.

계산된 결함 특성 주파수와 주파수 스펙트럼에 나타난 주파수 성분이 일치할 때, 결함이 있는 것으로 판정하였다. 실험으로부터 획득한 정상 베어링, 외륜 결함 베어링, 내륜 결함 베어링의 가속도 신호의 주파수 스펙트럼을 Fig. 3에 나타내었다.

주파수 분석을 해보면 외륜 결함이 있는 베어링의 경우에 모터의 회전주파수 50 Hz, 외륜 결함 특성 주파수 152.6 Hz와 배수에 해당되는 2차, 3차 고조파 성분들이 나타남을 알 수 있으며, 주파수 스펙트럼 상에 결함 특성 주파수 성분들이 나타난다. 반면에 내륜 결함을 가진 베어링의 경우에는 내륜 결함 특성 주파수인 247.4 Hz가 분명히 나타나지 않았다. 왜냐하면 내륜 결함에 의해 발생한 진동은 외륜 결함과 달리 결함에 기인한 충격이 베어링 케이스로 직접 전달되지 않고 케이스의 외부 표면으로 전달될 때, 보다 많은 전달 부분들이 있기 때문이다. 그리고 모터의 회전주파수 성분의 배수 성분들이 베어링의 결함 특성 주파수와 같을 때는 주파수 스펙트럼에서 회전 주파수의 배수 성분들인지 아니면 베어링 결함 발생 주파수 성분들인가에 대한 정확한 판단을 할 수 없다. 따라서 베어링 결함의 위치를 정확히 판단하는데 이전에 주로 이용되어온 주파수 영역에서 분석에는 한계가 있음을 알 수 있다.

3. 비선형 시계열 해석

3.1 의사위상공간

자연계에 존재하는 임의의 동역학계는 하나의 블랙박스

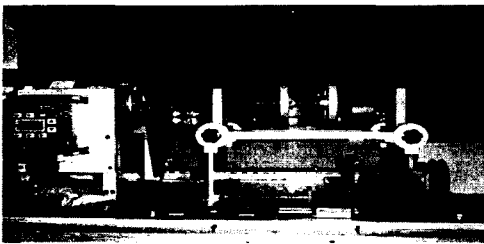


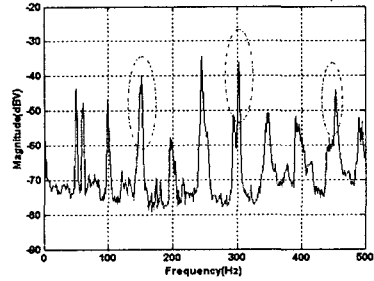
Fig. 1 Photo of Machinery Fault Simulator

Table 1. Design parameters of the Bearings

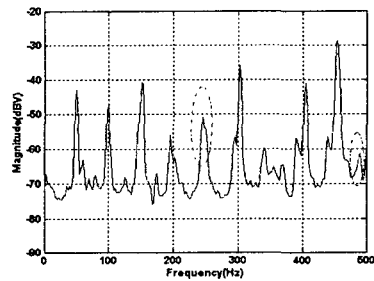
position	Pitch diameter (mm)	Number of Ball	Ball diameter (mm)
drive side	33.5	8	7.9
non-drive side	33.5	8	7.9

Table 2. Characteristic defect frequencies

	Characteristic defect frequencies
BPFO (Ball Pass Frequency of the Outer race)	152.6 Hz
BPMI (Ball Pass Frequency of the Inner race)	247.4 Hz



(a) Outer-race damaged bearing



(b) Inner-race damaged bearing

Fig. 3 Vibration spectrum

와 같은 존재다. 그 계에서 나오는 신호를 시간에 따라 측정된 데이터는 그 계의 동역학적 정보를 가지고 있다. 그 계의 상태를 알아보기 위해 얻어진 1차원 계열 데이터를 m 차원의 의사위상공간(pseudo-phase space)으로 재구성하면, 동역학적 특성을 보다 확실하게 규명할 수 있다. 의사위상공간을 재구성하는 방법으로 시간지연좌표를 이용하게 되며 이는 Takens⁽⁵⁾ 정리에 의해 수학적으로 증명되었다. 즉, 가속도 센서로부터 획득한 스칼라 신호를 m 의 차수와 τ 의 지연시간으로 재구성할 때 재구성된 벡터 $\vec{X}(i)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

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

여기서 m 은 매립차원(embedding dimension)을 τ 는 지연 시간(delay time)을 나타낸다. 위와 같이 재구성된 벡터는 m 차원 공간에서 한 점을 형성하고, i 를 변화시키면 재구성된 궤적이 나타난다.

3.2 시간지연 결정

1차원 시계열데이터로부터 의사위상공간을 구성할 때 지연시간을 결정하는 것은 위상공간상에서 재구성된 궤적에 영향을 준다.

최근까지 지연시간을 결정하는 방법으로 자기상관함수 (autocorrelation function)가 첫 번째로 최소가 되는 시간을 지연시간으로 결정하는 방법과 Fraser⁽⁶⁾가 제안한 평균상호정보량(average mutual information, AMI)이 첫 번째 최소가 되는 시간을 지연시간으로 결정하는 방법이 있다. 자기

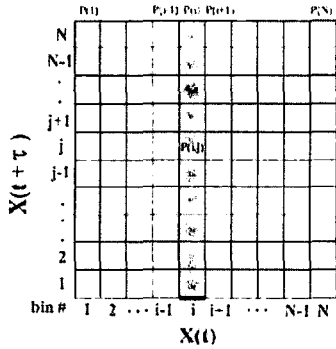


Fig. 4 The algorithm of the AMI

상관함수에 의해 결정된 지연시간은 데이터의 상호 선형적인 의존성을 계산하기 때문에 비선형적인 데이터의 지연시간을 구하기에 적합하지 않는 반면, 평균상호정보량에 의한 지연시간은 두 개의 변수들의 일반적인 의존성을 계산하므로 비선형 데이터의 지연시간을 결정하기에 적합한 방법이다.

본 연구에서는 의사위상공간을 구성하기 위한 지연시간을 평균상호정보량이 첫 번째로 최소가 되는 시간으로 결정하였다. 평균상호정보량은 Fig. 4에서 x 축 상의 i 번째 구간에 있던 점들이 시간 τ 후에 y 축 전체 구간에 가장 고르게 퍼지게 하는 τ 값을 지연시간으로 결정하는 방법이다. Fig. 4에서 $P(i)$ 는 전체 히스토그램(histogram)에서 i 번째 시계열상의 한 데이터가 있을 확률이다.

3.3 매립차원 결정

측정된 시계열 신호로부터 m 차원 의사위상공간을 만들기 위해서는 m 의 값 즉, 매립차원(embedding dimension)을

결정하는 것은 어려운 문제이다. 만약 매립차원을 적절한 매립차원보다 작게 선택하였다면, 이로부터 만들어지는 궤적은 서로 교차하여 많은 중첩들이 나타날 것이다.

본 연구에서는 매립차원의 결정을 위하여 Kennel⁽⁷⁾이 제안한 데이터의 크기와 잡음에 민감하지 않아 최근 가장 많이 사용되고 있는 거짓 최근접 이웃방법(false nearest neighbor, FNN)을 사용하였다. 최근접 거짓 이웃이란, Fig. 5와 같이 임의의 매립차원에서는 두 점이 근접점이지만 매립차원이 한 차원 감소하거나 증가될 경우에는 근접점이 되지 않는 점을 말한다. 이 방법은 매립 차원 이하에서는 의사위상공간 상에서는 가장 가까운 이웃 점들의 대부분이 거짓 이웃이 되지만, 매립 차원에 접근함에 따라 거짓 이웃의 수가 점점 줄어드는 성질을 이용한 것이다. 최근접 거짓 이웃 비는 주어진 각 데이터에서 최근접 거짓 이웃의 개수를 세어 이를 전체 점의 수로 나눔으로서 계산된다.

매립차원을 증가시키면서 거짓 이웃의 비율을 조사하여 최근접 거짓 이웃 비율이 첫 번째 0이 되는 차원을 해당 시계열 데이터의 최소 매립차원으로 결정한다. 정상 베어링과 내·외륜 결합 베어링에서 측정된 1차원 가속도 시계열의 데이터로부터 평균상호정보량과 최근접 거짓 이웃 비율을 계산한 결과를 Fig. 6과 Table 3에 정리하였다.

3.4 상관차원

상관차원(correlation dimension)은 의사위상공간 상에 있는 점의 프랙탈 차원(fractal dimension)으로 비선형 시계열 데이터에 대한 기하학적 구조 및 국소적 분포를 정량화 하는 양이다. 따라서 상관차원이 클수록 복잡한 구조를 가진다. 상관차원은 상관적분을 이용한 프랙탈 차원의 근사 값으로서 동역학계의 특성을 정의한다.⁽³⁾

상관차원의 계산방법은 여러 가지가 제안되고 있다. 본 연구에서는 재구성된 데이터로부터 상관차원을 구하기 위하여 J. Theiler⁽⁸⁾의 상관적분 계산식을 이용하였다. 상관차원을 구하는 수학적 알고리즘은 다음과 같다. 시계열의 데이터로부터 n 차원의 벡터 \vec{X}_i 를 구성한다.

$$\vec{X}_i = \{X(t_i), X(t_{i+1}), \dots, X(t_{i+(n-1)})\} \quad (2)$$

여기서 의사위상공간 상의 임의의 2개의 벡터 거리 $|\vec{X}_i - \vec{X}_j|$ 가 r 이하가 되면 상관적분은 다음과 같이 계산한다.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{2}{N^2} \sum_{i=1}^{N-k} \sum_{j=i+k}^N H(r - |\vec{x}_i - \vec{x}_j|) \right] \quad (3)$$

여기서 N 은 데이터 수, r 은 반지름, k 는 차단 매개변수 (cut-off parameter), H 는 히비사이드 계단 함수(Heaviside step function)로서 다음과 같이 계산된다.

$$r \geq |\overline{X}_i - \overline{X}_j| = 1, \quad r \leq |\overline{X}_i - \overline{X}_j| = 0 \quad (4)$$

이 방법은 끌개 상의 각 점에서 상관 적분을 계산함으로써 상관차원을 결정하게 된다. 의사위상공간 상의 한 점을 중심으로 반지름이 r 인 구(sphere)를 그리고 구 내부 점의 수를 구하는 과정을 각 점에서 대하여 반복하여 구한 값들에 대하여 평균을 한다. 상관차원 값은 식 (5)와 같은 $\log r$ 대 $\log_2 C(r)$ 을 변수로 하는 직선 회귀선(linear regression)으로부터 구한다.

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (5)$$

실제의 경우에는 $C(r)$ 와 r 에 대해서 로그-로그 도표를 그려 적당한 축척 관계를 보이는 영역에서의 직선의 기울기를 읽어내어 구한다.

4. 결론 및 고찰

회전자가 균형잡이(balancing)된 상태에서 정상 베어링과 베어링의 결함 부위 별로 획득한 가속도 시계열 신호로부터 평균상호정보량(AMI)과 거짓 최근접 이웃방법(FNN)으

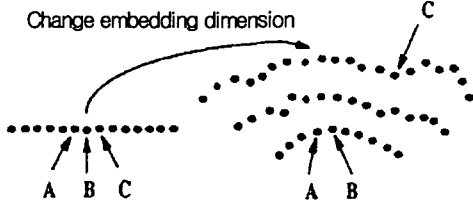


Fig. 5 The concept of the false nearest neighbor

Table 3. Results of delay time and embedding dimension

	Delay time	Embedding dimension
Normal	3	10
Outer-race fault	3	8
Inner-race fault	2	8

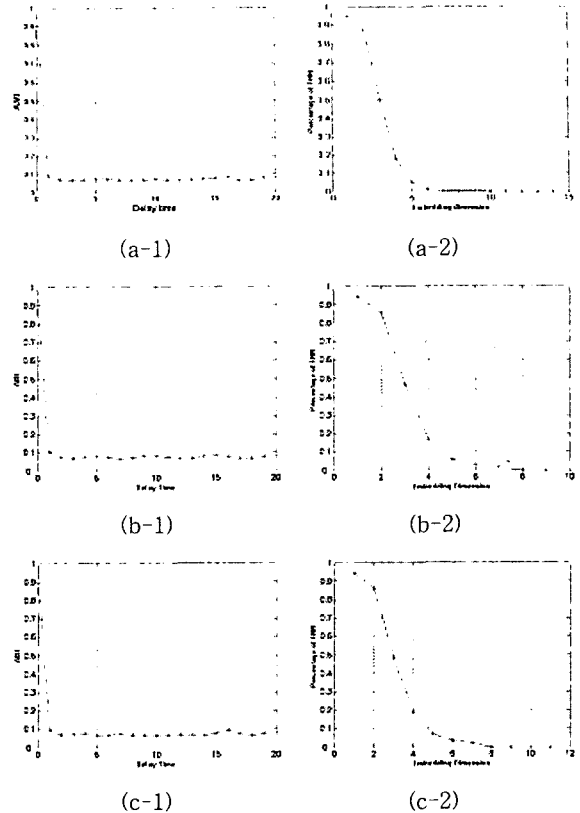
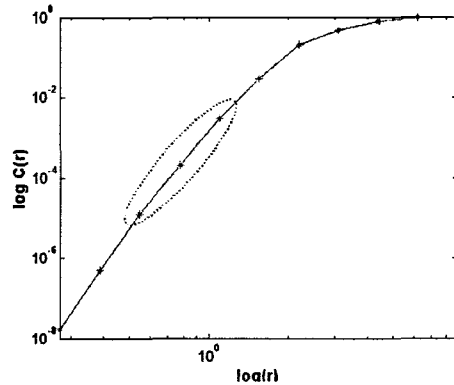


Fig. 6 Determination of delay time and embedding dimension,

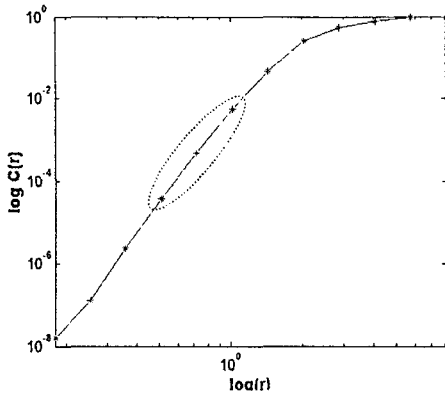
a : Normal, b : Outer-race fault,

c : Inner-race fault

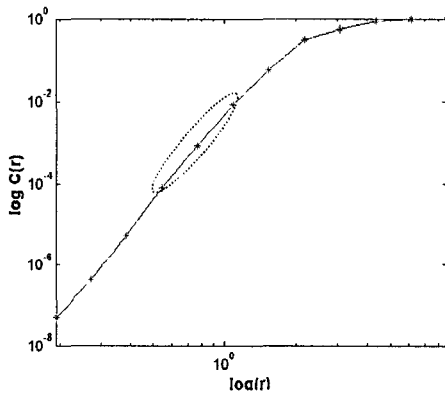
1 : delay time 2 : embedding dimension



(a) normal bearing



(b) outer-race damaged bearing



(c) inner-race damaged bearing

Fig. 7 Correlation integral vs. distance r

로 구한 지연시간 τ 와 매립차원 m 을 이용하여 상관적분을 계산한 후, 직선으로 보이는 극소 부분의 기울기로부터 상관차원을 구하였다. 상관차원의 계산하기 위한 로그-로그 도표를 Fig. 7에 나타내었으며, Table 2에 정리하였다.

결함 부위별로 상관차원을 해석해보면, 상관차원 값은 외륜 결함 베어링, 내륜 결함 베어링, 정상 베어링 순으로 증가하는 경향을 보인다. 가우스 랜덤(Gauss random) 과정 시계열에서 데이터 수가 무한대인 경우 $D = m$ 이 되며, C_r, r 의 로그-로그 도표에서 기울기 1인 직선으로 나타난다. 정상 베어링의 매립차원 m 은 10이며, 이 때 상관차원 $D = 9.714$ 이다. 정상베어링의 시계열 신호의 매립차원과 상관차원은 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 정상

베어링으로부터 획득한 시계열의 데이터는 가우스 랜덤 과정을 따른다고 볼 수 있다. 이 경우 데이터의 수가 유한하고 측정된 시계열에 잡음이 섞여 있기 때문에 랜덤 과정을 따르지만 상관차원은 수렴하는 결과를 보였다. 내륜 결함이 있는 진동신호로부터 재구성된 데이터의 상관차원은 6.752인데, 이 값은 외륜 결함이 있는 진동신호로부터 재구성된 데이터의 상관차원 5.974보다 크다. 이것이 의미하는 바는 외륜에 결함이 생기는 경우보다 내륜에 결함이 생기는 경우 베어링에서의 가진 원(exciting source)이 많다는 것을 뜻한다.⁽³⁾ 내륜 결함에 의해 야기되는 주기적인 충격은 외륜 결함의 경우와는 달리 축의 진동과 축의 회전 속도로 내륜 또는 축과 함께 회전하면서 베어링 케이스에 보다 많은 가진 원을 제공한다고 볼 수 있다. 따라서 정상 베어링의 경우와 결함을 가진 베어링의 상관차원 값이 확연히 차이가 나기 때문에 상관차원을 이용하여 베어링의 고장진단을 수행할 수 있는 것이다.

회전기계나 회전요소에 고장이 생기면 복잡한 비선형 진동 특성이 관찰이 되기 때문에 본 연구에서는 결함을 가진 베어링의 시계열 신호에 비선형적인 특성이 존재하는지를 확인하고 검정하였다. 비선형성을 검정하는 방법으로, 본 연구에서는 상관차원 분석을 사용하였다.

매립차원이 증가함에 따라서 상관차원의 극한값이 존재하지 않고 계속해서 증가한다면 그 시계열은 랜덤 한 것이고, 극한값이 존재하는 시계열은 비선형적 상관성을 가지고 있다고 할 수 있다. Fig. 8은 베어링 결함 데이터에 대한 매립차원을 증가시키면서 상관차원 값을 계산한 결과이다. Fig. 8에서 외륜 결함 발생 시계열 데이터의 매립차원은 8 이고, 상관차원의 값은 5.974에서 수렴하였으며, 내륜 결함 발생 시계열의 데이터의 매립차원은 8이며, 상관차원의 값은 6.752에 수렴하였다. 매립차원을 증가시키면서 계산한 결함 베어링의 상관차원 값은 일정한 값에서 수렴함을 보 이는데, 이는 베어링에 결함이 생겼을 때 측정된 시계열은 비선형 특성을 지니고 있다는 것을 의미한다. 또한 상관차원보다 큰 매립차원 값에서 상관적분 값이 수렴하는 이유는 측정된 시계열의 데이터 수가 유한하고 측정 잡음이 포함되어 있기 때문이다.

본 연구를 통해 회전체 고장진단 기계를 이용하여 정상 베어링과 외륜·내륜 결함을 가진 베어링의 가속도 신호를 측정하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고장 진단의 전통적인 방법인 주파수 분석만으로 명확하게 베어링의 결함 부위를 판단하는데 한계가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 회전기계의 고장진단에 사용되는 비선형 기법인 상관차원 해석을 적용함으로써 베어링의 결함 여부를 정량적으

로 파악할 수 있었으며, 베어링의 고장진단 및 상태감시에 적용 가능함을 보였다.

(3) 매립차원을 증가시키면서 상관차원의 수렴 여부를 분석한 결과, 정상 베어링의 진동 신호는 랜덤 과정을 따르는 반면, 베어링에 결함이 생겼을 때 측정된 진동신호는 비선형 특성을 지니고 있음을 확인하였다.

Table 4. The value of correlation dimension

Correlation dimension, D_2		
Normal	Outer-race defect	Inner-race defect
9.741	5.97	6.75

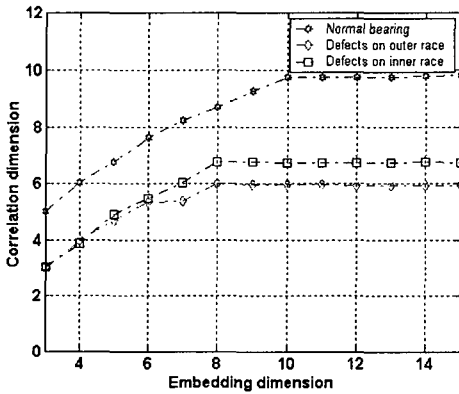


Fig. 8 Correlation dimension vs. embedding dimension

참 고 문 헌

(1) Jiang, J. D., Chen, J. and Qu, L. S., 1999, "The Application of Correlation Dimension in Gearbox Conditioning Monitoring," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 223, pp. 529~541.

(2) Logan, D. and Mathew, J., 1996, "Using Correlation Dimension for Vibration Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 10, pp. 241~250.

(3) Wang, W. J., Chen, J., Wu, X. K. and Wu, Z. T., 2001, "The Application of Some Non-Linear Methods in Rotating Machinery Fault Diagnosis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, pp. 697~705.

(4) The MathWorks, 1996, "MATLAB User's Guide".

(5) Takens, F., 1981, "Lecture Notes in Mathematics," Springer, Vol. 898, pp. 226.

(6) Fraser, A. M., Swinney, H. L., 1986, "Independent Co-ordinate for Strange Attractors from Mutual Information," *Physical Review A* 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) Theiler, J., 1999, "Efficient Algorithm for Estimating the Correlation Dimension from a set of Discrete Point," *Physical Review A*, Vol. 36, pp. 1603~1611.

(9) 장경천, 김현석, "주식 수익률의 카오스적 특성에 관한 실증연구", *한국증권학회*, Vol. 30, No. 4, pp. 99~130.