

회전기계의 진동에 의한 이상진단 시스템의 개발

^o양보석* , 전순기**, 장우교**, 임동수**, 김호중***

(Development of Vibration Diagnosis System for Rotating Machines)

(Bo-Suk Yang, Sun-Ki Jun, Woo-Kyo Jang, Dong-Soo Lim, Ho-Jong Kim)

1. 서론

발전플랜트 등 각종 산업분야에서 많은 회전기계가 설치되어 사용되고 있다. 이들 회전기계는 플랜트 내의 중요한 위치를 차지하고 있기 때문에 기계의 신뢰성 및 가동률 향상을 위해 기계를 정기적으로 정지하고 점검하는 「정기진단」을 수행하고 있다. 이 방법으로는 이상의 조기발견이 곤란할 뿐만 아니라 정상적으로 기능을 발휘하고 있는 기계를 정지하는 것에 의해 오히려 이상을 일으킬 가능성도 있다. 따라서 가동 중에 기계의 상태를 감시하고 진단을 수행하기 위해 이상진단 기술의 개발이 강력하게 요망되고 있다.¹⁾

즉 중요한 회전기계에는 운전상태를 감시(monitoring)하기 위해 각종 센서가 부착되어 있고, 설비보안의 측면에서 유용하게 활용되어 왔다. 회전기계에서는 온도, 압력, 유량 등의 process data 뿐만 아니라 통상 진동신호도 감시대상이 되고 있다. 이는 진동이 회전기계의 건전성을 나타내는 중요한 지표가 되고 이상이나 고장의 초기 감지에 유익한 자료가 되기 때문이다. 그러나 이상이나 고장이 발생하였을 경우, 진동 data로부터 원인을 추정하는 데에는 매우 전문적인 지식과 오랜 경험이 필요하다. 또한 원인추정에 있어서 잘못된 판단은 큰 사고와 경제적 손실은 야기시키게 되는 경우가 많기 때문에 선진국에서는 통상 회전기계 제작사의 전문가가 대응하여 처리하여 왔다.^{2,3)}

그러나 최근 플랜트의 고성능화, 복잡, 시스템화 및 고도의 전문가 부족 등의 상황에서 이상진단 및 고장진단의 자동화에 대한 요구가 매우 높게 되고 선진국에서는 상당히 오래 전부터 전문가 시스템의 개발에 역점을 두고 연구가 진행되어져 왔다.

고장진단시스템에 있어서 가장 중요한 것은 이상·고장의 원인(cause)과 증상(symptom)과의 관계를 바로 아는 것이다. 즉 「진단이란 증상과 인과관계가 기지의 상태에 있어서 원인을 추정하는 것」으로 정의될 수 있다. 종래에는 이상·고장의 원인과 관측된 증상사이의 인과관계를 이용하여 통상의 연산이나 원인, 증상 및 인과관계의 애매함(fuzziness)을 고려한 fuzzy연산 등의 인과관계의 모델로서 사용되었다. 따라서 인과 매트릭스를 이용한 수식모델에 의해 이상·고장의 원인과 증상 사이의 관계가 기술되고, 이의 역연산에 의해 증상으로로부터 원인이 추정될 수 있다.

본 연구에서는 퍼스널 컴퓨터에서의 사용을 전제로 일반

적인 회전기계를 대상으로 한 이상진단 시스템, 즉 on-line data에 의한 real time 진단 시스템을 구축한다. 본 시스템은 검출, 처리, 판단의 3단계로 구성된다.

2. 이상진단 시스템의 구성

검출 및 처리단계에서는 미리 정해진 시간마다 자동적으로 진단대상기계에 설치된 센서로부터의 진동신호를 측정하고, 이 data는 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터 내의 진단시스템에 입력되고 data 처리를 수행한다.

판단의 단계에서는 진동 data와 user에 의해 설정된 각종 한계치(threshold value)와의 비교에 의해 이상판별을 하고, 이상이 감지된 경우, 간이 진단을 하여 이상원인을 추정한다. 이를 위해 한계치 입력이라는 불편함은 있으나, 대상기계 및 운전상황에 대응한 한계치를 설정할 수 있으므로 진단 대상기계를 한정할 필요가 없고 정확한 판별이 가능하다.

또 과거에 측정된 진동 data는 본 시스템의 data base에 보존되므로 이들 data 중에서 임의로 data를 선택하여 표시함으로써 이상이 감지되지 않은 경우에도 과거 data에 기초한 경향 예측이 가능하다. 그리고 이상이 감지된 data에 대해서는 fuzzy 이론에 의한 간이 진단을 수행하여 이상원인을 추정한다.

2.1 Hardware의 구성

본 시스템은 일반적으로 보급되어 있는 personal computer 상에서의 사용을 전제하고 있다. 단, 처리속도가 늦은 기종에서는 data량이 증가하면, 진단에 시간이 너무 걸리기 때문에, 대상기종은 CPU가 32bit, 66MHz 이상의 기능을 갖는 것으로 하고 있다. 더욱이, 계산속도의 향상 및 data base작성에 필요한 memory의 확보를 위하여, 비교적 쉽게 setup할 수 있는 주변기기를 장비하는 것이 바람직하다. 참고를 위하여, 현재 사용하고 있는 hardware의 구성을 표시한다.

| 본 체 (IBM PC Compatible) | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| CPU | i80486 DX 66 |
| Memory | 16MB |
| 주 변 기 기 | |
| 내장형 hard disk | 320MB (소프트웨어5MB, 임시하일4MB 차지) |
| 수치 data 프로세서 | i80387 (반드시 필요) |
| 그래픽 board | ET4000/W32 (VESA를 지원하는 Super VGA) |
| Pointing system | MS Mouse Compatible (반드시 필요) |

* 부산수산대학교 공대 기계공학과

** 부산수산대학교 대학원

*** 한국중공업 (주) 기술연구소

2.2 시스템 실행부의 구성

이상진단 시스템의 구성을 나타낸 flow chart를 그림 1에 보인다. 본 시스템의 프로그램은 이하에 나타내는 여섯가지의 부분으로 구성되어 있다.

- (1) 진단대상 설정
- (2) 한계치 설정
- (3) 신호처리/주파수 분석
- (4) 정상/이상 판별
- (5) 이상진단
- (6) 경향예측

프로그램의 작성에 있어서는 디스플레이 상에서의 표시도면이 중심으로 되기 때문에, Graphic함수가 풍부하게 준비되어 있는 [C++ 언어]를 이용하여 기술하였다. 또 프로그래밍 방식은 가장 진보된 개념인 OOP(Object Oriented Programming)를 채택하여 각 모듈을 재사용할 수 있는 Class로 작성하였다. Compiler에서는 [Borland C++ Ver 3.1]을 사용하고 있다.

프로그램의 크기가 커짐에 따라 메모리의 요구사항이 커지므로 XMS(연속 확장 메모리) 또는 EMS(중첩 확장 메모리)를 사용하고 메모리 사용의 극대화를 위하여 하드 디스크에 임시 화일을 생성하여 사용한다. 사용자 Interface는 대화형 정보교환방식인 GUI(Graphics User Interface)를 사용하여 키보드의 사용을 최대한 줄이고 마우스를 사용함으로써 거의 모든 처리가 가능하도록 하였다.

3. 시스템의 초기설정

3.1 대상기계모델의 설정

본 논문에서는 진단의 대상이 되는 회전기계로 터보발전기를 예로 들어 설명한다. 저압(LP), 중압(IP) 및 고압터빈(HP)과 발전기(GE) 및 여자기(EX)의 5종류의 기계를 조합하여 구성하고, 최고 4개의 기계를 연결하는 것이 가능하다.

대상모델의 설정후, 그 모델에 대응하는 진동데이터의 계측위치를 지정한다. 본 시스템에서는 대상기계에 있어서 한 점(주로 베어링)에 있어서 한 방향으로부터 계측된 진동 데이터에 기초하여 이상판별 및 간이진단을 실행한다. 또, 지정된 진동데이터의 계측점에 대응하여, 이력 데이터를 보존해 놓기 위한 파일명을 아래순서로 자동적으로 결정한다.

- (1) 모델설정부에 있어서 대상이 되는 모델을 구성하는 각 기계의 기계번호, 기계명, 길이를 각각 설정한다.
- (2) 설정이 종료하면, 이어서, 그들 내에서 이상진단의 대상으로 되는 기계 및 진동측정위치(베어링 또는 축)를 결정한다.
- (3) 여기서, 지금까지의 설정내용으로부터 이력 데이터의 파일명을 결정한다.

모델의 설정 시에 결정된 데이터는 데이터파일에 저장되고, 이미 설정되어 있는 경우에는 그 데이터에 기초하여 자동적으로 모델을 설정한다. 설정 후는 항상, 수정인가 결정인가의 확인을 하도록 하고 있다. 이하에 표시한 그림은 디스플레이 상에서의 각 설정화면의 예이다. 우선 그림 2는 대상모델 표시 및 진단대상기계 지정화면이다. 기계의 선택은 dialog box에서 마우스로 필요한 부분을 선택하거나 키보드로 선택부분을 이동하여 선택할 수도 있다. 기계의 종류는 고압(HP), 중압(LP)터빈 및 발전기이다. 여기에서도 역시 마

우스로 list box를 클릭하여 연결부분을 간편히 연결한다.

3.2 한계치의 설정

본 시스템에서는 이상판별의 기준이 되는 한계치(threshold value)를 user 입력에 의해 미리 설정해 놓을 필요가 있다. 한계치는 대상기계에 따라 다르며, 또한 운전조건 등에 의해서도 다르게 된다. 따라서, 진단의 대상이 되는 기계를 한정하지 않는 한, 시스템 내에 사전에 설정해 놓는 것이 불가능하다. 또한, 한계치의 설정에 대해서는 경험적인 노하우(know how)도 필요하므로, 그 설정을 user에게 맞기는 편이 정확한 설정을 수행할 수 있다. 그를 위해, 한계치의 입력 및 변경에 대해 user가 이해하기 쉽고, 또한 정확히 설정가능할 것을 염두에 두고 한계치의 설정부를 작성했다. 한계치의 설정항목으로서는 이상판별부와 관련하여 이하의 3항목이 열거된다.

- (1) 진폭-진폭비변화에 있어서 진폭 경고치, 진폭 한계치, 진폭비 경고치, 진폭비 한계치
- (2) 주파수변화에 있어서 주파수 영역과 그 영역에 대응한 스펙트럼의 고장 레벨치 및 고장 레벨에 대응한 경고레벨, 경보 레벨의 비율(%)
- (3) 진폭 trend에 있어서 여유기간의 최저한계치.

각 항목에 대해 한계치의 설정이 종료하면 그림 3에 나타내듯이 전체 입력치를 전체적으로 표시한다. 이미 한계치가 설정되어 있는 경우는 한계치의 설정을 실행하면, 우선 현재의 설정상황이 그림과 같이 표시되고, 수정이 필요하다면 그 항목을 선택하여 수정하는 것이 가능하다.

4. 이상판별

회전기계의 진동진단의 경우, 먼저 정상(건진)인가 아니면 이상(결함)인가를 판정하는 이상판별이 필요하다. 진동에 의한 판별에는 진동의 overall진폭이나 주파수성분을 이용하여 한계치(기준치)와의 비교에 의해 정상과 이상을 식별하고 있다. 따라서 규범으로 되는 관정level인 한계치를 정하는 것이 중요하다. 일반적으로는 회전기계의 종류, 크기, 속도 등에 의해 경해져 있는 ISO, VDI, 등의 진동에 관한 기준치⁴⁾를 한계치로 이용하는 고정규범방식이 널리 이용되고 있다. 따라서 본 시스템에서는 이 방법에 기초하여 얻어진 진동 data의 종류에 따라 3.2절과 같이 3가지의 이상검사항목에 대해 사용자에게 의해 미리 설정되어 있는 각 항목마다의 한계치와 비교에 의해 해석을 수행한다. 그림 4는 각 항목에 대한 정상/이상판별결과를 나타내는 화면이다.

5. 퍼지 이상진단⁵⁾

본 시스템에서는 진동주파수 성분과 진동진폭에 대한 이상진동의 멤버쉽함수(membership function)를 고려하여, 멤버쉽정도(membership grade)를 구하고, 퍼지연산에 의하여 회전동기와 비동기진동을 구별하는 1차 진단을 한 후, 각각에 대한 진동진폭의 멤버쉽함수와 인과메트릭스(decision table)를 이용하여 보다 세분된 2차 진단을 수행하는 2단계의 진단법⁵⁾을 이용한다. 즉 1차 및 2차 진단으로 구성된다. 1차 진단에서는 편의상 회전동기진동과 저주파 및 고주파의 비동기진동으로 구분하여 진단한다. 그리고 1차 진단결과에 따라 그 영역 내에 존재하는 이상원인을 세분하여 최종진단을 하게 된다.

5.1 진동진폭의 멤버쉽 함수

진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 진동치라는 것을 나타내기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 semi-Cauchy 형의 멤버쉽함수를 채용하였다. 회전수 동기성분(1X)의 계수로는 $a=0, k=1/625$ 를, 회전동기성분의 2배수 성분(2X)에 대해서는 $a=0, k=1/156, k=1/100$ 등으로 가중치를 고려한 계수를 이용한다. 즉 1X 성분의 변위진폭이 25 μm 일 때를 한계치(threshold value)로 설정하여 멤버쉽함수의 정도가 0.5로 되도록 기울기 k를 정하고, 2X성분의 진동진폭은 12.5 μm , 그 외의 진동진폭은 10 μm 일 때를 한계치로 하였다. 이 멤버쉽함수에 의해 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 주파수인 것을 판정하는 멤버쉽 정도치를 구한다.

5.2 발생 주파수의 멤버쉽 함수

발생진동 주파수에 대하여 회전동기성분과 저주파성분, 고주파성분을 구별하기 위하여 선형 멤버쉽함수를 이용한다. 이 함수는 1X 성분의 정점과 저주파성분과 고주파성분의 정점을 1로 놓고 그 주파수와 인접하는 다른 주파수에서의 정도 0의 점을 연결하는 3각형으로 만든 형이다. 이 멤버쉽함수를 이용하여 각 주파수성분 마다의 멤버쉽 정도치를 구한다.

5.3 퍼지 이상진단

진동진폭의 멤버쉽정도를 각 진동주파수 마다의 멤버쉽 정도값과 퍼지 대수곱연산을 수행한 후, 각 주파수성분마다 퍼지 대수합연산을 하면 이상가능성의 정도를 나타내는 값이 얻어진다. 즉 1차 진단결과, 회전동기진동일 가능성의 정도가 고주파 및 저주파 진동일 가능성의 정도보다 크면 1차 진단으로 완료하고, 그렇지 않으면 2차 진단으로 이동하게 된다.

본 시스템에서는 2차 진단을 위한 decision table로서 회전기계에 관한 많은 자료를 집약한 결과로부터 얻어진 각 주파수성분의 percentage possibility가 표시되고 있고 이것을 판정의 가중치로 이용한다. 또한 판정의 정밀도를 위하여 저주파진동과 고주파 진동으로 구분하여 2차 진단을 수행한다. 그림 5는 misalignment에 대한 진동계측자료를 이용하여 본 시스템에서 진단한 결과이다. 예로 1차 진단 결과 고주파진동이라고 판정되면, 고주파진동을 위한 decision table을 이용하여 진동진폭 멤버쉽함수의 퍼지정도값과 퍼지대수곱 연산을 한 후 각각의 이상원인항목을 퍼지 대수합 연산을 하면 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 0.348로 가장 많은 득점을 한 것은 misalignment(FH1)이고, 따라서 misalignment에 의한 진동으로 진단할 수 있다. 이때 shaft crack(FH3)의 득점값이 0.206으로서 결합 가능성이 있으므로 역시 진단에 고려하여야 한다.

6. 경향예측⁶⁾

경향예측(trend forecasting)은 검출된 이상의 향후 경향을 예측하는 것, 즉 기계의 과거와 현재의 상태에 따라 미래의 발전단계를 예측하는 것이다. 본 연구에서는 새로운 경향예측법인 grey system 이론과 이의 data 생성법인 AGO(accumulated generating operation)와 GM모형을 이용하여 이상진동의 경향예측을 수행한다. 이 AGO의 장점은 관측 data를 규칙성이 강한 명확한 수학적 관계식으로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 비교적 적은 수의 data로부터 정도가 좋은 예측모형을 구출할 수 있으므로 종래 널리 이용되는 회귀분석법 보다 양호한 경향예측법이다. 그림 6은 경향예측 결과를 나타내는 화면의 한 예이다.

7. 결론

본 연구에서는 회전기계의 진동신호를 검출, 신호처리, 이상 판별, 이상진단 및 경향 예측을 수행하는 이상진동진단 시스템을 개발하였다. 이 시스템의 특징은 GUI를 지원하고 풀다운 메뉴방식을 통한 일관된 환경을 제공하며, 키보드 사용이 거의 없이 마우스만으로 모든 처리가 가능하다. 또한 각 모듈을 하나의 통합환경 내에서 처리된다. 급후 이상진단부분을 보다 개선하여 정밀진단이 이루어지도록 확장하여 갈 예정이다.

참고문헌

- 1) 豊田利夫, 回転機械診断の進め方, 日本 maintenance協會, 1993
- 2) S. Hisa et al., Vibration Diagnosis for Large Steam Turbine Rotor, 12th Conf. on Mechanical Vibration and Noise, ASME, pp.7-14, 1989
- 3) M.P. Boyce, et al., On-Line Monitoring and Diagnostics of Power Plants, EPRI Report CS-2920, pp.19-53, 1983
- 4) 양보석, 회전기계의 진동평가에 관한 동향, 한국소음진동공학회지 4(3), pp.278-282, 1994
- 5) 양보석, 전순기, 김호중, 퍼지이론을 이용한 회전기계의 이상진단법, 한국소음진동공학회 94 추계학술대회 논문집 pp.144-147, 1994
- 6) 장우교, 양보석, Grey System 이론을 이용한 기계상태의 경향예측, 대한기계학회 94 추계학술대회 논문집 pp.630-634, 1994

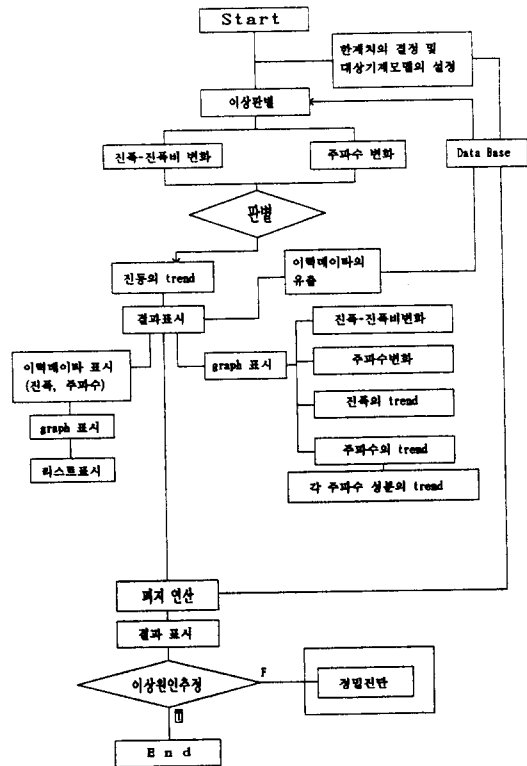


그림 1. 이상진단 System의 Flow Chart

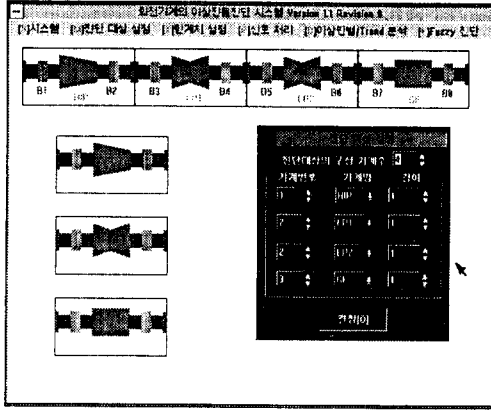


그림 2. 대상모델 표시 및 진단대상기계의 지정화면

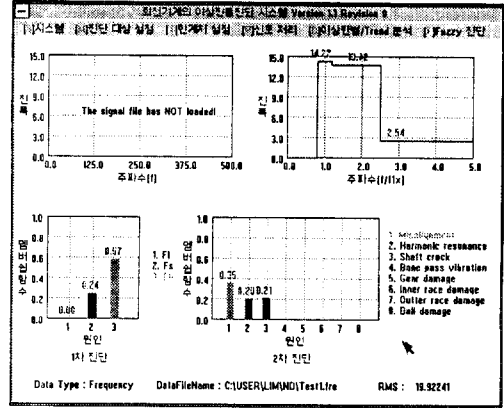


그림 5. 진단결과의 화면표시 예

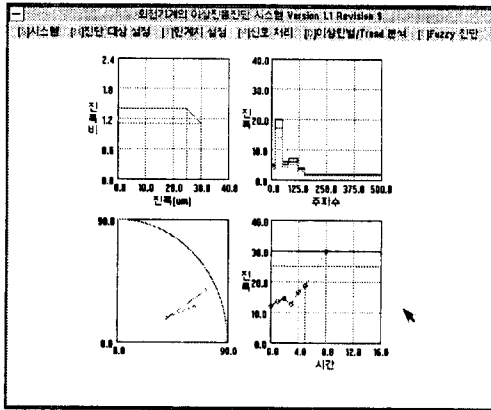


그림 3. 한계치 설정 화면

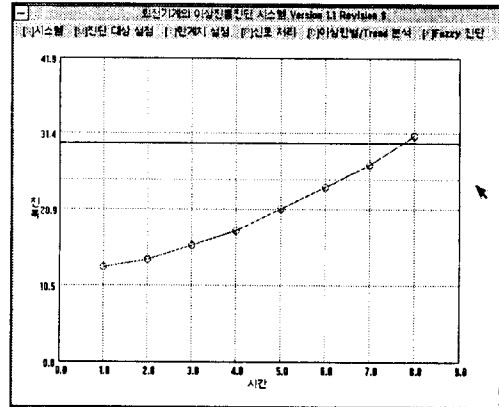


그림 6. 경향예측 결과 화면

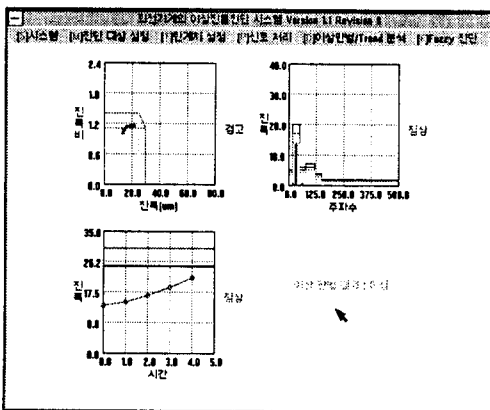


그림 4. 정상/이상 판별화면