

## 로터시스템의 통계적 이상진단 시스템에 대한 연구 (A Study on the Statistical Diagnosis for A Rotor System)

김성철, 김영진 (경희대학교)

Sung-chul Kim, Young-jin Kim (Kyunghee University)

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 경희대학교 산업공학과

### Abstract

베어링을 이용한 회전축은 모든 회전축의 근간을 이루고 있다. 이러한 회전축은 발전기 터어빈, 고정밀 공작기계 등에 많이 응용되고 있다. 그런데 이러한 대규모의 회전축에 이상이 생긴 경우, 이상을 방치하고 계속 사용하게 되면 기계전체의 파손을 가져올 수 있다. 이러한 기계전체의 파손이 일어나지 않도록 미리 이상을 진단할 수 있는 시스템을 구축하면 많은 비용을 절감할 수 있다. 지금까지 여러 종류 로터시스템 여러 종류의 이상진단을 시도하여 왔으며 앞으로도 많은 종류의 이상진단이 이루어지리라 생각한다. 다양한 형태의 이상진단은 시스템에서 추출되는 데이터를 통계적으로 처리하는 기법과 추출하는 센서의 특성을 파악하여 이상진단 알고리즘을 수립하는 과정을 망라하게 된다. 특히 이상진단 알고리즘에는 측정된 데이터의 불확실성을 감안한 이론이 적용되어야 한다.

본 논문에서는 로터시스템을 이용한 베어링 진단 유무에 대한 이상진단을 통계적 패턴인식 이용하여 정상과 비정상 상태를 구분하여 여러 종류의 이상을 구분하는 작업수행을 연구하고자 한다.

### 1. 서론

현대 산업기계의 많은 부분이 회전체 시스템으로 되어있다. 따라서 이러한 회전체 시스템의 고장 및 파손은 엄청난 손실을 초래하게 된다. 그러므로 이러한 회전체 시스템의 고장을 조기에 진단하고 대책을 수립하여 고장에 의한 경제적 손실을 최대한도로 줄이고자 하는 노력이 계속 시도되어 왔다.[1] 본 연구에서는 저어널 베어링의 센서를 통해 정상상태의 신호와 이상상태의 신호를 취득하여 진단데이터 베이스를 구축하고 이를 판단 알고리즘에 적용시켜 결함의 부위 및 결함정도를 나타내는 자동진단 방법을 개발 하고자 한다. 즉, rotor system 의 sensor로 부터 sample data를 취득하여 저장되어진 과거의 referance data와의 비교를 통해서 통해서 N(정상상태), F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>(비정상상태)를 판별하여 진단을 수행한다.

### 2. 통계적 패턴인식 결함진단방법

패턴인식 결함진단방법에는 여러 가지 방법이 사용된다. 신경망 이론을 이용한 방법, 퍼지 이론을 위한 방법, 통계적 방법을 이용한 방식이 존재한다.

본 연구에서는 통계적 방식의 방법을 사용하여 이상진단의 판단을 수행한다.[2] 통계적 방법을 이용하는 목적은 sensor data가 불확실성한 값을 가지고 있기 때문이다. 즉 데이터에는 sensor 자체 오류값과 system의 오류값이 존재 함으로써 전체적인 오류 값을 형성한다. 그러므로 오류가 포함되어 얻어진 데이터에 대한 특징 추출은 통계적 처리를 통하여 가장 효과적으로 행해진다.

통계적 패턴인식은 통계적인 가정에 바탕을 두고 분류 업무를 수행한다. 입력데이터로부터 추출된 특징 값은 각각의 특징 벡터를 C개의 부류들 중의 하나로 배정하는데 사용된다.

자연 상태에서 특징을 추출한 것으로 가정하면, 바탕이 되는 모델은 자연 상태 또는 확률(확률 밀도 함수)의 부류 조건부 집합(class-conditioned set)중의 하나가 된다.

저어널 베어링의 결함여부를 판정하기 위해서는 먼저 센서를 통해 수집된 진동신호로부터 결함 여부를 잘 나타내는 파라미터를 추출한 후, 판단(또는 분류)알고리즘에 따라 이 파라미터 값이 정상집단에 속하는지 아니면 이상집단에 속하는지를 판단하여야 한다.

따라서 결함진단의 효율성은 파라미터 추출방법 및 판단방법에 따라 좌우된다. 파라미터 추출방법에는 음향방출(Acoustic Emission : AE)과 Acc(Acceleration)센서의 활용 되어진다.

AE와 Acc 센서의 X 방향, Y 방향, Z 방향으로 인해서 얻어진 원시 data를 각각의 정상상태(N)와 비정상상태 3가지 (F<sub>0</sub>, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>)에대해서 평균값( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ ) 그리고 RMS를 구함으로써 규칙을 얻을수 있다.

RMS란 회전 기계에 있어서 베어링에 이상이 있을 때 발생하는 AE 또는 다른 센서의 신호 형태는 연속형이며 연속형 신호를 해석하는 방법으로서 신호의 에너지량을 측정하는 것이 적당하다. 이 에너지를 편리하게 구하기 위하여 RMS (Root Mean Square) 수치로 환산한다.

RMS는 수학적으로 어떤 주기를 갖는 신호를 제공하여 이의 평균치의 제공근으로 나타낼 수 있다.

$$RMS = \left[ \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad -①$$

$\Delta T$  : 시간간격

$V(t)$  : 신호함수이다.

신호를 정량적으로 나타내는 기본적인 방법중의 하나는 측정된 신호의 에너지를 측정하는 것이며 RMS는 에너지측정의 파라미터가 된다. 즉, AE 또는 다른 센서의 RMS 값은 신호의 에너지 측정에 사용될 수 있다.

reference data의 측정에 사용된 sensor와 RMS에 대해서 뒤에 나올 Fig 1을 보면 알수있듯이 결정함수를 결정하는 인자로써 볼수있는 것은 AE, Acc-x, Acc-y, Acc-z등의 대한 센서의 종류와 베어링의 위치인 a, b, c, d로 부터 얻어지는 데이터와 RPM의 변화에 대한 data로써 1200, 2400, 3600의 변화에 따른 값을 얻을수 있다. 따라서 실험데이터를 취하는 경우의 수는 센서의 종류4가지와 RPM의 종류 3가지 센서 위치 4가지의 조합으로 얻어진다.

### 3. 실험장치의 구성

#### 3.1 실험장치 설계 및 제작

##### 3.1.1 저어널 베어링의 설계

회전축을 지지하는 기계요소를 베어링이라 하며, 축이 베어링에 의하여 지지되는 부분을 저어널(Journal)이라 한다. 저어널 베어링은 구름베어링의 볼이나 롤러 같은 전동체가 없이 베어링과 축사이의 유막압력에 의해서 축의 하중을 지지하는 베어링의 형태이다.

저어널 베어링은 다음과 같이 분류된다.

##### ① 정압베어링

외부에서 가압한 유체가 베어링 틈새 내로 강제 주입되는 베어링이다. 공작기계등의 고강성용 주축이 지지베어링으로 사용되지만 속도에 한계가 있다.

##### ② 동압베어링

외부에서 가압없이 축과 베어링사이의 상대 운동에 의해서 압력이 발생되는 베어링이다. 정압베어링에 비해 하중지용량과 강성은 약하나 고속 회전이 가능하다.

본 연구에서는 고속의 저어널 베어링에 문제가 생겼을 때, 이상상태를 빨리 진단할 수 있는 시스템구축을 위하여 동압베어링을 설계 제작하였다. 베어링설계를 참고하여 직경 30mm, 베어링 길이부분 30mm에 라운딩을 고려한 베어링의 전체 길이 40mm, 베어링의 틈새를 35 $\mu$ m로 하는 베어링을 제작하였다. Fig 1에 실험장치의 개략도와 센서의 위치가 표시되어 있다.

##### 3.1.2 실험장치 제작

제작된 베어링을 기초로 하여 베어링 진단 시험기를 제작하였다. 진단 시험기를 제작하는데 몇 가지 사항을 고려하였다.[3]

- (1) 조립과 분해를 자주 해야 하므로 다루기 쉽고 무게가 적게 나가도록 만들었다.
- (2) 모터는 DC Servo Motor 로 소음 및 진동이 적

고, 부하변동에 따른 속도변화가 적으며 광범위한 속도 제어가 가능하여야 한다.

- (3) 모터의 순수 회전력의 전달과 축과의 불량 정렬을 최소화하기 위해 플렉시블(flexible)커플링을 모터와 축 사이에 연결했다.
- (4) 센서의 부착을 고려해 외부에서 기름을 공급하는 방식으로 기름 급유구가 필요하였다.
- (5) 회전축은 직경 30mm 에 길이 285mm로 열처리와 연마를 하도록 하였다.
- (6) Fig.1에서 ①은 베어링용 하우징으로 위쪽에 오일 급유구를 설치하였다.
- (7) ③은 베어링으로서 내경 30mm에 축과의 틈새는 35 $\mu$ m를 가지고 있도록 연마하였다. 그리고 ②번에 의해서 하우징과 고정될 수 있도록 하였다.
- (8) 베어링부품인 ③과 ①은 험거운 끼워 맞춤을 하도록 제작하였다.

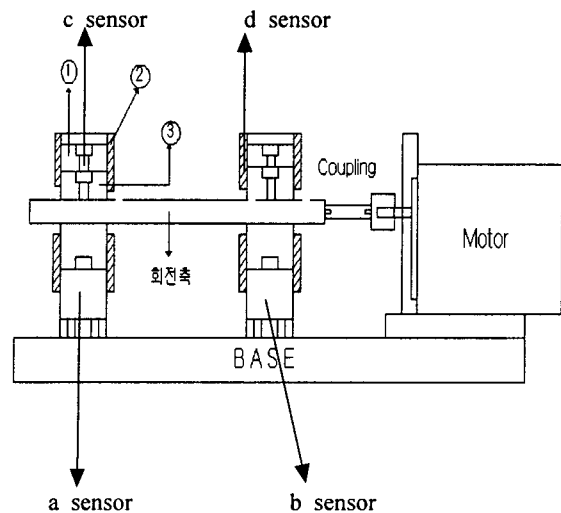


Fig 1 실험장치의 개략적인 구조

Fig.2는 실제 제작된 저어널 베어링 실험장치(축과 저어널 베어링, 구동모터, 커플링, 오일 공급장치)를 보여준다.

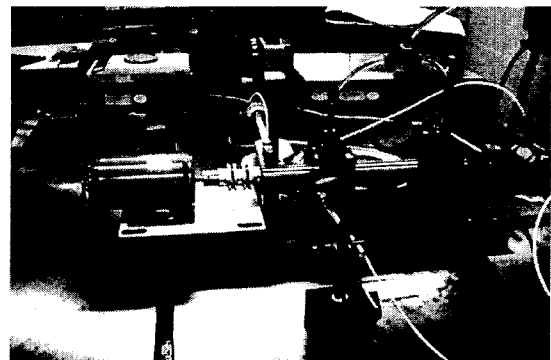


Fig. 2 실험장치 사진

### 4. 실험 데이터 분석 및 고찰

AE의 경우에는 Fig 3 에서 볼수있듯이 RPM의 증가에 따른 변화가 RMS값에 무관하다는 것을 볼 수있으며 상태별 즉 N, F0, F1, F2 와 위치별(a, b, c, d 센서의 위치)로 차이가 난다는 것을 볼 수 있다.

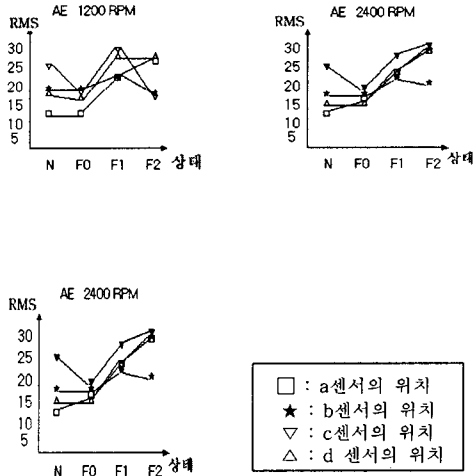


Fig 3 AE의 RMS와 각 상태와의 관계

Fig 4 에서 보듯이 Acc는 RPM과 비례해서 커지는 것을 볼 수 있고 상태별(센서의 위치)로도 차이가 난다는 것을 볼 수 있다. 위치에 따라 Acc의 경우 b위치의 data 값이 상대적으로 작음을 볼수있다.

이렇게 해서 얻어진 데이터를 통계처리함으로써 N : (정상상태), F0 : (비정상 상태 축방향 얇게 판 베어링), F1 : (비정상 상태 축방향 깊게 판 베어링), F2 : (비정상 상태 원주방향 판 베어링) 등의 reference data 가 구해진다.

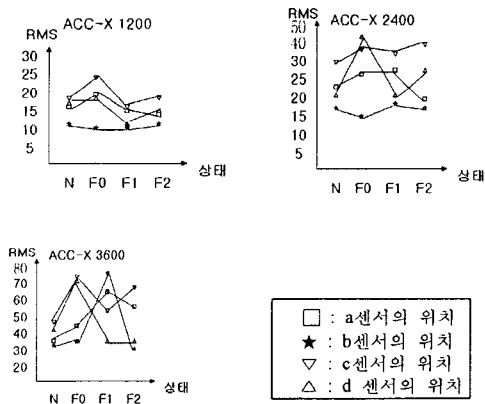


Fig 4 Acc-X의 RMS와 각 상태와의 관계

Table 1은 1200RPM인 경우의 X방향 Acceleration sensor 값을 각 센서 위치에서 정상 및 비정상(즉 N, F0, F1, F2) 의 경우에 대해 취하고 그 RMS값의 범위를 구한 것이다. 이것을 이용하여 특정 Sample data의 X방향 Acc이 어떤 경우의 것인지 판별할 수 있다. 이것을 Decision Matrix라 하고 모든 센서의 모든 RPM에 대해 작성하게 된다.

Acc-X 1200	N	F0	F1	F2
a	15-17	19-21	14-16	12-13
b	13-14	9-10	9-10	11-13
c	17-18	22-24	14-16	19-21
d	17-19	18-20	11-12	16-18

Table 1 Acc-X의 1200RPM의 Decision Matrix의 예

위의 Table 1에 보면 정해진 범주 내에서 sample data와 비교해서 센서의 위치와 정상상태 비정상상태를 구분한다. 이를 위해서 본 연구에서는 decision-matrix를 이용하여 그 Sample data를 비교함으로써 decision matrix의 셀에 유사한 값을 가지면 1을 그렇지 않으면 0으로 weighting factor를 부여하게 되며 이러한 값을 모두 더함으로써 그 데이터가 어떤 상태에서 추출되었는지에 대한 진단이 가능하다.

### 5. 적용

Sample data를 실제로 적용하여 Decision Matrix를 다음과 같이 구했다.

sample	N	F0	F1	F2
a	1	0	0	0
b	1	0	0	0
c	0	0	0	0
d	1	0	0	0
합계	3	0	0	0

Table 2 Acc-X의 1200RPM의 Sample data값

table 2는 table 1의 reference data값에 대한 Acc-X의 1200 RPM sample data값을 서로비교한 decision matrix data를 보여준다. 여기에서 sample data나 reference data를 비교한 weighting factor를 보면 그 상태가 정상이 임을 알게된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 저널 베어링의 이상상태 진단에 통계적 분류를 이용하였다. 실험장치로부터 AE 센서와 Acc를 통하여 받은 데이터의 평균값과 표준편차를 구한다. 이것을 통계적 알고리즘을 이용하여 패턴분류를 수행하고, 최적의 운전조건과 센서의 위치를 판별하여 전처리기에서 처리된 데이터를 이용하여 진단법칙을 만들었다.

이는 한 가지의 이상상태에 대한 실험 데이터를 이용하여 진단법칙을 작성했기 때문이며, 여러 가지의 복잡한 이상상태에서 실험 데이터를 검출했을 경우, 더욱 나은 예측을 예상할 수 있을 것이다. 완벽하게 프로그램으로 시연되지 못한 상태이므로 앞으로 프로그램처리를 통한 데이터의 분석을 통해서 좀더 나은 자료의 분석을 얻을 수 있으리라 생각된다.

### 참고문헌

- (1) Young-jin Kim, 1997, "A Framework for On-Line Diagnostic Expert System with Intelligent Sensor Validation", KSME journal, vol 9, No.1, Mar.
- (2) Robert Schalkoff " Pattern Recognition "1989 John Wiley & Sons, Inc
- (3) 신경용, 유송민 "저어널 베어링을 이용한 회전축의 감시시스템에 관한 연구"