

ARMA 계수의 신경회로망 적용에 의한 베어링 진단 기법에 관한 연구

오재웅, 신준, 한광희, 한장수

한양대학교 정밀기계공학과 LNYC

ABSTRACT

Various diagnostic techniques have been proposed according to the development of the engineering and the machine elements. Specially, since the bearing is an essential component in rotating machine, many researchers have been done an earlier detection and a exact diagnosis of defects on bearing.

In this study, the technique which differ from past diagnoses techniques in frequency domain such as Spectral analysis is proposed. Parametric ARMA model was utilized to define the system using time series directly. Based on the resulted ARMA parameters, more precies and faster diagnosis system through Neural network was presented

1. 서론

고도화 및 분업화된 산업 사회와 그에 따른 설비의 고속화 및 자동화는 생산 현장에 있어서 컴퓨터 시스템의 도입을 요구하고 있으며, 시설 관리와 설비 진단 면에서도 그 필요성이 확대되고 있다. 또한 전문 인력의 부족과 산업 재해 방지 및 제품의 다양화에 따른 측면에서도 그 요구가 커지고 있으며, 가동 중인 설비 상태의 검사와 이상의 조기 발견에 의해 불발적인 고장을 방지하고 과잉 보수에 의한 경제적, 시간적 손실을 막고 제품의 품질 향상 및 생산성 향상을 위해서도 크게 요구되고 있다.

본 연구에서는 생산 현장의 회전 기계에 가장 주요한 부품인 베어링을 진단하는 기법을 개발하고자 하였다. 베어링의 진단에는 종래에도 많은 연구가 있어왔다. 초기에는 소리와 진동 등을 인간이 감각적으로 검사하고, 그 판단에 의존하여 왔으나, 최근까지는 다양한 센서와 컴퓨터의 발전 및 신호처리 기술의 도입으로 기계의 상태를 센서로 검출하여 그 신호를 주파수 영역에서 처리하고 그 변화를 감시·모니터링하는 방법이 많이 사용되어왔다. 그러나, 이러한 방법은 주파수 영역으로의 변환 과정에서 정보의 손실이 우려되고 주변 잡음에 의해 큰 영향을 받는 단점이 있으며 인간의 감각적 판단이 여전히 사용되고 있는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 최근에는 Fuzzy 추론⁽¹⁷⁾⁽²³⁾과 신경회로망⁽¹¹⁾ 등을 이용한 인공지능형 진단 시스템이 연구되고 있다.

본 연구에서는 기존의 진단 시스템의 문제점을 보완하고 정확하고 빠른 진단 기법을 제시하고자 한다. 본 연구에서 사용된 기법은 기존의 기법과 달리 시간 데이터를 직접 사용하여 시스템을 정의하는 Parametric ARMA 모델의 계수를 사용하였다. 이는 ARMA 모델이 시스템을 정의할 때 그 추정된 계수를 사용하여 파워스펙트럼 밀도함수 등을 나타내고 고유치를 해석하는데 사용되며, 시스템이 변화하면 그 추정되는 계수들도 변화하므로 그 계수들의 변화 형태들을 통해서 시스템의 변화를 확인할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 ARMA계수들 중에서 AR계수 부분만을 진단의 패턴으로 사용하였다. 이는 AR부분이 시스템의 고유진동수를 정의하고 파워스펙트럼 밀도함수의 공진점의 위치를 지정하기 때문이다. 그리고 정확한 패턴 비교 및 진단을 위하여 인간의 감각적 기능을 모방한 신경회로망을 진단기구로 사용하였다. (1)(11)

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 ARMA계수들이 시스템의 변화를 표현하는 능력을 평가하기 위해 ARMA계수에 의한 파워스펙트럼 밀도함수⁽⁴⁾를 제시하고, AR계수에 의한 고유진동수⁽¹²⁾를 계산하여 확인하였다. 또한 시스템의 진단 능력을 판단하기 위하여 어느 정도의 잡음이 시스템이 진단을 수행하는데 영향을 주는지 고려하였고, 결합의 조기 진단 능력을 확인하기 위해 결합의 진전 정도에 따른 진단 능력을 확인하였다. 그리고 실제 실험 데이터를 통해 본 진단 기법의 유효성을 검증하였다.

2. 이론 해석

2.1 ARMA 모델의 이론해석 및 동특성⁽¹³⁾⁽¹²⁾

이론적인 상관관계는 시계열 상호간의 종속을 표현한다. 이 종속관계는 회귀(Regression)로서 표현가능하며 1 차의 회귀 관계인 경우인 AR(1) 모델은 다음과 같다.

$$X(t) = a_1 X(t-1) + e(t) \quad (1)$$

여기서 $X(t)$ 는 시계열, a_1 는 계수이고 $e(t)$ 는 잡음을 의미한다. 이 정의에 대해서 $e(t)$ 는 $e(t-1)$, $e(t-2)$, ...에 대해서 독립이고, $X(t-1)$, $X(t-2)$, ...에 대해서도 독립이라는 가정이 전제된다. 식(1)에서 정확한 종속관계를 알기 위해서는 $e(t) = 0$ 이 되는 a_1 를 찾아야한다. 이를 위해 최소자승법을 사용하면 다음과 같은 수식이 주어진다.

$$a_i = \frac{\sum X(t)X(t-1)}{\sum X(t)^2} \quad (2)$$

여기서 a_i 는 $X(t)$ 와 $X(t-1)$ 의 총속성의 크기를 의미한다.

$$\rho(e(t), e(t-1)) = \frac{\sum e(t)e(t-1)}{\sum [e(t-1)]^2} \quad (3)$$

$$\rho(e(t), X(t-1)) = \frac{\sum e(t)X(t-1)}{\sqrt{\sum e(t)^2 \sum X(t-1)^2}} \quad (4)$$

그러나 식(2)와 (3)에서 정의된 상관함수의 값은 실제의 경우 어느 정도 이상의 값을 갖으므로 상기의 정의에 위배되지 않도록 그 상관관계를 가정의 적합성에 따라 ARMA 모델의 차수를 결정한다. 따라서 식(4)와 같은 ARMA(n,m)의 일반식으로 제시된다.

$$X(t) - a_1X(t-1) - \dots - a_nX(t-n) = e(t) - b_1e(t-1) - \dots - b_me(t-m) \quad (5)$$

ARMA(n,m)의 동특성을 규명하기 위해 식(5)을 Backshift 연산자, B를 사용하여 식(5)를 다시 쓰면 다음과 같이 된다.

$$(1 - a_1B - a_2B^2 - \dots - a_nB^n)X(t) = (1 - b_1B - \dots - b_mB^m)e(t) \quad (6)$$

식(6)에서 AR 부분을 취하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & 1 - a_1B - a_2B^2 - \dots - a_nB^n \\ &= (1 - \lambda_1B)(1 - \lambda_2B) \dots (1 - \lambda_nB) \\ &= \prod (1 - \lambda_iB) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 는 n 차 차분방정식의 특성근을 의미한다. 식(7)은 다음의 식(8)로 변환되어지고

$$\lambda^n - a_1\lambda^{n-1} - a_2\lambda^{n-2} - \dots - a_n = 0 \quad (8)$$

식(8)의 특성근을 구하여 다음식에 적용하여 고유 진동수와 감쇠비를 구한다.

$$\omega_{nj} = \frac{1}{\Delta t} \frac{[\ln(\lambda_j \cdot \lambda_j^*)]^2}{4} \left[\cos^{-1} \frac{\lambda_j + \lambda_j^*}{2\lambda_j \cdot \lambda_j^*} \right]^2 \quad (9)$$

$$\zeta_j = \frac{[\ln(\lambda_j \cdot \lambda_j^*)]^2}{[\ln(\lambda_j \cdot \lambda_j^*)]^2 + 4 \left[\cos^{-1} \frac{\lambda_j + \lambda_j^*}{2\lambda_j \cdot \lambda_j^*} \right]^2} \quad (10)$$

여기서 λ_j 와 λ_j^* 는 복소공역근, Δt 는 샘플링시간이고 j 는 모드 차수이다. 가장 일반적인 Rational 모델은 보통 ARMA(n,m) 모델로 간주되며 주파수 특성은 파워스펙트럼 밀도함수^[14]으로서 다음의 식(10)에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} S_{ARMA}(e^{j\omega}) &= \left| \frac{b_0 + b_1e^{-j\omega} + \dots + b_me^{-jm}}{1 + a_1e^{-j\omega} + \dots + a_ne^{-jn}} \right|^2 \\ &= \left| \frac{B_m(e^{j\omega})}{A_n(e^{j\omega})} \right|^2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 S_{ARMA} 는 파워스펙트럼 밀도함수이다. 식(11)에서 분모에 해당하는 AR계수부분은 파워스펙트럼 밀도

함수의 공진점의 위치를 결정하고 MA부분은 크기를 결정한다. 따라서 진단에 사용될 패턴은 AR 계수를 선택한다.

또한 ARMA계수를 추정하기 위하여 소형컴퓨터에서도 사용가능하도록 하기위하여 축차적으로 계수를 추정하는 Kalman Filter^{[12][20]}를 사용하였다. 이를 위해 식 (5)를 식(12)로 변형하였다.

$$X_n = \sum a_i X_{n-i} - \sum b_i e_{n-j} + e_n \quad (12)$$

식(11)을 식(12)로 다시 변환하였다.

$$X_n = \Theta^T Z_n + e_n \quad (13)$$

여기서, $Z_n = [X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_{n-p}, -e_{n-1}, \dots, -e_{n-q}]$
 $\Theta = [a_1, a_2, \dots, a_p, b_1, \dots, b_q]^T$ 이다. 이모델을 아래의 알고리즘에 대입하여 계수를 추정해 나간다.^[20]

$$\text{초기화: } \Theta_0 = 0, P_0 = \alpha I \quad (14)$$

$$\text{Estimator: } \Theta_N = \Theta_{N-1} + K_N(X_N - Z_N^T \Theta_{N-1}) \quad (15)$$

$$\text{Filter Gain: } K_N = P_{N-1} Z_N (I + Z_N^T P_{N-1} Z_N)^{-1} \quad (16)$$

$$\text{Covariance: } P_N = (I - K_N Z_N^T) P_{N-1} \quad (17)$$

2.2 신경회로망^{[1][5][8][9][11]}

신경회로망은 생물의 중추신경계를 모방하여 중앙 집중식 제어 및 판단 기능을 지닌 인공지능이다. 특징은 입력신호가 활성화 함수에 의해 2진 데이터의 패턴으로 진행되는 것과 인간의 신경계통의 모방에 의한 구조적 거대함, 사건과 사건 사이의 관계를 논리적으로 규명하는 것 그리고 상벌의 원칙에 의거하여 학습에 의한 가중치의 변화를 통해 판단 능력의 향상이다.

본 연구에서 사용하는 해밍네트워크는 구조가 단순하고 이진 데이터를 사용하여 인식 속도가 빠른 장점이 있고 지역 최소에 빠질 염려가 없으며 기억저장 용량이 적게 사용된다. 따라서 기존의 일반 컴퓨터에서도 알고리즘 구축이 가능하다. 그러나 연속량을 다룰 수 없다는 단점이 있어 본 연구에서는 이를 변형하여 연속변량을 다룰 수 있도록 적용하였다. 기본 내용은 학습 패턴과의 비교를 통해 벗어난 정도를 수치로 나타내며, 이것을 Hamming Distance 라한다. 수식으로써 식(18)의 X_i 는 기준 패턴이고, Y_i 는 입력 패턴이다. 이 수식은 XOR의 개념을 갖고 있다. 그러나 본 연구의 사용 패턴은 특성상 연속변량을 다룰 수 있어야 하므로 Mapping 개념을 도입하였다. 즉 현재 입력되는 패턴이 어느 패턴에 가까운지를 Hamming Distance의 반대 개념인 Matching Score 로써 표현하도록 하였다. 이에 대한 수식은 식(19)와 같다.

$$H.D = \sum \text{ABS}(X_{ref,i} - X_{in,i}) \quad (18)$$

$$M.S = \sum (N * 1. - H.D)_j \quad (19)$$

여기서 H.D는 Hamming Distance이고, M.S는 Matching Score 이다. ABS()는 절대값을 의미하고, X_{ref} 는 기준 패턴, X_{in} 은 입력 패턴이다.

2.3 배어링의 결합 주파수^{[2][10][16][17]}

불 배어링에 결합이 발생하면 결합에 의해 충격 진동이 발생한다. 이 진동주파수는 배어링의 고유주파수이지만 이 고유주파수가 발생하는 주기주파수가 진단에 사용되고있다. 배어링의 고유 주파수는 식(20)과 같으며, 이에 대한 결합 주파수는 배어링의 기하학적

형상에 따라 아래와 같이 수식(21), 식(22), 식(23)을 통해 각각 계산된다. 이는 다음의 두가지 가정이 요구된다. 첫째, 궤도분과 볼사이의 미끄럼 접촉은 없다. 둘째, Radial, Thrust 방향의 힘에 대해서 각 부의 변형은 없다.

$$f_n = \frac{n(n^2-1)}{2\pi(D_r/2)^2} \frac{EIg}{n^2+1} \frac{1}{\gamma A} \quad (20)$$

여기서, E는 재료의 종탄성 계수, I는 원환의 관성 모멘트, γ 는 재료의 비중량, A는 원환의 단면적, D_r 는 원환 중심축의 직경, n은 파수이다.

Outer Race Defect:

$$f_o = z/2 f_r (1 - d/D \cos \alpha) \quad (21)$$

Inner Race Defect:

$$f_i = z/2 f_r (1 + d/D \cos \alpha) \quad (22)$$

Ball Defect :

$$f_b = D/d f_r [1 - (d/D \cos \alpha)^2] \quad (23)$$

여기서 z 은 볼의 갯수, f_r 는 축의 회전주파수, d 는 볼의 지름, D는 피치의 지름, α 는 접촉각을 의미한다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 진단시스템의 진단 능력과 그 타당성 및 유효성을 보이기 위해 세가지 모의 실험을 하였다.

3.1. ARMA 계수의 시스템 동특성 규명

3.1.1 시뮬레이션 방법

본 시뮬레이션에서는 ARMA모델의 시스템 동특성 규명 능력과 Kalman Filter의 유효성을 알기 위하여 30Hz, 60Hz, 100Hz의 주파수와 0.01의 감쇠비를 갖는 신호를 Kalman Filter를 통해 ARMA계수를 추정하고 모델링하였다. 추정된 계수를 사용하여 식(11)을 통해 파워스펙트럼 밀도함수^[4]을 보이고, 식(9)를 통해 3차 고유진동수를 계산하였다. 샘플링 시간은 $dt = 1/f_{max}$ 으로 하였다. 모델의 차수는 ARMA(8,7)로 하였다.

3.1.2 결과 및 고찰

시뮬레이션 결과를 Fig.3.1.2과 Table 3.1.1에 보였다. 결과에서 알 수 있듯이 ARMA계수는 세개의 고유진동수를 잘 계산하는 것을 알 수 있으며 파워스펙트럼 밀도함수도 공진점을 확인할 수 있다. 본 결과에서 ARMA 모델이 시스템을 잘 모델링함을 알 수 있으며, ARMA계수 중 파워스펙트럼 밀도함수의 공진점의 위치와 고유진동수 추정에 사용되는 AR계수가 패턴으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

3.2. 잡음에 의한 영향

3.2.1 시뮬레이션 방법

실제 환경에서는 입력 신호에 잡음이 포함된다. 이 경우 본 기법의 진단 능력이 잡음^[24]에 대해 얼마나 영향을 받는지를 고려하였다. 시뮬레이션 신호는 Table 3.2.1의 사양에 따라 식(21), 식(22), 식(23)에서 주어진 식에 의해 1015 rpm인 경우로 하였다. 이

신호에 식(24)에서 주어진 SNR(Signal to Noise Ratio) 20(dB)의 잡음을 부가시킨 경우를 기준 패턴으로 하였고, 15(dB)에서 -15(dB)까지 5(dB)씩 감소시켜 부가하면서 진단 능력을 확인하여 보았다.

$$SNR (dB) = 20 \log \frac{\sigma_s}{\sigma_n} \quad (24)$$

여기서 σ_s 는 신호의 분산이고 σ_n 는 잡음의 분산이다.

3.2.2 결과 및 고찰

결과를 Fig 3.2.1, Fig. 3.2.2, Table 3.2.2에 각각 파워스펙트럼 밀도함수와 AR계수의 변화 형태 및 진단 Matching Score를 제시하였다. 결과에서 알 수 있듯이 파워스펙트럼 밀도함수와 AR계수의 형태 변화가 잡음의 양에 따라 일정하게 변화하고 있지만 타겟함과의 구분이 어렵다. 이에 대해 해밍네트워크의 Matching score는 -5(dB)까지 양호한 진단 결과를 보여 주고 있다. 그러나, -10(dB) 이하에서는 신호의 특성 자체가 잡음에 묻혀서 진동 특성 구분이 어려워므로 정상 상태로 판정함을 알 수 있다. 실제계에서 0(dB) 이하의 잡음은 현실성이 없음을 감안할 때 본 시스템은 잡음의 영향 없이 진단을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 결함 진단 정도에 따른 진단 능력

3.3.1 시뮬레이션 방법

결함의 초기진단 능력을 알기 위해 결함의 진단 정도에 따른 영향을 고려하였다. 베어링의 사양은 Table 3.2.1과 같고, 식(21), 식(22), 식(23)에서 주어진 신호를 100%결함이라 보고, 10%에서 부터 100%결함의 10%씩을 증가시키면서 정상상태의 신호에 부가하여 모의 실험을 행하였다. 또, 실제계에 유사하도록 20(dB)의 잡음을 부가시켜 모의실험을 행하여 진단 능력을 확인하였다.

3.3.2 결과 및 고찰

결과를 Fig.3.3.1과 Fig.3.3.2, Fig.3.3.3, Table 3.3.1에 각각 파워스펙트럼 밀도함수와 AR계수의 패턴, Matching Score 변화 그리고 결함의 진단에 따른 Matching Score를 제시하였다. 결과에서 알 수 있듯이 보통 20%의 결함이 나타날 때부터 정확하게 진단함을 알 수 있다. 여기서도 파워스펙트럼 밀도함수를 눈으로 판단하여 진단하기는 어렵지만 해밍 네트워크를 사용한 경우 양호한 진단 능력을 보이고 있다. 그러므로 본 기법이 초기 결함 진단에도 극히 유효함을 알 수 있었다.

4. 진단 시스템 구성

4.1 패턴화 및 진단 기구^[11]

본 기법에서 사용되는 패턴은 ARMA 모델의 계수 중 AR계수 부분만을 사용하였다. 이는 AR 부분이 모델의 고유치를 해석하는 데 사용되며 본 진단에 있어서 최소한의 정보를 갖고 있기 때문이다. 특히 ARMA모델의 차수는 모오드 차수에 따라 변화되어야 하나 본 기법에서는 패턴이 필요하므로 그 차수를 ARMA(8,7)로 하였다. 진단 기구로는 기존의 2진데이터를 사용하는 해밍 네트워크를 연속변량을 다룰 수 있도록 Mapping 개념을 도입하였으며, 미리 학습된 패턴과의 유사성 정도를 해밍 거리의 반대 개념인 Matching Score로써 나타내었다. 수식은 식(25)로 주어진다. 결과는 아홉

Matching Score 중 최대값을 갖는 패턴만이 출력되어진다. Fig. 4.1은 이를 보이고 있다.

$$H.D = \sum_{i=1}^N \text{ABS}(X_{ref,i} - X_{in,i}) \quad (25)$$

$$M.S = N \times \text{Constant} - H.D$$

4.2 시스템 구성¹⁷⁾

본 시스템은 신호입력부, 사양입력부, 패턴저장부, 패턴형성부 및 진단부로 구성되어진다. 신호입력부에서는 신호의 센서와 증폭기, Lowpass Filter, A/D 변환기로 이루어 지고, 사양입력부에서는 진단 대상의 종류와 회전수의 입력이 이루어져 진단배어링에 필요한 패턴을 준비시킨다. 그리고, A/D변환기를 거친 신호는 패턴 형성부에서 Kalman Filter에 의해 ARMA계수가 추정되어 모델의 패턴 진단부에 입력되어 진단이 이루어진다. Fig. 4.2는 시스템의 구성도이다.

5. 실험

5.1 실험방법

본 실험에서는 참고 문헌에서 제시된 자료를 토대로 하여 본 진단 시스템의 실제계의 진단 타당성을 검증하고자 하였다. 본 연구에서 사용한 예는 두가지로써 첫번째 예¹³⁾는 Table 5.1.1의 사양을 갖고 드레스트 하중은 없으며, 640 rpm으로 회전하고 있는 경우이다. 결함은 Outer Race에 지름 3 mm로 방전가공된 결함을 갖고 있다. 두번째 예¹⁷⁾는 Table 5.2.1의 사양을 갖고 1.75kg의 드레스트 하중을 받고 있으며, 1800 rpm으로 회전하고 있는 볼 베어링이다. 결함은 Inner Race에 임의의 결함을 갖고 있다.

5.2 실험결과 및 고찰

첫번째 경우의 실험 결과를 Fig 5.2.1과 Table 5.2.1에 각각 파워스펙트럼 밀도함수와 Matching Score를 나타내었다. 또한 두번째 경우의 실험 결과를 Fig. 5.2.2와 Table 5.2.2에 각각 파워스펙트럼 밀도함수와 Matching Score를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 정확히 결함을 진단하고 있음을 알 수 있다. 두가지 경우 중 640 rpm일 때의 Matching score가 상호 유사하게 나오는 데 이는 회전수가 작으므로 결함들 사이의 주파수가 근접해있기 때문이다. 그리고 파워스펙트럼 밀도함수에서도 크기는 차이가 있지만 공진점의 위치가 유사함으로써 주파수 특성이 유사함을 알 수 있었다. 또한 두번째 결과에서는 Matching Score가 첫번째 보다 적은 값을 갖고 있는 데 이는 결함의 크기가 상대적으로 작아 결함의 특성들이 잘 나타나지 않기 때문이다. 실험 결과를 통해서 본 진단 기법이 유효함을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ARMA 모델을 통한 시스템의 동특성 규명의 기능을 통해 그 계수를 패턴화하여 시스템의 변화 진단이 가능함을 알 수 있었다.
- 2) ARMA 계수를 추정하기 위한 Kalman Filter의 유효성을 확인할 수 있었으며, 추정된 AR계수 패턴에 의한 신경회로망의 진단 능력을 검증하였다.
- 3) 본 연구에서 개발된 진단 기법은 잡음이 많이 부가되어 결함의 판단이 어려운 상황에서도 효과적으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

7. 참고 문헌

- 1) Yoh-Han Pao, "Adaptive Pattern Recognition and Neural Network", Addison-welky Publishing Company, Inc. 1989
- 2) "Signal Processing Technique를 이용한 Flexible Rotor System의 진동제어에 관한 연구", 1989.4. 한양대학교 연구보고서
- 3) 金井浩, "디지털 신호처리기술의 회전기계 자동진단에의 응용에 관한 연구", 日本 동북대학교 박사 학위논문, 소하 61
- 4) Dangles F. Elliott, "Handbook of Digital Signal Processing", Academic Prees, Inc. pp701~740, 1989
- 5) R. Beale, T. Jackson, "Neural Computing : An Introduction", Adam hilger pp22~32
- 6) Rangwala D. Dornfeld, "Integration of Sensors via Neural Networks for Detection of Tool Wear", ASME
- 7) G.S. Kumar, G.W. Ernot, "An Expert System Architecture for Predictive Monitoring", ASME
- 8) Richard, P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Network", IEEE Assp Magazine, April, 1987
- 9) Laura Icnieio Barke, "Introduction to Artificial Neural System for Pattern Recognition", Computer, Ops Res Vol 18, No 2, pp211~220, 1991
- 10) 김인수, "HIFTR를 이용한 Bearing이상진단에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1989
- 11) 손동규, "신경회로망을 이용한 자동차 고장진단", 한양대학교 석사학위논문, 1990
- 12) 차주현 "ARMA 모델을 이용한 시스템 동특성 규명에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1986
- 13) Sudhakar, M. Pandit, Shien-Ming Wn, "Time Series and System Analysis with Application", John Wiley & Sons, Inc 1983
- 14) John G Proakis, Dimitris G. Manolakis, "Introduction to Digital Signal Processing", Macmillan Publishing Company, 1988
- 15) Ching Li, "On-Line Bearing Localized Defects Detection by Pattern Recognition Analysis", ASME
- 16) 白木万博, "진동에 의한 설비진단", 三菱重工業株式会社 기술본부, 1982
- 17) 日笠泰三, 堤 作, "베어링의 퍼지이상진단", 일본기계학회 No 910-39 (1) 91.7.8~9, 강연회집
- 18) Y. B. Chen, S. M. Wn, "Machinery Condition Monitoring by Prediction Error Analysis", ASME, pp 129~139
- 19) Alexander S. Barkin, John J. Androan, "Mechanical Signature Analysis of Ball Bearing by Real time Spectrum Analysis", Journal of Environmental Sciences, Feb 1973
- 20) Frank L. Lewis, "Optimal Estimation with an Introduction to Hochartze Control Theory", John Wiley & Sons, 1986
- 21) W. E. Dietz, E. L. Kiech, J. M. Ali, "Jet and Rocket Engine Fault Diagnosis in Realtime", Journal of Neural Network Computing 1989
- 22) Bo Wahlberg, "ARMA Special Estimation of Narrow Band Process via Model Reduction", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing Vol 38 No 7, July 1990
- 23) "소음 진동의 온라인 감시전문가 시스템 개발", 한양대학교 연구보고서, 1991
- 24) Hsing-Hsing, "A New Method for Adaptive Time Delay Estimation for Non-Gaussian Signal", IEEE Transaction Acoustic, speech and signal processing, Vol30, No 2, FEB 1990

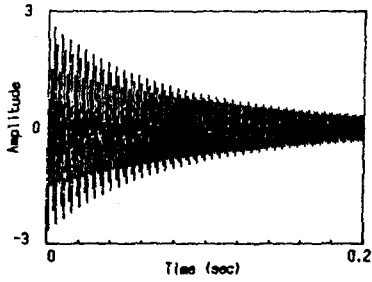


Fig.3.1.1 View of Signal

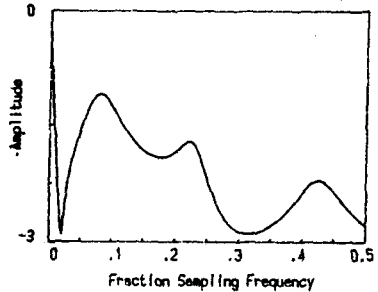


Fig.3.1.2 Power Spectral Density Function

Table 3.1.1 Results of Estimation on Natural Frequency

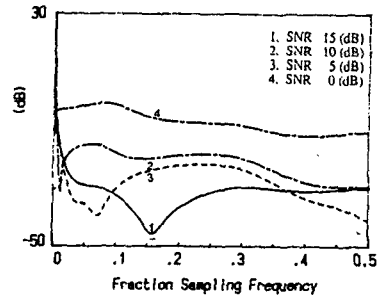
Exact Value (Hz)	Estimated Values (Hz)	Error (%)
30.0	29.94	0.02
60.0	59.87	0.02
100.0	100.07	0.07

Table 3.2.1. Specifications of Bearing

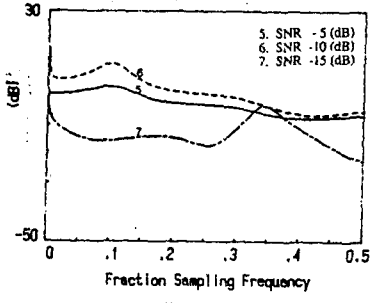
회전수	1015 rpm
볼의 개수	9 개
볼의 지름	9.62 (mm)
피치 지름	46.6 (mm)
접촉각	0 (Deg.)

Table 3.2.2 Matching Score on Degrees of Noise (%)

Degree of Noise (dB)	Good	Ball F.	Inner F.	Outer F.
15	6.3721 (79.7)	7.9254 (99.1)	7.6968 (96.2)	7.7990 (97.5)
10	6.2302 (77.9)	7.6709 (96.0)	7.5513 (94.4)	7.5789 (94.7)
5	6.2954 (78.7)	7.3589 (92.0)	7.2081 (90.1)	7.3076 (91.3)
0	6.3314 (79.1)	7.4227 (92.8)	7.2759 (90.9)	7.3754 (92.2)
-5	6.7436 (84.3)	7.1918 (89.9)	7.0489 (88.1)	7.1305 (89.1)
-10	6.7807 (84.8)	6.7766 (84.7)	6.6080 (82.6)	6.7668 (84.6)
-15	6.6277 (82.8)	6.0346 (73.4)	5.9614 (74.5)	6.0100 (75.1)



(a) 15 (dB) - 0 (dB)



(b) -5 (dB) - -15 (dB)

Fig.3.2.1 Power Spectral Density Function on Degrees of Noise

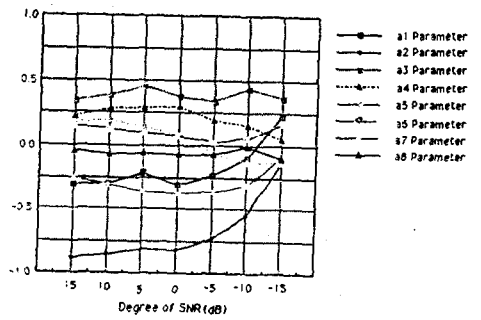
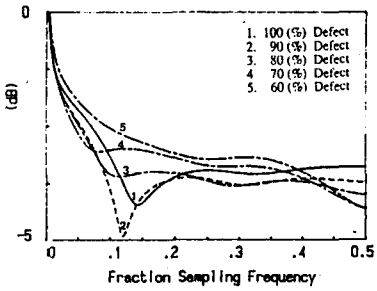


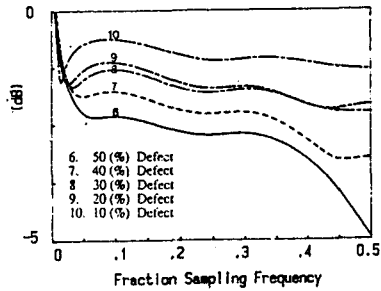
Fig.3.2.2 Variation of AR Parameters on Degrees of Noise

Table 3.3.1 Matching Score on Degrees of Ball Defects

Degree of Defect (%)	Good	Ball F.	Inner F.	Outer F.
10	7.0380 (88.0)	6.9456 (86.8)	6.9138 (86.5)	6.9836 (87.3)
20	6.5435 (81.8)	7.1157 (88.9)	6.9470 (86.8)	7.1039 (88.8)
30	6.4496 (80.6)	7.2062 (90.1)	6.9797 (87.2)	7.1642 (89.6)
40	6.3557 (79.4)	7.2967 (91.2)	7.0124 (87.7)	7.2225 (90.3)
50	6.3524 (79.4)	7.4464 (93.1)	7.1621 (89.5)	7.3722 (92.2)
60	6.3831 (79.8)	7.5966 (95.0)	7.3123 (91.4)	7.5050 (93.8)
70	6.3583 (79.5)	7.7377 (96.7)	7.4723 (93.4)	7.6168 (95.2)
80	6.3332 (79.2)	7.7553 (96.9)	7.4931 (93.7)	7.6284 (95.4)
90	6.3626 (79.5)	7.8918 (98.6)	7.6102 (95.1)	7.7415 (96.8)
100	6.3434 (79.4)	8.0000 (100.)	7.6921 (95.9)	7.8233 (97.3)



(a) 60 (%) - 100 (%)



(b) 10 (%) - 50 (%)

Fig.3.3.1 Power Spectral Density on Degrees of Ball Defects

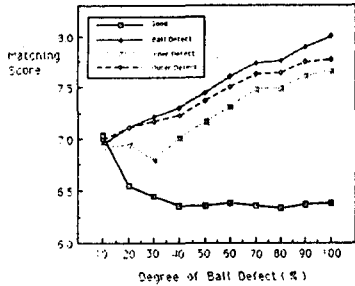


Fig.3.3.2 Matching Score on Degrees of Ball Defects

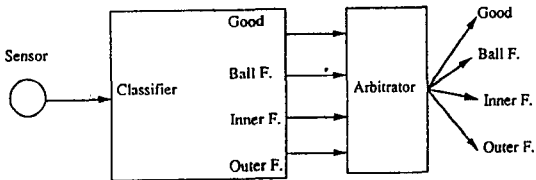


Fig.4.1 Concept of Modified Hamming Network

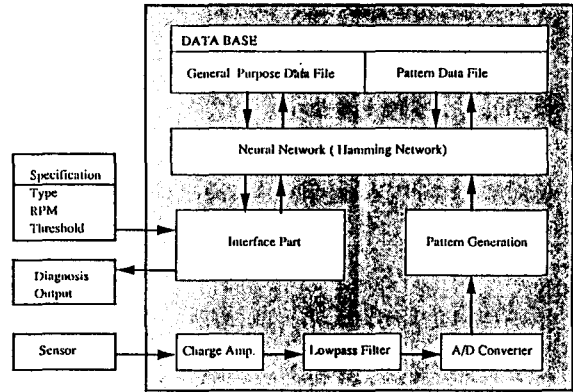


Fig.4.2 Block Diagram Representation of the On-line Bearing Diagnosis System

Table 5.1.1 Specification of Bearing Case (1)

Type	#6005
회전수	640 (rpm)
Pitch 지름 (D)	36.0 (mm)
회전체 직경 (d)	6.35 (mm)
회전체 갯수 (z)	10
접촉각 (α)	0°

Table 5.1.2 Specification of Bearing Case (2)

Type	JIS696
회전수	1800 (rpm)
Pitch 지름 (D)	10.5 (mm)
회전체 직경 (d)	2.7781 (mm)
회전체 갯수 (z)	7
접촉각 (α)	10.3 (Deg)

Table 5.2.1 Matching Score of case 1

	Good	Ball F.	Inner F.	Outer F.
Experiment Pattern	6.3245 (79.1)	7.306 (91.3)	7.163 (89.5)	7.394 (92.4)

Table 5.2.2 Matching Score of case 2

	Good	Ball F.	Inner F.	Outer F.
Experiment Pattern	5.6386 (70.5)	5.9014 (73.8)	6.2804 (78.5)	4.7320 (59.2)

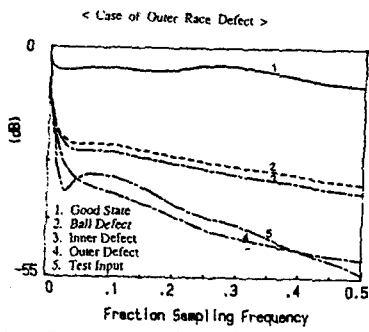


Fig.5.2.1 Power Spectral Density Function of case 1

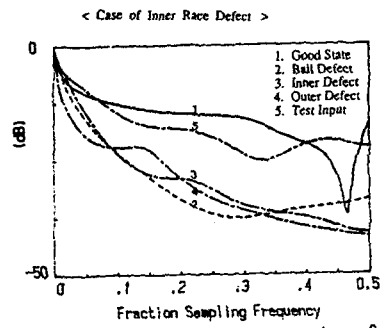


Fig.5.2.2 Power Spectral Density Function of case 2