

# 빗물펌프장 온라인 가동 감시시스템

이해철\*, 김민호\*\*, 김성원\*\*\*

Key Words : 빗물펌프장 통합모니터링, 고장예측, 정밀진동분석, 자동진단

## 1. 서론

온라인 상태감시 시스템이란 각종 센서를 기계 설비에 영구히 설치하여 기계 운전시 발생하는 진동, 소음, 변위, 온도, 압력, 유량 등 기계설비의 상태를 평가할 수 있는 데이터를 주기적으로 측정하고, 측정된 데이터를 분석하여 기계의 고장을 사전에 감지하여 예방하고 설비의 고장원인을 분석하여 고장의 근본원인을 교정할 수 있는 정보를 제공하는 시스템이다. 이러한 시스템은 약 40여 년 전부터 산업계에 등장하였으며 현재는 최신의 컴퓨터 기술과 결합하여 자동으로 설비 상태를 진단하고 결과를 관리자에게 유무선의 통신을 이용 관리자에게 보고할 수 있는 상태까지 발전되고 있다. 발전소, 제철소, 석유 화학단지 등 24시간 상시 가동 되는 산업체의 주요설비의 고장을 감시하기 위한 시스템으로 온라인 상태감시 시스템이 발전되어왔으나 최근에는 그 효용가치가 인정되어 산업전반의 주요 핵심 설비류에 확대 적용되고 있는 추세이다.

빗물펌프장은 장마기와 혹은 태풍 등에 의한 집중 폭우시 유수지에 유입된 물을 배출하는 것을 목적으로 하고 있다. 이처럼 빗물펌프장은 상시 운전되는 설비는 아니지만 단 한번의 고장이 막대한 인명 및 재산피해로 이어질 수 있기 때문에 매우 중요한 핵심설비로서 안정적인 설비의 운용이 필수적이지만 현재 빗물펌프장의 설비관리 시스템은 아래와 같은 문제점을 내재하고 있다.

첫째, 빗물펌프장의 설비는 간헐적으로 운전될 뿐 아니라 대부분의 설비가 수중에 설치되어 있기 때문에 주기적인 상태감시가 불가하며, 고장의 예측 및 원인 분석이 불가하여 항상 사고발생의 위험을 가지고 있을 뿐 아니라 그에 대한 과학적이고 효율적인 대책수립이

어렵다. 둘째, 설비의 운전상태 및 운전결과에 대한 분석이 불가능하기 때문에 안정적인 빗물펌프장의 운용을 어렵게 한다. 셋째, 설비의 사양, 설비의 규모, 기술 Data-base, 이력관리, 운전안정성 및 효율과 관련된 다양한 통계자료 등 빗물펌프장의 효율적 운용 및 향후 대책수립과 관련된 중요한 Data-base의 부재이다.

본 논문은 기존의 온라인 설비감시 시스템을 이용, 빗물펌프장 설비에서 발생하는 진동, 수위, 압력 및 배수량 등을 실시간으로 측정, 분석하고 그 데이터를 통합 관리하여 효율적인 빗물펌프장 운전 및 관리의 실현뿐 아니라 배수설비의 고장을 사전에 예측, 대비를 가능하게 하는 빗물펌프장 전용 온라인 가동 감시 시스템에 관한 내용을 소개하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 시스템의 개요

#### 2.1.1 System 개요

본 빗물펌프장 온라인 가동 감시 시스템은 빗물펌프장에 설치된 펌프의 상태 진단과 감시를 위해 펌프에서 발생하는 진동 및 운전 파라미터 신호를 측정하여 처리하는 하드웨어와 분석 소프트웨어가 통합된 시스템이다. 본 시스템은 확장성을 고려한 User Interface와 실시간(Real Time)으로 동작하는 Data Processing Module을 통해 어떠한 운전환경조건 아래에서도 펌프의 상태를 완벽하게 감시할 수 있도록 설계되었다. 또한 본 시스템의 분석 프로그램은 전문지식이 없는 일반 관리자에게 짧은 시간의 교육만으로도 원활한 운영이 가능하도록 인공 지능형 자동진단기능을 내장하였다.

본 시스템은 크게 6단계의 장치로 구성되어있다. 빗물펌프 설비에서 발생하는 다양한 신호를 감지할 수 있는 Sensor들로 구성된 신호취득장치, 센서의 신호를 Filtering하고 증폭시켜주는 신호 변환 장치, 변환기에서 취득된 데이터를 분석이 가능하도록 계산하는 신호

\* (주)나다에스앤비

\*\* (주)나다에스앤비

\*\*\* 중소기업진흥공단 펌프에너지기술실

E-mail : \* hlee@nadasnv.co.kr

\*\* kmh@nadasnv.co.kr

\*\*\* pump@sbcr.or.kr

처리장치, 처리된 데이터를 적재적소에 배분하는 자료 전송장치, 처리된 Data를 지정된 조건으로 저장하는 데이터 베이스 시스템, 그리고 저장된 데이터를 다양한 Function을 이용하여 분석하게 할 수 있는 Data 분석 프로그램으로 구성되어 있다. 또한 본 시스템을 통하여 신호 처리된 Data는 신호처리장치에 기본 장착된 Ethernet 모듈을 통하여 빗물펌프장 여러 부서 및 중앙 통제실에서 동시 분석이 가능하게 하였으며 설비상태의 이상이 감지되었을 때 자동적으로 지정된 설비관리자에게 E-mail 등을 통하여 통보하게 되어 있다. 또한 무선모듈 적용시 장소에 구애 없이 어느 곳에서도 PDA등의 무선단말기를 통하여 설비상태를 모니터링 할 수 있게 구성 되어있다.

본 시스템은 펌프고장의 예측과 고장의 분석을 가능케 하는 펌프상태감시(Protective Monitoring) 기능뿐 아니라 진동, 온도, 압력, 수위 센서에서 취득한 신호를 다양한 분석기법을 이용하여 가공함으로써 양정 분석, 토출량 분석, 펌프의 운전점 분석 등 펌프의 운전과 관련된 중요한 정보를 제공한다. 또한 이러한 Data들은 사용자에게 최적화된 데이터베이스 시스템에 저장되어 다양한 분석기법을 통해 펌프의 고장원인분석, 고장시기의 예측 과 그 대처방안, 계획수리의 실현, 향후 대책수립 및 정책 입안을 위한 자료 등 효율적이고 안정적인 빗물펌프장의 운용을 위한 정보를 제공한다.

### 2.1.2 System 개괄도

Data의 취득에서 처리 및 분석에 이르는 본 System의 Data 처리 Flow는 그림 1과 같다.

## 2.2 System Hardware의 구성

### 2.2.1 Hardware 개요

Hardware는 신호를 취득하는 센서, 취득된 신호를 Filtering 하고 증폭시키는 신호변환장치, 변환장치에서 취득된 데이터를 분석이 가능하도록 계산하는 신호처리장치, 처리된 데이터를 적재적소에 배분하는 자료전송장치로 구성되어 있다.

### 2.2.2 센서

센서는 펌프의 상태감시 및 운전상황분석을 위해 필요한 Data를 취득하는 기능을 수행한다. 베어링의 온도와 모터의 권선온도를 측정하기 위한 온도센서, 펌프의 기계적 결합 및 수력학적 결합 등의 분석을 위해 진동 신호를 취득하는 진동센서 그리고 펌프의 운전조건 및 안정성분석 그리고 양정 및 토출량 등의 분석

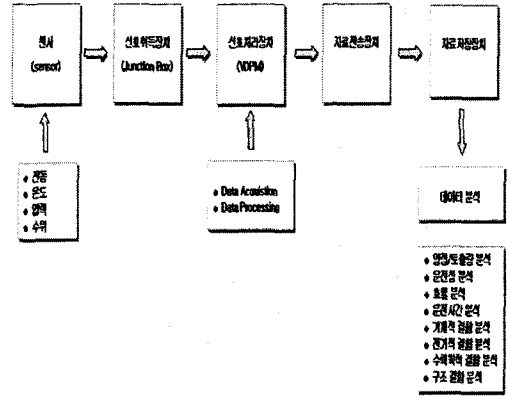


그림 1. 시스템 개괄도

및 측정을 위한 수위센서 및 압력센서 등이 사용된다. 모든 센서는 설비에 영구히 부착되며 수중설비에 적합하도록 방수, 방진, 항온조건을 만족시키는 특수사양을 적용한다.

### 2.2.3 신호변환장치

신호 입력단을 통과한 다양한 신호를 신호처리장치로 전송할 수 있도록 적절한 형태로 증폭 혹은 변조(Amplifier, V-A Converting)하는 기능을 수행한다.

### 2.2.4 신호처리장치

Vibration Data Processing Monitor로 불리는 신호처리장치는 국제 계량표준규격을 채택하고 있으며 메인 프레임과 각각의 신호처리 모듈을 장착할 수 있는 16 Slot의 Platform으로 구성되어 있다. 표준 모듈로는 메인 프레임, Power Supply 모듈, 그리고 CPU 모듈로 구성되어 있으며, 옵션 모듈로서 VDPM의 메인 프레임에 준비된 Slot을 이용하여 16개 모듈을 사용자가 선택하여 선별적으로 사용할 수 있다. 사용 가능한 옵션 모듈로는 Real Time Data Processing Module, Scan Time Data Processing Module, DC Monitor Module, Digital Input/Output Module이 있다.

VDPM의 Data Processing Module에서 신호처리된 Data는 CPU Module에 장착된 Ethernet 통신 Module을 통하여 Main Server의 Advanced Monitoring Software 와 인터페이스 된다. 또한 Main Server가 LAN망에 연결되어 있다면 다수의 사용자가 Data 공유 및 배수설비의 운전상태 모니터링이 가능하다. 또한 이러한 통신망을 이용하여 원격지에서 전문가가 VDPM을 Remote Control하여 시스템에 발생된 문제

점을 해결함으로써 보다 더 사용자에게 밀착된 지원이 가능하다.

### 2.2.5 자료전송장치

신호 처리 장치(VDPM)와 자료 저장 장치(Data Base Management System)의 연결 기능을 수행하는 장치로VDPM에서 보내온 자료를 DB에 안정적으로 저장될 수 있도록 하며, DB의 Data가 항상 일정한 크기로 유지되도록 Averaging기능을 수행한다.

### 2.2.6 자료 관리 장치(DBMS)

자료저장 장치(DBMS)는 크게 두 가지 기능을 수행한다. 온라인 모니터링 시스템 전체의 설정 정보를 저장하고, 신호 처리 장치로부터 실시간으로 측정되어지는 데이터들을 각 채널별, Function별로 저장하는 기능을 담당하게 된다. 자료저장 장치(DBMS)에 저장된 데이터는 Analysis 프로그램에서 다양한 그래프 형태로 출력되어 사용자에게 보다 쉽고 정확한 기계상태를 파악할 수 있도록 다양한 정보를 제공하게 된다.

### 2.2.7 자료 분석 장치

자료 저장 장치(DBMS)에 저장된 데이터를 읽어 들여, 기계상태 진단을 위한 자료로 활용하는 기능을 수행한다. 실시간 상태 감시를 위해 자료 전송 프로그램과 직접 연결되어 기계 상태(Status)를 직접 모니터 할 수 있고 알람이 발생할 경우, 그 상태가 자료 분석 프로그램에 표현되어 사용자가 즉각적인 조치를 취할 수 있게 설계되어 있다.

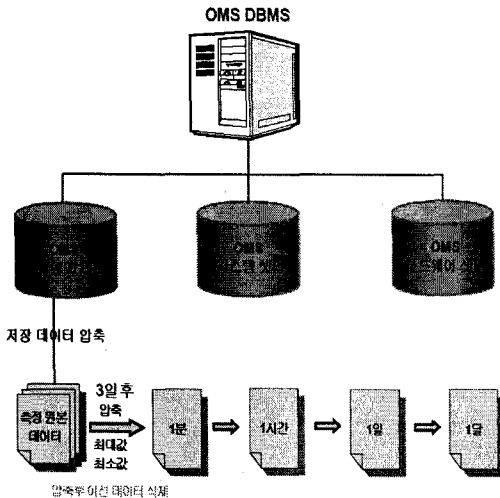


그림 2 자료 관리 장치

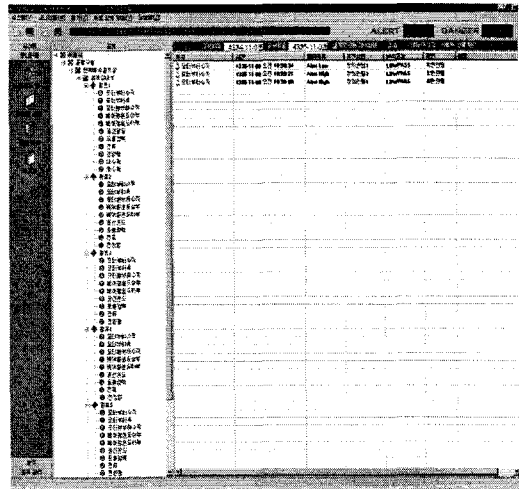


그림 3 Tree 관리 구조

## 2.3 System Software의 구성

### 2.3.1 Hardware 개요

본 시스템의 Software는 사용자에게 친숙한 Window-based Program으로서, 사용자의 Key-in을 최소화하고 단지 마우스 클릭만으로 쉽고 편리하게 사용할 수 있도록 User Interface를 구성하였다.

#### a) Tree 구조 및 Plant Map

빛물 펌프장의 구조 그리고 측정대상 및 종류의 계통도에 따른 Tree 구조 형태의 관리구조가 가능하며 2D 혹은 3D 형태의 Plant Map 과 다양한 설비그림의 기본 라이브러리를 제공함으로써 관리의 편의성 제고 및 시각적 관리가 가능하도록 설계되어 있다.

#### b) 자동 진단 및 분석 기능

본 시스템에 내장된 다양한 진단 및 분석 알고리즘 및 설비 고장사태 DB를 근거로 한 자동진단 기능을 통하여 자동설비 진단 및 분석이 가능하다. 사용자는 설비의 사양 및 운전조건만 입력하면 시스템 스스로 펌프의 상태를 분석하여 고장의 원인과 대책이 포함된 진단보고서를 생성해 줌으로 설비진단 전문가가 아닌 일반 관리자도 손쉽게 펌프고장에 대처 할 수 있도록 하였다.

### 2.3.2 Trend 관리

감시기능은 펌프에서 발생되는 다양한 Data의 추이를 관찰함으로써 펌프의 상태를 평가하고 이를 기반으로 하여 고장의 시기를 예측하거나 운전상태의 효율성을 평가하는데 있다. 운전시간, 운전구간 등 다양한 정

보의 수치 등을 설비의 종류, 상태, 중요도, 운전조건 등 다양한 변수에 따라 경고치를 설정하고, 실시간으로 입력되는 진동, 온도, 압력, 수위, 전류 등 다양한 입력 신호들의 Trend 와 이러한 Data들의 다양한 가공을 통하여 얻어지는 양정, 토출량, 혹은 변화율 등의 Trend 분석을 통해 완벽한 경향관리를 실현한다. 또한 실시간의 비교뿐 아니라 과거의 Data와의 비교를 통해 변동상황을 확인 할 수 있다. 이를 위해 제공되는 경향관리 Tool Plot 으로서는 실시간 Raw Data를 표현하는 Time Plot, Raw Data를 주파수 분석한 Spectrum Plot 등 기본적인 형태의 그래프 이외에 2D Waterfall, 3D Waterfall, Contour 등의 다양한 그래프 Plot을 지원한다. 또한 펌프의 효율과 관련된 다양한 변수와의 변화율을 추이관찰을 위한 다양한 Graph를 제공한다.

### 2.3.3 정밀분석

분석기능은 펌프의 감시기능을 통해 펌프의 이상징후가 발견되었을 시 그 이상원인을 규명함으로써 신속하고 근본적인 대책의 수립 및 시행에 있으며 또한 대책수행 후 그 결과를 분석함으로써 이상징후의 근본적인 원인 해결에 그 목적이 있다.

정밀분석 프로그램은 펌프에서 발생될 수 있는 모든 형태의 결함 및 펌프의 운전과 관련된 중요한 정보를 분석할 수 있는 다양한 Tool을 제공한다. 펌프에서 발생될 수 있는 기계적 결함, 전기적 결함, 수력학적 결함 및 구조결함은 진동 과 온도센서에서 취득한 Data를 기반으로 주파수 분석(FFT Analysis)을 통해 분석하며, 펌프의 효율과 관련된 펌프의 운전점 분석, 양정 분석, 토출량 분석 등은 전류, 수위 및 압력 센서로부터 취득된 Data 와 펌프의 효율곡선과의 상관관계의 분석을 통해 분석한다.

이를 위해 제공되는 분석 Tool 로서는 Lowpass, Bandpass, Autospectrum, CPB, Time, SED, Cepstrum, Phase등의 기본 분석 기능과 Orbit, Directional Spectrum, X-Y Position vs Time, X-Y Position vs Speed, Spectrum vs Speed, Vector History, Bode, Polar 등의 전문화된 기능으로서 사용자가 배수설비의 운전조건에 맞는 적합한 분석 Tool을 자유롭게 선택하여 사용할 수 있도록 다양한 분석 Tool을 제공한다. 특히 한 개의 측정 Point당 최대 12개의 Function을 동시에 선택하여 측정 가능하게 함으

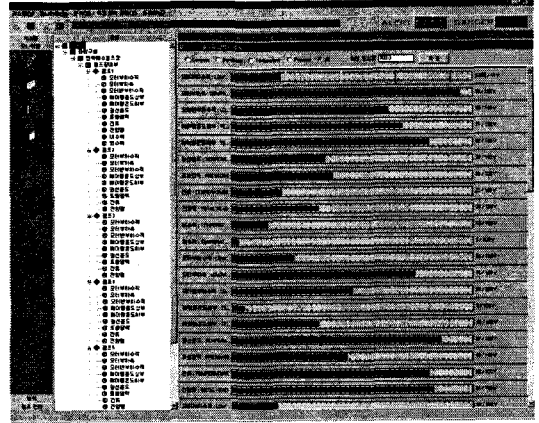


그림 4 경고값 설정 및 진동값 경향관리

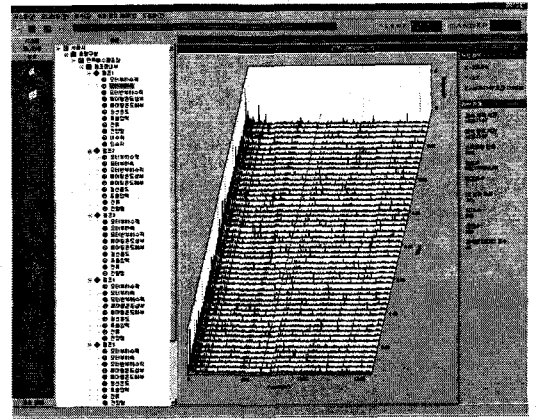


그림 5 시간별 진동 Trend

로서 보다 정밀한 상태 진단을 할 수 있도록 하였다. 또한 Main Reference, Delta, Harmonic, Sideband 등 다양한 형태의 Cursor는 진동신호 분석에 적합하게 설계되어 있다.

다음은 본 시스템의 정밀분석 Program을 이용하여 분석할 수 있는 대표적인 결함의 종류들이다.

#### a) 기계적 & 전기적 결함

빗물펌프장의 펌프에서 발생될 수 있는 대표적인 기계적/전기적 결함은 베어링결함, 축의 균열(Crack Shaft) 및 굽힘(Bent Shaft)과 같은 축 결함 회전차에서 발생되는 질량 불평형(Unbalance) 커플링에서 발생하는 정렬불량(Misalignment) 및 헐거움(Looseness), 접촉(Rubbing), 공진(Resonance) 등과 같은 결함이 있다.

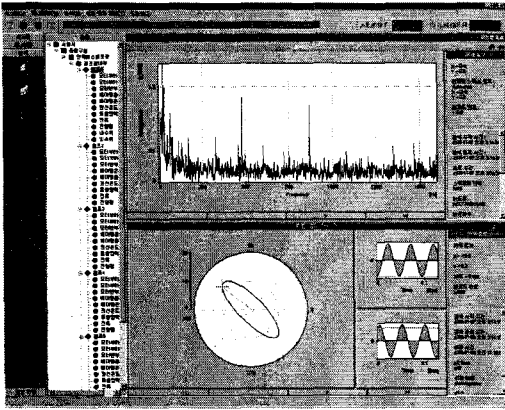


그림 6 다양한 진동신호 분석

이와 같은 대부분의 기계적 결함 등은 결함이 발생할 경우 특정 주파수 대역에서 진동 신호가 발생하거나 혹은 독특한 진동 Pattern의 형태로 나타난다.

펌프의 전기적 결함은 펌프를 구동시키는 모터에서 발생되며 고전자 혹은 회전자 편심에 의해 발생하는 공극(Air Gap) 불평형, 회전자(Rotor) 및 단락링(End Ring)에서 발생하는 회전자 봉(rotor bar)의 파손 및 크랙, 회전자 봉의 헐거움 및 개방, 회전자 적층의 단락, 회전자의 불규칙한 극부가열에 의한 열 굽힘(thermal bow) 및 단락링의 파손, 크랙 등이 있다. 또한 고정자에서 발생하는 대표적인 결함으로는 유연한 고정자, 고정자 적층(lamination)의 단락 및 고정자 철심의 느슨함 등이 있다. 전기적 결함 역시 기계적 결함과 마찬가지로 결함이 발생할 경우 특정 주파수 대역에서 진동 신호가 발생하거나 혹은 독특한 진동 Pattern의 형태로 나타나며 권선의 온도를 측정하기 위해 설치된 권선온도의 변화량을 이용하기도 한다.

#### b) 수력학적 결함

펌프의 수력학적 결함은 운전상태의 조건에 따라 발생하는 캐비테이션(cavitation), 재순환 유동(recirculation), 난류유동(turbulence), 서징(surging), 수격현상 및 압력 맥동 등의 결함이 있으며 유동조건에 따라 발생하는, 배관계 설계불량(piping), 흡입구 살계불량 및 토출구 설계불량 등이 있다. 일부 유동조건에 의해 발생하는 결함을 제외하고는 진동의 분석을 통해 결함의 정도와 원인을 분석할 수 있다.

#### c) 구조 결함

펌프의 구조결함은 주로 설치조건과 밀접한 관련이

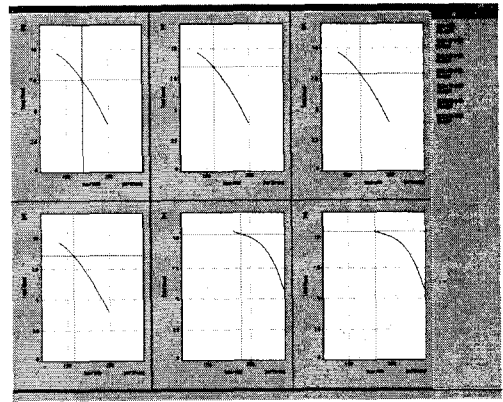


그림 7 실시간 펌프 운전점 감시

있다. 앞서 설명한 설비의 결함이라기 보다는 펌프를 지지하고 있는 구조물 혹은 부속물에서 발생하는 결함으로서 주로 베이스 결함을 포함하는 설치불량 결함 및 파이프 공진 등 펌프의 운전속도와의 공진에 의한 결함 등이 있다. 이러한 결함이 발생할 경우 특정 주파수 대역에서 Random한 주파수 형태가 발생하며 FRF라는 분석 기능을 이용하여 고유진동수를 분석 원인을 교정하게 된다.

#### d) 펌프 토출량 등 운전범위 분석

대부분의 빗물펌프의 고장은 과도한 운전부하가 주원인으로서 물의 유입량과 배수량이 급격히 변화하는 빗물펌프장에서는 과도한 저장정 상태로 펌프가 오랫동안 운전되어 과대 토출량 운전이 발생하면 펌프는 유체에서 발생하는 등의 영향으로 내구성이 급격히 저하된다. 때문에 펌프장 내/외수위의 차이에 따른 양정변동에 따라서 펌프에 가해지는 부하량 변동을 분석하여 펌프가 안전운전 영역을 벗어나는지를 평가해야 한다. 이러한 평가와 관련하여 본 시스템은 펌프의 운전 안정성과 관련된 주요 인자를 양정, 토출량, 운전구간, 운전시간 등 4가지 요소로 구분하고 입력된 Data와 각 Factor 간의 상관관계 및 각 Factor 간의 상관 관계를 분석함으로써 가장 안정적이고 경제적인 펌프운용의 실현을 가능케 하였다.

빗물펌프장의 펌프는 배관특성상 유량계를 설치한다 하여도 정확한 토출량 측정이 어려운 관계로 국내 거의 모든 빗물펌프장에는 유량계가 설치되어있지 않다. 이에 본 시스템은 펌프자체에 대한 정밀한 성능시험을 통해 펌프의 특성곡선을 구하고 가동감시 시스템의 수

위 및 압력 센서로부터 유입되는 Data 및 전류 Data와의 상호 분석을 통해 양정, 토출량을 정확히 산출할 수 있는 분석 알고리즘을 채택하고 있다.

## 2.4 Data-base system

경향관리 및 정밀분석 못지 않게 중요한 부분이 바로 Data-base System 이다. Data-base는 단순한 과거의 기록이 아니라 최적의 관리수준의 확보, 업무의 표준화, 관련 기술의 확보 및 인적 및 물적 자원의 효율적 배분 등 합리적 의사 결정 System을 위한 판단과 선택의 기준을 제공함과 동시에 새로운 목표와 기준을 제시하고 해결방안을 창출하는 무형의 자산이다.

설비상태의 Trend, 정밀분석 사례, Trouble Shooting 관련자료 이와 관련된 관련부품 정보, Outsourcing 정보 및 활용방안 등 펌프의 고장과 대책에 관련된 기술 Data의 축적은 Knowledge-based Management의 실현을 통해 향후 발생 할 수도 있는 다양한 고장에 효율적으로 대처할 수 있는 귀중한 자산이다.

또한 펌프의 운전과 효율에 관련된 펌프의 형식, 펌프의 사양, 시방점 개선 결정을 위한 필수적인 자료로 활용될 것이다.

## 3. 결론

빗물펌프장의 배수 설비는 상시 운전되는 설비는 아니지만 홍수와 같은 긴급 재해 상황에서 운전되기 때문

에 사소한 원인의 고장에도 막대한 인명적, 재산적 피해로 이어 질 수 있다. 본 시스템은 빗물펌프장 운전 상황을 통합모니터링 함으로서 홍수발생시 중앙통제소에서 신속하고 효율적으로 방재 대책을 강구할 수 있도록 하는 모니터링기능과 빗물펌프장의 배수펌프가 안전운전 영역에서 운전할 수 있게 감시하여 근본적으로 설비고장의 원인을 감소시킬 수 있는 감시기능, 그리고 진동분석을 통하여 고장 징후를 사전에 정확히 분석할 수 있는 진단기능이 주요기능이라 할 수 있다. 본 빗물펌프장의 설비고장 방지를 위한 지능형 온라인 상태감시 시스템은 이러한 기능들을 통하여 빗물펌프장의 설비고장에 의한 주변지역 침수피해를 방지할 뿐만 아니라 불필요한 Overhaul을 감소시켜 Overhaul에 따른 과도한 비용지출 및 정상적인 기계요소부품을 낭비하지 않는 가시적인 경제적인 효과는 물론 효율적으로 빗물펌프장 설비관리를 가능하게 하여 안정적인 빗물펌프장 운영을 가능하게 할 것으로 예상된다.

## 참고문헌

1. "Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics", John H. Williams, CHAPMAN & HALL, 1994.
2. "Vibration Monitoring and Diagnosis", Ralph A. Collacott, John Wiley & Sons, New York, 1979.