

지능진단기법에 의한 원심펌프의 고장진단에 관한 연구

신 준*, 이태연⁺

(논문접수일 2003. 5. 12, 심사완료일 2003. 6. 18)

A Study on the Diagnosis of the Centrifugal Pump by the Intelligent Diagnostic Method

Joon Shin*, Tae-Yeon Lee⁺

Abstract

The rotating machineries always generate harmonic frequencies of their own rotating speed, and increment of vibration amplitude affects to the equipments which connected to the vibrational source and causes industrial calamities. The life cycle of equipments can be extended and damages to the human beings could be prevented by identifying the cause of malfunctions through prediction of the increment of vibration and records of vibrational history. In this study, therefore, diagnostic expert algorithm for the centrifugal pump is developed by integrating fuzzy inference method and signal processing techniques. And the validity of the developed diagnostic system is examined via various computer simulations.

Key Words : Diagnostic Expert System(진단전문가시스템), Fuzzy Inference(퍼지추론), Vibration Signal(진동신호)

1. 서론

설비의 노후화 및 외부충격과 이상 작동을 파악하는 방법의 하나로서 진동 측정을 통한 진단법은 비파괴 검사이며 동작되고 있는 설비와 생산 과정에 영향을 주지 않는 경제적이고 효과적인 유지보수 수단이다. 특히 터빈, 베어링, 모터, fan, 펌프 등은 진동을 통하여 가장 쉽게 이상을 감지할 수 있는 회전 기기류이다. 이러한 회전 기기들에 있어서 베어링이나 회전체의 파손이 발생할 경우 진동 진폭이 증

가되어 주변 설비의 노후화를 가속시키고 설비의 이상작동과 파괴에 의한 산업 재해를 일으킨다. 따라서 설비의 진동 증가를 미리 감지하고 지금까지의 진동 기록을 이용하여 문제점을 추적함으로써 설비의 원활한 운전과 수명을 연장시켜 산업재해를 예방 할 수 있다⁽¹⁾.

한편, 회전체의 진동을 계측, 분석하여 진단을 수행하기 위해서는 계측, 데이터 수집, 데이터 분석 및 판단과정이 필요한데 전문가에 대한 훈련 정도 및 경험에 따라 동일한 설비에 대해서도 진단 신뢰도, 객관성, 정확성 등이 변화하게

* 주저자, 원주대학 동력기계과 (jshin@sky.wonju.ac.kr)
주소: 220-711 강원도 원주시 흥업면 흥업리 산2-1

+ 원주대학 동력기계과

된다. 따라서 이를 극복하기 위하여 일반 사용자가 진단 시스템을 전문가처럼 운용할 수 있도록 각종 신호처리 기술 및 인공 지능적 판단 기법을 내재한 전문가 시스템으로의 확장이 반드시 필요하다⁽²⁾.

본 연구에서는 대표적인 산업설비인 원심펌프에 대하여 진동에 의한 고장진단 전문가 시스템을 개발하기 위해, 신호처리 기술과 퍼지 추론방식을 통합한 진단 알고리즘을 개발하고 회전체에서 주로 발생되는 이상별 모의실험을 실시하여 개발된 진단시스템을 검증하고자 한다.

2. 진단기술

2.1 신호처리기술

본 연구에서는 시간영역에서 사용되는 해석 기법의 이론을 고찰하여 진단 프로그램 모듈 작성에 이용하였다⁽³⁾.

RMS 값은 어떤 계에 대해 전 주파수대에 걸친 진동의 크기가 문제될 경우 구조 변경으로 인한 진동의 전체 크기의 변화를 파악할 수 있으며 시스템 결합에 의해 소음이나 진동이 증가할 경우 RMS 값의 변화 추이를 관측하여 그 시점을 파악하는 결합 진단에 사용한다. 그런데 현재의 해석기기 대부분이 디지털형이므로 연속신호를 A/D 변환기에 의해 샘플함수로 변환하여 식 (1)과 같이 사용한다.

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (1)$$

또한 PTP(Peak to peak)는 진동 및 소음의 심한 정도를 나타내는 특성인 진폭을 정량화 할 수 있으며, 신호의 최대 변화를 나타내기에 편리하다. Crest factor는 식 (2)와 같이 PTP값과 RMS의 비를 의미하는데 하중이나 속도에 부분적으로 민감하지 않으므로 초기 결함을 감지 할 수 있는 진단 지표이며 소음, 진동 신호의 충격에 대한 측정치로써 Shock나 충격 소음 등에 사용된다.

$$\text{Crest factor} = \frac{\text{PTP}/2}{\text{RMS}} \quad (2)$$

2.2 회전체의 설비진단

회전체에 대한 설비진단 기술은 진동과 소음의 계측에 의한 방식이 주를 이루고 있다. 일반적인 회전체는 크게 축, 커플링, 베어링으로 구성되어 있으며 각 요소들의 이상 발생시 나타나는 현상은 주로 주파수 특성으로 감지할 수 있다⁽⁴⁾. Table 1은 일반 회전체에서 주로 발생되는 이상 현상

Table 1 Vibrational characteristics of rotating machines according to malfunctions

Malfunctions	Characteristics	
	main frequency	direction
unbalance	1RF(90)	A(10), H(50), V(40)
misalignment	1RF(40), 2RF(50)	A(50), H(30), V(20)
oil whirl	> 0.5RF(100)	A(10), H(50), V(40)
bearing defects	1RF(40) side band(20)	A(30), H(40), V(30)
mechanical looseness	2RF(50) harmonic(30)	A(10), H(30), V(60)

과 그에 따른 특징을 정리한 내용이다. Table 1에서 RF는 회전주파수(Rotating Frequency)를 의미하며 진동 방향에서 A는 축방향(Axial), H는 수평방향(Horizontal), V는 수직방향(Vertical)을 나타낸다. 또한 ()안의 숫자는 이상에 따라 특성이 나타날 수 있는 확률을 %로 표현한 수치이다.

2.3 전문가시스템

전문가 시스템은 특정 영역의 문제해결을 위하여 전문가의 경험적 지식이나 문제해결 방식을 컴퓨터 상에 이식하여 초보자도 전문가와 유사한 판단을 내릴 수 있도록 하기 위한 지식공학 시스템이다. 전문가 시스템의 도입으로 일반 사용자가 이 시스템을 사용해서 전문가와 같은 수준의 지적 행위를 하게 되므로 기술의 발달에 따른 전문가의 상대적인 능력감퇴에서 벗어날 수 있고 분산된 전문 지식을 결합하여 각 분야의 전문가들의 협동작업에 상당하는 기능을 발휘할 수 있게 된다⁽⁵⁾.

Table 2는 회전기계의 이상 현상과 이를 가장 효과적으로 진단할 수 있는 진단 지표와의 일반적인 상관관계를 나

Table 2 The relationship between diagnosis index and malfunctions

index \ malfunction	1RF	harmonic	RMS	Axial Vib.	side band
unbalance	●		○		
misalignment	○			●	
oil whirl	△		●		
bearing	△		○		●
looseness	○	●	△		

타낸 지식으로서 본 연구에서는 각각의 관련된 강도에 따라 적합(●), 고려(○), 참고(△)로 분류하여 제안하였다.

3. 진단 전문가시스템의 개발

본 연구에서는 원심펌프에서 측정된 진동 데이터를 각종 신호처리 기법을 이용하여 유용한 정보로 변환한 후 진단에 사용되는 지표들을 추출하였다. 진단 지표로는 Table 2에서와 같이 회전기계의 이상을 가장 효과적으로 감지할 수 있는 RMS와 1차 회전주파수를 기본 진단지표로 설정하였으며 Side band와 고차 하모닉 성분 및 축 방향의 진동을 보조 진단지표로 활용하였다.

Fig. 1은 원심 펌프의 기본적인 진동 RMS값과 측정된 RMS값에 대한 차이로 구성되는 멤버십 함수를 나타내고 있다. 이 함수는 퍼지 추론을 위한 기본 정보로서 활용되며 RMS 차이를 나타내는 x축 값의 범위는 일반 진단에서 적용되는 값의 범위를 3각형 모양으로 구성하여 인간 전문가의 감각적 판단 기준을 모델링하였다. 또한 y축 값은 0에서 1까지 정규화 시켰으며 여기서 4개의 언어적 변수는 AZ (Approximately Zero), SM(Small), ME(Medium), BI (Big)를 각각 의미한다.

또한 1차 회전주파수의 차이에 대한 멤버십 함수는 x축

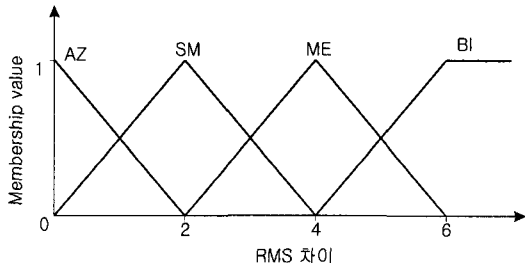


Fig. 1 Membership functions for RMS difference

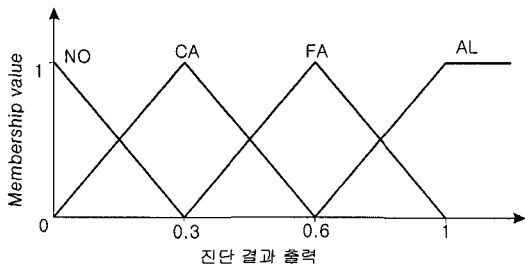


Fig. 2 Membership functions for output

값의 범위와 언어적 변수의 표현에 있어 Fig.1의 형태와 동일하다.

한편 Fig. 2는 진단 출력에 대한 멤버십 함수를 나타내고 있으며 x축 및 y축 값은 0에서 1까지로 정규화 시켰고 여기서 언어적 변수는 NO(Normal), CA(Caution), FA(Fault), AL(Alarm)을 각각 의미한다.

이상과 같이 기본 진단지표들과 출력에 대한 멤버십 함수를 구성한 후 추론에 필요한 각종 룰을 산출하기 위하여 RMS차이와 1차 RF의 차이로 Table 3과 같은 판단테이블을 구축하였다. 이 판단 테이블을 이용하여 총 16개의 진단 룰을 추출할 수 있으며 룰의 결론부에 해당되는 출력 결과는 현장 실험을 통하여 보정하였다.

한편 Table 4는 RMS 차이와 보조 진단지표의 검출 개수를 이용하여 구성한 판단 테이블로서 Table 3에서와 마찬가지로 16개의 룰을 추출할 수 있다.

이상과 같이 구성된 멤버십 함수와 판단 테이블을 이용하여 실제 데이터의 입력시 퍼지 추론을 통한 진단 결과를 산출할 수 있게 된다. 진단 과정에서 RMS 차이와 1차 RF 차이가 입력되면 멤버십 함수 그래프와 Table 3의 판단 테이블로부터 룰들이 추출되며 이렇게 추출된 룰들은 각각의 멤버십 함수에 적용되어 min-max 합성법에 따라 결과가 계산되어진다⁶⁾.

Table 3 Decision table for output by difference of RMS and 1st RF

RMS \ IRF	AZ	SM	ME	BI
AZ	NO	CA	FA	AL
SM	CA	CA	FA	AL
ME	FA	FA	AL	AL
BI	AL	AL	AL	AL

Table 4 Decision table for output by difference of RMS and number of diagnosis index

RMS \ Index	0	1	2	3
AZ	NO	NO	CA	FA
SM	CA	CA	FA	AL
ME	FA	FA	AL	AL
BI	AL	AL	AL	AL

또한 본 연구에서는 비퍼지화 과정을 위하여 무게중심법을 이용하여 x축에 대한 중심값을 계산하였고 이 값을 원래의 출력 멤버쉽 함수 Fig. 2에 적용시키면 2개의 교점이 나타나게 되는데 이들 값에 100을 곱하여 진단 확률로 변환하였다.

한편 보조 진단지표에 대해서도 앞의 내용과 동일한 과정을 수행하여 진단 확률을 계산하게 되며 두가지 추론 과정이 모두 끝나면 기본 진단지표와 보조 진단지표에 의하여 계산된 진단 확률들을 모두 산술 평균하여 최종 진단 결과로 확정된다.

4. 모의진단실험 및 결과고찰

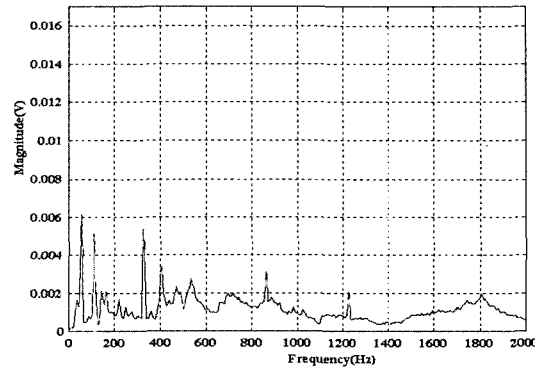
본 연구에서는 원심 펌프의 이상별 진단 실험을 행하기 위하여 펌프의 출력축에 가속도계를 설치하여 상하 방향 및 축 방향의 진동 데이터를 수집하였다. Fig. 3은 원심 펌프에서의 실험 장면을 나타내고 있다. 원심펌프 출력축의 베어링 하우스 부분에 3축방향 가속도계를 설치하여 진동데이터를 수집하였다.

진동 데이터를 분석한 결과로서 Fig. 4(a)는 최대 주파수를 2000Hz로 제한하여 측정된 상하 방향 진동의 주파수 데이터를 나타내고 있으며 (b)는 펌프의 축 방향에 대한 진동을 주파수 분석한 결과를 나타내고 있다.

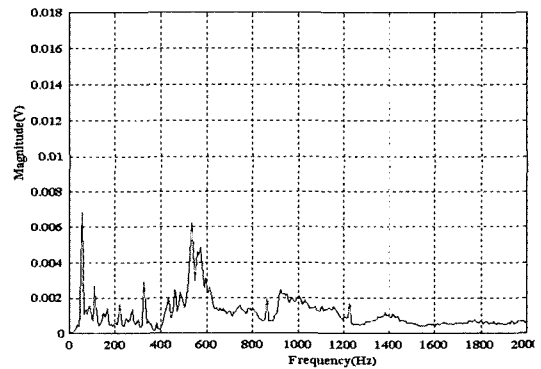
4.1 언밸런스(Unbalance) 진단

Fig. 5는 원심펌프에 언밸런스가 발생하였을 경우 진동 특성의 변화를 시뮬레이션 한 그래프이다. 언밸런스는 회전체에서 가장 빈번하게 발생하는 현상으로서 축 지지부의 진

동을 유발시켜 가스나 유체의 누설을 초래할 수 있다. 언밸런스가 발생되면 1차 회전주파수의 크기는 증가하지만 전



(a) Vertical direction



(b) Axial direction

Fig. 4 Frequency data of centrifugal pump



Fig. 3 Vibrational data acquisition set-up for the centrifugal pump

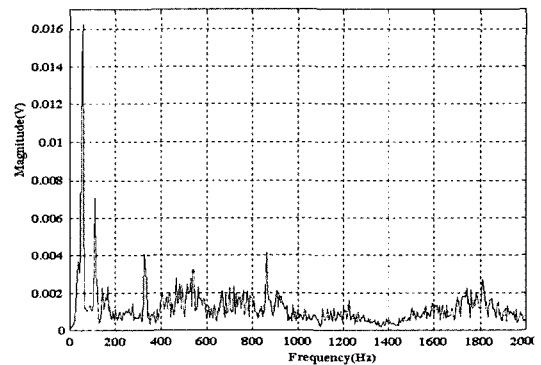


Fig. 5 Simulation data for unbalance

체적인 진동량은 크게 변화하지 않는다.

따라서 모의 실험에서는 Fig. 4(a)의 상하 방향 진동 데이터에서 펌프의 1차 회전주파수인 60Hz에 대해 크기를 2.6 배 증가시키고 나머지 주파수 성분들은 약간의 변화만을 주어 진단 실험을 행하였다.

Fig. 6은 Fig. 4의 그래프를 정상적인 펌프의 진동 데이터로 가정할 경우 Fig. 5와 같은 데이터가 입력되었을 때 개발된 시스템에 의한 진단 결과를 나타내고 있다.

개발된 시스템에 의한 진단 결과 현재 펌프는 가장 확률이 높은 “주의” 상태로 판정할 수 있으며 그 원인은 언밸런스인 것을 알 수 있다. 그러나 기존의 RMS에 의한 진단 결과 정상과 이상의 차이가 1.2배 정도이므로 “정상”이라는 잘못된 판정을 얻게 된다.

참고적으로 진단결과 표시창의 우측부분은 경향분석결과를 나타내는 그래프로서, 동일 설비에 대해 일정 간격으로 3회 이상 진단 후 고장 시기를 예측할 수 있는 기능을 마련하였다.

4.2 미스얼라인먼트(Misalignment) 진단

Fig. 7은 회전체에 미스얼라인먼트가 발생하였을 경우 진동 특성의 변화를 나타낸 그래프이다. 미스얼라인먼트는 주로 체결부의 중심이 서로 맞지 않을 경우 발생되며 그 결과로서 축 방향의 진동량이 증가하게 된다.

미스얼라인먼트 현상이 발생되면 축 방향에 대한 1차 회전주파수가 매우 커지게 되며 정도가 심한 경우에는 2차 회전주파수도 검출된다. 따라서 모의 실험에서는 Fig. 4(b)의 축 방향에 대한 1차 회전주파수 58Hz의 크기를 정상보다 3배 증가시켜서 진단 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 펌프 축에 미스얼라인먼트가 발생된 경우에 대해 개발된 진단 시스템에 의한 진단 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 진단 결과 현재 펌프는 “주의” 상태가 45%이며 그 원인은 미스얼라인먼트에 기인한 것을 확인할 수 있다. 그러나 기존의 RMS에 의한 진단에 있어서는 정상과 이상의 RMS 차이가 1.3배 정도이며 설비의 진단시 축방향의 진동을 고려하는 경우는 드물기 때문에 이 경우 “정상” 판정을 내리게 된다.

4.3 오일 휠(Oil whirl) 진단

Fig. 9는 회전체에서 오일 휠이 발생하였을 경우 진동 특성의 변화를 200Hz까지 나타낸 그래프이다.

오일 휠은 저어널 베어링에서 발생하는 현상으로서 윤활유의 고착에 의한 축의 회전을 방해하여 펌프의 성능을 저하시킨다. 회전축에 오일 휠이 발생되면 1/2차 회전주파수

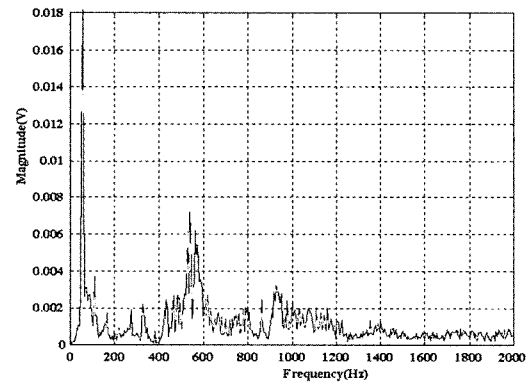


Fig. 7 Simulation data for misalignment

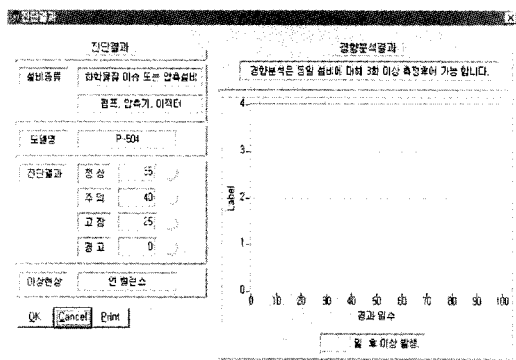


Fig. 6 Diagnostic result of unbalance

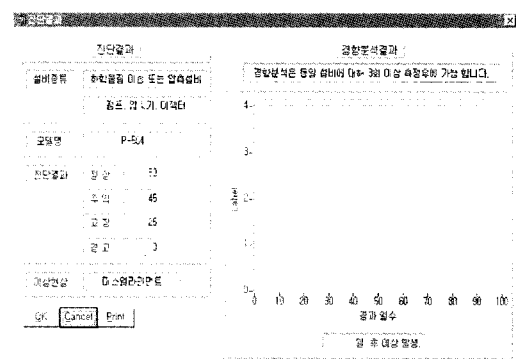


Fig. 8 Diagnostic result of misalignment

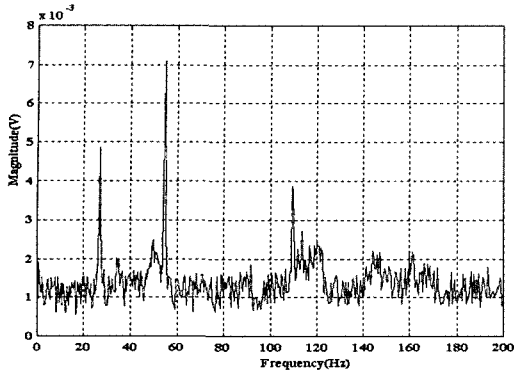


Fig. 9 Simulation data for oil whirl

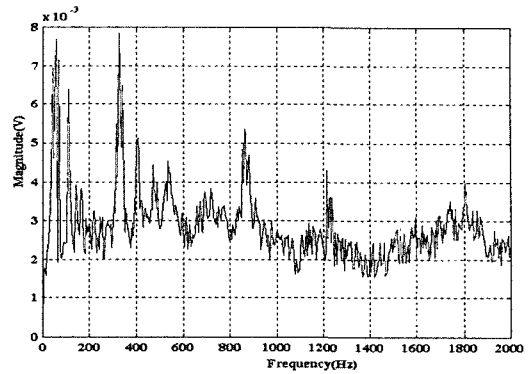


Fig. 11 Simulation data for bearing fault

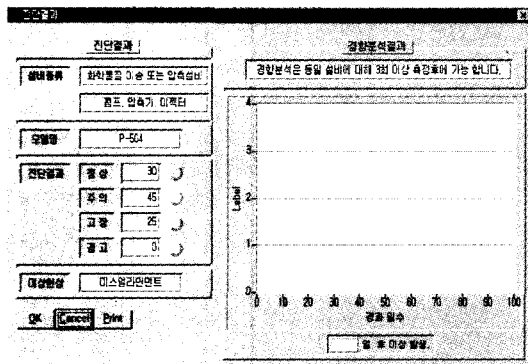


Fig. 10 Diagnostic result of oil whirl

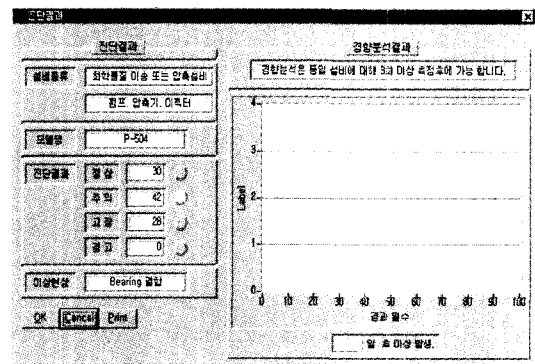


Fig. 12 Diagnostic result of bearing fault

와 1차 회전주파수의 1/2 이하 영역에 대한 저주파 진동이 매우 크게 증가하므로 모의 실험에서는 Fig. 4의 상하방향 데이터에서 30Hz와 저주파 영역에 대한 RMS 레벨을 증가시켜 진단 실험을 행하였다.

한편 Fig. 10은 Fig. 9와 같은 형태의 오일 뿔 발생시 개발된 시스템에 의한 진단 결과를 나타내고 있다. 진단결과 펌프는 50%의 “주의” 상태로 판정되었으며 그 원인은 오일 뿔로 출력되었다. 한편 오일 뿔이 발생하면 저주파의 RMS는 증가하지만 전체 RMS에는 크게 영향을 미치지 못하므로 RMS에 의한 진단 결과는 “정상”이다.

4.4 베어링 결함 진단

Fig. 11은 회전체를 지지하는 베어링에 결함이 발생하였을 경우 진동 특성의 변화를 나타낸 그래프이다.

베어링의 결함은 일반 회전체에서 사용자의 오감에 의하여 진단할 수 있는 항목중의 하나로서 결함 발생시 충격진

동과 소음을 발생시킨다. 특히 베어링은 내륜, 외륜, 볼 등의 결합 위치에 따라 고유한 결합 주파수를 나타내게 되며 이 결합 주파수를 중심으로 1차 회전주파수에 해당되는 sideband가 나타난다⁽⁷⁾. 따라서 모의 실험에서는 Fig. 4의 펌프 상하 방향 데이터에서 피크 주파수 주위에 60Hz의 sideband를 발생시키고 RMS값을 전반적으로 증가시켜 진단 실험을 행하였다.

한편 Fig. 12는 베어링 결함에 대한 진단 결과를 나타내고 있다. 개발된 시스템에 의한 진단 결과 현재 펌프는 42%의 “주의” 상태로 판정되었으며 그 원인은 베어링 결함으로 출력되었다. 한편 기존의 RMS에 의한 진단 방식에서는 side band의 발생이 전체 RMS에 미치는 영향은 극히 작지만 모의 실험에서는 전체적인 RMS 레벨을 증가시켰으므로 정상과 이상에 대한 RMS 차이가 2.2배로 계산되어 “고장”이라는 결과를 산출하였다.

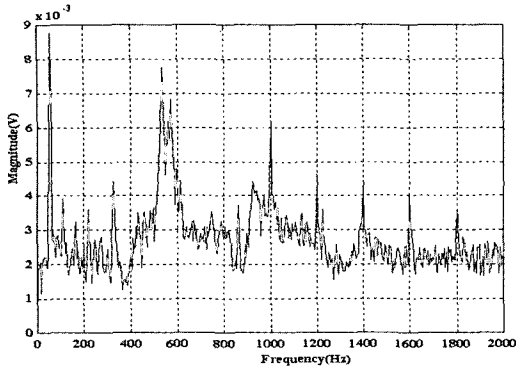


Fig. 13 Simulation data for mechanical looseness

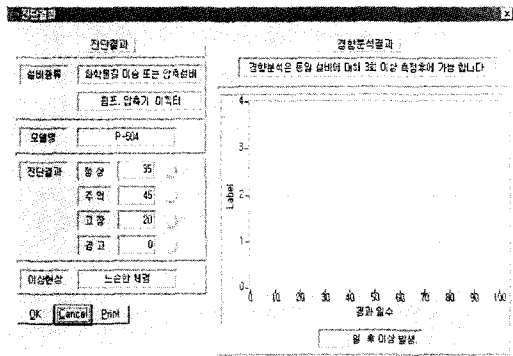


Fig. 14 Diagnostic result of mechanical looseness

4.5 느슨한 체결 진단

Fig. 13은 회전체 일부분의 체결이 느슨해졌을 경우 진동 특성의 변화를 나타낸 그래프이다. 회전체의 체결부가 느슨해지면 충격음이 발생되므로 소리에 의하여 진단할 수도 있으나 이 경우는 정도가 심한 상태이므로 조기 진단에 의한 정비가 우선되어야 한다. 기계적인 느슨함이 발생되면 1차 회전주파수를 기본으로 하는 고차 하모닉 성분이 검출되며 전체 설비의 진동을 증가시키거나 공진을 유발하기도 한다. 따라서 모의 실험에서는 Fig. 4의 축 방향 데이터에서 2차 이상의 고차 하모닉 성분을 첨가시키고 전체적으로 RMS 값을 증가시켜 진단 시뮬레이션을 수행하였다.

한편 Fig. 14는 Fig. 13과 같은 형태의 데이터가 입력되었을 경우 개발된 시스템에 의한 진단 결과를 나타내고 있다. 진단 결과 펌프는 45%의 “주의” 상태로 판정되었으며 그 원인은 느슨한 체결에 의한 것으로 나타났다. 한편 기존의 RMS에 의한 진단 결과에서도 설비 전반적인 진동 레벨

의 증가로 정상과 이상의 RMS 차이가 2.5배로 측정되어 “결함” 판정을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 펌프의 이상 진단을 감지하는 전문가 시스템의 개발을 위하여 진동신호에 의한 진단 시스템을 구축하고 모의 실험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 진단 전문가 시스템 개발을 위해 각종 신호처리 기술과 퍼지 추론 방식을 응용하여 측정된 신호로부터 효과적인 진단 결과를 추론할 수 있는 소프트웨어 모듈과 사용자 인터페이스 모듈을 개발하였다.
- (2) 원심 펌프에 대한 모의 진단실험을 통하여 회전체에서 빈번히 발생하는 각종 이상 현상들에 대해 개발된 시스템을 이용하여 효과적으로 진단할 수 있음을 검증하였다.
- (3) 개발된 진단 전문가 시스템을 통하여 단순한 레벨 비교에 의한 기존의 진단법으로는 확인할 수 없는 고장 형태까지도 진단할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Collacott, R. A., 1977, *Mechanical Fault Diagnosis*, Chapman and Hall.
- (2) Oh, J. E. and Choi, B. K., 1988, “Expert System for Diagnosis of Mechanical Facilities”, *Trans. of KSAE*, Vol. 10, No. 1.
- (3) Stearns, S. D., 1988, *Signal Processing Algorithm*, Prentice-Hall.
- (4) Collacott, R. A., 1979, *Vibration Monitoring and Diagnosis*, John Wiley & Sons.
- (5) Bachaman, B. G., 1985, *Rulebased Expert System*, Addison-Wesley.
- (6) Shin, J. and Oh, J. E., 1992, “Automobile Diagnosis by Neuro-Fuzzy Technique”, *Trans. of KSME*, Vol.16, No. 10, pp. 1833 ~ 1840.
- (7) Shin, J., Lee, J. C., Oh, J. E. and Jang, K. Y., 1992, “Diagnosis of Bearing by High Frequency Resonance Technique”, *Trans. of KSAE*, Vol. 14, No. 5, pp. 83 ~ 94.