

공학석사 학위논문

# 무선 PDA기반의 상태 감시 시스템

지도교수 양 보 석

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2006년 2월

부경대학교 대학원

지능기계 전공

손 종 덕

손종덕의 공학석사 학위논문을 인준함.

2005년 12월

|   |   |      |       |
|---|---|------|-------|
| 주 | 심 | 공학박사 | 김 동 조 |
| 위 | 원 | 공학박사 | 안 두 성 |
| 위 | 원 | 공학박사 | 양 보 석 |



## 목 차

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| ABSTRACT .....                                 | 2  |
| 1. 서 론 .....                                   | 3  |
| 1.1 연구 배경 .....                                | 3  |
| 1.2 온라인 상태감시기술의 개발현황 .....                     | 4  |
| 1.3 연구 내용 .....                                | 5  |
| 2. 상태감시 기준 설정 .....                            | 6  |
| 2.1 상태기준의 정립 .....                             | 6  |
| 2.2 일반적인 경고와 기준 데이터 설정 .....                   | 7  |
| 2.3 상태감시를 위한 특수한 기준의 설정 방법 .....               | 8  |
| 2.4 한정된 대역감시 또는 분할감시 .....                     | 9  |
| 2.5 통계적 방법에 의한 기준설정 .....                      | 11 |
| 3. 상태감시를 위한 진동평가기준 .....                       | 12 |
| 3.1 KS 규격(KS RSC 3001: 2001) .....             | 12 |
| 3.2 영국규격(BS) .....                             | 12 |
| 3.3 IEC 및 NEMA 규격 .....                        | 14 |
| 3.4 ISO 규격: 산업용 기계의 진동평가 규격(ISO 10816/3) ..... | 15 |
| 3.5 API 규격 .....                               | 16 |
| 3.6 DNV(Det Norske Veritas) 규격 .....           | 16 |
| 4. PDA 기반 상태감시시스템의 제안 .....                    | 18 |
| 4.1 개발 프로그램 구성 및 개발환경 .....                    | 18 |
| 4.2 제안 시스템 .....                               | 19 |
| 5. 시스템의 적용 예 .....                             | 27 |
| 6. 결 론 .....                                   | 36 |
| 참고문헌 .....                                     | 37 |

# Wireless PDA-based Machine Condition Monitoring System

Jong Duk Son

*Department of Mechanical Engineering,  
Graduate School,  
Pukyong National University*

## ABSTRACT

Mobile computing devices are becoming increasingly prevalent in a huge range of physical area, offering considerable market opportunities. Mobile devices like personal digital assistant (PDA) can support remote condition monitoring in plant equipments. LabVIEW software allows easy interactions between acquisition instrumentation and operators. Also it can integrate artificial intelligence algorithms. This paper presents preliminary results of a platform for remote monitoring system, which aims at enabling mobile access to real-time monitoring data by means of PDA. This system consists of two parts; one is condition monitoring and the other is fault diagnosis by using an neural network. Neural network algorithm does not destroy the initial training. It uses additional training data that is suitable for the classification of machine conditions. Condition monitoring and fault diagnosis are conducted by LabVIEW software installed in a notebook PC. The proposed system was applied to the condition monitoring and fault diagnosis of an induction motor. The application demonstrates that wireless PDA is a convenient device for the development of a powerful user interface in maintenance.

# 1. 서 론

## 1.1 연구 배경

기계의 상태감시(condition monitoring)는 운전 신뢰성을 향상시키고, 결함이나 고장으로 인한 생산 손실을 저감하기 위하여 최근 산업 현장으로부터 상당한 관심을 받아왔으며 그 중요성이 더욱 증가하고 있는 추세이다.<sup>1)</sup>

상태감시기술은 인공지능, 컴퓨터 및 정보통신기술의 급격한 발전에 따라 이들 기술과의 결합을 통하여 계속적으로 진보하고 있고, 새롭게 개발된 공학 기술과 설계는 상태감시의 질과 비용 효과성(cost effectiveness)을 향상시키기 위하여 사용되고 있다.

무선 personal digital assistant(PDA)는 기계 운전자와 유지보수기술자에게 소형이고 비용 효과적으로 사용하기 용이하므로 유용한 도구가 될 수 있다. 위험한 환경에서 사용되거나 중요 기계에서는 기계의 건강 상태를 올바르게 파악하기 위해서는 다양한 신호들의 취득이 필요하다. 이를 위해서는 현장에서 장기간 동안 기계를 감시하거나, 감시 센터(monitors center)로부터 떨어져 있거나 일정한 공간에서 기계 상태의 지속적인 감시를 하기 위해서 감시센터에서 장기간 체류하여야 하는 단점이 있다. 그러므로 기계의 건강상태를 감시할 수 있는 중요한 신호를 취득, 기록 및 표시하고 사무실로 전송하는 무선 상태감시시스템을 설계하는 것이 필요하다. 이러한 시스템은 기계 사용자, 유지보수기술자 및 관리자를 위하여 좀 더 실용적이고 편리한 수단을 제공할 수 있다.

결함이 있거나 오작동을 하는 회전기계로부터의 신호분류는 원인과 결과 사이의 관계가 매우 복잡하므로 전문지식과 경험을 필요로 한다. 결함의 원인과 증상 사이의 관계의 규명은 자동적인 진단 절차를 필요로 한다. 결함진단(fault diagnosis)을 위한 절차를 설립하기 위하여 많은 연구들이 수행되어져 왔다.<sup>3, 4)</sup> 전문가의 지식과 경험이 실제문제의 다양한 경우를 통하여 취득되므로, 전문가의 추론 절차를 모사하기 위하여 통계 및 확률적 접근에 근거하여 진단시스템을 구성하는 것이 효과적이다. 특징 기반의 알고리즘은 기계 상태를 분류하기 위한 강력한 도구를 제공한다. 일반적으로, 이 알고리즘 기계의 건강 또는 결함 상태에 대한 이전 데이터로부터 학습할 수 있는 능력을 가진

다. 이 정보는 나중 사용을 위하여 저장되고 이용될 수 있다.<sup>11)</sup> 특징 기반의 알고리즘 중 하나인 인공신경망의 이점은 기계의 상태를 알 수 있고 기계 내부의 상세한 동역학적인 이해 없이도 정보를 표시하는 것이다. 분류(**clustering**) 알고리즘은 레이블이 없는 특징 벡터를 클러스터로 조직하는데 사용된다. 유사한 벡터의 클러스터 내의 점들은 같이 조직된다.

이 논문에서는 PDA기반의 상태감시시스템을 개발하기 위한 플랫폼을 제안한다. 이 PDA 기반의 시스템은 먼 곳에서 다양한 기계들을 감시할 수 있다. 가정에서는 무선공유기를 이용해서 상태 감시가 가능하고, 외부에서는 무선 인터넷 서비스를 이용해서 상태감시가 가능하다.

## 1.2 온라인 상태감시기술의 개발 현황

먼저 네트워크 기반 설비 자동진단을 위한 국제 표준화 작업이 이루어지고 있다. 표준화 회의에서는 개별적으로 작동하던 제어기와 설비진단시스템의 통합을 위한 것으로 사업용 통신 프로토콜과 통신기기 제조회사와 무관하게 사용할 수 있는 모델을 국제 표준으로 제정하기 위한 것이다. 이 분야에서는 로크웰오토메이션, 지멘스 등 해외 메이저급 FA업체들이 관련 기술개발과 업계 표준화를 주도하고 있다.<sup>14)</sup>

로크웰삼성 오토메이션은 자동화 장비 모바일 제어서비스 엠링스를 출시하였다. 이 장비는 모바일 원격 제어 기능으로 자동화 시스템의 편리성을 강조한 관리 서비스이다. 엠링스는 PDA 등 모바일 기기에 CDMA 기술을 접목하여, 원격에서 분산 작동되는 PLC·모니터링시스템 등 자동화 설비들을 무선 패킷 통신으로 연결해 실시간으로 감시·제어하도록 해준다. 공정 설비의 상태와 점검 내용을 실시간으로 저장 및 전송할 수도 있다. 바코드 시스템과 연계해 창고에 입·출고되는 장비 및 물품 등의 관리에도 활용 가능하다.<sup>15)</sup>

LS산전은 345kW급 등 초고압 변전소에 적용이 가능한 변전소 진단감시시스템을 개발하였다. 이 시스템은 온라인으로 실시간 감시가 가능하다. 시스템에 내장된 알고리즘을 이용하여 변압기 및 가스절연개폐장치(GIS)에 설치된 센서로부터 각종 정보를 수집, 설치된 전력설비에 이상발생 여부를 사전에 알려주어 사고를 미리 예방할 수 있게 했다. 특히 진단 알고리즘은 전문가 데이터베이스 기반의 유증가스 정밀 진단 기능과 신경망 및 알고리즘 기반의 부분방전(**partial discharge**) 정밀진단 기능을 제공하는 등 예측검사 기능을 크게 강화하고 있다.<sup>16)</sup>

현재 삼성전자에서는 PC를 중심으로 가정이나 사무실에 있는 모든 정보가 전 기기를 무선으로 연결하고 있다. 따라서 PC를 중심으로 한 네트워크 환경은 모든 컴퓨터와 사물이 하나로 연결되는 유비쿼터스 시대에 더욱 중요한 의미를 지닌다. 언제 어디서나 어떤 기기로도 내 컴퓨터에 있는 모든 것을 내가 사용하고자 하는 위치에서 인터넷이든 전화든 유무선의 어떤 기기로도 다양한 네트워크를 통해 접속할 수 있는 것이 PC를 중심으로 한 유비쿼터스 생활의 요체다.<sup>17)</sup>

### 1.3 연구 내용

본 연구에서는 LabVIEW 소프트웨어 프로그램을 이용하여 기계 상태감시 알고리즘을 통합하고, PDA를 이용하여 멀리서 기계의 상태를 감시하는 시스템을 구축하였다.

제 2장에서는 상태감시의 RMS 기반의 일반적인 기준 설정방법과 특수한 기준을 설정하는 방법 그리고 통계적인 방법으로 기준을 설정하는 방법에 대해 설명하였다.

제 3장에서는 상태감시를 위한 진동 평가의 국제 기준에 대해 설명하였다.

제 4장에서는 제안된 시스템의 전체적인 흐름과 각 부분의 구성에 대해 설명하였다.

제 5장에서는 앞에서 제시한 상태감시, 진단 알고리즘의 이론과 개발된 소프트웨어를 토대로 PDA를 이용한 상태감시의 실제 소프트웨어 프로그램의 예를 설명하였다. PDA가 가지는 메모리의 한계 때문에 대부분의 계산은 노트북(base station)에서 수행하고 필요한 데이터만 PDA로 보내어 주게 되어있다. 그리고 간단한 진단 알고리즘의 결과도 PDA로 보내주게 되어있다.

제 6장에서는 본 연구의 주요 결론을 요약하였다.

## 제 2장 상태감시 기준 설정

상태감시의 목표는 전체적으로 최소의 비용을 유지하면서 기계를 계속해서 더 오래 운전하기 위한 정보를 제공하는 것이다. 상태감시와 예지정비는 정비 행위를 비용이 많이 드는 것으로부터 효율적이고 조직적이며 최소 비용의 정확한 조치로 바꾸는 것이라고 할 수 있다.

### 2.1 상태 기준의 정립

기계의 상태를 비교할 수 있는 기준 값(reference value)이나 정상상태에 대한 값이 없으면, 상태감시는 적절하게 이루어질 수 없다. 그러므로 상태를 판정하기 위한 근거를 제공하는 비교 기준값이 확립되어야 한다. 이에는 2개의 다른 형태의 비교 기준이 상태감시에 사용될 수 있다. 즉, 실질적으로 고장이 발생되었는지의 여부를 떠나서 절대적인 값만을 나타내는 것과 보다 질적인 비교 기준이 진동 상태감시, 특히 기계 구조물의 외부에서 측정되는 진동감시에 일반적으로 사용된다.

진동 한계치를 설정할 때, 2~3년간 연속적이고 믿을 만한 운전을 하는 것이 주 목표라면, 기계 제작자의 허용 한계치는 너무 높을 지도 모른다. 역으로 다른 설비에서 견딜 수 없는 진동 수준을 통상적으로 경험하는 몇몇 종류의 기계에서는 진동 측정 장비 공급자가 제공하는 허용 한계치는 너무 낮을 수도 있다. 무엇을 측정할 것인지, 어디서 어떻게 측정할 것인지, 허용 한계를 얼마로 조정할 것인가는 당연히 알아야 하며, 이것이 상태를 판정하는데 어떻게 도움이 될 것인가를 판정하기 위하여 알아두어야 할 사항은 다음과 같다.

- 무엇이 허용 한계를 벗어났는지 또는 변화했는지
- 얼마 정도까지 변화했는지
- 변화가 급속히 발생했는지 또는 천천히 발생되는지
- 처음에 관측된 것을 확증하거나 부정하는 다른 어떤 변화가 있는지

이러한 원칙을 가지고 시작하면 분석기술이 빠른 속도로 발달될 것이며, 적정한 정보를 취득하고 표시하는 방법을 알아내고 측정된 것을 분류하는데 걸리는 시간이 최소화 될 것이다.



## 2.2 일반적인 경고와 기준 데이터의 설정

일반적으로 경향관리에는 경고(warning level) 및 위험(danger level)의 2개 레벨 또는 경계(alert level), 경고(warning level) 및 위험(danger level 또는 trip level)의 3개의 레벨이 주로 이용된다.

1차 경고인 경계레벨은 상세한 진동분석이 수행되어야 한다는 것을 의미한다. 측정된 값이 경고 값을 넘어서는 경우에 대해서는 예외적으로 주파수 스펙트럼이나 시간파형에 대한 데이터가 수집된다. 데이터를 평가한 후, 유지보수작업을 수행할 것인지, 보다 자주 상태감시를 시작할 것인지 그리고 정기적으로 주기적인 상태감시를 계속할 것인지를 결정한다. 2차 경고인 경보레벨은 더욱 심각한 문제를 나타내며, 전체적인 규모의 분석 또는 유지보수작업이 수행되어야 한다. 작업에 할당되는 시간은 일반적으로 설비가 정지될 때까지 만으로 한정된다. 3차 경고인 위험레벨은 유지보수작업을 수행하지 않는다면, 곧 고장이 발생된다는 것을 의미한다.

그림 2.1은 ISO 10816-1 규격에서 제시하는 진동영역을 표시한다. 영역 A는 양호, 영역 B는 장시간 운전이 허용되는 영역, 영역 C는 보수조치를 계획하는 동안 제한된 기간동안 운전을 허용하는 영역이며, 영역 D는 운전이 허용되지 않는 영역을 나타낸다. 진동 크기의 중대한 변화가 발생하였을 때 제공하는 경보레벨은 영역 B의 상한 값의 1.25배가 권고되고, 비상정지, 즉 위험레벨의 설정은 영역 C의 상한 값의 1.25배를 초과하지 않도록 권고하고 있다.

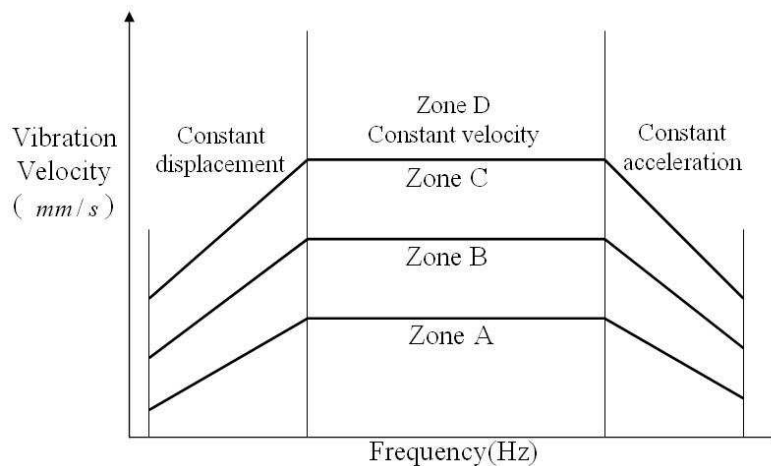


그림 2.1 진동 영역의 구분 (ISO 10816-1)

실제적인 경고 값의 설정에는 기계의 상태와 진동신호에 대한 지식이 요구된다. 새로 설치되는 유지보수 프로그램에서는 이러한 지식이 사전에 준비될 수 없으므로, 경고 값은 반드시 다른 장비, 다른 사람의 경험 그리고 일반적인 진동규격을 기준으로 설정되어야 한다. 비접촉 변위계로 측 진동이 측정되는 경우, 베어링 틈새에 대한 진동 값의 비율이 경고 값 설정에 이용될 수 있다. 때때로 설정된 경고 값은 재평가되어야 하고, 상태감시 프로그램이 운용되는 동안에 얻어진 경험을 기초로 변경되어야 한다.

## 2.3 상태감시를 위한 특수한 기준의 설정 방법

보다 세밀한 상태감시를 위해서는 진폭 대 주파수 스펙트럼과 같이 복잡한 진동 특성들을 주요 결합주파수성분 별로 분석하는 이산적인 방법(**discrete method**)이 사용되어야 한다. 진동 진폭의 심각도(**severity**) 기준에 대해 보면, 회전 주파수에 대해 탁월하게 허용 진폭에 근접하는 일련의 성분들로 구성되는 하나의 신호는 심각도 선도(**severity chart**)의 제한치를 넘어서지 않았더라도 명백히 비정상이다. 그러므로 문제는 수많은 개별적인 성분들을 포함하고 있는 복잡한 성분을 어떻게 정확하게 평가하느냐 하는 것으로 집약된다.

이에는 다음의 2개의 기본적인 방법이 사용되고 있다. 첫째 방법으로는 스펙트럼을 한정된 여러 주파수 대역(**bands**)으로 나누고, 각 대역에서의 전체 에너지와 최대 진폭을 수치로 변환한다. 그리고 각 수치는 미리 설정된 한계치와 비교하여 **overall** 값을 적용하는 방법과 동일하게 각 대역별로 경향 감시(**trend monitoring**)를 하게 된다. 둘째 방법은 협대역(**narrow band**) 스펙트럼 **envelope**를 감시하는 것이다. 두 방법 모두 각각 장단점을 가지고 있다.

대상 기계의 축 또는 그룹 단위로 결합진단을 수행할 수 있으며, 한 그룹마다 분석기능(**auto-spectrum**)을 1개 이상 설정하여 진단을 수행할 수 있다. 진단그룹의 형태에 따라 주파수대역 및 한계치가 다르게 설정된다. 그림 2.2는 상태감시 및 결합 진단 흐름도의 예를 나타낸다.

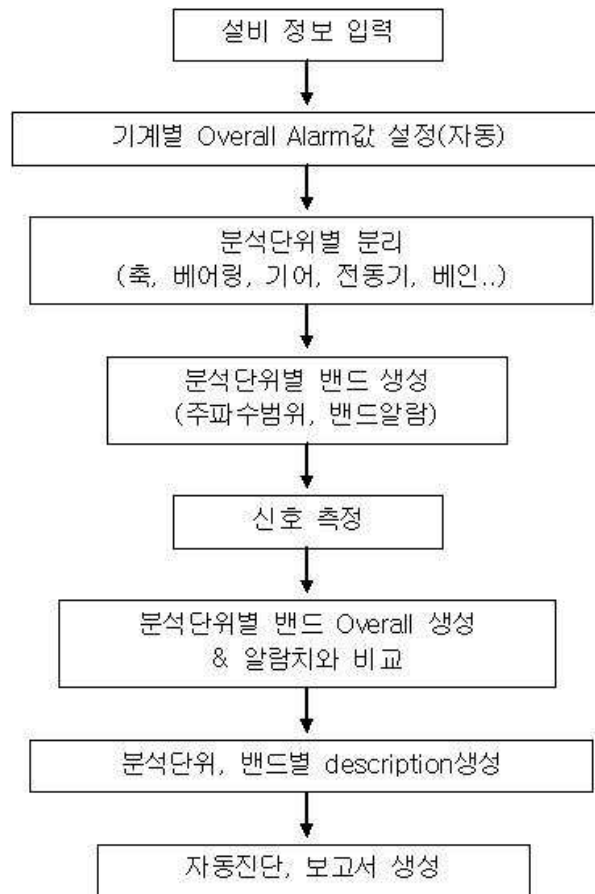


그림 2.2 상태 감시 및 진단 흐름도의 예

## 2.4 한정된 대역 감시 또는 분할 감시

기본적으로 각 기계 설비에 대해 잘 알려져 있는 결함주파수들에 대해 이들 주파수를 포함하는 한정된 대역들로 나누고, 각 대역에서의 전체에너지 또는 최고 진폭에 대한 크기를 경보레벨 값과 비교하여 감시하는 방법이다.

한정된 대역 감시는 뚜렷한 스펙트럼 상의 진폭 특징이나 특성을 이산적으로(discrete) 감시하기 위하여 복잡한 스펙트럼을 몇 개의 대역으로 분할한다. 보통 작은 상태의 변화에도 민감하도록 하기 위해 대부분의 복잡한 기계들은 10 ~ 12개 정도의 대역으로 나눌 필요가 있다.

각 대역에서의 전체 에너지와 최고 진폭의 크기는 미리 설정된 제한치와 비교되고, overall 값에 대하여 앞서 전체 값의 제한에서 설명된 것처럼 경향

감시된다. 이 방법은 매우 복잡한 기계의 스펙트럼에서 진폭이 작은 주파수성분의 초기 변화를 쉽게 인식할 수 있도록 해준다. 작은 변화에 대한 최대 감도는 구름요소베어링의 결함 주파수와 같은 특별한 특징을 분리하는 개별적인 부분으로 대역폭을 선택함으로써 얻어진다. 이것은 중대한 특징을 가지는 작은 변화가 더욱 큰 진폭을 가지는 주파수 성분들에 의해 감추어지지 않도록 보장한다. 전형적인 분할 스펙트럼의 예를 그림 2.3에 나타낸다. 이것은 구름요소베어링으로 지지된 기계에 대한 분할 예를 보여준다. 첫 번째 대역은 비정상적인 구조적 가진력을 제거하기 위하여 회전 주파수(1X)의 약 20%의 주파수에서 시작하여 회전주파수의 약 120%까지를 포함한다. 이 부분은 주로 질량 불평형(mass unbalance)의 징후를 나타낸다. 그 다음 부분은 회전 주파수의 2배수(2X)인 2차 조화성분(harmonics)을 포함한다. 세 번째의 대역은 회전 주파수의 3배(3X)에서 약 5배(5X) 성분까지를 포함한다. 제 5 대역은 구름요소베어링 결함주파수(내륜, 외륜, 볼 결함)의 기본 성분과 이의 2차 조화성분을 포함하고 있으며, 제 6 대역은 구름요소베어링 결함주파수의 3차 조화성분에서 대략 5kHz까지로 통상 베어링 외륜 결함주파수의 약 10차 조화성분을 포함한다. 여기서, 처음 다섯 대역들은 보통 RMS 또는  $RMS \times 1.414$  속도 값으로 감시되며, 고주파수 영역인 여섯 번째 대역은 속도나 가속도 값으로 감시될 수 있다. 가속도 피크로 측정되는 일곱 번째 부분은 고주파수의 베어링 특성을 나타내는데 사용될 수 있다. 매우 복잡한 기계의 스펙트럼에서도 에너지가 작은 결함성분의 초기변화를 쉽게 인식할 수 있게 해준다.

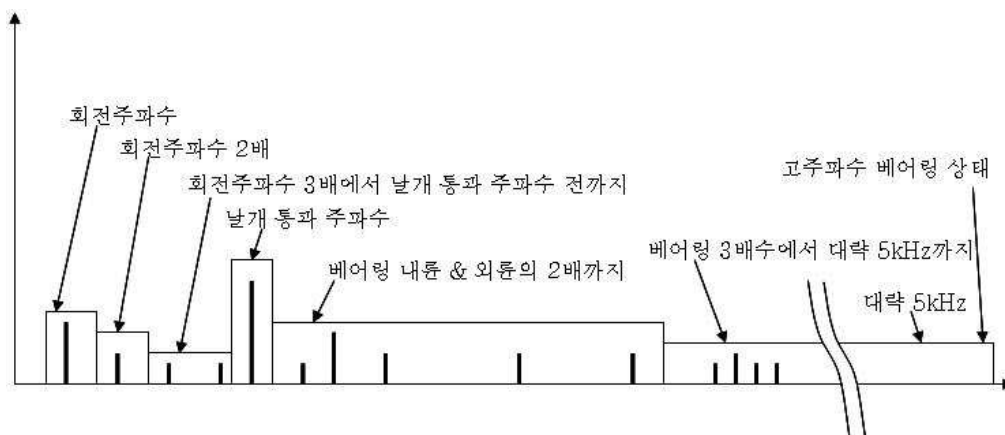


그림 2.3 주파수 대역별 상태감시 진단

## 2.5 통계적 방법에 의한 기준 설정

통계적인 분석은 경험을 정량화 하는 방법으로 고려될 수 있다. 정상상태의 진동 수준은 기계마다 각기 다르며 같은 기계라 하더라도 설치 위치와 방향(수평, 수직)등의 측정 점에 따라 통상 변하게 된다. 가장 정확한 통계적인 방법은 각각의 측정 점별로 특별한 한계치(기준치)를 산출할 수 있다.

통계적 분석의 개념은 매우 간단하다. 특정 측정 점에서 기록된 4개 또는 5개의 연속 측정값은 통계적으로 조합되어 정상 값과의 편차를 의미하는 표준편차 값에 정상 값을 더하여 평균값(mean value)을 계산한다. 통계 이론은 전체 측정값의 68.3%가 평균치의 1 표준편차( $\sigma_1$ ) 이내이고, 95.9%는 2 표준편차( $\sigma_2$ ) 이내이며, 99.7%는 3 표준편차( $\sigma_3$ ) 이내일 것이라고 설명한다. 중간 값으로부터 약 2.5 표준편차( $\sigma_{2.5}$ ) 이내에서 경보나 경고 값을 설정하는 것이 거짓 경보를 최대한 방지하면서 작은 변화에 대해 적정 감도를 유지한다는 것이 경험적으로 증명되어 있다. 만약 2.5 표준편차(즉, 약 42개의 측정에서 1개의 이탈)로 설정하였을 때 잘못된 경보가 너무 많이 발생되면, 설정치를 2.8(1/90)과 3.0(1/330) 사이 값으로 증가시킨다.

통계에 바탕을 둔 제한치 설정의 또 다른 이점은 그것이 실제 상황에 기초를 두고 있고, 정상적인 변화를 수용하며 변화에 민감하다는 것이다. 그러나 한 가지 주의할 점은 상대적인 제한치를 설정하는 시스템은 매우 낮은 진동 수준으로 운전되고 있는 기계에 대해서는 필요한 만큼 엄격하지 않다는 것이다. 그러므로 상대적인 제한 기준을 설정하는 모든 시스템은 절대 제한치를 함께 사용하여야 한다. 절대 제한치를 적절하게 설정하면 변화하는 기준치를 벗어나기 이전이라도 안전 제한치를 초과하면 경보를 발생시켜 안전치 이상으로 높게 상승하는 것을 방지할 수 있을 것이다.

## 제 3장 상태감시를 위한 진동 평가기준

### 3.1 KS 규격(KS RSC 3001: 2001)

정격 전압 및 정격 주파수에서 무부하 운전을 할 경우의 진동을 측정하며, 그림 3-2와 같이 각 베어링에 가까운 부분에서 상하 방향, 횡방향 및 축방향에 대하여 측정한다. 측정을 위한 설치 조건으로는 전동기의 중량에 따라

- 1) 중량400 kg 이하 :탄성체 위에서 측정을 원칙, 정반 위에서 측정도 가능
  - 2) 중량400 kg 이상 :정반 위에서 측정하는 것을 원칙
- 단, 각 측정값 중 최고의 값을 전동기의 진동 값으로 한다.

표 3-1 전동기의 허용 진동치(KS RSC 3001: 2001)

| 회전속도( <i>rpm</i> )       | 허용 진동치        |      |
|--------------------------|---------------|------|
|                          | $\mu\text{m}$ | mils |
| 3,000 <i>rpm</i> 이상      | 25.4          | 1.0  |
| 1,500 ~ 2,999 <i>rpm</i> | 50.8          | 2.0  |
| 1,000 ~ 1,499 <i>rpm</i> | 63.5          | 2.5  |
| 999 <i>rpm</i> 이하        | 76.2          | 3.0  |

### 3.2 영국규격(BS)

표 3-2 전동기 진동평가 규격(영국규격, BS)

| 회전속도       |       | BS 4999: part 50(1978) |    |         |      | BS 4675b |     |
|------------|-------|------------------------|----|---------|------|----------|-----|
| <i>rpm</i> | Hz    | Grade A                |    | Grade B |      | Grade 3A |     |
|            |       | 변위                     | 속도 | 변위      | 속도   | 변위       | 속도  |
| 3,000      | 50.0  | IEC 2373               |    | 24      | 2.66 | 16       | 1.8 |
| 1,500      | 25.0  |                        |    | 41      | 2.28 | 32       |     |
| 1,000      | 16.67 |                        |    | 55      | 2.04 | 49       |     |
| 750        | 12.5  |                        |    | 65      | 1.80 | 65       |     |

주) Grade A: 양호한 평형상태, Grade B: 만족스러운 평형상태,  
 Class 3: Heavy foundation의 대형기계, H: Foot에서 축 중심까지 높이(m)  
 단위: 변위( $\mu\text{m } p-p$ ), 속도(mm/s rms)

표 3-3 최대 허용진동레벨(BS 4999: Part 50)

| 등급<br>(Grade)        | 전동기 속도<br>(rpm) | 최대 진동속도<br>(mm/s, rms) | 축 중심높이<br>(mm) |
|----------------------|-----------------|------------------------|----------------|
| Normal<br>vibration  | 600 ~ 3,600     | 1.80                   | 80 ~ 132       |
|                      |                 | 2.80                   | 132 ~ 225      |
|                      |                 | 4.50                   | 225 ~ 400      |
| Reduced<br>vibration | 600 ~ 1,800     | 0.71                   | 80 ~ 132       |
|                      |                 | 1.12                   | 132 ~ 225      |
|                      |                 | 1.80                   | 225 ~ 400      |
|                      | 1,800 ~ 3,600   | 1.12                   | 80 ~ 132       |
|                      |                 | 1.80                   | 132 ~ 225      |
|                      |                 | 2.80                   | 225 ~ 400      |
| Specially<br>reduced | 600 ~ 1,800     | 0.45                   | 80 ~ 132       |
|                      |                 | 0.71                   | 132 ~ 225      |
|                      |                 | 1.12                   | 225 ~ 400      |
|                      | 1,800 ~ 3,600   | 0.71                   | 80 ~ 132       |
|                      |                 | 1.12                   | 132 ~ 225      |
|                      |                 | 1.80                   | 225 ~ 400      |

표 3-4 최대 허용 진동레벨(BS 4999: Part 50)

| 회전속도<br>(rpm) | 공장 측정<br>( $\mu\text{m}$ , p-p) | 현장 측정<br>( $\mu\text{m}$ , p-p) | 회전속도<br>(rpm) | 공장 측정<br>( $\mu\text{m}$ , p-p) | 현장 측정<br>( $\mu\text{m}$ , p-p) |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 250           | 100                             | 125                             | 1200          | 48                              | 60                              |
| 300           | 100                             | 125                             | 1300          | 45                              | 57                              |
| 350           | 94                              | 120                             | 1400          | 43                              | 54                              |
| 400           | 90                              | 115                             | 1500          | 41                              | 52                              |
| 450           | 85                              | 105                             | 1600          | 40                              | 50                              |
| 500           | 80                              | 100                             | 1700          | 38                              | 47                              |
| 550           | 77                              | 96                              | 1800          | 36                              | 45                              |
| 600           | 74                              | 92                              | 2000          | 33                              | 42                              |
| 650           | 71                              | 89                              | 2200          | 31                              | 39                              |
| 700           | 68                              | 85                              | 2400          | 29                              | 36                              |
| 750           | 65                              | 81                              | 2600          | 27                              | 34                              |
| 800           | 63                              | 78                              | 2800          | 25                              | 32                              |
| 850           | 61                              | 76                              | 3000          | 24                              | 30                              |
| 900           | 59                              | 74                              | 3200          | 22                              | 28                              |
| 1000          | 55                              | 69                              | 3400          | 21                              | 27                              |
| 1100          | 51                              | 64                              | 3600          | 20                              | 25                              |

주) 축 중심선을 통과하는 수평면의 베어링에서 측정.

주어진 값 사이는 선형 보간 하여 사용

### 3.3 IEC 및 NEMA 규격

표 3-5와 3-6은 국제전기기술자협회(IEC) 및 미국전기제작자협회(NEMA, National Electrical Manufacturers Association)가 제정한 전동기 관련 규격을 나타낸다. 표 3-5에서 *Amp.*는 진동변위 진폭(mm, p-p), *Vel.*은 진동속도 진폭(mm/s, rms)으로 회전속도 및 기초(*foot*)로부터의 전동기 회전축 중심까지의 높이(H)에 따라 허용진동레벨을 제시하고 있다.



표 3-5 IEC 및 NEMA 규격

| 회전속도   |        | IEC 2373:1974 Normal Grade |               |                          |               |                          |               | NEMA MG1<br>20.52:1980   |               |
|--------|--------|----------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| rpm    | Hz     | 80<H<132 mm                |               | 132<H<225 mm             |               | 225<H<400 mm             |               | 변위<<br>( $\mu\text{m}$ ) | 속도<<br>(mm/s) |
|        |        | 변위<<br>( $\mu\text{m}$ )   | 속도<<br>(mm/s) | 변위<<br>( $\mu\text{m}$ ) | 속도<<br>(mm/s) | 변위<<br>( $\mu\text{m}$ ) | 속도<<br>(mm/s) |                          |               |
| 3,000< | 50.0<  | 16<                        | 1.8           | 25<                      | 2.8           | 40<                      | 4.5           | 25<                      | 2.8<          |
| 1,500< | 25.0<  | 32<                        |               | 50<                      |               | 80<                      |               | 50<                      | 2.8<          |
| 1,000< | 16.67< | 49<                        |               | 76<                      |               | 123<                     |               | 64<                      | 2.4<          |
| 750    | 12.5   | 65                         |               | 101                      |               | 163                      |               | 76                       | 2.1           |

표3-6 최대 허용진동레벨(NEMA)

| 회전속도              | 변위진폭( $\mu\text{m}$ , $p-p$ ) |          |
|-------------------|-------------------------------|----------|
|                   | 직류, 교류전동기                     | 대형 유도전동기 |
| 3,000 rpm 이상      | 25.4                          | 25.4     |
| 1,500 ~ 2,999 rpm | 38.1                          | 50.8     |
| 1,000 ~ 1,499 rpm | 50.8                          | 63.5     |
| 999 rpm 이하        | 63.5                          | 76.2     |

### 3.4 ISO 규격: 산업용 기계의 진동평가 규격(ISO 10816-3)

출력 15kW이상, 운전속도 120~15,000rpm사이의 산업용 기계장치의 진동평가에 적용하며, 구체적으로는 50MW까지의 증기터빈, 1,500rpm이하 또는 3,600rpm이상의 속도를 갖는 50MW이상의 고속 증기터빈, 3MW이하의 산업용터빈, 원심압축기, 원심, 사류 및 축류펌프, 발전기, 모든 전동기, 송풍기 및 팬(fan)에 적용된다.

이 규격은 회전기계의 지지조건에 따라 강지지 및 유연지지로 구분하며, 아울러 그룹1~4로 나누어 4개의 경계에 대한 진동변위 및 진동속도 값을 제시하고 있다. 전동기는 축 높이(H)에 따라 그룹 1 또는 2에 해당된다. 일반적으로는 영역 B/C의 값이 허용진동치가 된다.

표 3-7 산업용 기계의 진동평가 규격(ISO 10816/3)

| 지지<br>분류 | 영역<br>경계 | 진동변위 ( $\mu\text{m}$ , rms) |     |     |     | 진동속도 ( $\text{mm/s}$ , rms) |     |      |     |
|----------|----------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----------------------------|-----|------|-----|
|          |          | 그룹1                         | 그룹2 | 그룹3 | 그룹4 | 그룹1                         | 그룹2 | 그룹3  | 그룹4 |
| 강<br>지지  | A/B      | 29                          | 22  | 18  | 11  | 2.3                         | 1.4 | 2.3  | 1.4 |
|          | B/C      | 57                          | 45  | 36  | 22  | 4.5                         | 2.8 | 4.5  | 2.8 |
|          | C/D      | 90                          | 71  | 57  | 36  | 7.1                         | 4.5 | 7.1  | 4.5 |
| 유연<br>지지 | A/B      | 45                          | 37  | 28  | 18  | 3.5                         | 2.3 | 3.5  | 2.3 |
|          | B/C      | 90                          | 71  | 57  | 36  | 7.1                         | 4.5 | 7.1  | 4.5 |
|          | C/D      | 14                          | 113 | 90  | 56  | 11.0                        | 7.1 | 11.0 | 7.1 |

주) 그룹 1: 대형기계(300kW~50MW), 전기기계 (축 높이  $H = 315\text{mm}$  이상)

그룹 2: 중형기계(15~300kW), 전기기계 ( $160 < H < 315\text{mm}$ )

그룹 3: 원심, 사류 또는 축류펌프(15kW 이상, 분리된 구동장치)

그룹 4: 원심, 사류 또는 축류펌프(15kW 이상, 연결된 구동장치)

영역 A: 양호, 영역 B: 장시간 운전허용, 영역 C: 제한된 기간운전 허용 (보수조치 필요), 영역 D: 허용불가

### 3.5 API 규격

표 3-8은 미국석유회(American Petroleum Institute)가 제정한 동기전동기의 최대 진동허용레벨을 나타낸다. 이 규격 역시 3개의 동기속도 영역과 전동기의 지지조건에 따라 진동변위 진폭으로 제시하고 있다.

표 3-8 최대 허용진동레벨 (API 541)

| 동기속도              | 변위진폭( $\mu\text{m}$ , $p-p$ ) |      |
|-------------------|-------------------------------|------|
|                   | 탄성지지                          | 강지지  |
| 3,000 rpm 이상      | 25.4                          | 25.4 |
| 1,500 ~ 2,999 rpm | 38.1                          | 50.8 |
| 720 ~ 1,499 rpm   | 50.8                          | 63.5 |

### 3.6 DNV(Det Norske Veritas) 규격

표 3-9는 노르웨이 선급협회(DNV)가 다양한 선박용 전동기에 대한 실적치를 바탕으로 제정한 권장 진동한계치를 나타낸다. 이 규격에서는 진동을 일으키는 기진력(가진력, **exciting force**)에 따라 전동기 내부의 진동원의 경우와, 외부로부터 진동전달에 의한 경우로 나누어 진동레벨과 손상레벨(**demage level**)에 대해 진동변위 및 진동속도 값으로 제시하고 있다.

**표 3-9** 선박용 전동기의 권장 진동한계치

a) 내부 기진의 경우

| 구분       |                               | 수평방향             | 수직 및 종방향           |
|----------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| 진동<br>레벨 | 변위 ( <b>mm</b> , <i>p</i> )   | 0.4 (1 ~ 2Hz)    | 0.5 (1 ~ 2Hz)      |
|          | 속도 ( <b>mm/s</b> , <i>p</i> ) | 5.0 (2 ~ 100Hz)  | 8.0 (2.4 ~ 100Hz)  |
| 손상<br>레벨 | 변위 ( <b>mm</b> , <i>p</i> )   | 0.8 (1 ~ 2Hz)    | 1.0 (1 ~ 2Hz)      |
|          | 속도 ( <b>mm/s</b> , <i>p</i> ) | 30.0 (2 ~ 100Hz) | 15.0 (2.4 ~ 100Hz) |

b) 외부 기진의 경우

| 구분       |                               | 수평방향             | 수직, 종방향            |
|----------|-------------------------------|------------------|--------------------|
| 진동<br>레벨 | 변위 ( <b>mm</b> , <i>p</i> )   | 0.5 (1 ~ 2Hz)    | 0.5 (1 ~ 2Hz)      |
|          | 속도 ( <b>mm/s</b> , <i>p</i> ) | 8.0 (2 ~ 100Hz)  | 8.0 (2.4 ~ 100Hz)  |
| 손상<br>레벨 | 변위 ( <b>mm</b> , <i>p</i> )   | 1.0 (1 ~ 2Hz)    | 1.0 (1 ~ 2Hz)      |
|          | 속도 ( <b>mm/s</b> , <i>p</i> ) | 15.0 (2 ~ 100Hz) | 15.0 (2.4 ~ 100Hz) |

## 제 4장 PDA 기반 상태감시시스템의 제안

### 4.1 개발 프로그램 구성 및 개발환경

본 프로그램은 아래의 그림 4.1과 같이 **Windows XP Professional** 기반의 OS(**Operating System**)를 가지며 Note Book에서 작동된다. 어플리케이션 프로그램은 **LabVIEW 7.1 Version**이다. PDA에서는 **Windows Mobile 2003**의 OS를 탑재하여 **LabVIEW 7.1 Version PDA Module**의 어플리케이션 프로그램이 설치되었다. 통신방법은 **Server**와 **Client** 각각 **TCP/IP** 무선통신을 하게 되어있다.

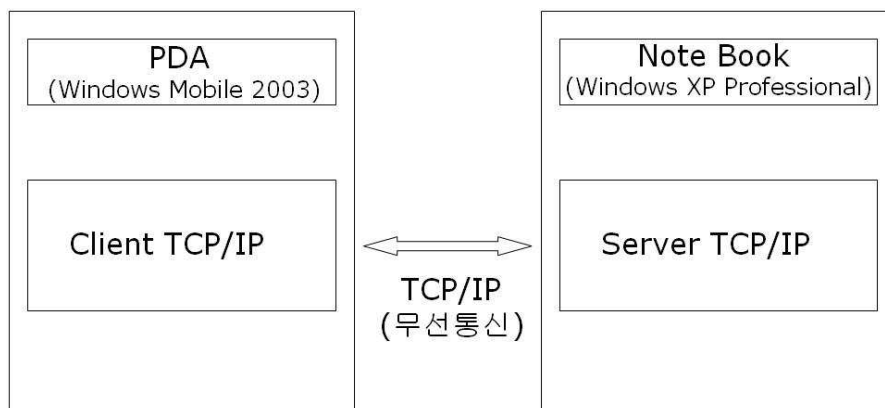


그림 4.1 개발 프로그램 환경

## 4.2 제안 시스템 소개

그림 4.2는 본 시스템의 사진을 나타내고 있다. 하나의 가방에 노트북, DAQ 장비, 센서가 동시에 탑재된다.



그림 4.2 시스템의 사진

그림 4.3은 시스템의 구조를 보여주고 있다. 이 시스템은 데이터수집(DAQ), 서버(Notebook PC)와 클라이언트(PDA)로 구성되어 있다. 센서로부터 취득된 신호의 상태감시는 서버에서 수행된다. 그러나 단지 진동신호의 특징 값만이 PDA로 보내진다.

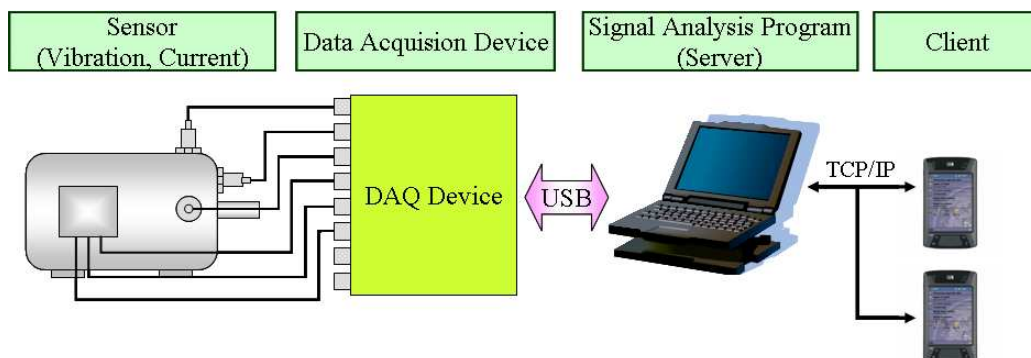


그림 4.3 시스템의 구조

그림 4.4는 PDA기반의 모니터링 시스템을 다이어그램으로 표현하였다. 변환기로부터 수집된 신호는 DAQ Device에 내장된 AD 변환기에 의해 이산신호로 변환되고 서버(Notebook PC)는 이 데이터를 분석하게 된다. 여기에서 처리된 중요도 높은 데이터는 TCP/IP 통신을 통해 클라이언트(PDA)로 전송된다.

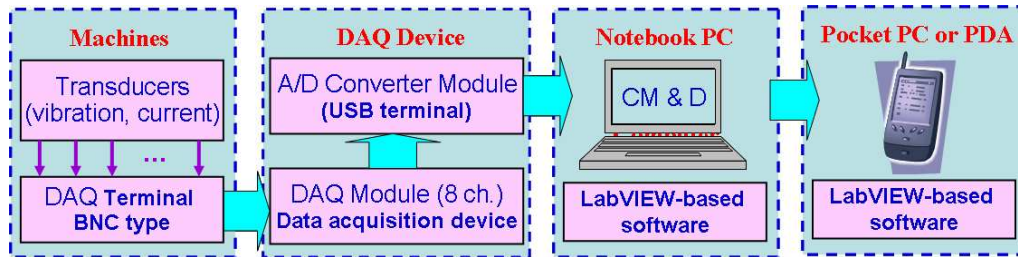


그림 4.4 시스템의 구성도

LabVIEW 프로그램은 사용자가 데이터 수집 장비를 쉽게 작동할 수 있게 한다. 이 프로그램은 컴퓨터에서 작업하는 그래픽 기반의 가상장비로서 데이터의 수집과 분석 콘트롤(Control)을 쉽게 한다. 특히 LabVIEW 프로그램 안에 포함되어 있는 Sound and Vibration toolkit에는 statistical, averaging, zoom FFT, harmonics, octave, order tracking, orbit plot, waterfall analysis, transient signal analysis (short FFT), RMS trend monitoring, PDA and condition monitoring 등의 기능을 가지고 있다.

본 시스템은 3장에서 소개하였던 절대적 기준 설정방법과 통계적 기준설정 방법을 함께 적용하였다. 그리고 2장에서 소개되었던 절대적 기준 방법 중 ISO 10816-3규격을 적용하였다. 통계적인 방법은 실시간으로 5개의 신호를 취득하고, 식 (1)을 이용하여 표준편차  $\sigma$ 를 구하고, 평균에  $3\sigma$ 를 더하여 통계적인 경보레벨을 설정하였다. 식 (1)에서  $x_i$ 는 각각의 실시간 신호,  $\bar{x}$ 는 5개의 평균을 나타낸다.  $n$ 은 데이터 개수이고, 식 (2)에서  $x_{new}$ 는 통계적인 방법으로 부터 계산된 기준치이다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (1)$$

$$x_{new} = \bar{x} + 3\sigma \quad (2)$$

그림 4.5는 서버(Notebook PC)에서 상태 감시하는 흐름도를 보여준다. START는 AD변환된 시간신호를 나타낸다. Configuration은 센서의 감도, 평균화 횟수, 디지털 필터링 범위와 데이터 수집 장비의 샘플링율을 설정한다. 서버에서 보여주는 화면은 시간, 주파수, orbit, waterfall, 과도 신호분석을 보여준다. 특징 값은 평균, 왜도, 첨도, RMS, 형상계수와 파고율을 포함한다. 데이터베이스는 특징 값들을 저장한다.

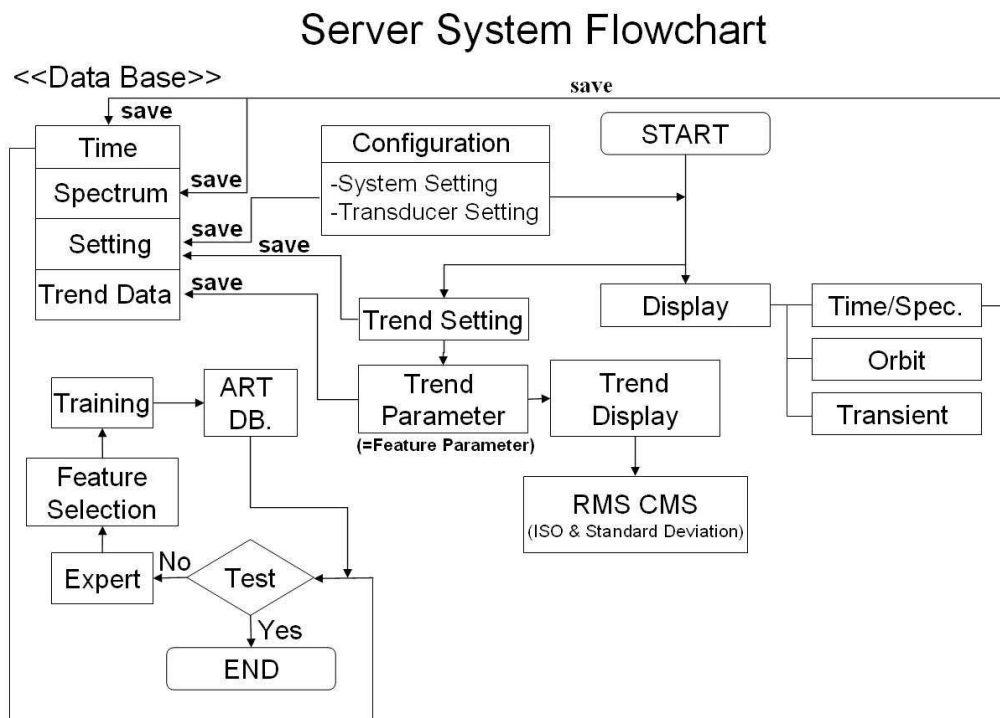


그림 4.5 Server(Notebook PC) 시스템의 흐름도

그림 4.5에서 만약 CMS(상태감시)판정이 No(결함이 있는 상태)라고 결정되면, 그 때 알고리즘은 동작하고 결함을 진단한다. 결국 서버에서는 그림 4.5와 같이 PDA로 RMS 정보를 보내주게 된다. PDA에서는 경보 상태와 ISO 규격의 기준을 보여준다. 알고리즘의 진단 결과는 다음과 같은 숫자로 표현된다.

- 1 : Angular Misalignment (편각 정렬불량)
- 2 : Bowed Rotor (굽힌 축)
- 3 : Broken Rotor Bar (회전자봉 파손)
- 4 : Fault Bearing (결함 베어링)

- 5 : **Mechanical Unbalance** (기계적 불평형)
- 6: **Normal** (정상)
- 7 : **Parallel Misalignment** (편심 정렬불량)
- 8 : **Phase Unbalance** (상 불평형)

그림 4.6은 Client System이 가지는 데이터의 흐름도를 나타낸다. Client (PDA)에서는 Server측 IP Address를 입력하고 Connect 버튼을 누르게 되면, 세 가지 화면즉, 시간영역 RMS 값, 협대역 Peak의 크기와 경보 레벨 및 알고리즘의 진단 결과를 보여준다.

### Client System Flowchart

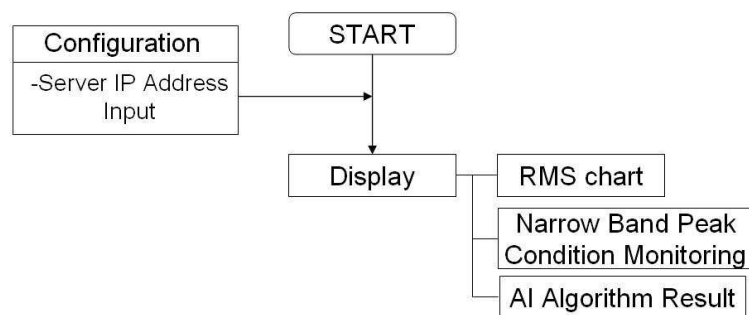


그림 4.6 Flowchart of client (PDA) system

이 시스템은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 이 시스템은 설정하고 실시간 신호를 분석하고 보여주는 부분, 신호의 특징 값들의 변화 추이를 보여주는 부분 그리고 알고리즘을 계산하는 부분으로 나뉘어 진다. 이 서버 시스템의 기능은 실시간 FFT 분석, 경향(trend) 분석을 할 수 있다.

첫째 설정하고 실시간 신호를 분석하는 부분은 그림 4.7을 보면 센서정보 중 센서 감도, 샘플 수, 디지털 고역통과필터(**high pass filter**), 평균(**average**)을 설정할 수 있고, 실시간 신호를 분석하고 보여주는 부분은 시간영역 확대 표시(**zooming display**), 주파수 영역 표시, 시간 신호 저장 기능이 있다. 그림 4.8에서 과도분석(transient analysis)은 Short FFT를 이용하여 시간의 변화에 따라 FFT된 신호들의 크기에 따른 신호들의 변화를 관찰할 수 있다. 고역통과필터와 평균이 필요한 이유는 가속도 센서가 저주파수 신호를 포함하게 되



면 신호 전체의 RMS 값이 커지거나 적분할 때 원하지 않는 큰 값이 나타날 수 있기 때문에, 일반적으로 0.7Hz, 7Hz, 22.3Hz의 고역통과필터를 사용한다. 그리고 평균을 통하여 주기적으로 나타나는 신호를 더욱 강조하고 노이즈는 줄여 SN비를 향상시킬 수가 있다. 실시간 신호를 보여줄 때, 확대표시(**zooming display**) 기능을 사용하여 넓은 대역에서 볼 수 없는 신호들을 자세히 관찰 할 수 있다. 과도 분석 기능은 기계의 기동(**start-up**)이나 정지(**shut down**)시에 기계적 결함의 경우 시간에 따라 변화하는 특징들을 가지고 있는데 이를 잘 관찰할 수 있다. 만약에 전기적인 원인에 의한 결함이라면, 전원을 차단하여 기계를 정지할 경우에는 순간적으로 가진원인 전자기력이 사라지게 되므로 결함 신호가 나타나지 않을 것이다.

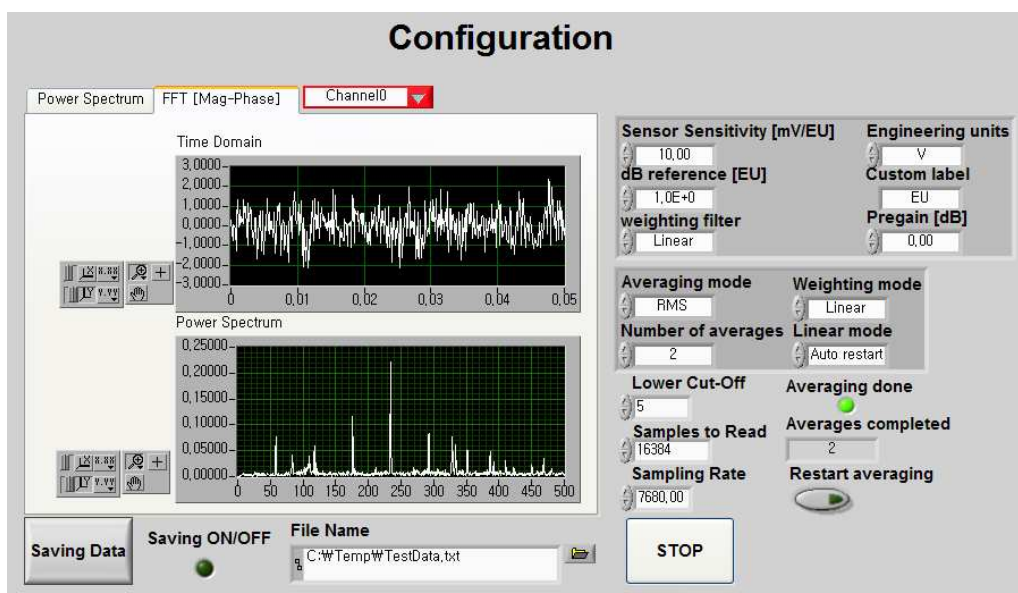


그림 4.7 Configuration의 캡처 화면

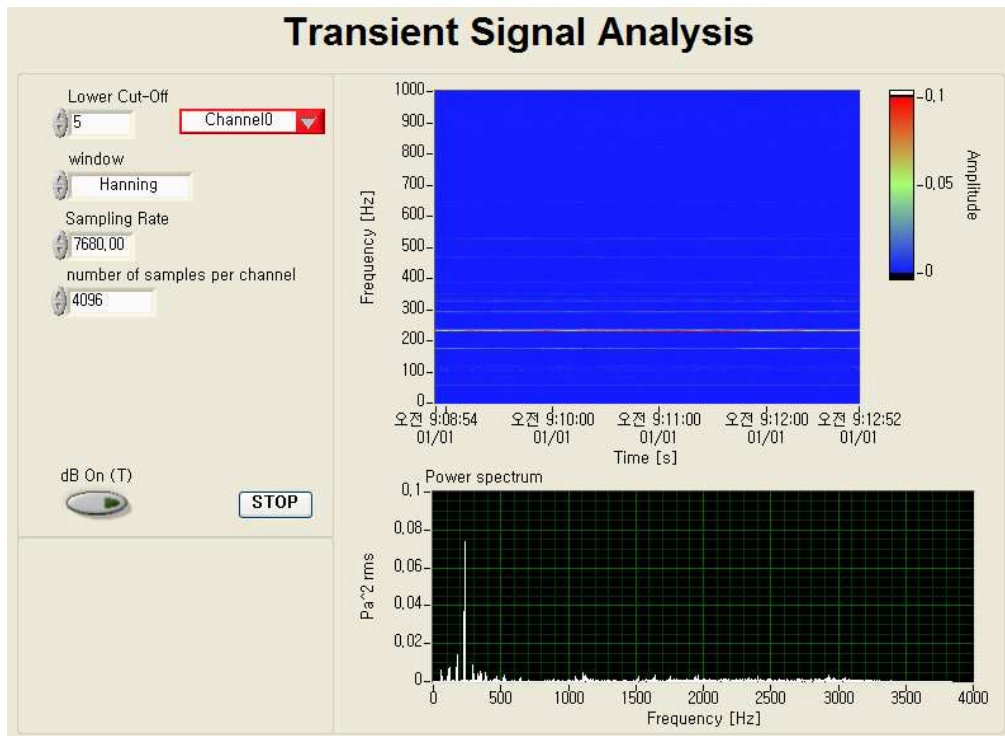


그림 4.8 Transient 분석의 캡처 화면

둘째 신호의 특징 값들의 변화 추이를 보여주는 부분은 RMS 값을 이용하여 RMS 변화를 시간 신호와 함께 절대적 기준과 통계적 기준을 동시에 보여 주고 기준을 넘는 신호는 경보와 비상정지를 나타내는 경고등이 보여주게 되어 있다. 이 신호는 가속도 신호를 취득하여 시간영역으로 적분하여 속도신호와 변위신호로 나타낼 수 있고 각각에 대해 RMS 값을 구하게 된다. 그리고 RMS 기반의 상태 감시뿐만 아니라 FFT 처리된 신호를 대역(band)별로 나누어 각 대역 주파수의 피크치를 상태 감시할 수 있게 되어 있다. 각 피크치는 통계적인 방법에 의해 기준이 설정이 되고, 각각에 대해 경보 신호를 나타낼 수 있게 하였다. 실제 진단 알고리즘에서 사용되는 특징 값들의 변화 추이를 실시간으로 변화를 관찰할 수 있도록 각 특징 값들이 나열되어 있다.

산업현장에서는 절대적인 평가 기준인 RMS 기법과 기계가 가지는 신호의 이전데이터를 이용하여 기준을 설정하는 방법을 많이 이용하고 있다. 기계의 상태는 오랜 시간 동안 결함이 발생할 수도 있지만, 돌발적인 상황에 의해 결함이 발생할 수도 있으므로 절대적 평가 기준과 상대적인 평가기준을 동시에 적용하는 것이 적절할 것이다. 이를 위해 절대적인 평가 방법으로는 ISO기준

을 사용하였고, 상대적인 평가 방법으로는 표준편차를 이용한 통계적인 방법을 적용하였다.

셋째로 결함진단 알고리즘을 계산하는 부분은 알고리즘을 필요한 때에 호출하여 쓸 수 있는 방법을 사용하였으며, 시간신호를 데이터 수 16384개, 샘플링을 7680Hz로 저장하여 계산될 수 있게 되어 있다. 알고리즘은 그림 4.7에서 필요시에 버튼을 누르게 되면 계산을 수행하게 된다. 그 결과는 그림 4.9에 다시 보여주게 되며 숫자로 결과를 알 수 있게 된다. 특징 기반의 알고리즘은 학습이 필요한 단점이 있다. 따라서 대상전동기와 비슷한 용량이나 지지 조건을 갖는 전동기의 결함을 측정하여 신경망 알고리즘을 통하여 학습하는 과정을 가지게 되고 학습된 데이터는 결함 신호에 대한 지도를 만들게 되어 있으며 실제 신호를 적용하여 테스트 과정을 거쳐 결과를 보여주게 되어 있다. 알고리즘의 결과를 통해 비전문가라도 알고리즘 결과를 참고하여 잘못된 진단의 가능성을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

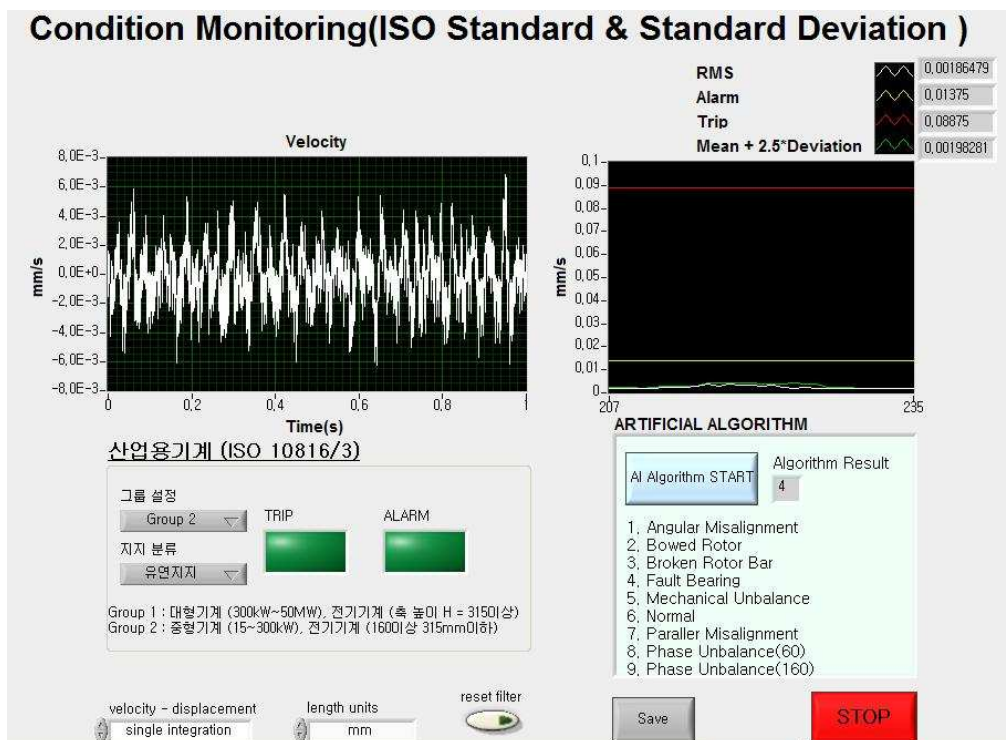


그림 4.9 상태감시 화면

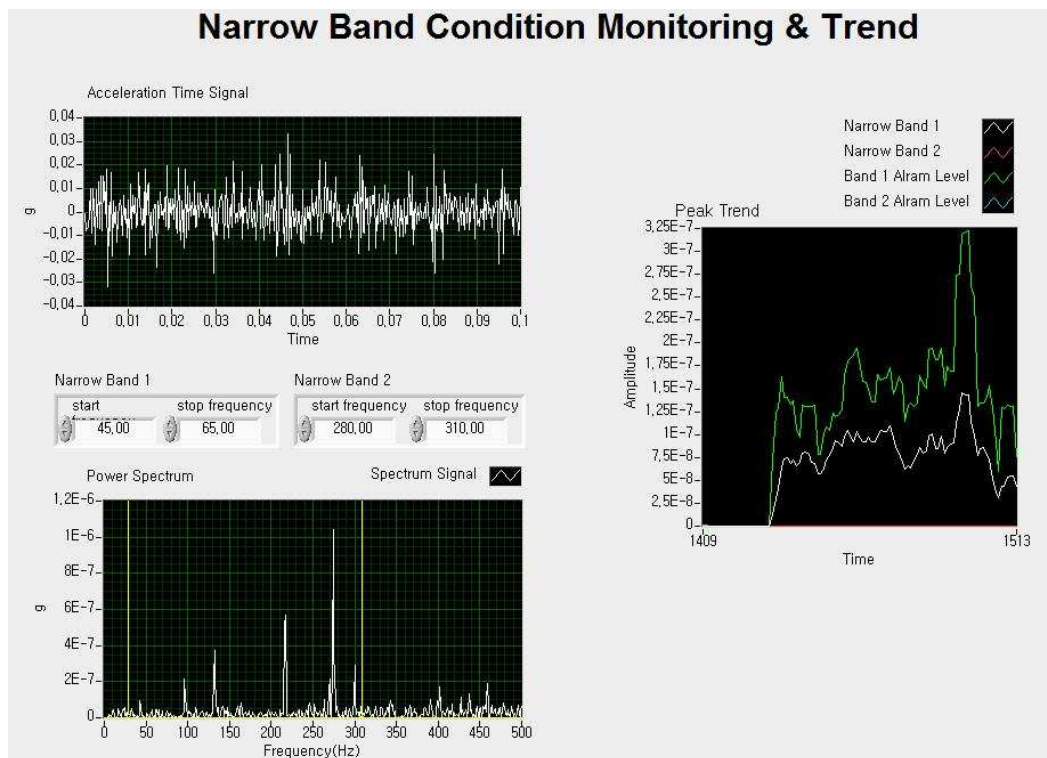


그림 4.11 협대역 분석의 캡처 화면

## 제 5장 시스템의 적용 예

### 5.1 적용 대상 시스템

본 시스템의 적용 예로 냉각 팬(fan) 구동용 유도 전동기의 상태감시에 적용하기 위해 그림 5.1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 유도 전동기에서 발생하는 주요 결함으로는 베어링 결함, 회전자 결함 및 고정자 결함이 있으며, 이 중에서 베어링 결함이 약 50%로 가장 많이 발생하는 것이 알려져 있으며, 이어서 고정자 결함과 회전자 결함 순서로 결함이 발생된다. 가장 많이 발생하는 베어링 결함에 대해 정상 베어링의 신호와 결함 베어링 신호로 테스트하고 이를 비교하였다.

시스템에 적용된 유도 전동기는 그림 5.1과 같이 냉각 팬을 이용하여 부하 테스트를 할 있도록 설계되었다. 유도 전동기의 부하는 송풍기의 팬으로 부하를 걸었다. 유도 전동기와 팬 부하 사이는 커플링으로 연결 되어 있다. 커플링은 체인 커플링을 사용하였다. 대상 유도 전동기의 주요 사양은 표 5.1과 같다.

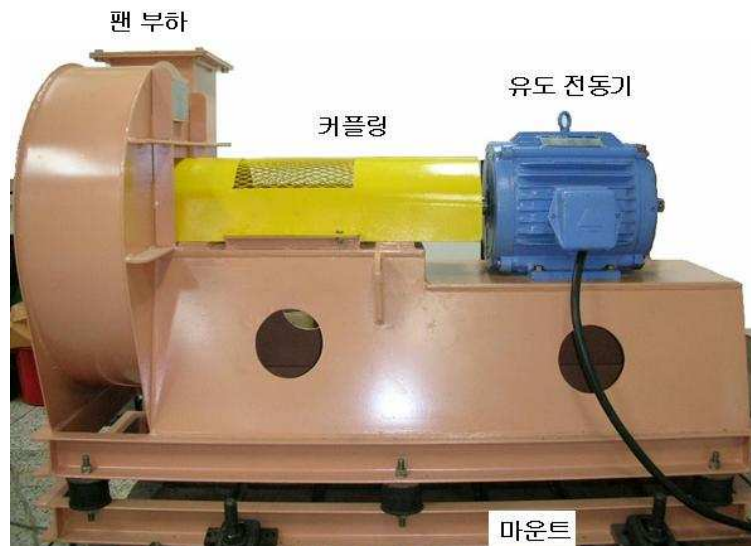


그림 5.1 실험장치

표 5.1 유도전동기의 주요 사양

|               |                |                |         |
|---------------|----------------|----------------|---------|
| Model         | HKS 131SR102HP | Rotor bar      | 28      |
| Power         | 7.5kW(10HP)    | Stator slot    | 24      |
| Type          | HKS-7.5/2      | Rotating speed | 3520rpm |
| Bearing (DE). | NU 208E        | Line frequency | 60Hz    |
| Bearing (NDE) | NU 208E        | Manufacturer   | HYUNDAI |

그림 5.2는 대상기계의 베어링의 외륜 결함 사진을 나타내고 있다.



그림 5.2 베어링 결함 그림

표 5.2 베어링 결함 주파수

| Model   | BPFO   | BPFI     | FTF     | BSF      |
|---------|--------|----------|---------|----------|
| NU 208E | 330 Hz | 484.8 Hz | 23.9 Hz | 170.5 Hz |

표 5.2에서는 적용 전동기에 장착된 롤러베어링의 각 결함별 발생가능 결함 주파수를 나타내고 있다.

단열 원통형 롤러 베어링 NU208E의 형상 데이터는 롤러수( $Z$ ) 14개, 피치 원지름( $D$ ) 56.2mm, 롤러직경( $d$ ) 11mm, 접촉각( $\alpha$ )는  $0^\circ$ 이다. 따라서 롤러 베어링 외륜 결함주파수는 식 (3)에 의해 결정된다.



$$f_0 = f \times \frac{Z}{2} \times \left( 1 - \frac{d}{D} \times \cos \alpha \right) \quad (3)$$

그림 5.3는 대상 전동기에 본 연구에서 개발된 시스템을 적용한 Server측의 전체 사진을 나타내고 있다.

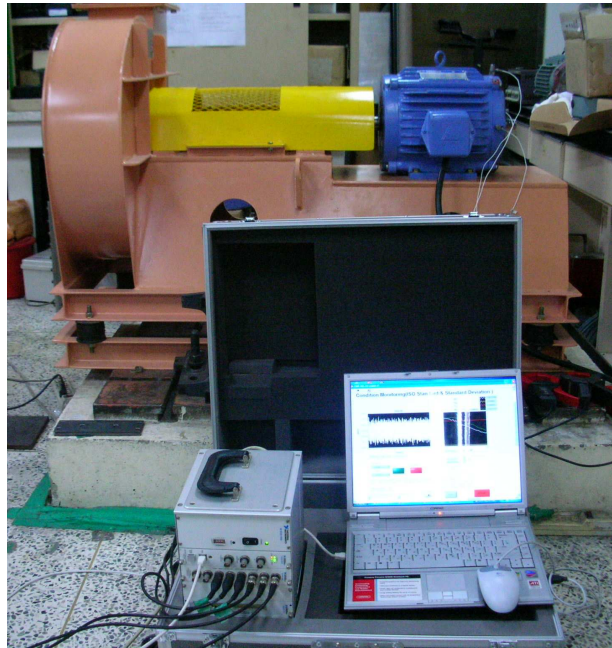
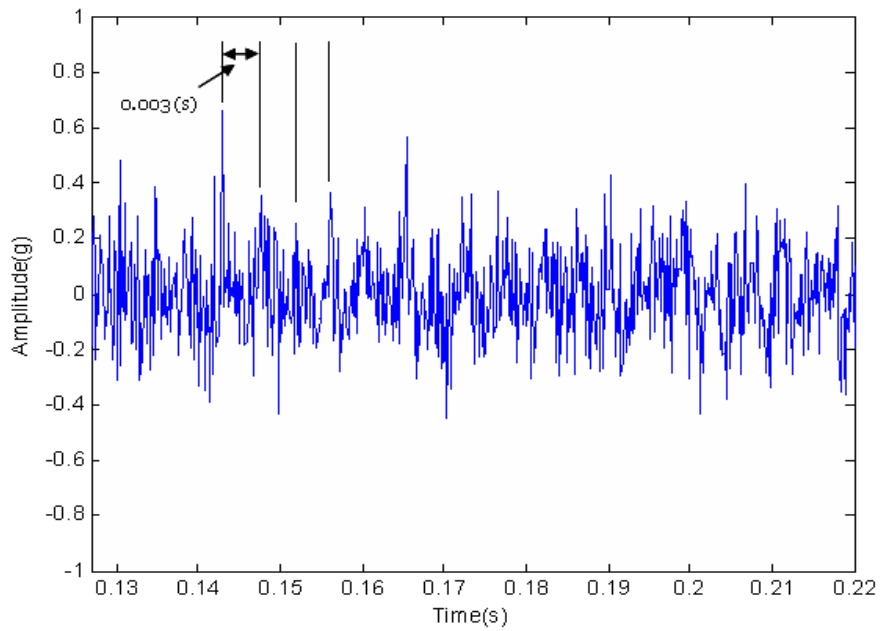


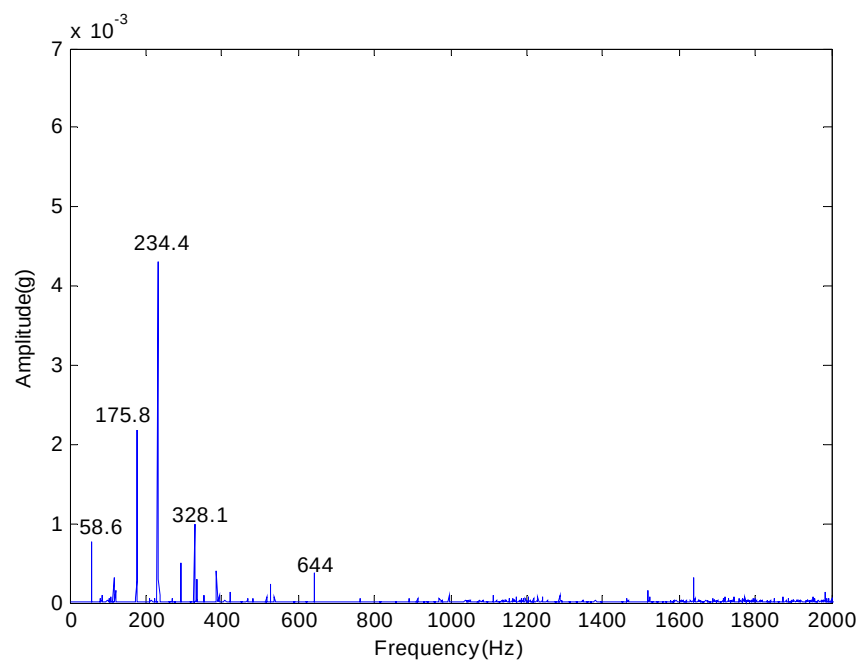
그림 5.3 시스템의 설치 사진

## 5.2 유도 전동기의 파형 분석

롤러 베어링에 외륜 결함이 있는 경우의 시간응답파형과 주파수 스펙트럼을 그림 5.4에 나타내었다. 베어링에서 발생된 충격 파형 사이의 간격이 약 0.003Hz가 발생하였으며, 이는 그림 b)의 주파수 스펙트럼에서 328.1Hz에 해당된다. 표 5.2의 이론적인 외륜 결함주파수인 320Hz에 대응한다. 주파수 분석에서 58.6Hz는 회전 주파수(1×)가 되며, 175.8Hz와 234.4Hz는 각각 3차 및 4차 조화성분인 3×, 4× 성분이고, 644Hz는 11차 조화성분인 11× 성분이 된다.



(a) 시간파형



(b) 주파수 스펙트럼

그림 5.4 결함 전동기 신호의 시간 파형과 스펙트럼



### 5.3 Server (Notebook)

Server의 프로그램은 크게 3가지의 화면으로 구성된다. 그림 5.5는 PDA 기반의 상태감시시스템의 메인 화면을 나타내고 있다. 그림에서 좌측 상단의 그래프는 시간 영역에서 진동속도 값의 시간과형을 실시간으로 보여주고, 오른쪽 상단의 그림은 시간영역의 RMS 값에 대한 경향(trend) 선도와 ISO 기준에 의해 설정된 경보레벨과 비상정지레벨을 나타낸다. 그리고 순간적인 위험을 경고하기 위한 표준편차를 이용한 경고레벨을 동시에 표현하고 있다.

왼쪽 하단에서 산업용 기계에 대한 ISO 10816-3 규격을 이용하여 기계의 그룹을 그룹 1에서 그룹 4 중에서 선택할 수 있고, 지지조건 역시 강지지와 유연지지 중에서 선택할 수 있으며, 이 선택에 따라 각 조건에 대응하는 경보레벨과 비상정지레벨이 자동으로 설정된다. 오른쪽 하단의 그림은 인공신경망 알고리즘인 ART-KNN을 이용하여 상태감시를 하는 도중에 진단을 실행할 수 있도록 되어 있고, 진단 결과인 9종류의 결함을 그에 대응하는 숫자로 표현되도록 하였다. 가속도 신호를 측정하여 디지털 적분을 한번 수행하여 속도 값으로 표현되었다. 이 그림으로부터 전동기의 현 상태는 전체적인 RMS가 진동한계치를 넘어서지 않는 것을 알 수가 있다.

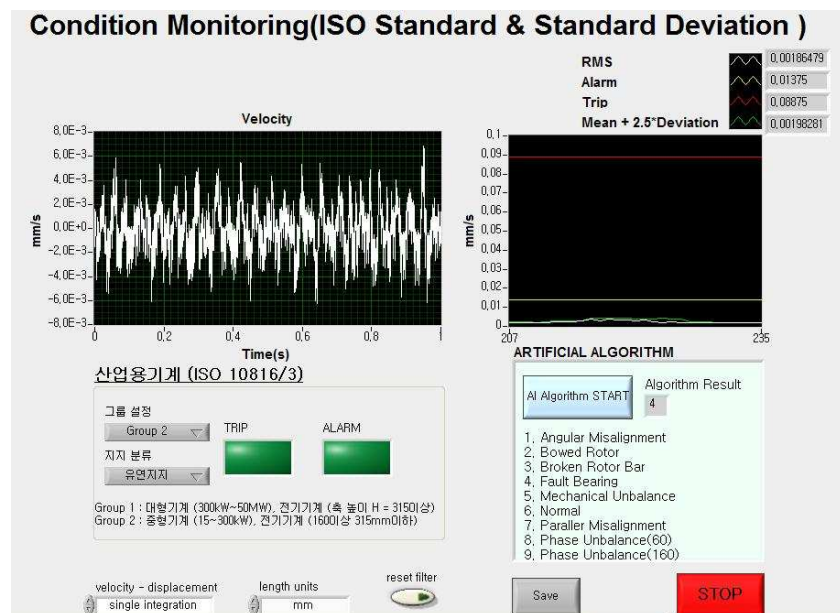


그림 5.5 상태 감시 진단 메인 화면

진단 알고리즘을 실행하게 되면 알고리즘 계산을 수행하게 된다. 알고리즘에 이용된 훈련데이터는 적용 전동기가 아닌 소형전동기(1HP)의 9개의 결함에 대해 20번 측정된 데이터를 이용하였다. 이 때 결과는 그림 5.4의 실제 결함 신호를 20개를 샘플하고 샘플링 주파수와 데이터수를 훈련데이터와 동일하게 조건을 주고, 알고리즘을 수행한 결과 20개중 18개는 베어링 결함신호를 나머지 2개는 기계적 불평형 결함을 나타냈었다. 약 90%의 정도로 베어링 결함을 표현하는 것으로 나타났다.

그림 5.6은 진동가속도 신호의 파워스펙트럼을 구하여 이 때 주파수 Peak의 협대역 분석을 할 수 있는 화면을 나타내고 있다. 지금은 회전주파수가 있다고 생각되는 45 ~ 65Hz 대역과 베어링 결함주파수가 예상되는 280 ~ 310Hz 대역의 스펙트럼 Peak의 경향을 모니터링하고 있다. 여기에서는 앞에서 시간영역 RMS 경향감시에서 경보가 발생한다면, 파워스펙트럼의 분석을 통하여 정밀한 분석을 가능하게 하고 관심 주파수대역의 경향을 관찰할 수 있다.

그림 5.7은 인공지능기반 결함진단 알고리즘에 이용되는 주요 특징 값들의 경향을 나타내고 있다.

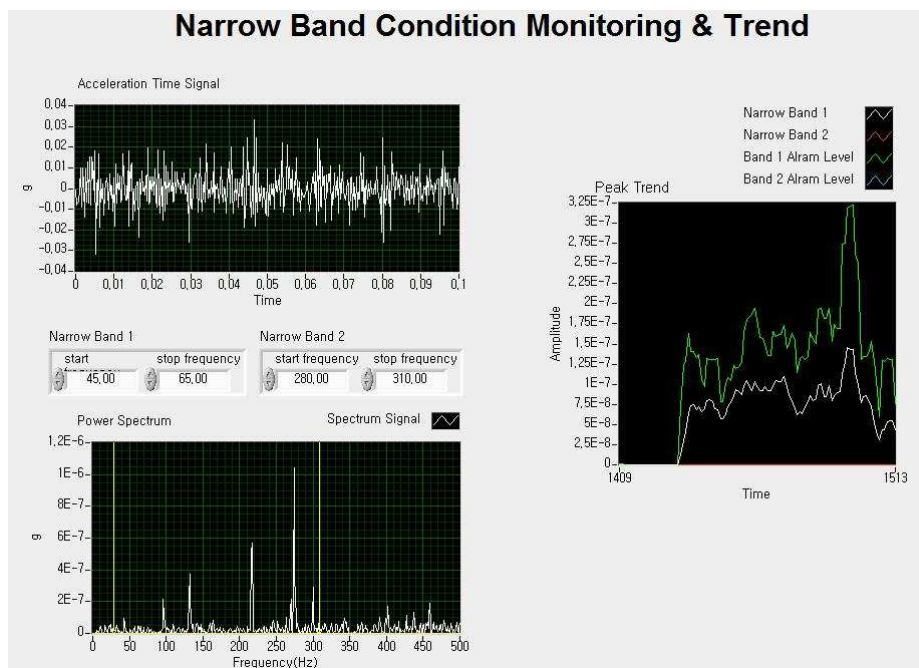


그림 5.6 협대역 분석 화면

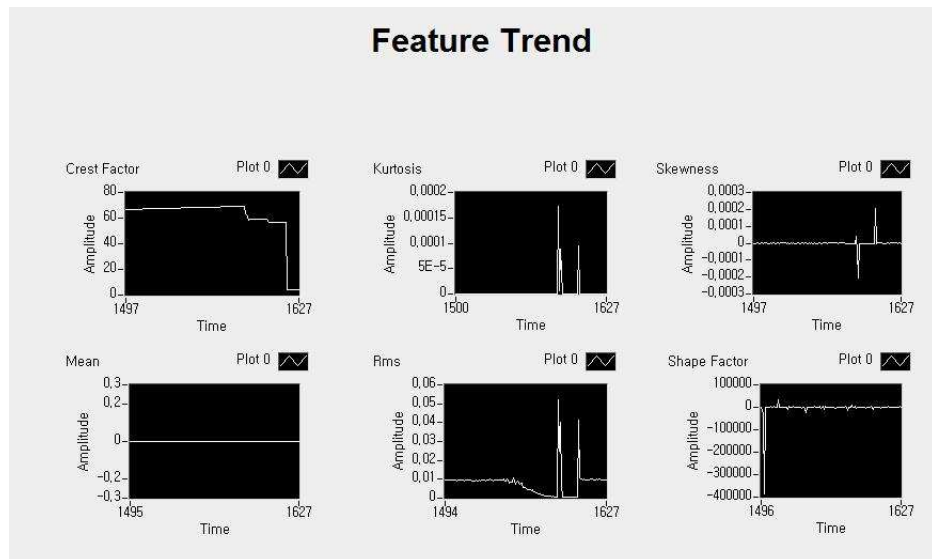


그림 5.7 주요 특징 값의 Trend 화면

Server는 이외에 Orbit분석, Short FFT 분석의 기능을 가지고 있다.

#### 5.4 Client (PDA)

그림 5.8은 PDA와 이에 표시되는 그림을 캡처한 사진을 나타낸다. 우측 그림에서 MACHINE은 기계가 설치되어 있는 서버의 IP Address를 나타낸다. ON/OFF는 신호가 PDA에 들어오고 있는지를 색깔로 확인할 수 있게 되어 있다. 그리고 3개의 채널(CH1, CH2, CH3)은 각각의 특징 값(RMS, PEAK 및 CREST FACTOR)을 표시한다. 아래 그래프는 3개의 채널의 RMS를 나타내고 있다.

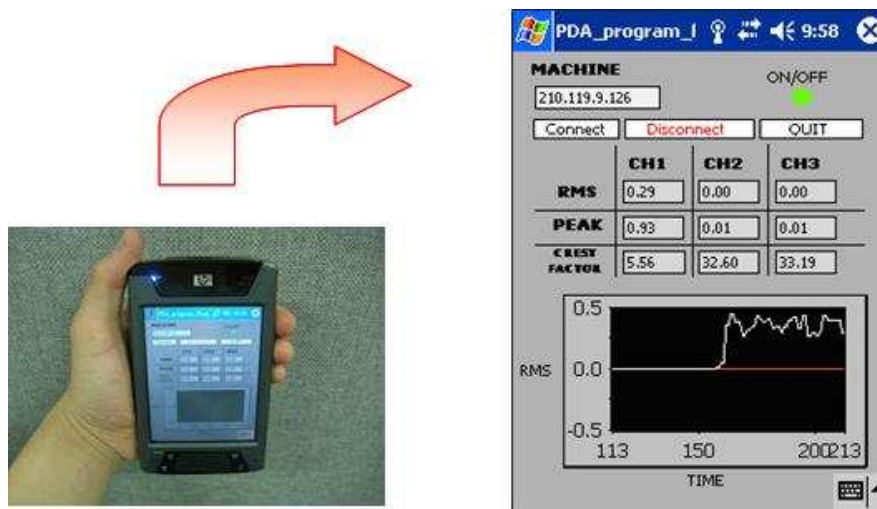
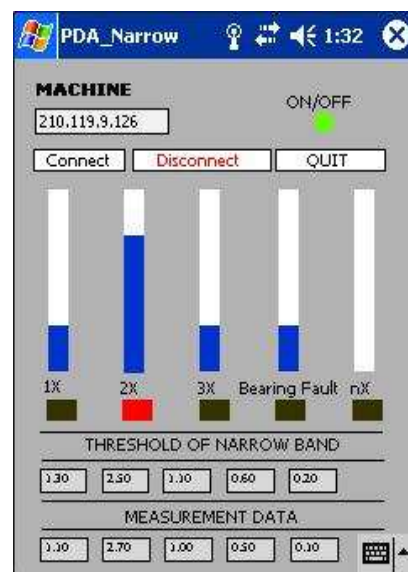
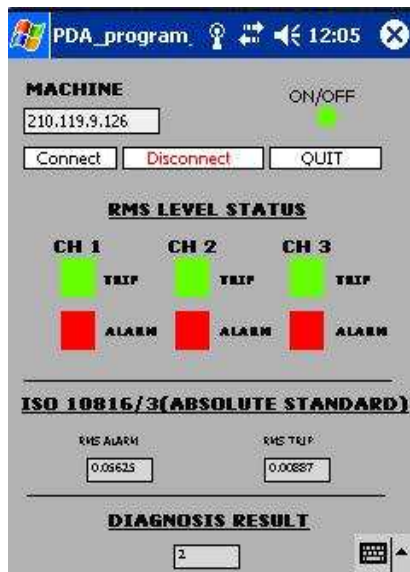


그림 5.8 PDA와 캡처 화면

그림 5.9의 (a)는 각각의 채널의 경보를 표시함과 동시에 현재의 경보레벨을 표시한다. 그리고 실시간 신호를 이용하여 진단 알고리즘(ART-KNN)의 분석 결과를 나타낸다. DIAGNOSIS RESULT의 숫자는 각각의 결함의 종류를 나타낸다. 그림 5.9의 (b)는 실시간 스펙트럼을 주파수 대역별로 나누고, 그 때의 스펙트럼 피크 값을 감시한다. 그리고 제 3장에서 설명한 통계적 기법을 이용하여 설정한 상태감시 레벨 값과 현재의 스펙트럼 피크 값을 동시에 보여준다.



(a) RMS 경보레벨과 진단결과      (b) 스펙트럼 협대역 신호의 상태감시  
그림 5.9 PDA를 이용한 상태감시 결과의 표시 예

## 제 6장 결 론

본 연구에서는 회전기계의 상태를 감시하고 결함을 진단함에 있어서 무선 (wireless) 기술 중의 하나인 PDA를 이용하여 기계 사용자에게 기계의 상태를 알려줄 수 있는 시스템을 설계 제작하였다. 상태감시 진단에 널리 이용되는 RMS치를 이용한 기존의 ISO 기준의 절대적 판정기준뿐 아니라 표준편차를 이용한 상대적 판정도 가능하게 시스템을 제작하였다.

그리고 제안된 시스템으로 실제 생산된 유도전동기에 적용하여 실시간 상태감시와 알고리즘 테스트를 수행하였다. 기존의 PDA가 가지는 메모리의 부족과 CPU 속도의 한계를 극복하기 위해서 Server 컴퓨터에서 대부분의 계산을 수행할 수 있도록 하고 PDA 간의 데이터 공유를 수행하였다.

LabVIEW 소프트웨어는 Client(PDA)와 Server(Notebook)를 연결하는 유용한 도구이므로, 이를 이용하여 실시간으로 신뢰할 수 있는 데이터를 확보할 수 있었고, 기존 알고리즘과 통합할 수 있었다.

따라서 사용자의 편의성과 상태감시 진단의 효율성의 관점에서 볼 때, 본 연구에서 제안된 시스템을 통해 현재 발전하고 있는 무선기술과 병행한 연구가 수행된다면, 기존의 하드웨어를 수동적으로 옮기거나 작업자가 현장에서 대기하던 것과 비교하면 기계의 상태감시와 진단의 많은 인력과 시간을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

- (1) Finley WR, Hodowanec MM, Holter WG. (2000), An analytical approach to solve motor vibration problems, IEEE Trans. on Industry Applications, 36(5), 1467-1480.
- (2) Lynne Hall, Adrian Gordon, Lynne Newall, Russell James (2004), A development environment for intelligent applications on mobile devices, Expert Systems with Applications, 27, 481-492
- (3) Thomson WT & Fenger M. (2001) Current signature analysis to detect induction motor faults, IEEE Trans. on Industry Applications, 7, 26-34.
- (4) Thomson WT, Rankin D & Dorrell DG. (1999) On-line current monitoring to diagnose airgap eccentricity in large three-phase induction motors- Industrial Case Histories, Verify The Predictions, 14 (4), 1372-1378.
- (5) Toshiaki Kimura, Yuichi Kanda (2005), Development of a remote monitoring system for a manufacturing support system for small and medium-sized enterprises, Computer in Industry, 56, 3-12
- (6) C. Kral, F. Pirker, G. Pascoli, W. Berghold, A LabVIEW Based Rotor Fault Diagnostics Tool for Inverter Fed Induction Machines by Means of the Vienna Monitoring Method at Variable Speed, Acapulco, MEXICO October 15-19
- (7) L. Collamati, F. Filippetti, G. Franceschini, S. Pirani, C. Tassoni (1992), Induction Machine Stator Fault On-line Diagnosis based on LabVIEW Environment
- (8) LabVIEW User manual, National Instruments, Austin(TX), USA
- (9) Wan-Young Chung, Sung-Ju Oh (2005), Remote monitoring system with wireless sensors module for room environment, Sensors and Actuators B (in press)
- (10) Samanta B. and K.R. Al-Balushi (2003), Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features, Mechanical System and Signal Processing, 17(2), 317-328.
- (11) B.S. Yang, T. Han, J.L. An (2004), ART-Kohonen neural network for fault diagnosis of rotating machinery, Mechanical System and Signal Processing, 18(3), 645-657
- (12) Samanta B. and K.R. Al-Balushi (2003), Artificial neural network based fault

- diagnostics of rolling element bearings using time-domain features,  
Mechanical System and Signal Processing, 17(2), 317-328.
- (13) John S. Mitchell, An Introduction to Machinery Monitoring and Analysis,  
B&K Condition Monitoring System Division, 270-288.
- (14) S.K. Kim, 네트워크 기반 설비 자동진단 국제표준화 회의 개최, 전자신문  
(2005.02.02)
- (15) S.K. Kim, 로크웰삼성 오토메이션 자동화 장비 모바일 제어서비스 엠링스  
출시, 전자신문(2005.05.31)
- (16) S.K. Kim, LS산전, 변전소진단감시시스템 개발, 전자신문(2005.6.15)
- (17) S.K. Kim. 유비쿼터스 관련 PDA를 활용현황, 전자신문(2005.7.12)



## 감사의 글

본 논문의 완성까지 소중한 여러분들의 관심에 감사를 드립니다.

항상 부족한 저를 지켜봐 주시고 지도해 주신 양보석 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 본 논문이 완성되기까지 조언해 주신 진대형에게 감사를 드립니다.

학부 2학년부터 실험실에 들어와서 동고동락하면서 지내던 희로애락을 같이 하였던 선후배님들 학문의 동역자로서 잊지 못할 것입니다. 옆에서 늘 웃는 얼굴로 지켜봐 주시던 영모형, 그리고 귀찮게 옆에서 질문해도 언제나 웃는 얼굴로 대답해 주시던 종룡형, 외국에서 유학와서 고생하는 Widodo, Nui-gang, Di-xiao, 실험실 최초 여(女) 대학원생 애희, 그리고 실험실에서 대소사를 도맡아하던 삼총사 민찬, 재갑, 선화, 나의 손발이 되어준 도균, 기태, 기용, 백석에게도 심심한 감사를 포함합니다.

대학원 2년과 교회 생활 쉽지는 않았지만 늘 기도해 주시던 권혁일 전도사님, 보원누님, 재연누님, 광현이, 종숙이, 장윤이, 지연이, 정필이, 희진이, 신혜에게도 감사를 드리고, 우리 전도 동역자 홍경희 간사님, 최계화, 최현숙, 김경옥, 손현옥, 홍미영간사님, 동현, 동민, 재욱형에게도 늘 감사한 마음뿐입니다.

그리고 꼭 빼먹어서는 안되는 부모님. 눈에 넣어도 아프지 않을 아들 언제나 잘 되기를 바라는 아버지과 어머니에게 감사를 드립니다. 그리고 자주 보지는 않지만 졸업하신 선배님들 시행착오하는 부분들 좋은 충고로 해주시던 창묵형, 그리고 실험실 생활의 모범이 된 용한형, 늘 지혜로운 말씀해주시는 동수형, 늘 기쁜 하루를 살라고 말씀하시는 유신형, 프로페셔널의 기준 상윤형, 훌륭한 빌더 용민형, 크리스찬의 도전 동춘형, 늘 칭찬해주시던 채순석님, 진로에 대해 늘 걱정해주시는 이선순 지사장님 그리고 일일이 다 적지는 못하지만 여러 선배님들에게 감사를 드립니다.

아직도 걸어야 할 길이 멀지만 또 다른 세계에 한 발 내딛어 많은 사람에게 본이 되어지고, 나로 인하여 많은 사람들이 변화될 수 있도록 저 자신부터 변화하는 사람으로 살려고 합니다. 삶의 가치를 물질보다는 생명에 두고 열심히 연구하는 연구자의 길을 걷고 늘 정직과 성실함으로 나아가려고 노력 할 것입니다.