

산업용 회전 기기의 현장 이상 진단을 위한 지식 기반 전문가 시스템 개발

Development of knowledge based expert system for fault diag: industrial rotating machinery

이태욱 · 이용복 · 김승종 · 김창호* · 임윤철**

Tae-Wook Lee, Yong-Bok Lee, Seung-Jong Kim, Chang-Ho Kim and Yun-Chul Rhim

Key Words : Condition Monitoring(상태 감시), Rotating Machinery(회전 기계), Knowledge Base(지식 기반), Fault Diagnosis(결함 진단), Expert System(전문가 시스템)

ABSTRACT

This paper proposes a knowledge-based expert system, which is assembled into hardware organized with sensor module, A/D converter, USB, data acquisition PC and software composed of monitoring and diagnosis module combined with a frame-based method using Sohre's chart and a rule-based method. Vibration signals using various sensors are acquired by A/D converter, transferred into PC and processed to obtain a continuous monitoring of the machine status displayed into several plots. Through combining frame-base which covers wide vibration causes with rule-base which gives relatively specified diagnosis results, high accuracy of fault diagnosis can be guaranteed and knowledge base can be easily extended by adding new causes or symptoms. Some examples using experimental data show the good feasibility of the proposed algorithm for condition monitoring and diagnosis of industrial rotating machinery.

1. 서론

발전소 혹은 제철소 등의 큰 규모의 공장에서 기계의 결함으로 인해서 사고가 생기거나 공정에 차질이 오면 막대한 손실이 발생한다. 품질이 나쁜 제품이 생산될 것이며 기계의 파손을 고치기 위해서 필요한 경제적인 손실도 감수해야 한다. 따라서 불의에 생기는 사고를 예방하기 위해서 회전 기계 진단 시스템의 필요성이 대두되었다.

현장에서 회전 기계의 데이터를 수집하여 그 데이터의 해석을 기반으로 기계의 건전성을 판단하고 조기에 이상을 예측하여 효율적으로 기계를 관리하는 상태 감시(condition monitoring)를 수행하기 위해서는 정확한 데이터 획득과 그의 실시간 전송을 위한 측정 장비가 필수적이다. 하지만 해마다 많은 측정 진단 장비들의 대부분이 해외에서 수입되는 실정이며 진동 신호 분석에 스펙트럼 분석기(FFT analyzer)

가 사용되고 있지만 많은 채널의 신호들을 획득하기 힘들고 조작이 어려울 뿐더러 추세 도표 등 여러 가지 데이터를 기반으로 하는 모니터링과 상태 진단에 응용되기 어려운 단점이 있다. 따라서 PC와 A/D 변환기를 이용한 측정 장비 제작이 필요하다. 이에 양보석⁽¹⁾ 등은 PC와 8채널, 분해능 12bits, 최대 250kHz의 A/D 변환기(DT-2833)를 이용하여 하드웨어를 구성하였으며 상용화된 장비로는 SciTech사에서 연구 개발한 23채널, 분해능 16bits, 최대 50kHz의 A/D 변환기와 RS232를 이용하여 연결된 PC로 구성된 모니터링 장비가 있다.⁽²⁾

또한 기계의 이상이나 고장이 발생하였을 경우 획득된 데이터를 이용하여 원인을 추정하기 위해서는 매우 전문적인 지식과 오랜 경험이 필요하다. 하지만 전문가가 흔치 않을뿐더러 적재적소에 있기가 매우 힘든 상황이다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 전문가를 대신할 시스템의 필요성이 대두되었으며 현재 여러 곳에서 연구 개발되고 있다. 상태 진단 시 측정 데이터의 다양성, 비선형성, 이상 발생에 대한 판단 불확실성 등을 극복하고 보다 정확한 진단 알고리즘을 개발하기 위하여 신경 회로망(artificial neural network: ANN)⁽³⁾, 퍼지 추론(fuzzy reasoning)⁽⁴⁾, 유전 알고리즘(genetic algorithm)⁽⁵⁾ 등 여러 이론들이 사용되고 있는데 대표적인 것은 전문가 시스템(expert system)⁽⁶⁾과 신경 회

* KIST Tribology Center
E-mail : huhu@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5669, Fax : (02) 958-5659

** 연세 대학교 기계공학과

로망 등이다. 그러나 신경 회로망의 경우 정확한 결론을 내리게 하기 위해서는 훈련에 필요한 데이터 수가 많이 필요하며 회로망 훈련에 오랜 시간이 걸린다. 또한 한번 훈련되면 그 범주 내에서만 정확한 결론을 유도하는 단점이 있다. 이에 비해 전문가 시스템은 정확한 지식을 기반으로 하기 때문에 추론 과정이 명확하고 지식 기반을 이용하여 새로운 결합 진단이 가능하다. 이에 Tim⁽⁷⁾ 등은 Sohre 차트를 바탕으로 규칙 기반 진단을 적용하여 전문가 시스템을 구현하였으며, Chun⁽⁸⁾ 등은 Sohre 차트를 이용하여 규칙 기반으로 지식을 표현한 후 퍼지 추론 진단을 수행하는 전문가 시스템을 연구 개발하였다. 또한 Lee⁽⁹⁾ 등은 정확한 결합 진단을 위해 지식 표현 방식을 달리하는 프레임 기반 진단과 규칙 기반 진단을 결합한 하이브리드 진단 시스템을 연구하였다. 이는 기존 전문가 시스템에 적용된 독립된 기법으로서 가지는 진단 취약성에 대해 상호 보완하면서 각 기법들의 장점을 활용하는 알고리즘이다.

따라서 본 논문에서는 A/D 변환기, PC를 이용한 하드웨어와 하이브리드 진단 알고리즘을 적용한 상태 모니터링 및 결합 진단 소프트웨어로 구성된 전문가 시스템을 구현하였으며 이의 정확성과 효율성을 검증하기 위해서 테스트 장치를 구성하고 실험을 병행하였다. Figure 1은 시스템 개요와 진단 과정을 나타내고 있다.

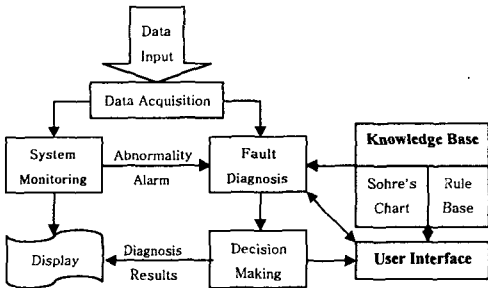


Fig. 1. Flow chart of fault diagnosis expert system

2. 데이터 수집용 하드웨어

하드웨어는 진동 신호 감지를 위한 센서 모듈, A/D 변환기, 컴퓨터로의 데이터 전송을 위한 USB모듈 그리고 결합 진단 전문가 시스템과 데이터 베이스가 구축된 PC로 구성된다. 상태 진단을 위해서는 진동 신호를 얻기 위한 변위, 속도, 가속도 센서뿐만 아니라 온도, 압력 등의 여러 가지 센서가 사용될 수 있지만 이렇게 다양한 센서들은 각각 다른 출력 형태를 가지고 있기 때문에 모두 동일한 입력 조건에서는 만족할만한 결과를 구할 수가 없다. 따라서 각 센서들의 특성을 고려한 모듈 형태의 입력부를 개발하여 센서마다의 오차를 줄이고 그 특징에 따라 모듈 교체가 가능토록

하였으며 분할기를 추가 시켜 최대 16채널의 입력신호를 사용할 수 있도록 하였다. Figure 2은 제작된 하드웨어 시스템을 보여주며 Figure 3는 하드웨어 구성을 나타내고 있다.

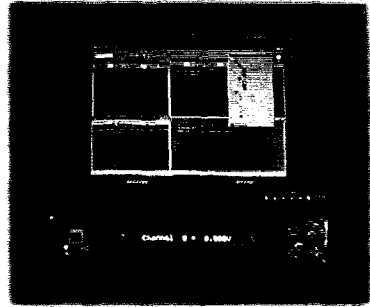


Fig. 2. Portable condition monitoring system

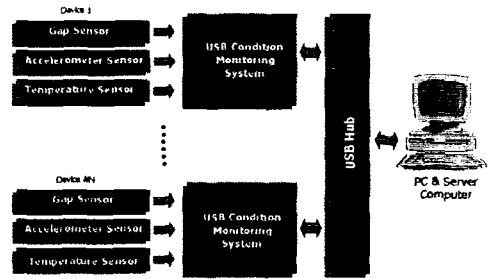


Fig.3. Configuration and block diagram of hardware

수집된 데이터는 16채널, 최대 100kHz의 샘플링 주기, 해상도 12bits 성능의 NI사의 보드(National Instrument DAQ-PAD 6020E)를 통해 A/D 변환된 후 USB를 통하여 일방 전송(isochronous transfer)에 의해 PC로 전송된다. USB(Universal Serial Bus)는 컴퓨터와 주변기기의 표준화된 인터페이스 방식으로 12Mbps의 대용량 전송속도, Hot plugging, 자체 전원 공급, PNP(plug and play)등의 특징이 있다. 이는 기존의 병렬 포트(parallel port)나 직렬 포트(serial port)에 비하여 고속의 데이터 전송이 가능하기 때문에 실시간 전송 시 매우 적합하며 허브(hub)를 이용하면 최대 127채널의 신호 입력이 가능하므로 복잡한 기계에도 적용될 수 있다.

3. 감시 진단 소프트웨어

감시 진단 소프트웨어는 수집된 데이터를 그래프로 도시하고 현재 기계의 상태를 판별하여 이상 발생 시 결합 진단을 하는 프로그램으로써 Visual C++ 6.0을 이용하여 제작되었다. Figure 4는 소프트웨어 구성과 순서도를 나타내고 있다.

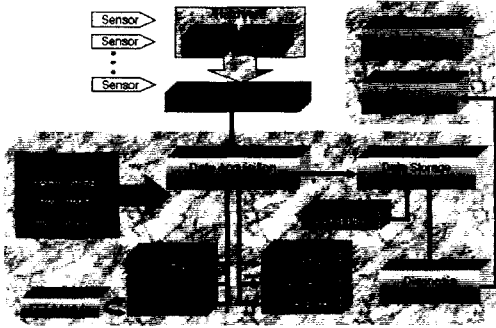


Fig. 4. Configuration and flowchart of expert system

Table 1은 사용자가 시스템을 쉽게 운용할 수 있도록 하기 위해 프로그램의 최상위에서 다룰 수 있도록 제작된 작업창(workspace)의 내용이다. 회전체의 정적 및 동적 해석 모듈, 진동 경향 추세 분석과 이상 원인 판별을 위한 진단 모듈, 기계 이력 관리 및 알람 등의 시스템 환경 설정 모듈이 트리(tree)식 구조를 통하여 기능별로 구분되어져 있으므로 사용자는 원하는 그래프와 기능을 쉽게 실행시킬 수 있다. Figure. 5는 시스템을 이용하여 데이터를 수집하고 있는 화면이다.

Table 1. Workspace of expert system

Program	Directory	Window	
Software	Analysis	Static Mode	Time View
		Dynamic Mode	Orbit View
			Spectrum View
			Waterfall View
			Bode View
			Polar View
	Trend View		
	Diagnosis	Advanced Analysis	
		Machines Description	
	Setting	Channel Setting	
		Alarm Setting	
		View Setting	

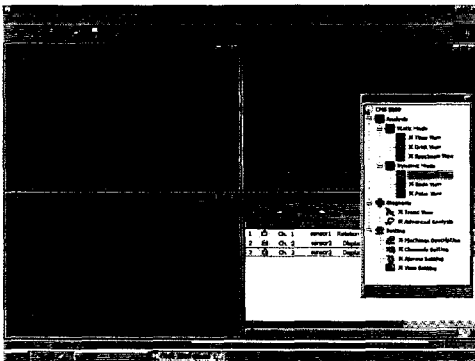


Fig. 5. Operating window of expert system

3.1 환경 설정 모듈

환경 설정 모듈은 데이터 수집, 기계 이력 정보 관리, 알람, 그래프 정보 설정 부분으로 구성되어 있다. 데이터 수집 부분에서는 센서의 종류, 민감도, 위치 등 각 채널의 정보와 정확한 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수, 샘플링 데이터 수, 샘플링 시간 등을 입력하여 수집 환경을 제어한다. 알람 기능은 진동 진폭에 대한 한계치(baseline)를 정하여 과도한 진동 시 사용자에게 경고를 주는데 이 수치는 대상 기계마다 다르며 설정은 전문가의 지식과 경험에 의존하기 때문에 본 시스템에서는 위험 정도를 3가지 단계(attention, warning, alert)로 구분하고 이에 따른 수치를 대상 기계에 맞게 바꿀 수 있도록 스크롤 바 컨트롤을 이용하여 구현하였다. Figure 6는 한계치를 설정하는 알람 윈도우를 나타낸다.

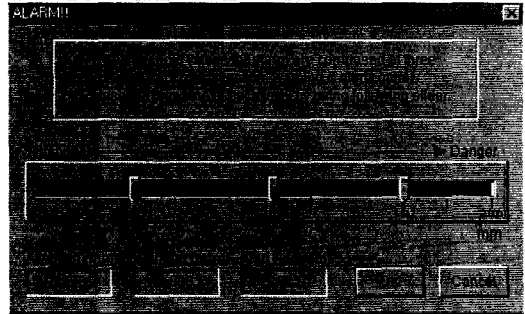


Fig. 6. Alarm setting window

기계 이력 정보 관리의 상태 진단 대상 기계의 이력 해석(history analysis)을 하는 부분이다. 기계의 이름, 제작사, 모델명, 제작 날짜 등의 기본적 정보와 온도, 압력, 운전 회전수, 사용된 센서와 그 위치 등 모니터링 시의 환경에 대한 정보가 저장되어 있어서 대상 기계를 효율적으로 관리할 수 있다. Figure 7은 대상 기계 정보를 표시한 화면이다.

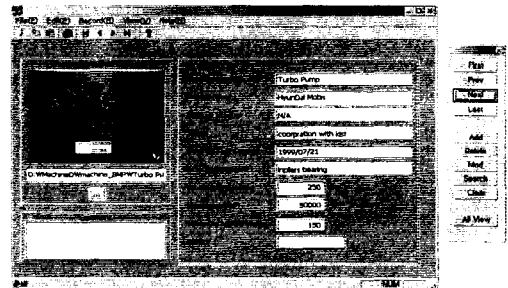


Fig. 7. History analysis window

3.2 분석 모듈

분석 모듈은 저장된 혹은 실시간으로 전송된 데이터를 이용하여 그려지는 여러 그래프를 바탕으로 대상 기계의 상태를 정밀하게 파악할 수 있도록 해주며 회전 속도의 변화 유무에 따라 정적 해석 부분과 동적 해석 부분으로 나누어진다. 정적 해석 부분은 실시간, 스펙트럼, 축 궤적 그래프 등으로 구성되며 사용자는 이를 통해 실시간으로 기계의 상태를 점검할 수 있다. 동적 해석 부분은 주파수 왜도, 보드, 극 선도 등으로 구성되며 사용자는 회전 속도 변화에 따른 주파수 성분의 진폭 변화, 위상 변화를 검지하여 이상 발생 시 증상들의 변화를 동적으로 파악할 수 있다.

3.3 추세 분석

이 모듈은 과거의 데이터를 바탕으로 현재 및 미래의 기계 상태를 유추할 수 있도록 해주는 트렌드 분석(trend analysis) 부분이다. 최소 1분 간격의 진동 신호(peak to peak 혹은 average)를 그래프에 나타내어 오랜 시간 동안 운전되어 온 기계의 진행상태를 사용자가 쉽게 파악할 수 있다. 모니터링 기간이 길어지면 데이터 양이 많아지는데 이를 효율적으로 검색, 관리하기 위해 MS-SQL 7.0 데이터 베이스를 사용하였다.

4. 진단 알고리즘

4.1 프레임 기반 진단

현장에서 회전기계 결함 진단에 널리 쓰이는 Sohre 차트를 근간으로 프레임 형태 지식 기반(frame-based)을 구성하고, 이를 이용해 진단을 수행하는 방법을 제안하였는데 이 방법은 전문가 시스템의 구조적인 지식 표현에 속한다. Sohre 차트는 여러 진동 현상과 각 진동 결합 발생의 확률적 관계를 설정한 도표이다. 지배 주파수 분석, 지배 진폭의 발생 방향과 위치, 회전 변화 시의 진폭 반응 등의 여러 범주들에 속해 있는 90여 개의 다양한 증상들을 바탕으로 하여 40여 개의 결합을 검증할 수 있다. 차트에서 각 결합들의 징후에 따른 가능성의 합은 100일 수도 있고 그 이상일 수도 있는데 이는 각각의 결합들이 여러 증상에서 동시에 일어날 수 있기 때문이다. Figure 8는 Sohre 차트에서 주파수 분석 범주의 결합들과 그 증상을 나타낸다.⁽¹⁰⁾

Sohre 차트를 근간으로 한 프레임 기반의 진단 과정은 우선 각 증상별 범주 내 결합 가능성을 구한다.

$$P_i(A) = \frac{\sum (\text{probabilities of detected symptoms})}{\sum (\text{probabilities of all symptoms})} \quad (1)$$

$P_i(A)$ 는 각 범주에 포함된 증상 중 측정된 데이터를 통해

Cause of Vibration	Resonant Freq.	40-50%	50-100%	1X	2X	Higher Multiple	1/2 RF	1/4 RF	Lower Multiple	Odd Freq.	Very High Freq.
Unbalance	5	-	-	90	5	5	-	-	-	-	-
Casing distorting	10	10	10	60	20	10	-	-	-	-	-
Seal rub	10	10	10	20	10	10	-	-	10	10	10
Bearing damage	20	20	20	40	20	10	-	-	-	-	20
Coupling damage	10	20	10	20	30	10	-	-	-	-	80
Eccentricity	60	-	-	40	60	-	-	-	-	-	-
Misalignment	5	10	-	30	60	10	-	-	-	-	10
Bearing damage	20	20	20	40	20	-	-	-	-	-	20
Critical speed	100	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-
Oil whirl	-	80	-	-	-	-	10	5	-	-	-

Fig. 8. The part of Sohre's Chart - Predominant frequency analysis

탐지된 증상들의 확률값과 범주 내 모든 증상들의 확률의 더한 값을 이용하여 구한다. 이는 각 범주 내에서의 결합 A의 발생 가능성을 의미한다. 최종 결합 확률은 기하 평균 식을 이용하여 구하게 된다.

$$P(A) = \left[\prod_{i=1}^n P_n(A) \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

n 은 추론에 사용된 범주의 개수이다. 만약 어떤 범주 내의 증상 중 하나도 탐지되지 않았다면 그 범주는 추론에서 제외된다. 기하 평균은 산술 평균에 비해 보다 값이 작기 때문에 각각의 증상별 범주에 구해진 값들 중 낮은 확률값에 가중치를 주는 것이 된다. 이를 통하여 여러 결합들 사이에서 가능성이 높은 결합에 대한 분별성을 높게 할 수가 있다.

4.2 규칙 기반 진단

규칙 기반(rule-based) 기법은 매우 복잡한 전문가의 지식을 표현하는 방법 중 IF-THEN 구조를 이용하여 진단을 수행한다. 예를 들면 다음과 같이 구성되어 있다.

IF : Predominant frequency component is 1X
and the direction of vibration is radial
and the location of predominant vibration is rotor
THEN : Problem is unbalance with belief is 0.7

규칙을 통해서 얻어진 결합의 확률은 확신도(certainty factor)로 표현된다. 이는 진동 현상에 대한 추론이 모든 회전체 결합에 대해서 명확하고 확실한 자료를 기반으로 하는 것이 아닌 각 현상에 대한 전문가의 지식을 바탕으로 주관적인 해석에 기인하기 때문이다. 이러한 지식구조는 다양한 규칙들을 동시에 처리할 수 있으므로 보다 정확한 진단이 가능할뿐더러 모듈화된 진단 시스템 구현이 가능하도록 해

준다. 하지만 규칙 구문의 IF 절을 만족해야 만 결과를 추론할 수 있으므로 진동 데이터 인식과 데이터 가공(FFT) 등의 일련의 데이터 획득(data acquisition) 과정과 진폭의 한계치 설정이 매우 중요하다. 또한 불완전한 데이터나 노이즈로 인해서 설정된 룰의 신뢰도와 그의 적용에 제한을 받을 수 있는 단점이 있다.

여러 개의 규칙을 통해서 얻어진 각각의 확신도를 종합하고 처리하기 위해서 Dempster-Shafer 방법이 적용되었다. 이 방법은 확률적 지식을 신뢰 추정의 개념으로 전환시키는 것이므로 기존의 확률과는 달리 규칙을 통해 얻어진 결과의 신뢰성 정도를 나타내는 것이다. 이 방법에서 모든 규칙의 집합을 θ 로 나타내며 각 규칙의 신뢰도는 0과 1 사이에 속하게 된다. 본 논문의 진단 시스템에서는 압축기를 대상으로 수집된 규칙 집합 θ 를 구간으로 하여 규칙들을 구성하였으며 θ 내의 각각의 부분에 대해서 다음과 같은 특성을 지닌다.

$$m(\emptyset) = 0 \text{ 그리고 } \sum_{A \in \theta} m(A) = 1 \quad (3)$$

m 은 기본 배정도 함수로써 각각의 규칙에 의해서 발생하는 신뢰도를 나타낸다. 여러 진동 현상에 대한 각각의 규칙들의 결합 신뢰도를 처리하는 과정은 다음과 같다.

$$[m_1 * m_2](A) = \frac{\sum_{X \cap Y = A} m_1(X)m_2(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X)m_2(Y)} \quad (4)$$

(4)의 식은 규칙들을 만족하는 두 가지 결합에 대한 예이다. m_1 과 m_2 의 공통된 부분에 대한 확률값과 공집합의 의미를 가지게 되는 부분에 대해서는 1에서 빼준 값을 이용하여 계산하게 된다. 이는 공집합이 가졌었던 값에 비례해서 각 결합들의 신뢰도를 증폭시키는 것이다.⁽¹¹⁾

4.3 하이브리드 지식 기반 진단

앞의 두 가지 진단 방법으로 구성된 병렬 구조를 기반으로 한 하이브리드(hybrid) 진단 알고리즘을 사용하여 최종 결합 가능성을 도출하였다. 각 방법이 동일한 데이터를 가지고 독립적으로 진단을 수행하며 이 결과들을 이용하여 최종 결합 가능성을 계산한다. 이 때 Dempster-Shafer 방법이 다음 식과 같이 재사용 된다.

$$[m_{sc} * m_{RB}](A) = 1 - \{1 - m_{sc}(A)\} \times \{1 - m_{RB}(A)\} \quad (5)$$

규칙 기반 진단과 다른 점은 정규화 요소가 없는 점이다. 이는 서로 같은 결합에 대해서 최종 결론을 유도하므로 공

집합이 발생할 경우가 없기 때문에 최종 결합 가능성을 증폭시켜줄 필요가 없다.

5. 진단 사례

앞과 같이 구성된 결합 진단 전문가 시스템을 검증하기 위해서 불평형, 오일 뿔, 마멸 실험을 시행하여 결합 데이터를 검출하고 이를 결합 진단 전문가 시스템에 적용시켰다. Figure 9는 벤틀리 네바다사에서 제작된 rotor-kit 실험 장치이며 Figure 10~12는 각 결합들의 스펙트럼 선도이다.

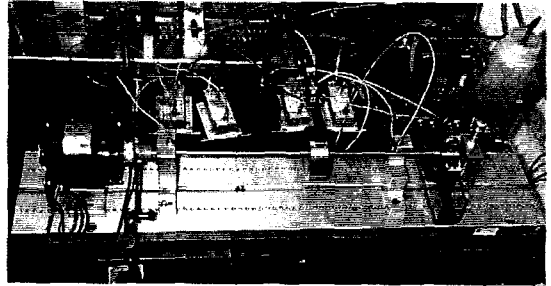


Fig. 9. Experimental setup of rotor-kit

5.1 불평형 사례

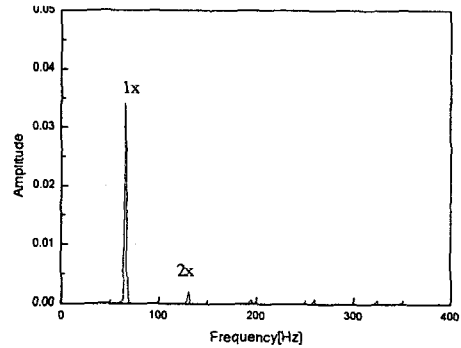


Fig. 10. Unbalance spectrum

detected symptoms

predominant freq.: 1x

location of predominant freq.: shaft

	Frame based	Rule base	Hybrid
Unbalance	0.87	0.54	0.94
Casing Distortion	0.67		0.67
Eccentricity	0.47		0.47
Bearing Damage	0.44	0.23	0.54
Rotor Axial Rub	0.39		0.39

5.2 오일 휄 사례

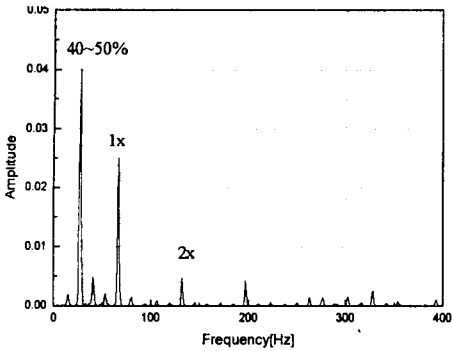


Fig. 11. Oil Whirl spectrum

detected symptoms

predominant freq.: 40~50% high,
location of predominant freq : shaft

	Frame based	Rule base	Hybrid
Oil Whirl	0.89	0.54	0.95
Coupling Damage	0.34		0.34
Bearing Damage	0.32	0.23	0.48
Rotor Axial Rub	0.34		0.34
Thrust Bearing Damage	0.1		0.1

5.3 마멸 사례

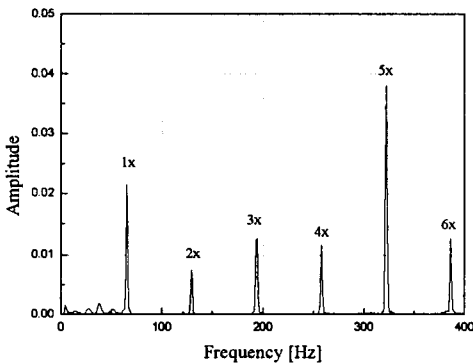


Fig. 12. Rubbing spectrum

detected symptoms

predominant freq.: 5x
location of predominant freq : shaft

	Frame based	Rule base	Hybrid
Rubbing	0.24	0.7	0.8
Misalignment	0.15	0.7	0.74
Harmonic Resonance	0.3	0.4	0.58
Casing Distorting	0.27		0.27
Coupling Damage	0.12		0.12

첫 번째 사례의 경우 가장 두드러진 1x 성분에 의하여 불평형 성분이 가장 높은 확률로 검출되었다. 두 번째 사례에서는 1x의 40~50% 주파수 성분의 진폭이 가장 크게 나타났으며 이로 인해 오일 휄 결합이 높은 확률로 검출되었다. 세 번째 사례의 경우 3x, 4x, 5x 등의 조화파(harmonics) 성분들에 의해서 마멸 결합이 가장 높은 가능성을 가지고 검출되었으며 이로 인해서 정렬 불량 결합도 같이 검출되었다.

진단 사례들에서 보면 가장 지배적인 결합이 프레임 기반 진단과 규칙 기반 진단에서 가장 높은 결합 가능성으로 도출되었고 이는 하이브리드 기법을 통해서 그 확률이 증폭되었다. 이를 통해서 여러 결합들 사이에서 지배적인 결합을 명확하게 알 수 있다. 이러한 진단 사례를 통해서 하이브리드 진단 알고리즘이 진동 결합 진단에 정확히 응용될 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 회전 기계의 상태 모니터링과 결합 진단을 위하여 A/D 변환기, PC로 이루어진 하드웨어와 수집된 데이터를 그래프로 나타내어 기계의 상태를 파악하는 모니터링 부분, Sohre 차트를 이용한 프레임 기반 기법과 규칙 기반 기법의 진단 부분으로 구성되어진 결합 진단 전문가 시스템을 연구 개발하였으며 이를 검증하기 위한 실험을 병행하였다. 실험결과를 이용하여 진단 시스템에 적용해 본 결과 주파수 등의 여러 증상들에 따른 결합 진단이 원활히 수행됨을 알 수 있었다. 하지만 진폭이 한계치를 넘는 경우 진폭의 크기가 결합 가능성에 영향을 미치지 못하는 단점이 있었다. 앞으로 이를 처리함과 더불어 결과에 대한 정확성을 지식 기반에 피드백(Feedback)을 시키는 알고리즘을 추가하여 보다 정확한 진단 시스템을 구현할 계획이다.

참고 문헌

- (1) 양보석, 전순기, 장우교 등, 1995, "회전기계의 진동에 의한 이상진단 시스템의 개발", 한국소음진동학회 춘계학술대회 논문집 pp.350-353
- (2) A. Davies, 1998, "Handbook of Condition Monitoring", Chapman & Hall
- (3) Z. Wang, Y. Liu, P.J.Griffin, 1999, "A combine ANN and Expert system tool for transformer fault

diagnosis" Proceedings of the 1999 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 1

(4) 양보석, 전순기, 김호중, 1996, "퍼지이론을 이용한 회전 기계의 진동진단법", 대한기계학 회논문집(A), 20권, 5호 pp1411-1418,

(5) C.C.Peck, A.P.Dhawan, "Genetic Algorithm based input selection for a neural network function approximator with applications to SSME health monitoring" NASA-CR-199089

(6) C. Siu, Q. Shen, R. Milne, 1997, "A Fuzzy Expert System for Vibration Cause Identification in rotating machines", Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol 1, pp 555 -560

(7) Tim Talyor, David Lubkeman, 1989, "Application of knowledge-based programming to power engineering problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.1, pp345-352

(8) Chun Siu, Qiang Shen, Robert Milne, "A Fuzzy Expert System for Vibration Cause Identification in rotating machines", IEEE

(9) Y.B.Lee, T.W.Lee, S.J.Kim et al, 2001, "A hybrid knowledge-based expert system for rotating machinery", Proceedings of the 14th international congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, pp689-696

(10) J. Sawyer, 1980, "Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook", Turbomachinery international Publication.

(11) 이재규 등, 1998, "전문가 시스템 원리와 개발", 법영사