

## 회전기계의 상태감시 및 진단 시스템 개발

### Development of Condition Monitoring and Diagnosis System for Rotating Machinery

°함중석\* · 이종원\* · 박성호\* · 양보석\*\* · 황원우\*\* · 최연신\*\*\* · 전오성\*\*\*\*

J. S. Ham, C. W. Lee, S. H. Park, B. S. Yang, W. W. Hwang, Y. S. Choi, O. S. Jun

**Key Words** : Condition monitoring, diagnosis, rotating machinery, case-based reasoning, neural network, gear driving system, demonstrator

#### ABSTRACT

This paper introduces an enhanced condition monitoring and diagnosis system recently developed for rotating machinery. In the system, the data acquisition/monitoring, signal processing, machine condition classifier, case-based reasoning and demonstration modules are effectively integrated with user-friendliness so that machine operators can easily monitor and diagnose the status of rotating machinery in operation. Some of the new features include the directional spectrum, case-based reasoning and neural network techniques. And the demonstrator modules for fault diagnosis of a gear driving system and for basic understanding of the rotor dynamics are provided to help the potential users better understand the system..

#### 1. 서 론

국내 발전소, 산업기계설비, 플랜트 등에서 압축기, 모터, 펌프, 터빈, 발전기 등 회전기계에 대한 감시 및 진단기술은 오래 전부터 꾸준히 발전되어 왔으나, 최근 이들 회전기계의 고성능 고속화로 인하여 더욱 더 정밀한 설계기술과 엄격한 운전조건이 필요할 뿐만 아니라 산업현장에서 더욱 더 안전하고 효과적인 운전을 위하여 감시 및 진단 시스템의 수요가 증가하고 있는 실정이지만, 대부분의 이들 감시 및 진단기술은 외국기술에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 기술의 대외 의존을 탈피하고 독자적인 기술을 확보하고자 회전기계의 결함탐지 및 예측진단을 위한 기술 및 프로그램을 개발하였다. 본 프로그램은 전체구성[Fig. 1]은 다음과 같은 모듈로 구성되어 있다.

- 1) Rotor Vibration Monitor (RVM)
- 2) Rotor Signal Analyzer (RSA)

- 3) Machine Condition Classifier (MCC)
- 4) Case-Based Reasoning (CBR)
- 5) Gear Fault Diagnosis (GFD)
- 6) Diagnosis Assistance Demonstrator (DAD)

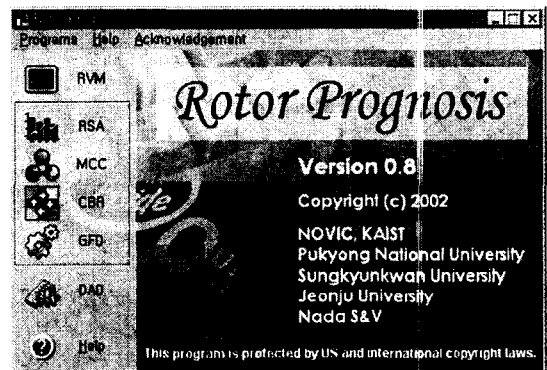


Fig. 1 Rotor Prognosis Program

프로그램은 윈도우 환경에서 기계 진동 신호의 취득/해석/진단을 통합적으로 수행할 수 있는 프로그램인 Rotor Prognosis를 VB와 VC++ 언어를 이용하여 개발하였다. Rotor Prognosis는 크게 진동 신호의 감시와 이를 획득/저장하는 프로그램(RVM: Rotor Vibration Monitor)과 획득한 진동 신호로부터 원하는 정보를 추출해 낼 수 있도록 처리하

\* 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : jsham@cais.kaist.ac.kr  
Tel: (042) 869-3056, Fax: (042) 869-8220

\*\* 부경대학교 기계공학과

\*\*\* 성균관 대학교 기계공학과

\*\*\*\* 전주대학교 기계공학과

는 프로그램(RSA: Rotor Signal Analyzer), 기계 진동신호의 웨이블릿 변환과 신경회로망 기법을 이용한 이상 진단 프로그램(MCC : Machine Condition Classifier), 고장 진단 사례들에 대한 데이터베이스로부터 당면한 문제와 가장 유사한 증상을 검색하여 주는 프로그램(CBR : Case-Based Reasoning), 기어 구동계의 이상 유무를 판별할 수 있는 프로그램(GFD : Gear Fault Diagnosis), 그리고 회전체의 거동을 직관적으로 이해할 수 있도록 돕는 프로그램인 DAD(Diagnosis Assistance Demonstrator)로 구성되며 아이콘을 선택함으로써 각 모듈로 들어가서 진단해석을 수행하게 된다.

## 2. 프로그램 구성

### 2.1 RotorVibrationMonitor(RVM)

이 모듈[Fig. 2]은 진동신호를 실시간으로 수집하여 분석할 수 있도록 A/D 변환기를 사용하였으며, 획득된 진동 신호를 실시간으로 계속 전달 받아 이를 화면에 표시하고, 특정한 조건을 만족할 경우 획득한 진동 신호를 디스크에 저장할 수 있다. 또한 사용자가 원하는 여러 가지 정보를 제공하기 위하여, 저장된 진동 신호 및 최근의 진동 신호를 실시간으로 분석/처리하여 그 결과를 그래픽으로 보여줌으로써 대상 시스템의 진동 상황 및 문제점을 직관적으로 이해, 분석할 수 있도록 하였다.

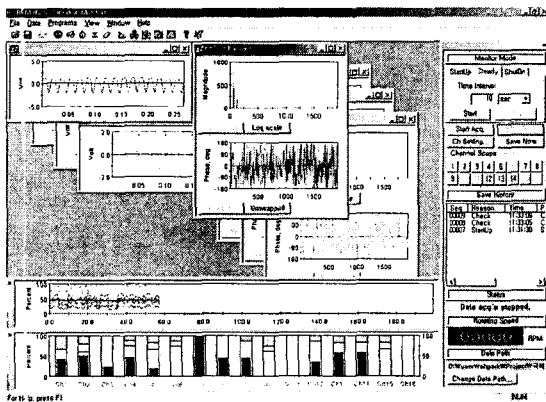


Fig. 2 Rotor Vibration Monitor

### 2.2 RotorSignalAnalyzer(RSA)

후처리 프로그램인 RSA 프로그램[Fig. 3]은 RVM 프로그램과 데이터를 공유하며, 크게 시간 영역 해석과 주파수 영역 해석, 시간-주파수 해석 부분으로 구성되어 있다. RSA 프로그램은 회전체의 진동 신호를 적절하게 표시할 수 있는 복소 신호의 처리 및 방향성 신호 처리를 위하여 complex class를 구성하였고, 이를 기반으로 하여 complex FFT를

하고, 그 결과를 이용하여 Power spectrum을 구할 수 있으며, Correlation, Coherence 함수 등을 구할 수 있다. 또한 시간-주파수 영역 해석은 하모닉 웨이블릿(Harmonic wavelet) 함수를 이용하였다. 이 모듈에서 처리 가능한 분석 방법은 시간영역 및 주파수 분석, Orbit Analysis[Fig. 4a & b], 복소주파수 분석, 스펙트럼 및 방향성 스펙트럼 분석[Fig. 5], Coherence Function, Waterfall Plot, 방향성 Waterfall Plot, Correlation Function, Cascade Plot, Harmonic Wavelet[Fig. 6] 등이 있다.

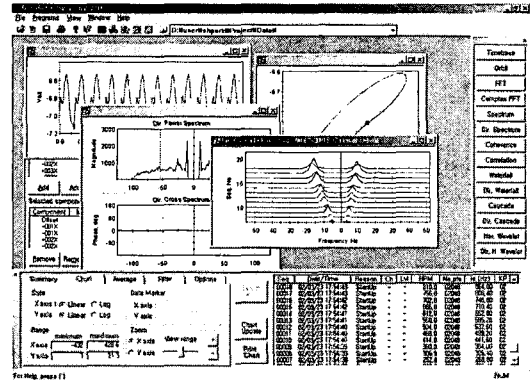


Fig.3 Rotor Signal Analyzer

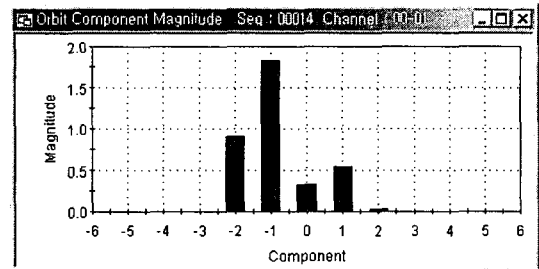


Fig. 4a Orbit Component Plot

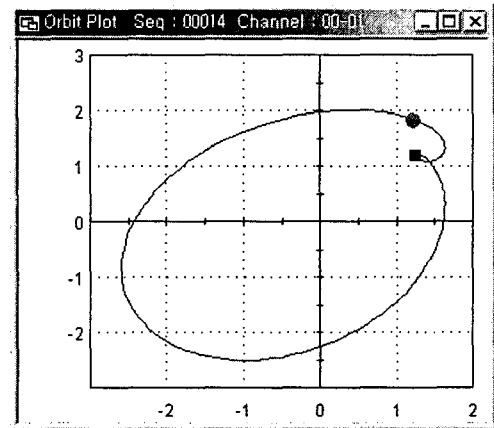


Fig. 4b Orbit Plot

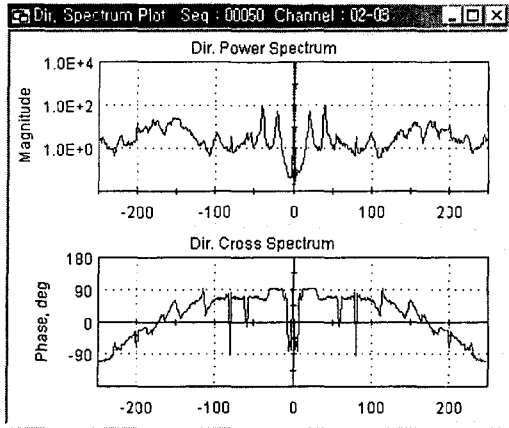


Fig. 5 Directional Spectrum Plot

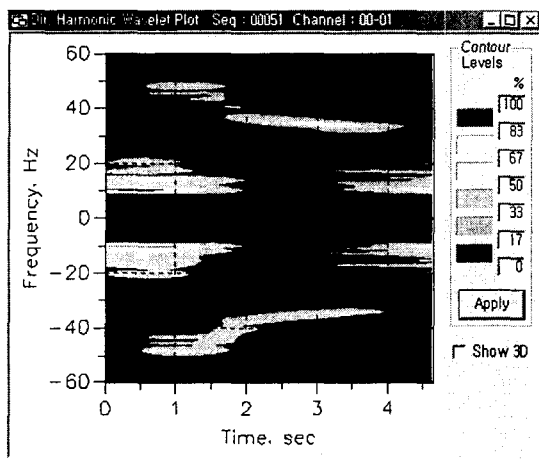


Fig. 6 Directional Harmonic Wavelet

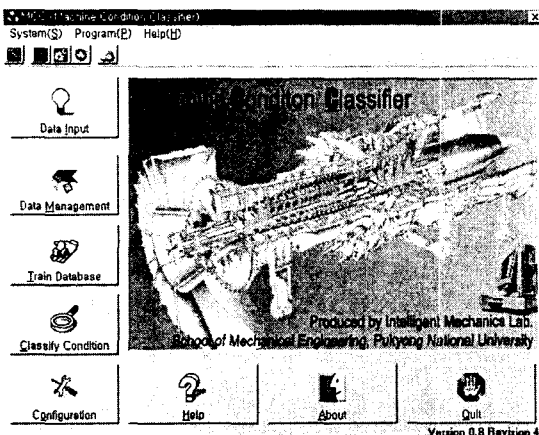


Fig. 7 Machine Condition Classifier

### 2.3 MachineConditionClassifier(MCC)

MCC 프로그램[Fig. 7]은 대상기계의 상태를 나타내는 진동/소음 신호를 데이터베이스로 저장해 놓고 새로운 현장 신호가 발생했을 때, 그 신호가 과거의 신호에 가까운가를 파악하는, 지능형 기계 상태 분류 시스템이다. 진동/소음 신호의 특징 추출을 위해 이산 웨이블릿 변환을 사용하였고, 인공 신경망 훈련/분류를 위해 학습벡터 양자화(Learning Vector Quantization) 기법을 사용하였으며 본 모듈의 이상 진동 진단 알고리즘은 다음과 같은 단계를 거친다.

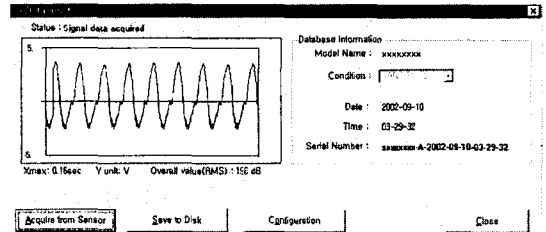


Fig. 8 Data Input Screen

#### (1)신호획득(Data Input)

신호취득을 위한 외부 프로그램을 실행시키거나 이미 취득한 데이터를 훈련용 데이터로 사용하기 위해 모델, 시간, 상태에 따라 유일한 시리얼 번호로 된 이름으로 DB폴더에 저장한다.[Fig. 8]

#### (2)Data Management

훈련용 데이터를 Browsing할 수 있으며 데이터의 상태를 수정할 수 있다.[Fig. 9]

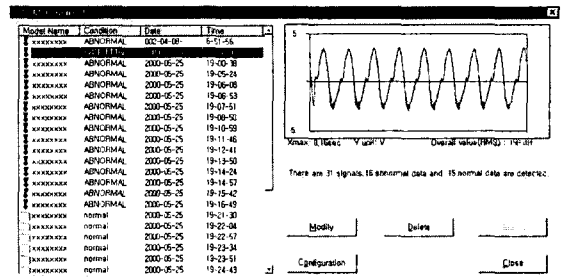


Fig. 9 Data Management Screen

#### (3)TrainDatabase

DB폴더에 저장된 훈련용 데이터를 이산 웨이블릿 변환하여 특징을 추출하고 훈련/분류시킬 수 있다.[Fig. 10]

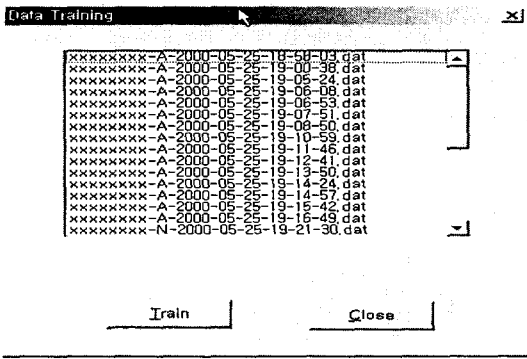


Fig. 10 Train Database

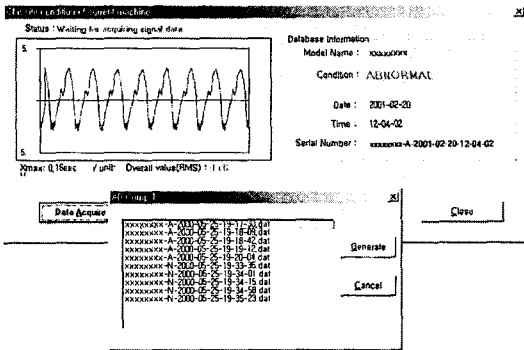


Fig. 11 Classify Condition Screen

(4) Classify Condition

새로 취득한 진동/소음 신호를 웨이브렛 변환하여 나온 특징을 이전의 데이터베이스를 통해 훈련된 특징 데이터와 비교하여 현재의 상태를 비교하여 정상/불량 여부를 판별한다.[Fig. 11]

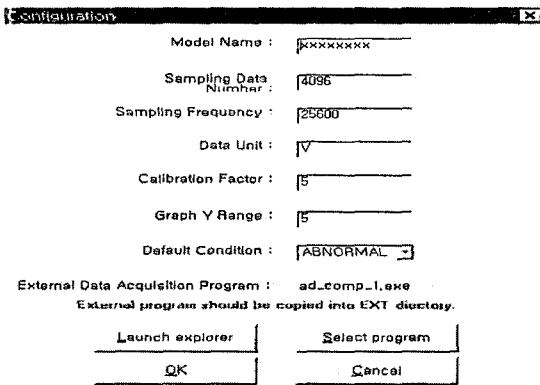


Fig. 12 Configuration Screen

(5) Configuration

대상기계의 모델명과 신호 처리 변수를 입력하며 신호 취득을 위해 실행되는 외부 프로그램을 지정할 수 있다.[Fig. 12]

2.4 Case-Based Reasoning(CBR)

CBR 프로그램은 데이터베이스로 저장되어 있는 각종 진단 사례들에 근거한 사례기반 추론과 유사한 사례를 검색하기 위한 유사도 평가 (Similarity Evaluation) 방법을 사용하여 이상 원인을 진단하는 방법이다.

사례기반 추론시스템은 다음의 과정을 거치게 된다.

- ① 발생된 문제와 가장 유사한 이전의 사례를 검색한다.
- ② 발생된 문제를 해결하기 위해 이전 사례로부터의 지식과 정보를 재사용한다.
- ③ 이전 사례로부터 제안된 해가 적용되었다면, 발생된 문제에 맞는 형태의 해로 수정한다.
- ④ 발생된 문제를 해결했다면 성공한 해로, 문제 해결에 실패하였다면 실패한 해로 저장(retain)한다.

새로운 문제(New Case)를 해결하기 위해 하나 이상의 유사한 과거 경험(Previous Case)이 검색되고, 검색된 과거 경험으로부터 하나 이상의 해결방법을 새로운 문제에 재사용(Reuse)한다. 재사용(Reuse)된 해결방법은 영역전문가(Domain Expert) 혹은 현장 작업자에 의해 수정(Revise)되고, 수정된 해결방법은 새로운 문제의 원인과 해결방법이 하나의 사례로 조직화하고, 사례베이스에 저장됨으로써 사례기반추론의 과정이 종결된다.

Fig. 13에 나타난 입력 창을 통해서 입력된 키워드와 가중치를 사례 기반 추론기에 전달되고, 추론기는 입력된 키워드를 가지고 라이브러리에 저장된 이전사례의 키워드와 비교하여 일치할 경우, 입력가중치를 차례로 더하여 전체 가중치로 그 더해진 값을 나누어 유사도를 평가한다.

계산된 결과에 따라 유사도 순위에 따라 결과가 sorting 되고, 사용자는 원하는 사례를 선택한다.[Fig. 14] 선택된 사례는 표 1의 표준사례로 나타나고 사용자는 이를 토대로 현재 안고 있는 문제들을 해결하게 된다.

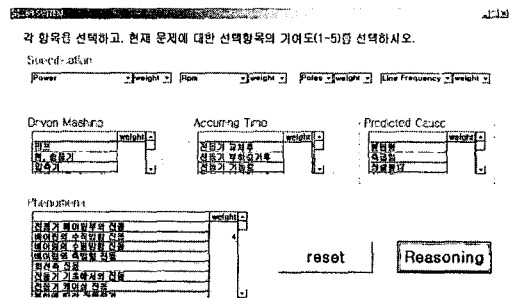


Fig.13 Case-based Reasoning Input Screen

순위를 클릭하시면, 원하는 사례를 보실 수 있습니다.

- 유사도 순위 1 | motor 22 = 0.38729833
- 유사도 순위 2 | motor 12 = 0.38729833
- 유사도 순위 3 | motor 19 = 0.38729833
- 유사도 순위 4 | motor 1 = 0.361157559
- 유사도 순위 5 | motor 29 = 0.36115755
- 유사도 순위 6 | motor 8 = 0.339683110

Fig.14 Result of Case Search  
Table1 Standard Case

사건 번호	현상	회전차의 이상현상
1	유동기(Driver) 구동용 전동기 (300W, 1180rpm, 78A, 그림 1)	회전차의 이상현상
2	회전차의 이상현상	회전차의 이상현상
3	회전차의 이상현상	회전차의 이상현상
4	회전차의 이상현상	회전차의 이상현상
5	회전차의 이상현상	회전차의 이상현상
6	회전차의 이상현상	회전차의 이상현상

### 2.5 Gear Fault Diagnosis(GFD)

GFD 프로그램[Fig. 15]은 기어 구동계에서 획득한 진동 신호로부터 스펙트럼과 챔스트럼, Kurtosis 값을 계산하여 기계의 고장 유무를 검사할 수 있도록 한다. RVM으로부터 받은 데이터나 일반 ASCII 데이터를 모두 입력할 수 있고 그래픽 처리를 통해 사용자가 쉽게 정보를 얻을 수 있도록 짜여져 있다.

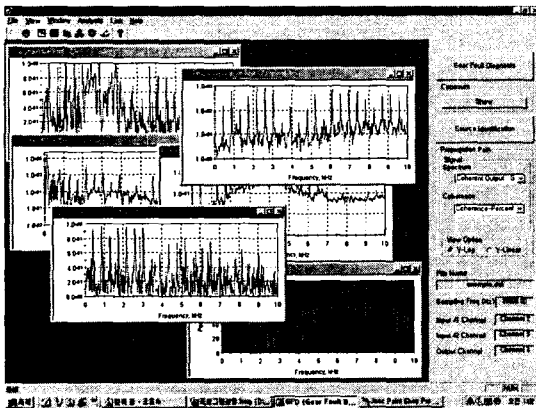


Fig.15 Gear Fault Diagnosis

### 2.6 Diagnosis Assistance Demonstrator(DAD)

회전기계의 진단지원을 위한 DAD 프로그램[Fig. 16]은 애니메이션 기법을 통해 회전체의 기본적인 거동을 직관적으로 이해할 수 있도록 하였고[Fig. 17] 회전체 모델의 수치 입력을 통해 그래픽으로 회전체 형상을 확인해 볼 수 있고, 회전체 모드개개 변수[Fig. 18], 영향계수 등을 계산할 수 있다.

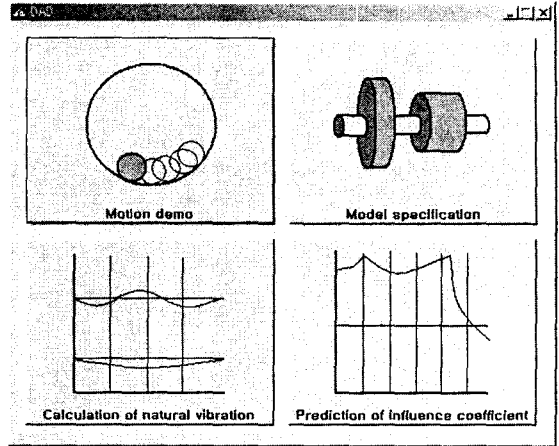


Fig.16 Diagnosis Assistance Demonstrator

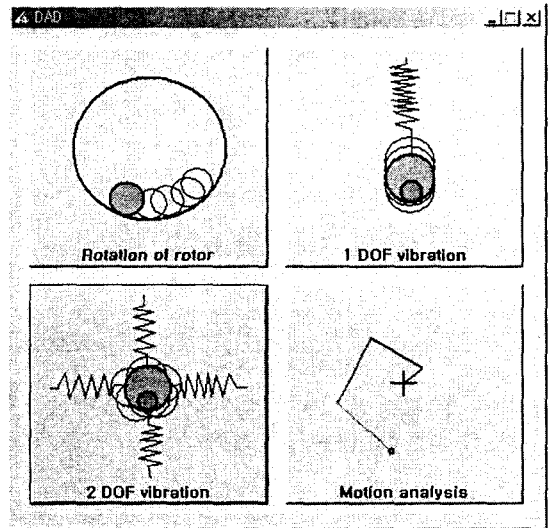


Fig.17 Motion Demonstrator

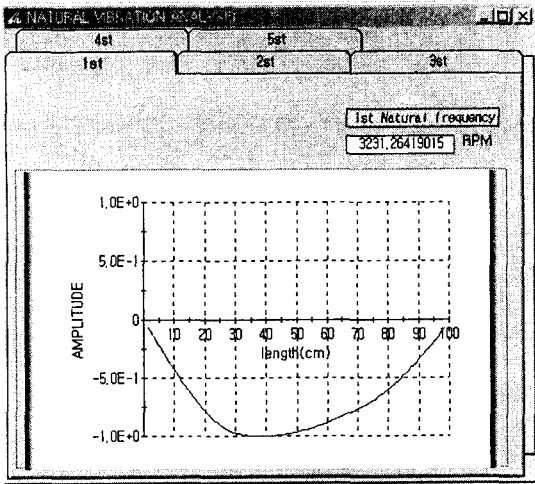


Fig.18 Example of Mode Shape

### 3. 결론

이상과 같이 본 프로그램은 회전기계의 예측 및 진단에 필요한 여러 함수를 포함하므로 실제현장에서 필요한 회전기계의 감시진단 시스템을 구성할 때 기본적인 플랫폼으로서 역할을 수행할 것으로 판단되며, 앞으로 기계진단 분야의 외국기술의 국산화에 기여할 것으로 기대된다.

### 후 기

본 내용은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

### 참 고 문 헌

(1) J. S. Bendat and A. G. Piersol, 2000, *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*, 3rd Edition, Wiley Inter-science.

(2) 한윤식, 1998, "회전 기계 과도 진동 신호의 방향성 스펙트럼 해석," 한국과학기술원 박사학위논문.

(3) D. E. Newland, 1997, "Practical Signal Analysis : Do Wavelet Make Any Difference?," ASME DETC97/VIB-4135.

(4) S. Mallat, 1989, "A Theory for Multi-resolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation," Proc. IEEE Trans. on Pattern Anal. and Math. Intel., Vol. 11, No. 7.

(5) J. T. Tou, R. Gon, 1974, *Pattern Recognition Principles*, Addison-Wesley, Reading, MA.

(6) Y. H. Pao, 1989, *Adaptive Pattern Recognition and Neural Network*, Addison-Wesley, New York.

(7) T. Kohonen, et al., 1996, "Engineering Application of the Self-Organizing Map," Proceedings of the IEEE, Vol. 84, No. 10, pp. 1358-1384.

(8) S. Haykin, 1999, *Neural Network*, 2nd Edition, Prentice Hall.

(9) Y. S. Hwang and S. Y. Bang, 1991, "A New Neural Network Model Based on Nearest Neighbour Classifier," Proc. IJCNN, Vol. 3, pp. 2386-2389.

(10) T. M. Cover, P. E. Hart, 1967, "Nearest Neighbor Pattern Classification," IEEE Trans. on Information Theory, Vol. 13.

(11) B. S. Yang, 1998, *Machine Health Diagnosis Case Book*, Hyosung Press.

(12) J. S. Park, and K. J. Kim, 1994, "Source Identification Using Multi-Input/Single-Output Modeling and Causality Checking of Correlated Inputs," Transactions of the ASME, Vol. 116, pp. 232-236.

(13) 신용호, 1997, "전달오차와 백래쉬에 의한 기어 구동계의 동특성 해석," 성균관대학교 박사학위논문.

(14) O. S. Jun and J. O. Kim, 1999, "Free Bending Vibration of a Multi-step Rotor", Journal of Sound and Vibration, Vol. 224, No. 4, pp. 625-642.

(15) C. W. Lee, 1993, *Vibration Analysis of Rotors*, Chapter 8, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.