

Windows NT 기반의 회전 기계 진동 모니터링 시스템 개발

김창구*, 홍성호**, 기석호***, 기창두****

Development of Rotating Machine Vibration Condition Monitoring System based upon Windows NT

Chang Gu Kim*, Seong Ho Hong**, Suk Ho Kee***, Chang Doo Kee****

ABSTRACT

In this study, we developed rotating machine vibration condition monitoring system based upon Windows NT and DSP Board. Developed system includes signal analysis module, trend monitoring and simple diagnosis using threshold value. Trend analysis and report generation are offered with database management tool which was developed in MS-ACCESS environment. Post-processor, based upon Matlab, is developed for vibration signal analysis and fault detection using statistical pattern recognition scheme based upon Bayes discrimination rule and neural networks. Concerning to Bayes discrimination rule, the developed system contains the linear discrimination rule with common covariance matrices and the quadratic discrimination rule under different covariance matrices. Also the system contains k-nearest neighbor method to directly estimate a posterior probability of each class. The result of case studies with the data acquired from Pyung-tak LNG pump and experimental setup show that the system developed in this research is very effective and useful.

Key Words : Rotating Machinery (회전 기계), Machine Condition Monitoring (기계 상태 진단), Statistical Pattern Recognition(통계적 패턴인식), Artificial Neural Networks(인공 신경회로망), k-NN Classification (k-NN 분류법)

1. 서론

회전기계는 발전 플랜트 등의 산업 현장에서 가장 광범위하게 사용되고 중요한 역할을 하기 때문에 이상이 발생했을 때 즉각적인 고장원인의 추정과 그에 대한 대응책이 요구되어진다⁽¹⁾. 진동 신호 모니터링은 회전 기계의 상태를 해석하는 가장

유용한 수단이다. 회전기계는 시간이 지남에 따라 다양한 요인에 의해 진동이 발생하게 된다. 또한 이러한 과도한 진동은 소음을 유발하며 심한 경우에는 시스템의 일시 정지 또는 파급사고를 유발할 수 있다. 따라서 예방 보존 프로그램을 이용하면 회전체의 상태를 미리 판정하여 대책을 수립할 수 있고 기계 보수를 위한 시스템 정지 시기를 적절

* 전남대학교 기계공학과 대학원
** 한국가스공사 연구개발원
*** 서강정보대학교 소방안전관리과
**** 전남대학교 기계공학과

히 결정할 수 있다. 따라서 불시 정지 및 파급사고의 손실을 최대한 줄일 수 있다.

현재 현장에 설치된 많은 장비들은 진동 신호를 단순 지시하는 기능만을 가지고 있다. 이런 시스템은 진동 신호 데이터의 저장에 이루어지지 않아 진동 경향 분석과 통계적 데이터 관리가 불가능하며 이상 발생시 원인 분석이 곤란하여 관리자가 유지 보수하는데 많은 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 회전 기계에서 발생하는 진동 신호를 계속적으로 모니터링할 수 있는 시스템을 개발하였다. 취득된 진동 신호는 데이터베이스에 저장하여 향후 회전체 상태 진단을 위한 자료로 활용한다. DAO(Data Access Object)를 이용하여 진동 신호 데이터 베이스를 구축하였고 MS-ACCESS 기반의 진동 데이터베이스 관리 도구를 개발하였다. 개발된 진동 모니터링 시스템은 Preset Alarm 기능에 의한 간이 진단 기능이 있다. 또한 통계적 패턴 인식 기법(LDF,QDF 등)과 신경망(MLP)에 의한 고장 진단을 위한 Matlab 기반의 후처리 프로그램(Post Processor)을 개발하였다.

2. 진동 모니터링 시스템 구성

진동 모니터링 시스템의 사양은 Table. 1 과 같다. 운영체제는 사용자 인터페이스가 편리하고 시스템이 안정적인 Windows NT 를 선택하였다. 호스트 프로그램 개발에 사용된 개발툴은 Microsoft 사의 Visual C++ 6.0 Enterprise Version 을 이용하였고 신호 취득은 Innovative Integration 사의 ADC64 를 사용하였다. ADC 64 는 Analog Input Channel 이 64 개이고 120db/decade Tunable Anti-Alias Filter 와 Programmable Gain 을 가지고 있으며 TMS320 CPU 를 탑재한 DSP 보드이다. 가속도 센서에서 발생하는 진동 신호는 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 신호처리를 하므로 호스트 PC 에 부하를 주지 않는다.

DSP Board 에서 구동되는 프로그램(Target Application)은 Texas Instruments 사의 TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C Compiler 와 Innovative Integration 사에서 제공하는 Zuma Toolset 을 사용하여 개발하였다. DSP Board 와 호스트 PC 의 인터페이스 방식은 다음과 같다. 진단과 경향 모니터링에 관련된 데이터를 DSP Board 의 RAM 에 저장하고 인터럽트(Interrupt)를 발생시킨다. 원

도우 NT 를 기반으로 하는 호스트 프로그램에서 인터럽트를 받으면 DSP 의 Dual Port 메모리 영역에 접근해서 가져오는 방식으로 호스트 PC 와 DSP 보드가 인터페이스 되어 있다.

Table 1 System configuration of the vibration condition monitoring system

호스트 PC	삼성 Magic Station Pro M616T (MMX233MHz)
운영 체제	Microsoft Windows NT 4.0 Workstation version
개발 툴	MS Visual C++ 6.0 Enterprise Version TMS320 DSP Optimizing C Compiler
DSP Board	Innovative Integration ADC64CC
DSP Debugger	Innovative Integration Code Composer Ver 3.0

3. 고장 진단 알고리즘

개발된 시스템에서는 한계치 설정을 이용한 간이 고장 진단과 패턴인식 기법에 의한 고장 진단이 가능하다. 패턴인식 기법에 의한 결함 분류는 크게 통계적인 방법과 신경망을 이용한 방법으로 나눌 수 있다.

통계학에 기반을 둔 패턴 분류는 다시 모수적인 방법과 비모수적인 방법으로 나누어진다. 각 회전체 상태에 대한 확률밀도함수를 정확히 계산할 수 있다면 베이지 정리와 같은 모수적인 방법에 의하여 최적의 분류결과를 얻을 수 있다. 그러나 확률밀도 함수를 계산하기 어려운 경우에는 비모수적인 방법에 의해 고장 진단을 수행할 수 있다⁽²⁾. 또한 최근에는 신경회로망이 회전기계고장 진단에 활발히 응용되고 있다^(3,4).

개발된 회전기계 진동 모니터링 시스템은 통계적 방법중 모수적인 방법으로는 회전체 각 상태에 대한 정규성과 등분산성을 가정하는 선형판별 함수(LDF)와 정규성만을 가정하는 이차형 판별 함수(RDF)를 제공한다. 각 상태에 대한 임의의 분포를 가정하지 않는 비모수적인 방법에서는 k-근접 이웃 방법이 구현되었다. 근접 이웃 방법에서 거리는 유클리안 거리를 사용하였다. 또한 신경망

기법에서는 가장 많이 응용되고 있는 기법중의 하나인 다층 퍼셉트론(MLP)을 이용한 고장 진단을 수행한다. 신경망 학습 모델은 역전파 학습 모델을 이용하였다⁽⁵⁾.

3.1 통계적 패턴인식

통계적 패턴 인식은 베이지 판별 규칙에 이론적 기반을 두고 있으며 베이지 판별 규칙은 아래 식과 같다.

$$x \rightarrow \hat{\pi}, \text{ if } p(\hat{\pi}|x) = \max_{1 \leq j \leq g} p(\hat{\pi} = \pi_j|x) \quad (1)$$

즉 회전체 각 상태에 대한 사후 확률($p(\hat{\pi}|x)$)을 구해 가장 큰 확률을 갖는 부류로 회전체의 상태를 할당하는 방법이다. 여기서 상태 $\hat{\pi}$ 의 사후확률은 다음과 같은 베이지 정리에 의해 구할 수 있다.

$$p(\hat{\pi}|x) = \frac{p(x|\hat{\pi})P(\hat{\pi})}{\sum_{j=1}^g p(x|\hat{\pi} = \pi_j)P(\hat{\pi} = \pi_j)} \quad (2)$$

여기서 $P(\hat{\pi})$ 는 회전체 상태 $\hat{\pi}$ 의 사전 확률이다. 식(2)의 분모항은 생략될 수 있으므로 베이지 판별규칙은 상태의 조건부확률밀도함수 $p(x|\hat{\pi})$ 와 사전확률 $P(\hat{\pi})$ 의 추정방법에 의존하게 된다.

3.1.1 모수적인 방법

사전확률 $P(\pi_k)$ 는 일반적으로 훈련집합에서 각 상태의 크기 비율로 쉽게 추정될 수 있는 반면에 각 회전체 상태에 대한 분포에 대한 정보를 얻기는 매우 힘들다. 그래서 회전체 상태 π_k 에 대하여 평균 벡터 μ_k 와 공분산 행렬 Σ_k 를 갖는 다변량 정규 분포를 가정하여 유도된 판별함수를 가장 많이 사용하고 있다. 다변량 정규 분포식을 식(2)에 대입하면 다음과 같은 이차형 판별함수(Quadratic Discriminant Function : QDF)를 얻을 수 있다.

$$d_i(x) = \min_{1 \leq k \leq g} (x - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1} (x - \mu_k) + \ln |\Sigma_k| - 2 \ln P(\pi_k) \quad (3)$$

만약 각 상태에 대하여 공분산 행렬을 동일하다고 가정할 수 있다면 식(3)의 이차항은 생략 가능하여 다음과 같은 선형판별함수(Linear Discriminant Function : LDF)를 얻을 수 있다.

$$d_i(x) = \min_{1 \leq k \leq g} -2\mu_k^T \Sigma^{-1} x + \mu_k^T \Sigma^{-1} \mu_k - 2 \ln P(\pi_k) \quad (4)$$

이때 모수 평균 벡터 μ_i 와 공분산 행렬 Σ 에 대한 추정량으로 다음과 같은 최우추정량(MLE)을 많이 사용한다⁽²⁾.

3.1.2 비모수적인 방법(k-NN 분류 규칙)

지금까지는 각 상태의 분포를 가정하는 베이지 판별 규칙에 대해 설명하였다. 그러나 실제 문제에서는 각 상태의 분포를 가정할 수 없는 경우가 많다.

Fix와 Hodges가 제안한 k-최근접 이웃 분류 방법은 베이지 결정 규칙에서 사후 확률 $p(\pi_i|x)$ 를 바로 추정하는 방법이다.

$$x \rightarrow \pi_j, \text{ if } k_j = \max_{1 \leq i \leq g} k_i \quad (5)$$

여기서 k_i 는 패턴 x 와 근접한 k 개의 이웃중 상태 π_i 에 소속된 훈련 패턴의 개수이다. 이때 우리가 무한 훈련집합을 가정하면 k_i/k 는 상태 π_i 의 사후확률 $p(\pi_i|x)$ 의 불편추정량이 된다.

4. 모니터링 시스템

본 시스템의 구성은 아래 Fig. 1과 같다. 진동 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 모니터링할 수 있고 ACCESS를 이용하여 개발한 진동 경향 분석 도구를 이용하여 진동 경향 파악이 가능하다. 설정된 한계치를 이용한 PRESET ALARM 기능이 있고 MATLAB 환경에서 개발된 후처리 소프트웨어를 이용하여 패턴인식 기법에 의한 고장 진단 수행이 가능하다. MATLAB 기반의 후처리 프로그램과 MS-ACCESS 기반의 Database 관리 도구는 OFF-LINE으로 작동한다.

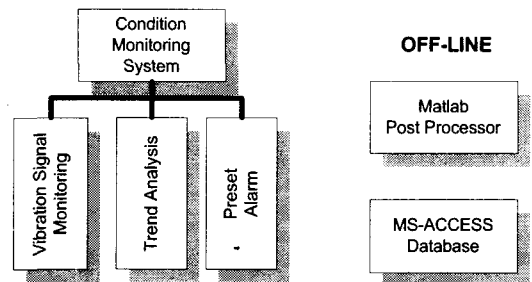


Fig. 1 Schematic diagram of monitoring system

4.1 진동 신호 모니터링

본 시스템에서 제공하는 진동 신호 모니터링 기능은 아래 Fig. 2 과 같다. Fig. 3 은 모니터링 기능을 선택했을 때의 화면이다. 진동 신호를 시간 영역과 주파수 영역에서 모니터링 할 수 있고 오빗 선도를 제공한다. 오빗 선도를 이용해 축의 궤적을 볼 수 있고 회전체의 상태진단 수행도 가능하다. 스펙트럼 선도는 진동 신호를 주파수 분석한 그래프이다.

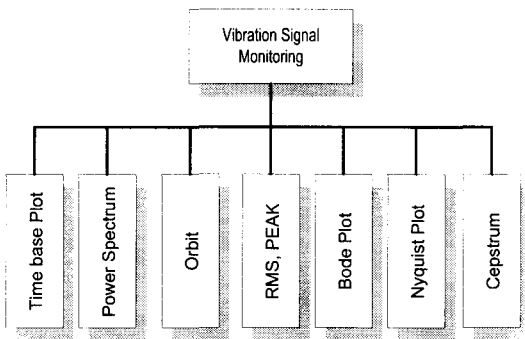


Fig. 2 Schematic diagram of signal analysis module

이상 진동에 따라 각기 고유한 주파수 특성을 보이므로 진단시 유용하게 사용한다. Fig. 3 의 ㉔영역은 취득된 신호의 RMS와 PEAK 값을 보여준다. 어느 Channel의 신호인지를 알 수 있도록 윈도우 캡션바에 기기명과 채널이 표시되어 있다. 좀 더 상세한 관찰을 위해 그래프 확대/축소 기능(㉑)을 제공한다. Fig. 4는 주파수 영역의 확대된 그래프를 보여주고 있다. 마우스를 이용하여 주의 깊게 보고자 하는 주파수 영역만을 설정하여 확대할 수 있다. 오른쪽 하단에는 특징 주파수의 크기가 기록되어 있고, 이 값은 간이 진단에 유용하게 활용될 수 있다.

4.2 경향 분석

경향 분석을 통해 장기간에 걸친 회전체의 상태 변화 추이를 알 수 있다(Fig. 5). 즉 회전체의 운전 상태 및 이상점을 미리 판정하여 대책을 수립함으로써 생산성 향상을 꾀할 수 있다. 경향 감시가 가능한 파라미터는 RMS, Peak, 0.5X, 1X, 1.5X, 2.0X, 2.5X, 3X, 그리고 베어링의 특징 주파수이다.

Time domain s signal

Frequency Spectrum

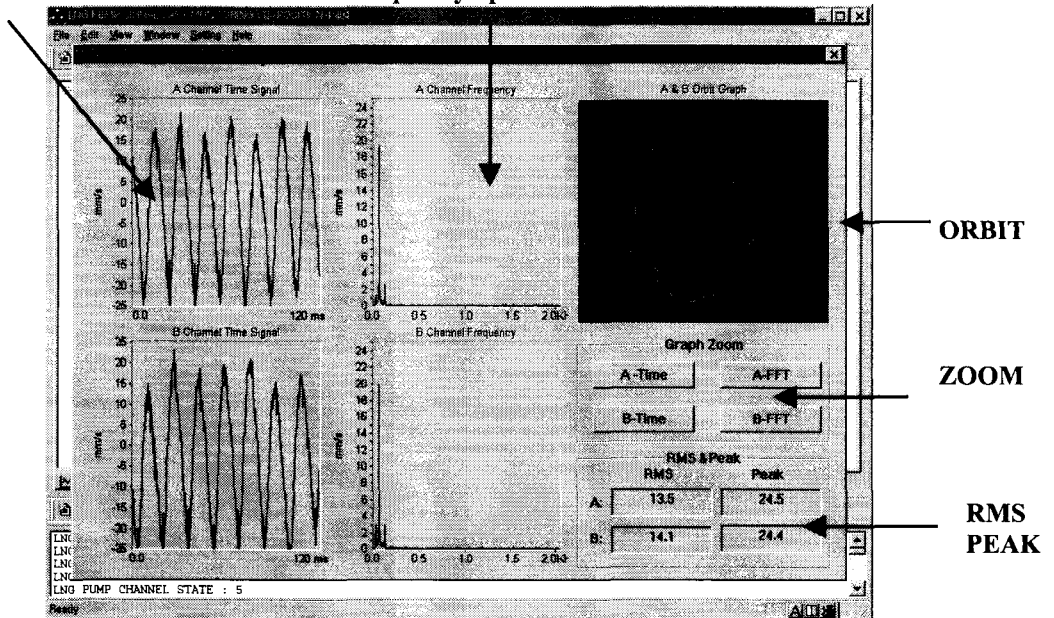


Fig. 3 Monitoring window of developed system

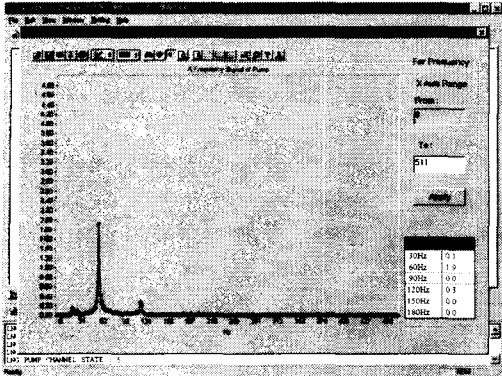


Fig. 4 Frequency spectrum zoom-in of vibration signal

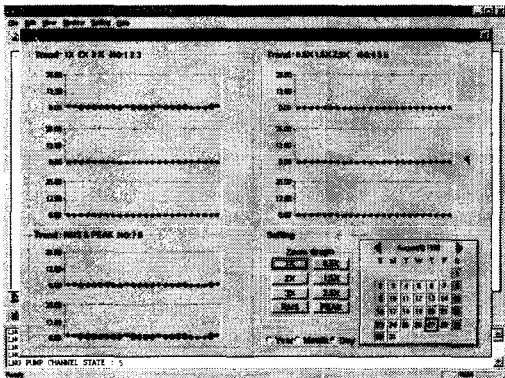


Fig. 5 Trend monitoring of the day

년, 월, 일간의 경향 분석이 가능하다.

4.3 한계치 설정 기능

한계치 설정 기능을 이용하여 회전체 진동의 한계치를 설정한 후 진동 신호 값이 한계치 보다 크면 경고 메시지를 주게 되어 있다. 본 시스템에서는 모니터링하는 모든 파라미터에 대한 한계치 설정이 가능하다. 아래 Fig. 6은 한계치 설정화면을 보여 주고 있다. Fig. 7은 한계치 설정을 위한 도움말 화면이다.

4.4 진동 신호 데이터베이스

진동 신호 데이터베이스는 순간 순간의 진동 경향을 PC에 저장한다. 저장된 데이터를 이용하여 경향 분석을 수행할 수 있고 고장 진단도 가능하다. 본 개발에서는 장기간의 진동 데이터베이스 관리를 위한 엔진으로 Microsoft사에서 개발한 Jet

DB Engine을 사용하였다. Jet DB Engine의 DAO 모델을 사용하였는데, DAO 모델은 관계형 데이터베이스 시스템의 구조를 모델화한 클래스의 집합이다.

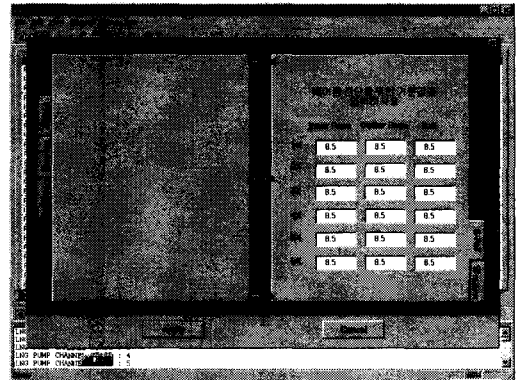


Fig. 6 Setup window for preset alarm

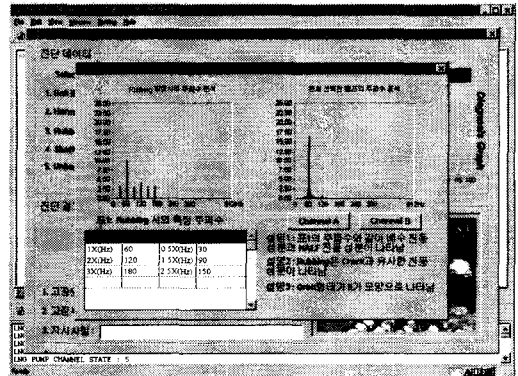


Fig. 7 Help window for simple diagnosis

Jet Database Engine을 이용하여 데이터베이스를 구축하였기 때문에 MS-ACCESS와 호환이 가능하다. ACCESS를 이용하여 진동 경향 관리를 위한 도구를 개발하였고 Fig. 8는 구축된 DB 관리 도구의 SQL 집합을 보여준다.

4.5 Post Processor(후처리 프로그램)

개발된 시스템은 Preset Alarm 기능에 의한 간이 진단 기능이 있다. 또한 Matlab 환경에서 개발한 후처리 프로그램을 이용하여 패턴 인식 기법에 의한 고장 진단과 진동 신호 분석이 가능하다.

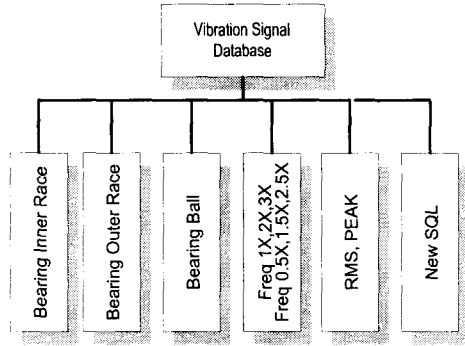


Fig. 8 SQL of Developed DB Tool

Fig. 9는 후처리 프로그램을 이용한 진동 신호 분석 예이다. 속도가 3600 RPM 인 러빙이 존재하는 실험장치에서 취득한 데이터의 주파수 분석 결과이다. 후처리 프로그램을 이용하여 데이터 베이스에 저장된 DB 파일을 로딩하여 파워 스펙트럼과 진동 응답 선도(보드 선도, 나이키스트 선도)와 캡스트럼 분석을 수행할 수 있다. 후처리 프로그램에서 지원하는 고장진단 알고리즘은 LDF, QDF, k-NN 그리고 신경회로망이다.

5. 모니터링 시스템 적용 사례

5.1 한국 가스공사 평택 LNG 인수 기지

한국가스공사 평택 LNG 인수기지에서는 LNG

펌프를 이용하여 LNG를 고압의 상태로 유지할 필요가 있다. 펌프에 설치된 가속도 센서를 통하여 취득된 진동 신호를 이용하여 펌프의 상태를 파악할 수 있다. 기존에 LNG 인수기지에는 LNG 펌프에 2개의 가속도 센서를 설치하고 현재 진동 신호의 RMS 값을 연속적으로 모니터링할 수 있는 설비(Bently Nevada 3300)가 도입되어 운영되고 있었다. 하지만 기존의 장비로는 진동 신호의 저장에 이루어지지 않아 장기간의 진동 경향 파악이 불가능 했다. 평택 인수기지에서는 펌프의 예방보존을 위해 전남대에서 개발한 진동 모니터링 시스템을 도입하였고 시험 운전하였다. 6개월동안의 진동 신호를 취득하고 저장하였다. DB 관리 도구에서 98년 10월 1일부터 12월 30일까지를 검색 기간으로 입력한 후 시간 영역 경향 보고서 작성 기능을 선택한 결과는 아래 Fig. 10과 같다. 본 시스템을 이용하여 3개월간의 RMS와 PEAK 값의 변화 추이를 확인해 볼 수 있다. Fig. 11는 주파수 영역의 변화 추이이다.

5.2 벤틀리 네바다 로터 키트에 적용

회전 기계가 비정상적으로 작동할 때 발생하는 현상을 벤틀리 네바다 로터 키트(Bently Nevada Rotor Kit)를 이용하여 인위적으로 만들어 주었다.

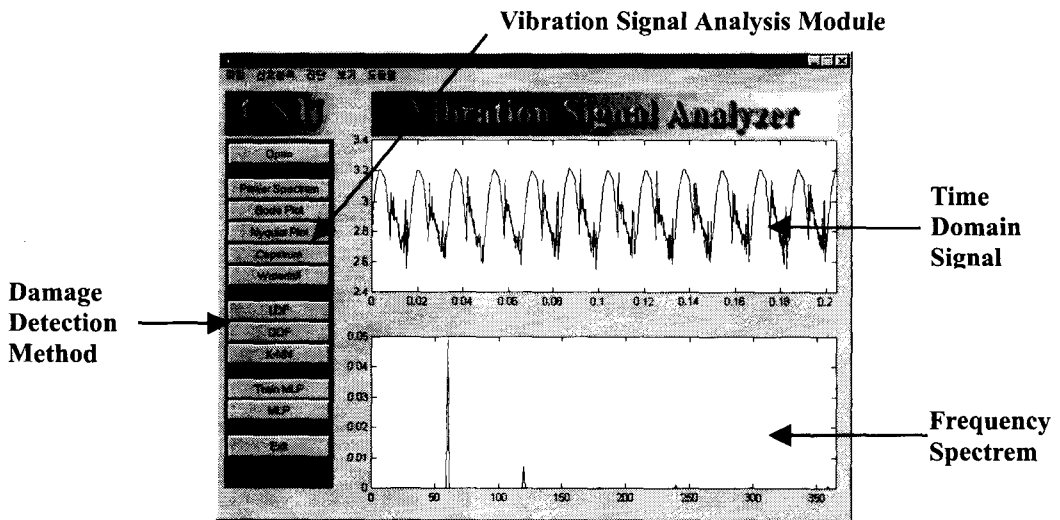


Fig. 9 Post processor based upon matlab for fault detection and vibration analysis

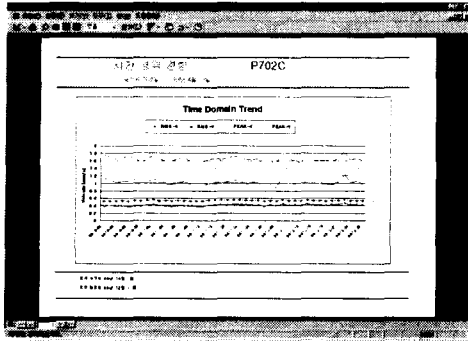


Fig. 10 Time domain trend report of a specific period

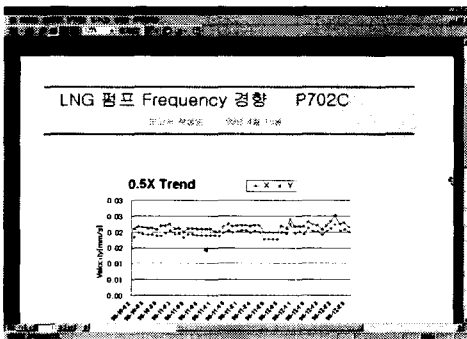


Fig. 11 Frequency domain trend report of a specific period

실험장치 구성은 Fig. 12 와 같다. 본 연구에서는 아래와 같은 4 가지 조건에 대하여 상태 분류를 시도하였다.

- ① 정상 상태
- ② 러빙만 발생하도록 한 상태
- ③ 불평형만 발생하도록 한 상태
- ④ 러빙과 불평형을 동시에 발생하도록 한 상태

각 상태별 실험 방법을 살펴 보면 아래와 같다. 불평형 상태는 축에 달려 있는 디스크의 구멍에 질량(0.2g, 0.8g, 1.2g)을 추가하고 진동신호를 취득하였다. 러빙 상태는 러빙 나사(Rub Screw)를 이용하여 하우징 부위에 있는 구멍에 러빙 나사를 돌려(러빙의 정도를 변화시켜가며) 신호를 취득하였다. 러빙과 불평형이 동시에 존재하는 상태는 ①과 ②의 두 가지 상태를 동시에 회전체에 만들어

주었다.

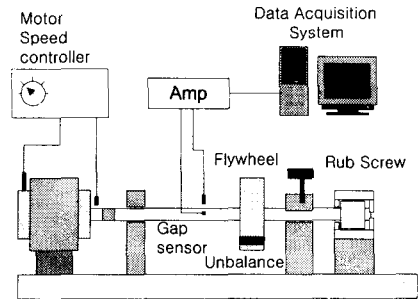


Fig. 12 Schematic diagram of experimental set up

수평 수직 진동을 측정하기 위하여 에디커런트 타입(Eddy Current Type)의 변위센서를 X, Y 축에 90°의 각도로 설치하였고 5KHz 로 신호를 샘플링 하였다.

신호는 3600RPM 에서 각 상태당 60000 개씩 진동 신호를 취득하였다. 각 상태별로 취득한 데이터 60000 개중 40000 개는 학습용으로 나머지 20000 개는 테스트 용으로 사용하였다.

패턴인식 기법에 의한 고장 진단 결과는 아래와 같았다.

Table 2 Recognition success rate

실험 방법	인식율
LDF	25%
QDF	87.5%
k-NN	93.4%
Neural Networks	96.1%

실험에 사용된 방법중 MLP 가 가장 높은 인식율을 보였다. 통계적 방법중에서는 k-NN 이 가장 높은 인식률을 보였다. k-NN 은 각 상태의 확률밀도함수에 대한 어떠한 가정도 하지 않기 때문에 사료 된다. LDF 와 QDF 는 낮은 인식률을 보였지만 각 회전체 상태의 사후 확률을 추정해 주는 장점을 가지고 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 회전체의 진동 신호를 측정하고 분석하며 고장진단을 수행할수 있는 시스템을

개발하였고 개발된 시스템을 로터키트와 한국 가스공사 LNG Pump 에 적용하여 유용성을 검증하였다. 개발된 시스템은 아래와 같은 기능을 가지고 있다.

- (1) 각종 선도를 통한 기계 상태의 분석 및 이상 진단 수행(Time base plot, spectrum, bode plot, waterfall and nyquist plot, etc)
- (2) 지속적으로 기계 상태를 모니터링하고 저장하는 데이터베이스 구축 및 진동 정보 가공용 DB 관리 도구 개발
- (3) Matlab 환경에서 작동하는 패턴인식 기법(모수적 인식 기법, 비모수적 인식기법, 신경망)에 의한 고장 진단

참고문헌

1. 서상윤, 임동수, 양보석, “자기 조직화도를 이용한 회전기계의 이상진동진단,” 한국소음진동공학회 1999 년도 추계학술대회논문집, pp. 411~416, 1999.
2. 김창구, 박광호, 기창두 “회전기계 고장 진단에 적용한 인공신경회로망과 통계적 패턴인식 기법의 비교 연구,” 한국정밀공학회지 제 16 권 제 12 호, pp. 119~125, 1999.
3. T. I. Liu and J. M. Mengel, "Intelligent monitoring of ball bearing conditions" Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 6(5), 419-431, 1992.
4. A. C. McCormick and Nandi A.K, "Classification of Rotating Machine Condition using Artificial Neural Networks" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C, Vol. 11 No. 6, pp. 439-450, 1997.
5. Chin-Teng Lin and C.S. George Lee, "Neural Fuzzy Systems," Prentice-Hall International Inc 1996.
6. C. K. Mechefske and J. Mathew, "Fault Detection and Diagnosis in Low Speed Rolling Element Bearings PART II: The Use of Nearest Neighbour Classification," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 6(4), 309-316, 1992.
7. 장우교, “회전기계의 이상진동진단 시스템에 관한 연구,” 부산수산대학교 대학원 석사 학위논문, 1996.
8. 배용채, 터빈이상 진동의 자동 진단 시스템에 관한 연구, 전남 대학교 대학원 박사학위논문, 1995.
9. 이안성, 홍성욱, 김호종, 이 현, “스팀터빈 발전기 자동 진단 시스템 개발,” 한국소음진동공학회지 제 5 권 제 4 호, pp. 543~554, 1995.
10. 양보석, 장우교, 임동수, 김호종, “회전기계의 이상진동 진단시스템의 개발,” 한국소음진동공학회지 제 6 권 제 3 호, pp. 325~331, 1996.