

저어널 베어링으로 지지된 회전축의 이상상태 진단을 위한 진단전문가 시스템의 개발

유송민[†] · 김영진 · 박상신*

경희대학교 기계산업시스템 공학부

*영남대학교 기계공학부

Development of Diagnostic Expert System for Rotating Machinery with Journal Bearing

Songmin Yoo[†], Young-Jin Kim and Sang-Shin Park*

College of Mechanical and Industrial System Engineering, Kyung Hee Univ., Suwon, Korea

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

Abstract – A rotating axis diagnostic system supported with journal bearing has been established that has been widely used in the industry. In order to measure the most sensitive signals that would be generated in the abnormal operation, sensors which measure AE(acoustic emission), gap and acceleration have been attached at the various location on the experimental apparatus. Data were obtained in the steady state operational condition of the system which was verified through the empirical measurement. Notable discrepancies were observed in RMS acceleration signal which could be utilized to predict the undesirable operational condition of the system.

Key words – journal bearing, diagnostics, rotor system setup, signal processing, decision matrix.

1. 서 론

저어널 베어링을 이용한 회전축은 볼베어링을 이용한 회전축과 함께 대부분의 회전축의 근간을 이루고 있다. 이러한 저어널 베어링을 이용한 예로는 자동차 엔진 베어링, 수력 발전소, 화력발전소의 터빈 베어링, 핵 발전소의 터빈 베어링, 공작기계 주축 등 다양하다. 따라서 이러한 저어널 베어링으로 지지된 회전축의 이상을 진단할 수 있는 데이터베이스의 구축과 진단을 위한 추론법칙의 확립은 필수적이라 할 수 있다. 이러한 추론의 법칙을 확립하고, 실제기계가 작동중에 컴퓨터에 의한 이상유무의 판단 및 작동정지, 이상상태의 출력등을 자동화시킨 것을 진단 전문가 시스템이라 한다 [1-2]. 따라서 본 연구에서는 저어널 베어링으로 지지된

회전축의 이상을 베어링의 표면의 원주방향 스크래치, 베어링의 표면의 축방향 스크래치, 베어링의 찌그러짐(Lobe 형상), 베어링의 축방향 휨, 축의 휨, 축의 스크래치베어링등으로 나누어서, 각각의 경우에 나오는 회전계적, 열발생, 소음, 진동의 신호를 측정하고, 정상상태에서의 신호들과 비교 분석을 통해 이상상태의 신호들을 추출하여 데이터 베이스를 구축하고자 한다. 한편, 이러한 데이터 베이스 구축과 병행하여, 동적인 센서에서 나오는 신호의 분포를 통계적으로 처리하는 프리프로세서의 개발과 불확실성이 내재된 정보에 기초하여 시스템에 대한 판단을 하는 통계적인 추론방법을 개발하여 실제 회전축의 이상을 진단하는 전문가 시스템을 개발하고자 한다[3].

이러한 진단 전문가 시스템은 지하에서 작동하는 펌프나, 우주 공간에서 작동하는 회전축과 같은 극한의 상황에서 원거리에서 이상유무를 판단할 수 있는 시스

[†]주저자 · 책임저자 : smyoo@khu.ac.kr

템 개발의 기초가 될 수 있다. 또한 나아가 수력, 화력 발전소나 핵발전소 등과 같이 대형의 회전축의 이상이 생겼을 경우의 경제적 손실은 기하학적이라 볼 수 있는데 이러한 이상이 생겼을 때, 이상 진단을 하여 보정을 제시할 수 있는 시스템 개발의 초석이 될 수 있다. 이 진단 시스템은 회전축에 국한되지 않고, 선반이나 밀링등의 가공중의 톨의 이상 진단, 반도체 가공공정, 대형의 화학 공장의 이상진단 등의 여러 분야에 응용되어 시스템의 보호를 통한 경제적 손실을 막을 수 있는 기초가 된다고 생각된다[5].

회전기계에 사용되는 베어링으로는 크게 구름베어링과 미끄럼 베어링의 두가지로 나눌 수 있는데 특히 고속, 고 부하의 조건에서는 미끄럼 베어링에 속하는 저어널 베어링의 사용이 요구되며 그 역할이나 중요도가 더 커지고 있다. 이 저어널 베어링은 특수한 경우를 제외하고는 대부분 유체윤활의 환경에 있으며 구름 베어링에 비해 이의 관리 및 보수가 다소 쉽지 않은 점도 있다[4].

베어링이나 회전축 손상의 근본 원인에 관계되는 마찰 및 마모에 대한 발생 기구 및 그 특성에 대해서는 이론 및 실험을 통한 많은 연구가 발표되어 있으며 현재도 계속 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들을 규명하는 도구중의 하나로서 음향방출(Accoustic Emission: AE)기술을 들 수 있는데 이를 이용한 마찰 마모 발생기구 해석에 관한 것은 최근에 여러 편의 논문을 통하여 발표되고 있다. 대부분 이들 발생 메커니즘과 AE의 관계에 대해 마모 실험을 통해 그 상관 관계를 입증하고 있으며 매우 효과적인 도구라고 평하고 있는 실정이다[8]. 그러나 이들 연구들은 대부분 편이나 디스크 형태의 시편에 의한 마모 실험으로부터 그 결과를 얻고 있으며 실제 베어링 시스템에 대한 결과들은 매우 적은 편이다. 본 논문에서는 실제 저어널베어링으로 지지된 실험용 회전축을 설계 제작하여 다양한 작동 환경에서 운전에 관련된 데이터를 추출하는 과정과 이를 통계적 기법에 적용하여 이상상태의 유무 및 이상의 종류를 파악하는 진단 기법을 소개 하고자 한다.

2. 실험장치제작

2-1. 실험장치설계 및 제작

저어널 베어링은 볼 또는 롤러 베어링과는 달리 전동체가 없이 베어링과 축사이의 유막 압력에 의해서 축의 하중을 지지하는 베어링의 형태이다. 저어널 베

어링은 외부에서 가압한 유체가 베어링 틈새내로 강제 주입이 되는 정압베어링과 외부에서 가압없이 축과 베어링사이의 상대운동에 의해서 압력이 발생하는 동압 베어링으로 구분이 된다. 정압베어링은 공작기계등의 고강성용 주축의 지지베어링으로 사용이 되지만 속도의 한계가 있다. 동압베어링은 하중지지용량과 강성등은 상대적으로 작지만 고속 회전을 할 수 있다는 장점이 있어 발전기 터빈용 베어링, 비행기 터빈용 베어링 등에 널리 사용이 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 고속의 저어널 베어링에 문제가 생겼을 때, 이상상태를 진단할 수 있는 기초 자료를 얻고자 동압베어링을 설계 제작하였다.

저어널 베어링의 설계시에 고려했던 사항들을 정리해보면, 우선 진단을 위해서는 이상상태를 만들어서 정상상태와의 비교 학습을 시켜야 하므로 조립과 분해를 자주해야 했기에 다루기 쉽도록 무게를 줄여 작게 설계하는데 주안점을 두었다. 그리고 두 번째로는 베어링의 이상상태가 있어도 일단은 회전할 수 있도록 베어링의 틈새를 크게 하여야 했다. 또한 모터의 진동에 관한 영향을 줄이기 위한 커플링을 사용하여야 했다. 또한 동압 저어널 베어링은 베어링의 반경도가 기름에 잠기도록 하는 것이 좋지만 센서의 부착등을 고려하여 외부에서 기름을 흘려주는 방식으로 설계하여야 했기에 기름 급유구가 필요했다. 또한 작용 기름이 베어링에서 빠져 나온후 다시 모여 재급유를 할 수 있도록 오일 홈을 바닥판에 만들어야 했다. 위와 같은 사항을 고려해서 다음의 절차에 따라 설계하였다. 우선 축직경은 $\phi 30$ 으로 정하였다. 그리고 축의 전체길이는 센서의 부착등을 고려해서 285 mm로 하였다. 그렇게 되면 축의 무게는 재료 SC45의 밀도 $\gamma=7.85 \times 10^6 \text{ kg/mm}^3$ 로 보고, 축직경을 d 라하면 질량을 계산할 수 있다.

$$W = \gamma \frac{\pi d^2}{4} L = 7.85 \times 10^6 \times \frac{\pi \cdot 30^2}{4} \times 285 = 1.58 \text{ kg} \quad (1)$$

이때 한 개의 베어링은 0.79 kg의 하중을 받게 된다. 그런데 커플링이 달려야 하므로 그 무게를 감안하여 0.85 kg의 하중이 작용하는 베어링을 설계하여야 한다. 베어링의 설계시에는 베어링 설계 데이터북을 이용하였다. 저어널 베어링을 설계를 위해서는 우선 무차원수인 Sommerfeld 수를 계산하여야 한다. Sommerfeld 수는 다음식과 같이 정의 된다.

$$S = \frac{\eta N}{P} \left(\frac{r}{C} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 η 는 점도, P 는 단위면적당 하중으로 $P=W/D \cdot L$ =하중/직경×베어링폭 이고, N 은 초당 회전수이고, C 는 베어링 틈새, r 은 베어링 반경이다. L/D 를 직경대비 베어링길이라 하였을 때, 보통 1을 사용하고, $L/D=1$ 인 경우에 최소유막이 $h_0/C=0.5$ 로 하였을 때, 저어널 베어링 데이터북의 자료에서 Sommerfeld 수는 0.18이 된다. 사용오일은 $\eta=21 \text{ cP}$ 라 하였을 때, 최소 회전수 $N_{\min}=500 \text{ rpm}$ 으로 보았을 때,

$$N = 500/60 = 8.33 \text{ rps}$$

$$\eta = 15 \times 10^{-7} \times 10^7 = 1.53 \times 10^{-7} \text{ kgf} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$$

$$P = \frac{0.85 \times 9.807 \text{ kgf}}{3 \times 3 \text{ mm}^2} = 0.93 \text{ kgf}/\text{cm}^2$$

$$0.18 = \frac{1.53 \times 10^{-7} \times 8.33 \left(\frac{r}{C}\right)^2}{0.93} \quad (3)$$

반경은 15 mm 이므로 틈새는 41 μm 이하이면 언제나 하중을 지지할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 직경 30, 베어링 길이부분 30에 라운딩을 고려하여 베어링전체 길이를 40으로 정하였고, 베어링의 틈새는 35 μm 로 정하였다. 이러한 설계를 기초로 하여 베어링 진단시험기의 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. ①은 회전축으로서 직경 $\phi 30$ 에 길이 285인 회전축으로 열처리와 연마를 하도록 하였으며 축의 한쪽 끝은 커플링이 연결될 수 있도록 설계하였다. ②는 베어링용 하우징으로 위쪽에 오일 급유구가 설치되어 있고, 베어링 부품인 ③과는 헐거운 끼워맞춤을 할 수 있도록 하였다. 또한 바닥판인 ⑤번에 고정 할 수 있도록 구멍을 가지고 있다. ④은 베어링으로서 내경에 축과의 틈새

는 35 μm 를 가지고 있도록 연마하였고, ④번에 의해서 하우징과 고정이 될 수 있도록 하였다.

바닥판에는 오일의 배출홈을 베어링 주변에 사각으로 만들고 한쪽으로 흘러나갈 수 있는 배출구를 만들었다. 상부에 하우징의 오일 급유구와 연결되는 한 개의 오일 구멍이 설치되었고, 오일의 충분한 급유를 위하여 원주방향으로 홈을 만들었다. 또한 조립공차를 고려하여 직각도를 0.003으로 하였고, 진원도도 0.003으로 제한하였다.

2-2. 실험방법

저어널베어링의 이상진단 전문가 시스템을 구축하기 위한 베어링 실험장치를 만들었다. 이 실험장치는 다음의 사진에 나와있다(Fig. 2). 여기에는 축과 저어널 베어링, 구동 모터, 커플링 그리고 오일 공급을 위한 저장 박스 및 관 그리고 축의 회전 컨트롤러 박스가

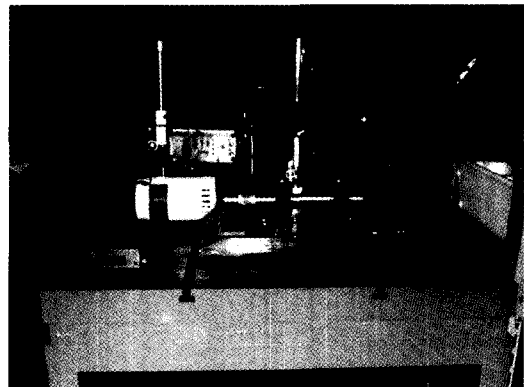


Fig. 2. Experimental apparatus.

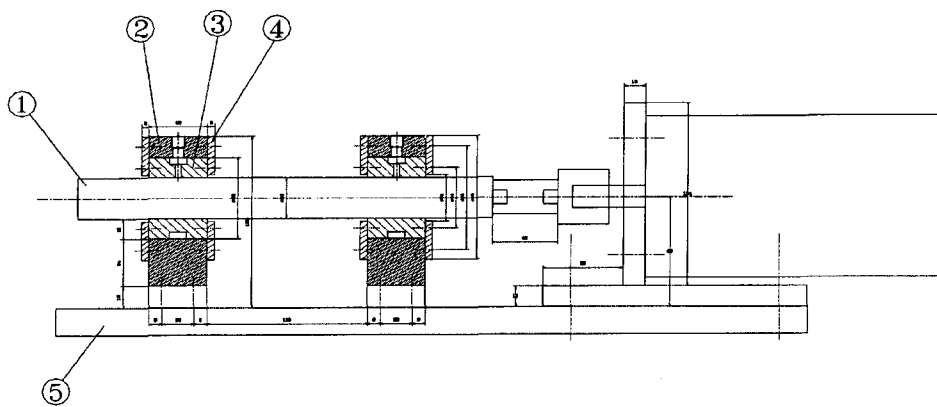


Fig. 1. Bearing system diagram.

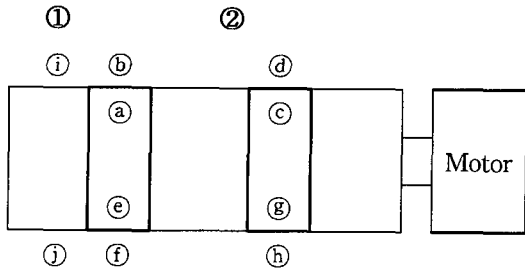


Fig. 3. Sensor disposition in the system ((b), (d), (f), (h) = Side top; ① and ② are the bottom of (b) and (f)).

보인다. 이 장치를 이용하여 저어널 베어링으로 지지된 축의 정상상태에서의 신호를 추출하였다. 이를 위하여 위의 실험장치에 신호를 추출하기 위한 센서가 부착되어 있고 이것은 DAS로 사용되는 PC에 연결되어 신호를 추출한다.

이 데이터를 수집하는 센서는 위의 Fig. 2상에 시스템에 부착되며 이것을 개략적으로 표시하면 다음과 같다(Fig. 3).

2-3. 센서

진동 신호의 획득 방법에는 가속도 센서와 AE 센서를 사용하는 경우와 비접촉식 Gap(근접) 센서를 이용하는 경우가 있다. 그러나 가속도, AE 센서는 부착이 용이하다는 장점이 있으나 센서의 부착이 베어링의 하우징 바깥 부분에 이루어지게 되므로 저어널 베어링에서 발생하는 진동 신호가 베어링과 하우징을 통해 전달되면서 감쇄되는 경향이 있으므로 베어링 초기의 작은 결함을 검출하기에는 부적당하다. 이에 반해 Gap 센서는 베어링 외륜에 직접 설치함으로써 이러한 문제점을 보완할 수 있다[8].

2-4. 데이터처리

본 연구에 사용된 시스템은 입력부, 증폭부, 신호처리부로 구성되어 있다. Fig. 4는 데이터 흐름도이다. 입력부는 AE센서, 가속도 센서, Gap센서 등으로 이루어져 있다. 증폭부는 AE센서는 프리앰프와 메인 앰프를 거쳐 증폭되며, 가속도 센서는 Charge앰프를 거쳐 증폭되며, Gap센서는 자체적으로 OP앰프를 설계하여 증폭부를 만들었다. 신호처리부는 입력부와 증폭부를 통과한 각종 센서로부터의 신호는 A/D converter에 의해 디지털화된다. 디지털화된 신호는 응용에 적합한 특징인자들을 추출한다.

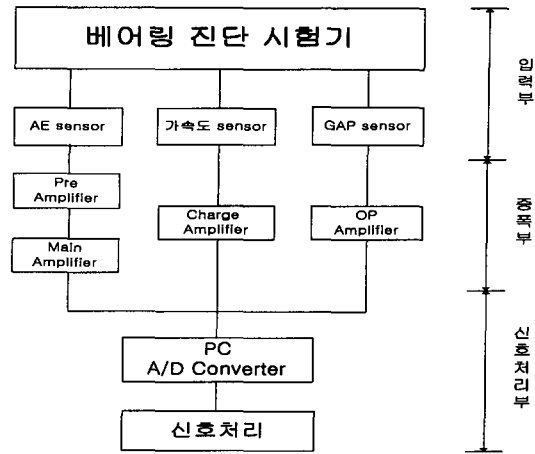


Fig. 4. Data flow chart.

2-5. 실험방법

2-5-1. 안정화 실험

시간에 따른 자료의 변화상태를 확인하기 위하여 정상상태의 베어링에서 모터의 속도와 센서의 위치를 고정시킨 후 처음 측정 시각으로부터 10분 간격으로 1시간 동안의 데이터를 취득하였다. 운전속도는 1200 rpm를 선정하였으며 AE와 가속도 센서의 자료로서 Fig. 3의 (a) 위치에서 측정한 결과를 분석하였으며 Gap 센서는 Fig. 3에서 ① 및 ② 위치에 고정하였다.

2-5-2. 정상, 이상베어링 데이터 취득 실험

정상상태의 베어링과 이상상태의 베어링을 각각 다른 모터 회전수와 센서의 위치를 설정하여 데이터를 취득하였다. 정상상태의 운전시험의 경우에는 (a)와 (c) 지점의 하우징에 모두 정상베어링을 설치하였으며 이상상태의 경우에 (a)지점에 하우징에는 비정상상태의 베어링을 설치하였다. (c)지점의 하우징에는 정상베어링을 설치하였다.

운전조건으로 모터의 회전속도를 1200에서 3600 rpm까지 600 rpm 단위로 설정하였다. 위의 두 실험 모두 센서와 증폭기를 통과한 신호는 A/D board(DT-2839)를 통하여 ASCII 형태로 저장되며 RMS 값으로 변환되어 비교 분석된다.

3. 통계적 진단행렬 및 적용 결과

3-1. 통계적 처리

회전 기계에 있어서 베어링에 이상이 있을 때 발생하는 AE 또는 다른 센서의 신호 형태는 연속형이며

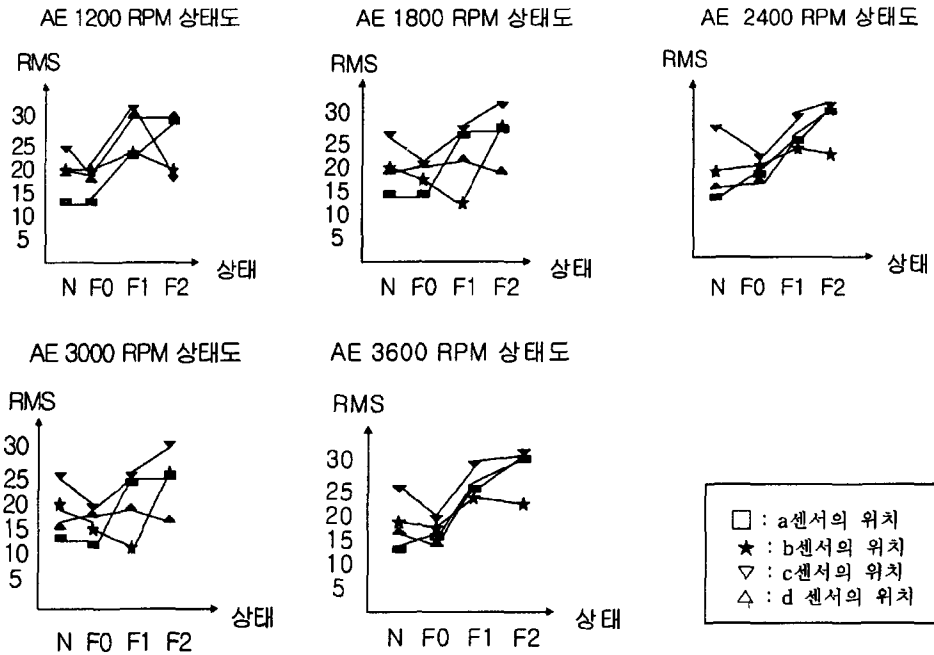


Fig. 5. AE RMS in each status.

연속형 신호를 해석하는 방법으로서는 신호의 에너지 양을 측정하는 것이 적당하다. 이 에너지를 편리하게 구하기 위하여 RMS(Root Mean Square) 수치로 환산한다.

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

$$RMS = [1/\Delta T \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt]^{1/2} \tag{4}$$

이때 ΔT , $V(t)$ 는 각각 측정구간시간 및 신호함수이다. 또한 윗식으로부터 AE 신호의 에너지율은 다음과 같다.

$$dE/dt \propto (RMS)^2 \tag{5}$$

즉, AE신호의 RMS값은 AE신호의 에너지 측정에 사용될 수 있다.

AE의 경우에는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 RPM의 증가에 따른 변화가 RMS값에 무관하다는 것을 볼 수 있으며 상태별 즉 N, F₀, F₁, F₂와 위치별(a, b, c, d) 센서의 위치로 차이가 난다는 것을 볼 수 있다. Fig. 6에서 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 볼 수 있다. 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.

3-2. 통계적 방법을 이용한 진단결과

Table 1은 1800RPM인 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.

Table 1에서 나타나는 바와 같이 정해진 범주 내에서 sample data와 비교해서 센서의 위치와 정상상태 비정상상태를 구분한다. 이를 위해서 본 연구에서는 decision-matrix를 이용하여 그 Sample data를 비교함으로써 decision matrix의 셀과 유사한 값을 가지면 1을 그렇지 않으면 0으로 가중치(weighting factor)를 부여하게 되며 이러한 값을 모두 더함으로써 그 데이터가 어떤 상태에서 추출되었는지에 대한 진단이 가능

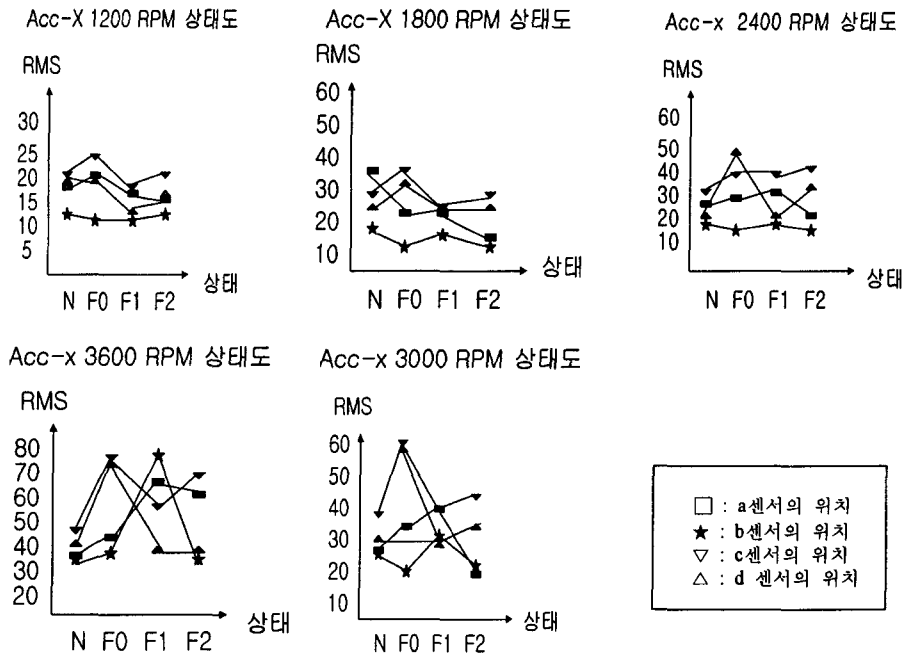


Fig. 6. Acc_X RMS in each status 1998. 7. 10. 실험 보고서.

Table 1. Decision matrix table for Acc-X at 1800 rpm

| Condition | N | F0 | F1 | F2 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| ① | 36-37 | 22-23 | 24-26 | 19-21 |
| ② | 17-19 | 12-14 | 14-16 | 15-17 |
| ③ | 27-29 | 36-38 | 20-23 | 26-28 |
| ④ | 24-26 | 29-31 | 18-21 | 21-23 |

Table 2. Decision matrix of Acc-X at 1800 rpm

| Condition | N | F0 | F1 | F2 |
|-----------|---|----|----|----|
| ① | 0 | 0 | 1 | 0 |
| ② | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ③ | 0 | 0 | 1 | 0 |
| ④ | 0 | 0 | | 0 |
| Sum | 1 | 0 | 4 | 1 |

하다. Sample data를 실제로 적용시킨 Decision Matrix는 다음의 Table 2와 같다.

Table 2는 Table 1의 reference data값에 대한 Acc-X의 1800 RPM sample data값을 서로비교한 decision matrix data를 보여준다. 여기에서 sample data나 reference data를 비교한 weighting factor를 보면 그 상

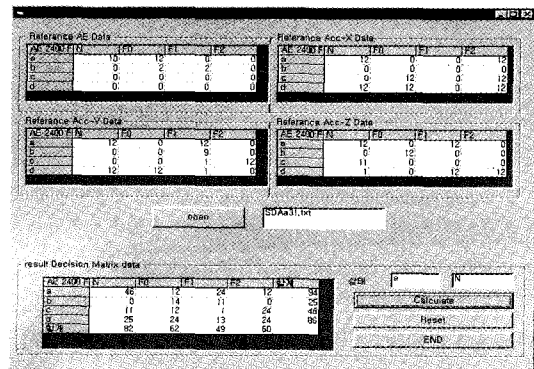


Fig. 7. Decision matrix at 2400 rpm.

태가 비정상 F1(비정상 상태 축 방향 깊게 판 베어링)임을 알게 된다. Sample data를 실제로 적용하여 Decision Matrix를 구하는 프로그램의 수행을 Fig. 7에 표시하였다[10].

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 통계적 처리를 통해서 저어널 베어링의 안정상태에 대해서 진단을 수행하였다. 그 결론은 다음과 같다.

- 저어널 베어링으로 지지된 회전축시험시스템을 설계 및 제작하였다. 이 장치에는 시스템의 상태를 파악하기 위한 AE센서, GAP 센서, 그리고 ACC 센서가 부착되어 있다.

- 이 장치로부터 회전축의 이상상태와 정상상태의 실험데이터를 추출하였다. 이상상태는 각각 F_0 : (비정상 상태 축방향 얇게 판 베어링), F_1 : (비정상 상태 축방향 깊게 판 베어링), F_2 : (비정상 상태 원주방향 판 베어링) 등으로 만들어져 구해진다.

- 시스템 상태 검증을 위한 전처리기를 통하여 실험데이터의 통계적 특성을 파악하였다. 이를 통하여 진단을 수행하는 진단 행렬(Decision Matrix)을 개발하였고 검증하였다. 저어널 베어링으로 지지된 축의 이상신호는 시스템의 특성상 필터링되는 경향이 있었다.

- 위의 진단을 수행하는 프로그램을 windows 용으로 개발하였다.

본 연구에서는 시스템의 상태를 진단하는데 센서 데이터가 갖는 통계적 특성을 이용하였다. 그러나 이상상태가 하나의 원인으로 부터 발생하는 것이 아니고 다양한 원인이 복합되어 발생한다는 측면에서 그 비선형성을 파악할 수 있는 기법이 필요하게 된다. 즉 비선형 데이터를 처리하는데 사용되는 신경망 이론이나 이를 진단하는데 사용되는 퍼지논리 등이 그 대표적인 기법이라 할 것이다. 향후연구에서는 비선형적 기법을 중점적으로 적용하는 것이 요구된다[6-7, 9].

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 '98 과학기술기초 중

점연구 지원과제(1998-018-E00137)로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Milne, R., 1987, "Strategies for Diagnosis," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMB-17, No. 3, May/June.
2. Agogino, A.M., Srinivas, S. and Schneider, K.M., 1988, "Multiple Sensor Expert System for Diagnostic Reasoning, Monitoring and Control of Mechanical Systems," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 2, No. 1.
3. 김영진 1994, "진단 전문가 시스템의 개발: 연산적 센서 검증," 기계학회논문집 제18권, 제2호.
4. Alexander, G.M., Greutzer, F.L. and Kangas, L.J. "Turbine Engine Diagnosis Artificial Network (TEDANN)," Pacific Northwest National Laboratory Technical Brief, 1994.
5. Kusiak, A. Intelligent manufacturing systems, Prentice Hall, 1990.
6. Grossberg, S. "Nonlinear neural network; principles, mechanisms and architectures," Neural Networks, Vol. 1, pp. 17-61.
7. Masory, O. "Monitoring machining processes using multi-sensor reading fused by artificial neural network," J. Mater. Processing Technol. Vol. 28, pp. 231-240, 1991.
8. Divakaruni, S.M. and Sheibel, J.R. "Development and Testing of turbine and generator expert monitoring systems," Industrial Applications of Knowledge-Based Diagnosis, Ed. G. Guida, 1992.
9. Timothy J. Ross, Fuzzy LOGIC WITH ENGINEERING APPLICATIONS, McGraw-Hill, Inc, 1995.
10. 이형배의 비주얼 베이식 6, 1999.