

LNG 펌프 고장 진단 시스템 개발

홍 성 호, 이 용 원, 황 원 걸*, 기 창 두*, 김 영 배*

한국가스공사 연구개발원, 전남대학교 기계공학과*
(1998년 11월 13일 접수, 1998년 12월 4일 채택)

Development of Diagnosis System for LNG Pump

S. H. Hong, Y. W. Lee, W. G. Hwang*, Ch. D. Ki*, Y. B. Kim*

R&D Center, Korea Gas Corporation

*Department of Mechanical Eng., Jun-Nam University

(Received 13 November 1998; Accepted 4 December 1998)

요 약

회전기계의 진동해석은 기계의 이상을 미리 판정하여 적절한 유지 보수를 수행하기 위한 지표로 활용이 가능하다. 현재 평택기지에 설치된 고장진단시스템은 LNG펌프의 진동수치가 위험수준에 도달시 기계적 결함부위 진단을 할 수 있다. 본 연구는 Windows NT환경에서 DSP보드를 사용한 자동진단시스템 개발에 대한 것이다. 펌프의 상태진단을 위해 2개의 가속도센서로부터의 속도신호를 해석하고 펌프의 상태에 대한 다양한 그래프를 보여주며 특정 진동값을 일정시간 간격마다 저장하여 펌프의 결함 발생시 운전자가 컴퓨터 모니터에서 전문가 시스템을 활용하여 자동으로 진단하고 경향을 감시함으로써 펌프의 상태를 점검할 수 있다.

Abstract - Vibration analysis of rotating machinery can give an indication of possible faults thus allowing maintenance before further damage occurs. Current predictive maintenance system installed in Pyung-tak has the ability to diagnose the mechanical problems within the LNG Pump when the vibration exceeds preset overall alarm levels. In this study, LNG pump auto-diagnosis system based upon Windows NT and DSP Board is developed. This system analysis velocity signal acquired from dual accelerometer input monitor system to diagnose pump condition. Many plots which display machine condition are shown and features of vibration are stored in every time. If the fault is found, the system diagnoses automatically using expert system and trend monitoring. Operator checks pump condition intuitively using personal computer monitor.

Key Words : LNG Pump, Vibration, Diagnosis, Power Spectrum, Data Access Object

1. 서 론

LNG 인수기에서는 LNG 펌프를 이용하여 LNG를 고압의 상태로 유지할 필요가 있다. 따라서 고압의 LNG 펌프는 안정적 가스 공급에 있어서 중요한 기기중의 하나라고 할 수 있다. 그러나 LNG 펌프는 고압, 고속으로 운전되는 대용량의 회전체로써 재질의 불균일성, 편심 등의 영향으로 진동 및 소음을 수반할 수밖에 없다. LNG 펌프는 중량을 지지하기 위하여 볼 베어링, 저널 베어링 또는 부쉬 등을 사용하는데, 시간이 지남에 따라 마모로 인하여 심한 진동을

발생하게 된다. 또한 이러한 과도한 진동은 심한 소음을 유발하며 심한 경우에 시스템의 불시정지 또는 파급사고를 유발할 수 있다. 따라서 예방 보전 프로그램을 이용하여, 회전체의 운전 상태 및 이상점을 미리 판정하여 대책을 수립함으로써 보수를 위한 시스템 정지 시기를 적절히 채택하여 불시정지 및 파급사고의 손실을 최대한 줄일 수 있다. 이러한 기계진단의 지표로는 기계진동을 통하여 LNG 펌프 상태에 대한 많은 정보를 얻을 수 있으므로 대부분 진동 신호가 이용된다. 즉, 일련의 진동 경향을 통하여 운전 상태 및 이상 결함의 진전 상태를 감시, 분석함

으로써 안전 운전을 기할 수 있다. 그러나 이에 필요한 데이터 수집, 신호 처리, 결함 탐지, 경향 분석 및 결함 부위의 판정은 이 분야의 전문가가 아니면 수행하기가 어렵다. 따라서 현장에서 진단 시스템을 비전문가들이 이용하는 데는 많은 어려움이 따른다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 LNG 펌프 운전 조건에 따른 각종 진동의 원인 및 진동 특성을 자동적으로 분석, 진단할 수 있는 LNG 펌프 이상 자동진단 시스템을 개발할 필요가 있다.

회전기계의 상태 진단에 가장 널리 사용되고 있는 진동 해석법은 국내 발전소, 가스 인수기지 등지에서 사용하고 있는 거의 모든 터빈 발전기, 급수 펌프, 팬 등의 이상 진단에 적용되고 있다(1),(5). 그러나 국내에서 주로 사용하고 있는 회전체 진동 감시 시스템은 회전체의 진동 상태를 감지하여 지시, 기록하며 진동경보치를 설정하여 결함에 의한 이상진동이 발생하였을 경우 경보를 발생하고 필요시 회전체를 정지하는 체계로 이루어져 있다. 이러한 시스템으로는 회전체 시스템의 이상진동 발생 여부는 알 수 있으나 진동의 원인별 분석은 불가능하다. 특히 LNG 기지에서 사용되는 LNG 펌프는 고압, 저온의 LNG를 공급하는 대형 회전체로써 운전 조건 및 결함 상태에 따라 각종 진동, 열적 변형, 마모 등이 발생하게 된다.

현재 LNG 인수기지에서는 LNG 펌프에 2개의 가속도 센서를 설치하고 연속적으로 모니터링할 수 있는 설비(Bently Nevada 3300)가 도입되어 운영되고 있지만 현재의 장비로는 펌프에서 발생하는 진동 신호를 단순히 지시하는 기능만 되어 있어 진동 신호 데이터의 기록 및 저장에 이루어지지 않아 데이터베이스 구성과 통계적 데이터 관리가 불가능하며 펌프의 이상 발생 시 원인 분석이 곤란하여 관리자가 유지 보수 및 이상 진단을 판단하는데 어려운 문제점을 갖고 있다. 따라서 LNG 펌프의 정상상태와 이상상태에서 발생하는 진동 특성을 분석, 파악하고, 진동경향을 데이터 관리함으로써 보수 시기를 결정하고, 이상 원인 및 위치 파악을 하는 과학적 진단 시스템 개발은 현재의 LNG 펌프 운영성을 극대화할 수 있다. 또한 이러한 진단 시스템 개발은 LNG 펌프의 고장을 미리 예측함으로써 돌발적인 운전 중단을 방지하여 기기의 신뢰성을 높이고 이상발생이 예상되는 기기만 보수함으로써 정기적인 보수에 따른 인력 및 비용 절감을 얻을 수 있다. 또한 본 연구에서 축적된 기술은 향후 인수 기지 해수 펌프, BOG Compressor 등 회전기계 설비 진단 개발에 활용이 가능하다고 할 수 있다.

2. 진단 시스템 구성

호스트 PC의 CPU는 MMX 233 이며 Data Access Object(DAO) 신호 데이터베이스 구축을 위해 고용량의 하드(4기가)를 탑재하였다.

운영체제는 사용자의 편리와 신뢰성을 확보하기 위해 Windows NT로 선택하였다. 호스트 프로그램 개발에 사용된 개발틀은 Microsoft사의 Visual C++ 5.0 Enterprise Version을 이용하였고 신호 취득은 Innovative Integration사의 ADC64를 사용하였다. ADC 64는 Analog Input Channel이 64개이고 120db/decade Tunable Anti-Alias Filter와 Programmable Gain을 가지고 있는 TMS320 CPU를 탑재한 DSP 보드이다. 진동 신호는 DSP보드에 입력되고 입력된 신호는 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 고속으로 신호처리를 하므로 호스트 PC에 부하를 주지 않는다. 따라서 A/D 전용 보드를 사용했을 경우 호스트 PC CPU 속도에 따른 한계를 벗어날 수 있다.

DSP보드에서 구동되는 프로그램(Target Application)은 Texas Instruments사의 TMS320 Floating-Point DSP Optimizing C Compiler와 Innovative Integration사에서 제공하는 Zuma Toolset을 사용하여 개발하였다. DSP 보드와 호스트 PC의 인터 페이스 방식은 다음과 같다. 진단과 경향 모니터링에 관련된 데이터를 DSP 보드의 RAM에 저장하고 인터럽트(Interrupt)를 발생시킨다. 윈도우 NT를 기반으로 하는 호스트 프로그램에서 인터럽트를 받으면 DSP에 접근해서 가져오는 방식으로 호스트 PC와 DSP가 인터페이스 되어 있다. 개발에 사용된 시스템 사양은 아래 Table 1.과 같다.

Table 1. System configuration

호스트 PC	삼성 Magic Station Pro-M616T (MMX233MHz)
운영 체제	Microsoft Windows NT 4.0 Workstation version
개발 틀	MS Visual C++5.0 Enterprise Version TMS320 DSP Optimizing C Compiler
DSP 보드	Innovative Intergration-ADC64CC
DSP Debugger	Innovative Integration-Code Composer Ver3.0

3. 고장 진단 시스템

본 시스템은 Windows NT를 기반으로 한 윈도우 환경에서 운용되므로 관리자가 쉽게 진단

시스템을 응용할 수 있다.

아래 Fig. 1은 본 시스템의 시작 화면을 나타내고 있다.

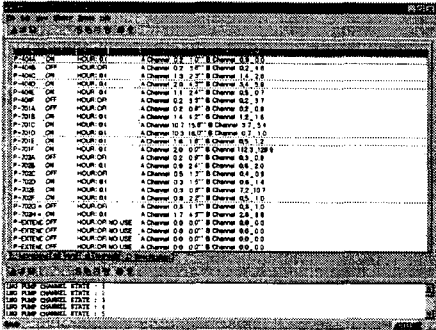


Fig 1. Starting window of the diagnosis system

본 시스템의 메뉴에는 파일, 에디트, 뷰, 설정, 도움말이 있고 중요한 기능인 모니터링, 경향분석, 진단, 세부사항을 위하여 4개의 단축 탭(왼쪽 하단)을 가지고 있다.

3.1 모니터링

본 시스템은 LNG 펌프의 진동 신호를 실시간으로 모니터링 할 수 있다. 모니터링 기능은 선택된 펌프에 대한 시간영역신호와 주파수 스펙트럼 그래프를 보여준다. 회전체에서 발생하는 진동 신호는 회전 기계의 상태를 결정하는 중요한 지표가 되므로 순간 순간 펌프의 상태를 관찰할 수 있다.

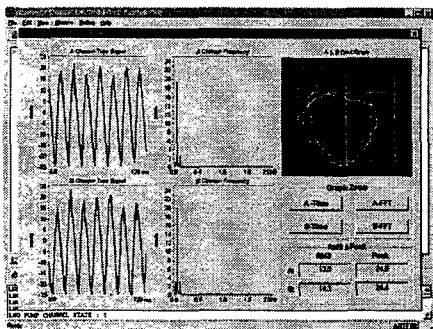


Fig 2. Vibration monitoring window of the diagnosis system

Fig. 2의 왼쪽은 시간영역의 신호를 보여주고 가운데의 스펙트럼 선도는 시간과형의 신호를 주파수 분석한 결과를 출력한다. 이상 진동에

따라 각기 고유한 주파수 특성을 보이므로 진단 시 매우 유용한 그래프이다. 우측 상단에 있는 오빗은 X축 Y축에 대한 진동 응답을 벡터적으로 합성한 것으로 축중심에 대한 실제적인 거동을 나타내는 그래프이다. 어느 펌프의 신호인지를 알 수 있도록 윈도우 캡션바에 펌프명과 채널이 표시되어 있다. 간이 진단 결과(RMS, PEAK)를 화면 우측 하단에 보여주고 있다. 좀더 상세한 관찰을 위해 그래프 확대/축소 기능을 사용한다. 아래 Fig.3, 4는 확대된 그래프를 보여주고 있다. 이 화면에서는 그래프의 저장과 불러오기가 가능하며 문서 편집을 위한 클립 보드 복사 기능이 있다. 그래프 스타일, 부분 확대, 그리드 등의 추가 기능이 있다. 마우스를 이용하여 주의깊게 보고자하는 주파수 영역만을 설정하여 확대할 수 있다. 오른쪽 하단에는 특징 주파수의 크기가 기록되어 있고, 이 값은 간이 진단에 유용하게 활용될 수 있다.

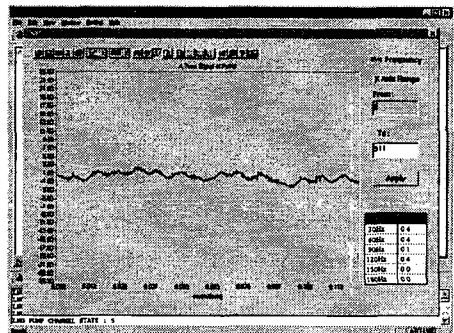


Fig 3. Time zoom-in of vibration signal

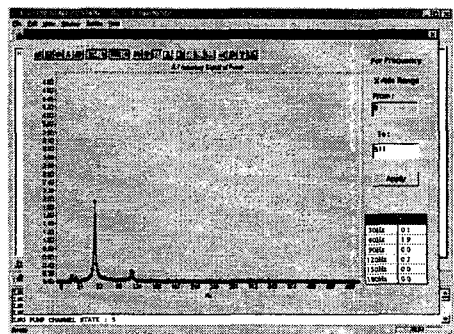


Fig 4. Frequency spectrum zoom-in of vibration signal

3.2 경향 감시

경향 감시는 입력되는 신호를 계속적으로 저장하고 장기간에 걸친 경향을 관찰하는데 목적

이 있다. 경향 감시가 가능한 파라미터는 RMS, Peak, 0.5X, 1X, 1.5X, 2.0X, 2.5X, 3X이다.

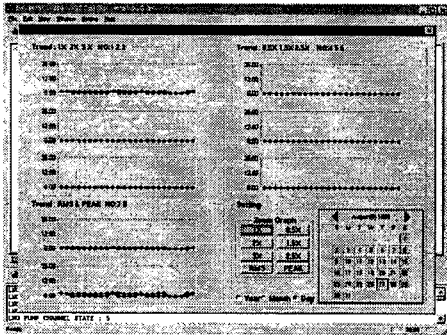


Fig 5. Trend monitoring of the day

경향 감시는 Fig.5와 같이 진동 신호 경향을 그래프로 볼 수 있게 하였다.

3.3 고장 진단

회전기계고장 진단법에는(6) 주로 진동의 overall 진폭 또는 주파수 성분을 이용하여 한계값과 비교하여 이상, 정상을 판별하는 진단법과 진동진폭의 변화율에 의한 이상 판별법, 이상진동들의 특징을 정리한 인과 행렬을 이용하는 방법, 결정목을 이용하는 방법, 진동벡터의 시간적 변화율을 이용하는 방법, 또는 크랙의 위치표정을 하기 위한 AE를 이용하는 방법등이 있다. 본 연구에서는 진동의 overall진폭 또는 주파수 성분을 한계값과 비교하여 이상, 정상을 판별하는 방법을 이용하였다. 진단 메뉴에서는 시간 영역 신호와 FFT변환에 의한 주파수 스펙트럼신호를 가지고 현재 펌프 진동상황을 파악함으로써 신호분석결과를 출력한다. LNG 펌프의 고장 진단을 위해 사용되는 신호처리의 목적은 첫째, 신호의 시간 변화로부터 정상과 이상을 구별한다. 둘째, 이상이 있다고 알게 된 경우, 그 이상의 종류를 판정한다. 셋째, 이상의 정도를 추정하고, 고장의 시기를 예측하는 것을 목적으로 한다. 각각의 진동원인을 분류하여 영향의 원인을 백분율로 표시한다. 운영자가 주파수 스펙트럼에 익숙하지 않더라도 고장 진단을 손쉽게 수행할 수 있도록 도움 기능을 제공하였다. 고장에 따른 주파수 스펙트럼의 경향과 관심 있게 보아야 할 고장 징후를 도움 기능에 제공하였다. Fig. 7부터 10은 고장에 따른 도움 기능 화면이다.

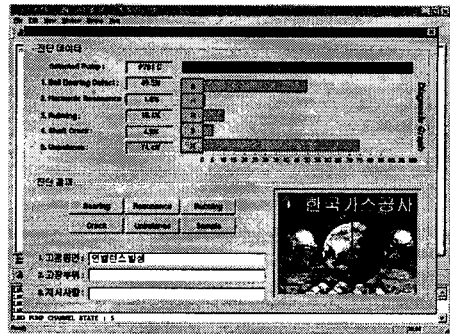


Fig 6. Diagnosis result window

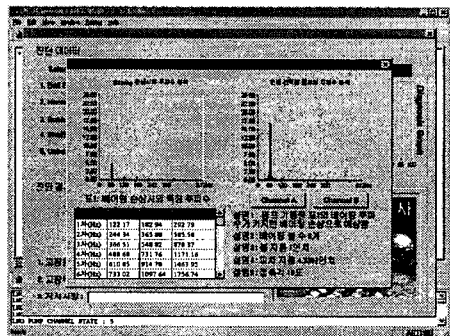


Fig 7. Diagnosis help window of bearing

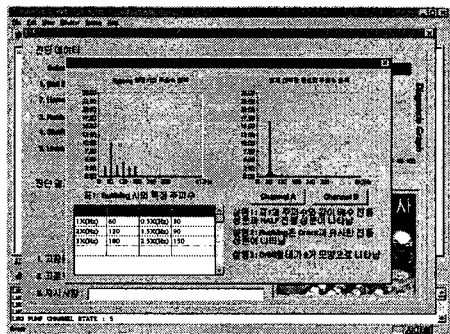


Fig 8. Diagnosis help window of rubbing

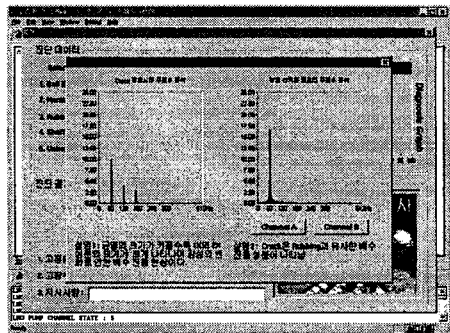


Fig 9. Diagnosis help window of crack

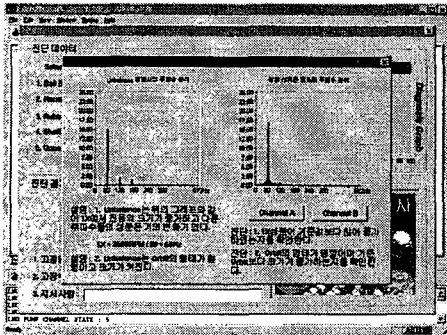


Fig 10. Diagnosis help window of unbalance

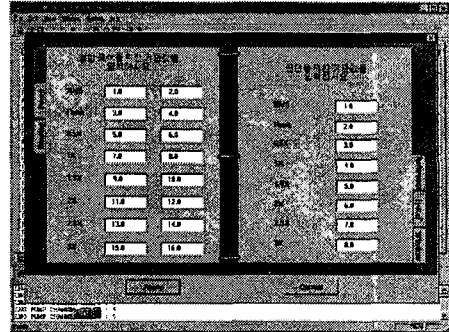


Fig 13. Setting window of trend and diagnosis.

3.4 시스템 설정

셋업 메뉴에는 펌프, 베어링, 기준값 설정, 베어링 기준값설정, 윈도우함수 선택의 메뉴가 있다. 펌프메뉴에는 회전체 속도, 분석을 위한 주파수 범위를 설정할 수 있다.

Fig. 13의 기준 메뉴에서는 경향 해석과 진단을 위한 RMS, PEAK와 특정 주파수값들을 설정할 수 있다.

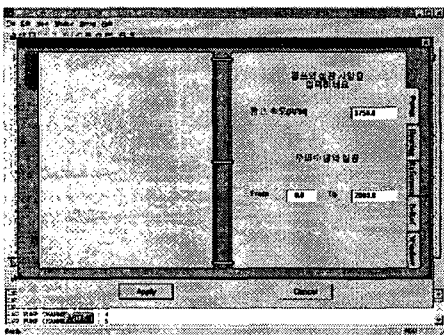


Fig 11. Setting window of pump

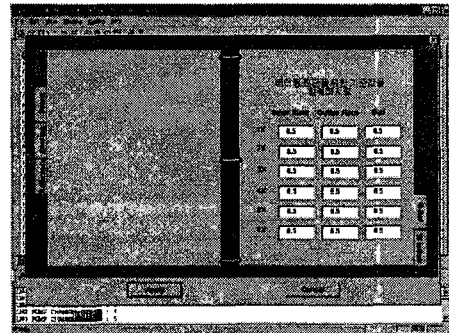


Fig 14. Setting window of bearing diagnosis

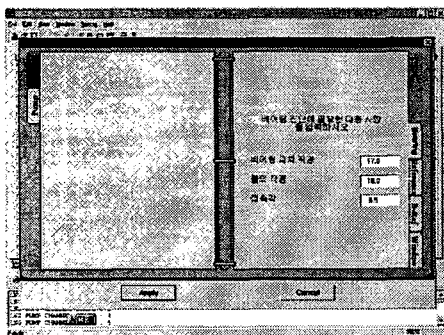


Fig 12. Setting window of bearing specification

Fig. 14의 베어링 진단메뉴에서는 진단을 위한 특정 주파수값들을 설정하여 진단시 기본값으로 사용한다.

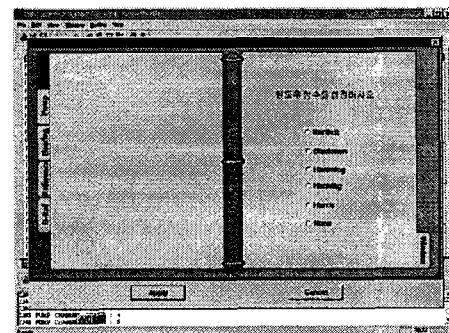


Fig 15. Setting window of window function

Fig. 12의 베어링 메뉴에는 베어링 피치 직경, 볼의 직경, 접촉각을 설정할 수 있다. 입력된 베어링 사양에 의해 베어링의 특징 주파수가 결정된다.

Fig. 15의 윈도우 함수 메뉴에서는 Bartlett, Hanning, Hamming 등의 함수를 선택할 수 있다.

3.5 신호 데이터베이스 구축

신호 데이터베이스는 순간 순간의 진동 경향을 PC에 저장하게 되므로 이 데이터베이스를 유지, 보수하기 위한 엔진이 필요하다. 본 연구에서는 로컬용 데이터베이스 시스템을 구축할 때 가장 좋은 Engine이라고 평가 받고 있는 Microsoft사에서 개발한 Jet DB Engine을 사용하였다. Jet DB Engine의 DAO 모델을 사용하였는데, DAO 모델은 관계형 데이터 베이스 시스템의 구조를 모델화한 클래스의 집합이다.

Jet Database Engine을 이용하여 데이터를 구축하였기 때문에 Excel, Access와 호환이 가능하다. Excel과 Access를 사용하여 보고서를 손쉽게 작성할 수 있다. 아래 표2는 신호 데이터베이스에서 사용된 파일명과 파일의 기능에 대한 설명을 제공한다.

Table 2. File list used in signal data database

파일명	기능
Pump.mdb	현재 신호를 계속적으로 저장
Trend.mdb	펌프 데이터를 정리하여 일일 데이터를 형성한다.
Month.mdb	Trend.mdb를 정리하여 달 데이터를 형성한다.
Spectrum.mdb	매일 한번씩 주파수 스펙트럼을 저장한다.
Setting.mdb	프로그램 설정 사항을 저장한다.



Fig 16. Temporary database file(pump.mdb)

Pump.mdb(Fig.16)에는 순간 순간 들어오는 진동 신호를 평균화하여 저장된다.

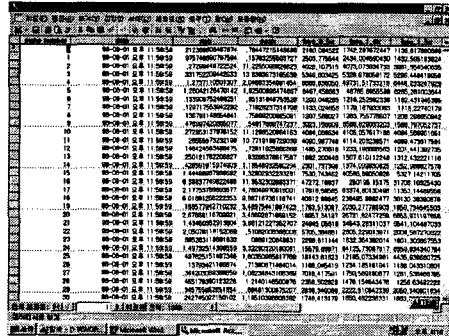


Fig 17. DB file stored with day trend(trend.mdb)

Trend.mdb(Fig.17)에는 Pump 데이터베이스를 정리하여 시간당 1번씩 24 Set의 진동 신호를 저장하여 1일 데이터베이스를 구성한다.

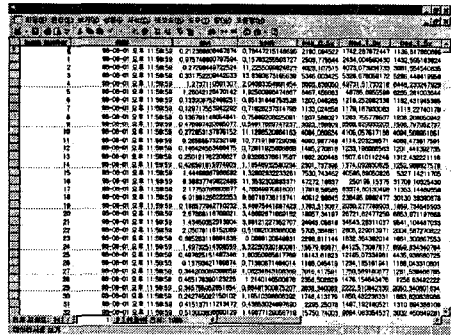


Fig 18. DB file stored with month trend(month.mdb)

Month.mdb(Fig.18)파일은 Trend.mdb 파일을 Averaging하여 1달 데이터를 형성한 것이다.

4. 본 시스템의 기대 성과

이 연구를 통하여 얻는 기대 성과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 펌프 진동 해석 체계 확보 LNG 펌프 진단 시스템은 활용성이 높을 것으로 기대되나 신뢰성이 높은 시스템을 구축하기 위해서는 고장도 이상에 대한 안정적이고 정량적인 정보 파악이 중요하다. 개발된 시스템을 활용하여 많은 실측 데이터를 축적할 수 있다.

- 2) 진동 신호처리 기법 확보 펌프의 이상 진단을 구별할 수 있는 신호처리 기법을 확보 할 수 있다.
- 3) LNG 펌프의 이상 현상 예측 및 원인 파악
- 4) 유사 펌프의 진동진단 시스템 개발시 활용
본 연구에서 축적된 기술은 향후 인수기지 해수 펌프, BOG Compressor 등 회전기기 설비 진단 개발에 활용이 가능하다.

5. 결 론

본 연구에서는 LNG 펌프의 진동 신호를 검출, 신호처리, 이상판별, 이상진단 수행하는 시스템을 개발하였다. 이 시스템의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 1) Windows NT를 기반으로 하고 진동 신호를 측정 및 분석할 수 있는 Software 개발 합
- 2) 지속적으로 기계 상태를 모니터링하고 저장하는 데이터베이스 구축
- 3) 진동 신호를 분석하고 자동으로 진단을 수행

부 록

LNG 펌프의 대표적 진동 특성(4)

A1. 러빙(Rubbing) 진동

러빙은 회전부와 시일과같은 고정부가 물리적으로 접촉됨으로써 평형과 동적 강성을 변화시켜 발생하는 진동의 형태이다. 대체로 다른 기계고장의 2차적 증상으로 나타난다. 러빙 진동은 매우 비선형적인 특성을 갖으며, 접촉부의 국부 과열에 따른 축의 굽힘으로 회전체가 불균형되어 고진동으로 발전할 수 있다.

(1) 러빙의 특성

1. 회전체의 전반적인 고유 진동수를 순간적으로 증가 시킴으로써 불안정한 신호가 나타나게 되는데 이는 순간적인 회전 방향의 변화로, Orbit에서 형상이 한 번 꼬인 형태인 8자 모양을 나타냄.
2. Spectrum상에서 1/2X, 3/2X, 5/2X 등의 Half 주파수 성분과 회전속도 또는 회전 속도의 2배의 주파수 성분에 대한 진동이 발생.

A2. 불균형 진동

회전체의 편심력에 의하여 나타나는 가장 일반적인 진동 형태로써 브레이드의 부식, 회전체의 비산 등 고유 질량의 불평형과 열적 굽힘이 주된 원인이 된다.

(1) 불평형의 특성

1. 질량 불균형에 기인되는 불평형의 진동 형태는 주로 회전수와 동기되어 1회전당 1회의 강제력이 발생됨.
2. 진동 특성이 재연성이 있음.
3. 1X(동기 주파수) RPM 이 탁월 주파수로 나타남.

A3. Crack에 의한 진동

균열은 설계 시 응력집중 요소의 부적당한 배치 또는 기계 제작시 재질의 불균일과 단조공정의 불안정 등으로 나타날 수 있으며, 운전중 비정상적인 진동으로 축의 응력과 변형을 초래하고 피로의 증가, 균열 및 응력 부식으로 인하여 발생함.

(1) Crack의 특성

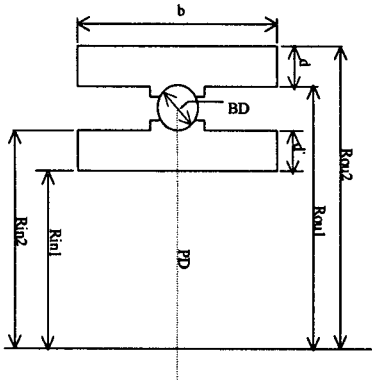
1. 1X 진동이 균열부에서 변함
2. 균열이 점진적으로 발전하면서 축의 강성(stiffness)이 변화되므로 1X, 2X 등 동기 주파수의 배수진동 경향이 바뀜.
3. 벨런싱으로 진동 조정이 안됨

A4. 베어링 고장에 의한 진동

큰 충격하중, 간섭량 과다, 축의 원통도 불량, 축선의 불일치(Misalignment),슬리브 테이퍼도 불량, 설치부의 모뎀기 과다, 윤활 불량, 재질적 결함, 볼과 Race사이에 발생하는 정전기적 방전 등이다.

(1) 베어링 결함의 특징

1. 진동레벨이 비정상적이고, 급격히 높은 진폭에 도달할 수 있으며 결함베어링의 영역에 국부적으로 진동이 커지는 경향이 있다.
2. 진동 값은 통상 비정상적이고, 시간에 따라 증가한다.
3. 베어링 결함에 의한 진동수 계산법



(1) 외부레이스의 결함에 의한 진동수

$$f_o = \frac{n}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta\right)$$

(2) 내부레이스의 결함에 의한 진동수

$$f_{in} = \frac{n}{2} \times fr \times \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta\right)$$

(3) Ball의 결함에 의한 진동수

$$f_b = \frac{TD}{BD} \times fr \times \left(1 - \left(\frac{BD}{PD}\right)^2 \cos^2\beta\right)$$

BD : Ball 직경, PD : Pitch 직경, n : 볼수, β : 접촉각, fr : 축회전수

후 기

본 연구는 한국가스공사 연구개발원 97-CD-CR-대학-218-22의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 이안성, 홍성욱, 김호중, 이 현, 스팀터빈 발전기 자동 진단 시스템 개발, 한국소음진동공학회지 제5권 제4호, pp. 543~554, 1995
2. 배용채, 터빈이상 진동의 자동 진단 시스템에 관한 연구, 전남 대학교 대학원 박사학위논문, 1995
3. 윤중호, 회전기계 베어링의 자동 진단 시스템에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1990

4. Singiresu S. Rao, Mechanical Vibrations, Addison-Wesley, 1995
5. 양보석, 장우교, 임동수, 김호중, 회전기계의 이상진동진단시스템의 개발, 한국소음진동공학회지 제6권 제3호, pp. 325~331, 1996
6. 藤澤, 1993, 大形回轉機械軸系振動診斷法, 日本機械學會論文集©, 第59卷 第568號, pp 3607~3612
7. 한국가스공사 연구개발원, LNG 펌프 진단시스템 개발 최종 보고서, 1998
8. 양보석, 기계의 진동상태 감시를 위한 순서, 한국소음진동공학회지 제6권 4호, pp.394~409, 1996
9. 채장범, 기계의 상태/고장 진단, 한국소음진동공학회지 제6권 제4호, pp.387~393, 1996
10. 정승호, 박영필, 진동 신호를 이용한 볼 베어링의 결함진단에 관한 연구, 대한기계공학회논문집 제19권 제12호, pp.3260~3269, 1995
11. 강병용, 진동 신호를 이용한 볼베어링의 결함진단에 관한 연구, 영남대학교 대학원 박사학위 논문, 1996
12. 장우교, 회전기계의 이상진동진단 시스템에 관한 연구, 부산수산대학교 대학원 석사 학위 논문, 1996