

# 마모발생의 통합 분석을 통한 대형 기계 운 시스템의 상태진단기술 적용

## Condition Monitoring Technology for Plant Machinery system Based on Integrated Wear Monitoring

윤의성<sup>1</sup>, 장래혁<sup>1</sup>, 공호성<sup>1</sup>, 한홍구<sup>1</sup>, 권오관<sup>1</sup>,  
송재수<sup>2</sup>, 김재덕<sup>2</sup>, 엄형섭<sup>2</sup>, ,

1: 한국과학기술연구원, 트라이볼로지연구센터

2: 광양제철소, 설비기술부

**Abstract** - Condition monitoring technology was applied for an air compressor lubricating system to achieve a proactive maintenance, which could prevent a catastrophic failure and detect root causes of the conditional failure of the system. For this work, various types of wear monitoring technology were used and compared with the results of vibration and temperature measurements. Results generally showed that every technology has a limitation to failure detection, and integrated-based condition monitoring should be performed for the best results. In this work, an idea for the implementing integrated wear monitoring was suggested and demonstrated.

### 1. 서론

상태진단기술은 기계설비 및 부품의 원활한 운전을 유지케 하며 예기치 않은 고장 또는 부품파손에 의한 작동불능으로 막대한 경제적 손실이나 이로 인한 인명피해를 줄이기 위해, 기계시스템의 운전 상태를 계속적으로 또는 정기적으로 감시하며 이상 발생현상을 사전에 검지하여 예방·조치케 하는 첨단기술로서 선진국들을 중심으로 1980년 초부터 연구개발되어 정착되고 있는 신기술분야이다[1-3]. 국내의 경우도 최근 들어 발생한 교량의 붕괴 사건, 지하철/철도 차량의 운행정지 사건 등의 대형사건

들을 통하여 상기 기술의 도입 및 연구개발의 필요성이 사회적으로 점차 확산되고 있다. 또한 최근 급속하게 성장하고 있는 국내 화학플랜트 등의 대형플랜트 사업분야의 경우, 과거에는 선진국들로부터의 상기 기술을 Turn-key Base로 제공받아 사용해 왔으나, 그동안 상기 분야의 신기술적용 및 개발사례 등이 전무하다시피하여 빈번한 사고발생으로 인하여 막대한 경제적 손실을 감수하고 있는 등 심각한 국면에 처해 있음을 보게 된다.

상태진단기술의 일환으로써 현재까지 국내외를 걸쳐 가장 활용이 잘되고 있는 기술은 기계류 시스템의 진동량 측정과 동특성 해석에 의한 상태진단기술을 첫

번째로 들 수 있다. 진동특성 해석에 의한 상기 기술은 관련 분야에서의 이론정립 및 측정기기류의 일반화 등의 활발한 개발에 힘입어서 많은 발전을 거듭하고 있다. 그러나, 상기 기술을 실제에 적용하는데 있어서 발생할 수 있는 단점은 기계요소들에서 각기 발생하는 파동에너지원들이 서로 다른 요소들을 통해서 측정부위로 전달이 되기 때문에 상호 간섭 및 전기적 외란 등의 복합적 요인들에 의하여 부정확하게 측정될 수 있어서 이들에 관한 정밀한 신호처리기법을 개발하여야 하는 어려움이 있고, 따라서 사용자 측면에서 볼 때 사용하는 기법에 관하여 이해하기 어렵거나 자체적으로 응용할 수 있는 여지가 적을 수 밖에 없다. 또한 상기 기술은 일반적으로 기계시스템이 저속에서 동작할 경우에는 파동에너지를 적절하게 측정 및 분석하기 어려운 문제점들이 있으며, 측정센서류의 위치 선정에 따라 측정결과가 크게 좌우될 수 있으므로 관리자가 상기 분야의 전문적 기술인력이어야 하는 문제점들도 있다[2].

기계시스템 내에서 발생하는 마모량을 측정하고 분석함으로써 기계시스템의 파손 여부 및 건전성을 판단케 하는 이른바 마모분석을 통한 상태진단기술은 진동특성 해석에 의한 상태진단기술의 제반 단점들을 보완함과 동시에 혹은 진동량 측정기술에서 얻을 수 없는 귀중한 정보를 추출할 수 있는 장점들을 지니고 있다. 상기의 기술은 윤활시스템을 사용하는 기계시스템 내에서 발생하는 마모입자들의 양 및 마모특성을 분석하는 제반 기술 사항으로서, 인체 내의 혈액을 분석하여 인체의 건강을 판단하는 기술과 유사하며, 따라서 기계 건강진단기술(Machine Health Monitoring) 로도 불리운다.

마모분석을 통한 상태진단기술 적용에 의하여 측정되는 사항들은 크게 나누어 정량적 및 정성적인 결과들로서, 첫째 정량적으로는 기계작동 시간에 따른 마모의 발생량을, 둘째 정성적으로는 마모입자들의 성분분석 및 마모입자 크기의 변화 (즉 마모기구의 천이), 외부로부터의 오염입자 침입 여부, 기계요소 부위의 부식발생 여부 및 산화정도등을 분석할 수 있다[2, 4-6].

이상과 같은 측정분석 결과에 의하여 일차적으로 기계시스템의 건전성 여부를 판단할 수 있으며, 또한 발생하는 마모현상의 천이 특성을 분석하여 사전에 시스템이 파손될 수 있음을 조기경보 할 수 있는 장점도 있다. 또한 지속적으로 발생하는 마모발생 특성을 분석하여 현재 사용되는 기계시스템의 주된 마모기구를 파악하여 현재 기계 시스템 내에서 발생하고 있는 파손의 근본적 원인 (root causes)을 색출하고 따라서 시스템에서 향후에 발생할 수 있는 조건부적인 파손 (conditional failure)를 사전에 예방 및 조치할 수 있다. 또한 상기 결과를 이차적으로 개량된 기계시스템 설계를 위한 기본 설계자료로서 활용할 수도 있다.

현재까지 국내외를 통하여 실용화된 상태진단기술들을 측정기술별로 특성에 따라 대분류하면, 시스템 작동변수(온도, 압력, 속도등)들을 측정하는 방법, 기계부품 혹은 윤활유의 물리화학적 변화를 측정하는 방법, 마찰손실에너지(진동/소음)을 측정하거나, 마모에 의한 재료손실을 검지하는 측정방법등이 있으며, 이들은 다시 측정주기에 따라 주기적인 점검에 의한 Off-line 방법과 On-line 방법으로 분류된다.

이들 중 본 연구의 주요 대상인 마모에 의한 재료손실 탐지기술은 기계 동작

중인 상태에서 기계의 분해작업 없이 기계요소 부품들의 파손정도 및 여부를 수시로 혹은 연속적으로 관찰/검지할 수 있다는 장점을 지니고 있는 상태진단기술 분야 중 핵심기술이다. 기계요소에서 발생된 마모입자들을 정성·정량적으로 해석함으로써 기계의 작동상태 및 건전성 여부를 가장 잘 파악할 수 있는 장점을 지니고 있으며 기술적용의 On-line 화가 용이하다[7].

상기 기술의 On-line 기술로서는 Q.D.M. (Quantitative Debris Monitor), Magnetic Plug, Particle Counter, Fluid Condition Monitor 및 최근 본 연구진에서 개발 중인 OMD (Opto Magnetic Detector)를 이용한 방법들이 있으며, 실제적으로 미국, 영국 등에서 발전설비 시스템, 항공기, 함정 등의 엔진시스템과 대규모 유압시스템 등의 핵심 상태진단기술로서 그 사용 예를 찾아볼 수 있다.

Off-line 상태진단 기술로서는 과거에 국내를 비롯한 미국 국방성등에서 폭 넓게 사용이 되어 왔던 Spectroscopy 기술 외에 1970년 이후에 개발된 Ferrography 기술 및 PQ(Particle Quantifier) / RPD (Rotary Particle Depositor)기술 등이 대표적이다.

본 연구에서는 대형 공기 압축기 기계 시스템을 대상으로 다양한 상태진단기술들을 적용하고 비교하였다. 연구의 주된 대상은 시스템에서 발생하는 마모의 측정과 분석이었으며, 기존에 사용되고 있는 상태진단기술의 주요 측정대상인 시스템의 진동량 및 온도 측정결과들과 비교함으로써 향후 상기 시스템의 선형정비(Proactive maintenance)를 실현시킬 수 있는 상태진단기법을 제시하고자 하였다

## 2. 대상 기계유회시스템 개요

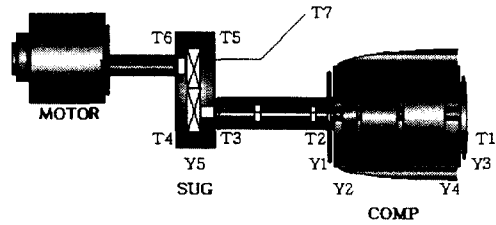


Fig. 1. Air-compressor system.

마모발생의 통합분석을 통한 상태진단 기술의 적용은 대형 공기압축기 시스템을 그 대상으로 하였다. 선정된 시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 대형모터(약 8000 kW), 증속기, 압축기를 그 주요구성으로 하고 있으며, 각 구성별로 모터에는 저널베어링, 압축기의 틸팅패드 저널베어링, 증속기 내부의 휠 및 피니언과 스톱스트 베어링등의 기계요소로 되어 있다. 유회시스템은 대형 오일탱크(약 5,000 L)로부터 메인베어링, 기어, 압축기로 공급되며 46 cSt @ 40°C(ISO VG 46)의 점도를 가진 오일이 사용되고 있다.

대상 압축기 시스템은 자체가 대형시스템일뿐만 아니라 이상발생에 의한 가동중지시 2차적으로 다른 대형시스템의 가동을 중단시키는 결과를 초래하므로 경제적으로 큰 피해가 예상된다. 지난 5년간의 정비이력을 보아도 그 손실의 정도를 알 수 있는데, 최초 설치시부터 현재까지 3번의 정기 보수로 인한 가동중지로 인하여 약 2,000시간, 이상발생으로 인한 가동중지 8회로 약 600시간이란 큰 경제적 손실을 가져왔다. 기존에 사용하고 있는 상태진단기술은 특정부위별 온도와 진동값, 사용유회유의 주요 물성치의 측정 및 분석에 기반을 두고 있다.

사용유회유의 물성치는 월2회씩 동점도, 점도지수, 수분가, 전산가, 협잡물을

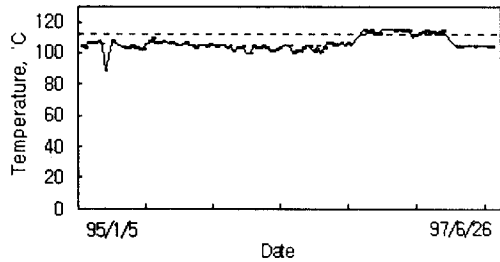


Fig. 2. Temperature of T4 with the time period. ( ---- Alarm level)

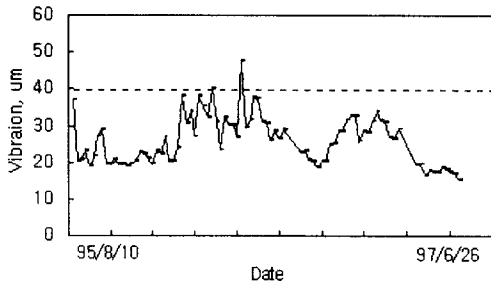


Fig. 3. Vibration at Y2 with the time period. ( ---- Alarm level)

측정, 분석하고 있다. 온도와 진동값은 Fig. 1에서 보듯이 온도는 7부위(T1~T7)에서, 진동값은 5부위(Y1~Y5)에서 측정하고 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서는 시스템에 이상발생이 있었던 과거 3년동안 측정된 온도 및 진동값의 측정 예를 보여주고 있으며, 상기 측정 부위의 기존보수관리 기준의 예를 들면 Y2 (Alarm: 40  $\mu\text{m}$ , Trip: 70  $\mu\text{m}$ ), T4 (Alarm: 114.9 $^{\circ}\text{C}$ , Trip: 124.9 $^{\circ}\text{C}$ )이다.

측정결과들을 살펴보면, 증속기 측 베어링 부위의 온도인 T4가 최근 들어서 지속적으로 Alarm치를 상회하였고, 압축기 입력측 베어링 부위의 진동값인 Y2가 간헐적으로 높게 측정되었다. 그러나, 시스템은 정상적으로 작동하였으며 상기의 기준치 이상의 결과들은 그 후 정기보수관리 이후 정상수준으로 회복되었음을 알 수 있다. 그러나, 그외 다수 발생하였

던 이상발생에 의한 가동정지시에는 그에 상응한 측정값을 보이지 못함으로써 온도와 진동값의 측정 및 분석에 기반을 둔 기존의 상태진단기술에 어려움이 있음을 알 수 있었다.

### 3. 마모 측정 및 분석 결과

대상시스템에 적용된 상태진단기술은 국내외를 통하여 실용화된 것 중 핵심기술인 마모에 의한 재료손실 탐지기술에 해당한다.

#### 3-1. ICP 분석

시스템에 사용되는 윤활유 내의 마모입자 성분분석을 위하여 ICP(Inductively Coupled Plasma Spectroscopy) 분석을 하였다. Fig. 4에 나타난 사용오일의 ICP 분석결과를 살펴보면, 97년 3월의 정기보수작업 이후에 Fe 성분의 마모입자 발생이 많이 감소했음을 알 수 있는데, 상기의 분석 결과는 과거 정기보수작업 이전에 압축기 시스템에서 발생하였던 과도한 진동 발생으로 인해 주요 기계 요소들의 금속 성분이 Fe로 이루어져 있는 증속기 내 Wheel 및 Pinion 기계 요소 부분에서 마모 발생이 주도적으로 발생한 것으로 사료된다.

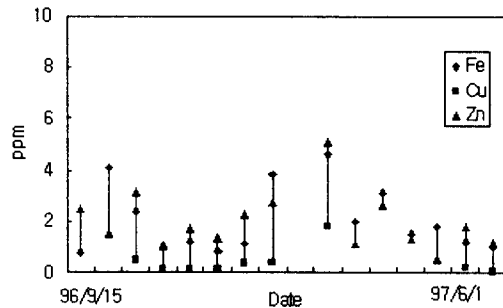
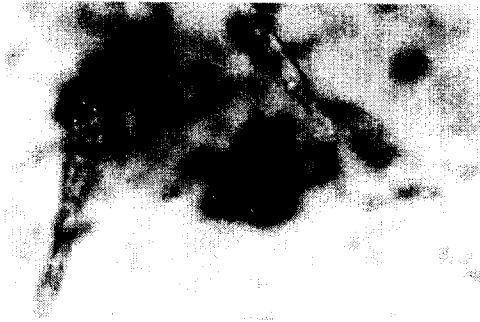
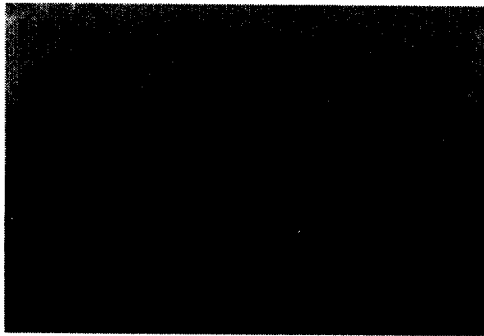


Fig. 4. ICP result of compressor oil.

### 3-2. RPD 분석



(1) dark metallo-oxide



(2) spherical particle

Fig. 5. Optical micrographs showing typical wear debris from Compressor oil.

RPD(Rotary Particle Depositor)에 의한 마모 입자에 관한 정성 분석의 결과를 살펴보면, 96년도 9월 이후부터 발생된 마모 입자들의 경우 발생된 마모 입자들의 양은 매우 적었으나, 97년 3월의 정기 보수 작업 이전에는 마모 입자들의 표면 위에 temper color를 띄거나 혹은 검은 색의 dark metallo-oxide 입자들이 관찰되었으며(Fig. 5-1), 마모 입자 표면이 부분적으로 용융된 흔적을 지닌 입자들 및 높은 접촉 응력을 받는 기계 요소 부위들에서의 피로 파괴 발생과 매우 밀접한 관계를 지니고 있는 구상 마모입자

(spherical particle)들의 생성(Fig. 5-2)을 적지 않게 관찰할 수 있었다. 상기 마모 입자들의 모습은 3월 이후에 점차적으로 감소하고 있으나, 위와 같은 마모 입자의 정성적 분석 결과로서 97년 3월의 정기 보수작업 이전에 발생하였던 주요 마모 기구 중의 하나는 증속기 내부에 위치하고 있는 Wheel 및 Pinion 기계 요소들의 마모 발생이었음을 추측해 볼 수 있다.

### 3-3. PQ 측정

PQ(Particle Quantifier)는 마모입자들의 자성모멘트를 측정하여 결과를 PQ Index로 나타내는 마모량의 정량적 측정 기기이다. Fig. 6은 시간에 따른 PQ Index의 변화로서, 시스템에서 발생한 마모입자들 중에 강자성체 및 상자성체 입자들의 총 마모발생량의 변화를 보여주고 있다

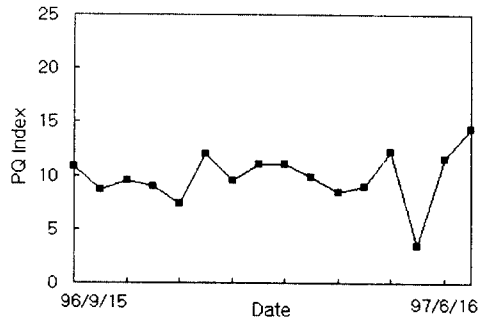


Fig. 6. PQ Index result of Compressor system oil.

### 3-4. dCA 측정

dCA(digital Contam-Alert)는 윤활유를 필터 스크린에 통과시켜 오염입자들에 의해 필터스크린이 막힘으로써 나타나는 유량변화를 측정함으로써 오염도 및

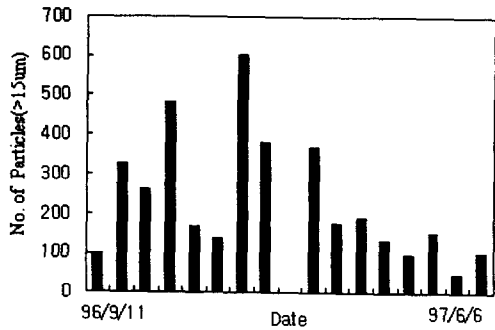


Fig. 7. Change in the No. of particle size (>15µm) with the time period.

오염입자분포 등을 측정하는 기기로서, 크기별 마모입자의 수, 마모입자의 총중량, ISO 등급, SAE 등급 및 NAS 등급과 같은 국제적으로 표준화 되어 있는 오염도 등급[2]들을 측정할 수 있다. Fig. 7은 상기 측정 결과로서, 시간에 따라 시스템에서 발생하는 상대적으로 크기가 큰 마모입자들의 수의 변화를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면, 97년 3월 정기적인 보수작업이 행해지기 이전에는 발생한 마모입자들의 크기가 점진적인 증가추세를 보이다가 이후 점차 감소하는 모습을 나타내고 있다.

### 3-5. OMD 측정

OMD(Opto Magnetic Detector)는 본 연구진에 의하여 최근에 개발된 마모량 정량 측정기기로서, 기존의 마모입자량을 측정하는 측정기기들의 장단점을 보완하여 윤활유 내의 상자성입자와 비자성 입자를 구별하여 측정할 수 있도록 고안된 기기이다. 상기 기기는 측정오일에 입사광을 투과시킨 후 투과되는 빛의 양 즉 광학밀도를 측정함으로써 오일 내에 함유되어 있는 총마모입자 혹은 외부 침입물들을 정량적으로 측정한다. OMD에 의하여 측정되는 광학밀도의 변화는 윤활

유 종류 및 자력장의 유무에 따라서 다음과 같이 표시된다.

$$D_1 = \ln\left(\frac{J_1}{J_2}\right), \quad D_2 = \ln\left(\frac{J_3}{J_2}\right)$$

where,  $J_1$  : 신유의 광학밀도

$J_2$  : 사용유의 광학밀도

$J_3$  : 자력장을 가했을 때 사용유의 광학밀도

Fig. 8은 carbonyl iron powder (순도 99.5%, 평균크기 약 20µm) 오염입자를 사용하여 OMD로 측정된 광학 밀도  $D_1$  과  $D_2$ 의 변화를 나타내고 있으며, 농도 증가에 따른 광학밀도  $D_1$ 과  $D_2$ 의 변화

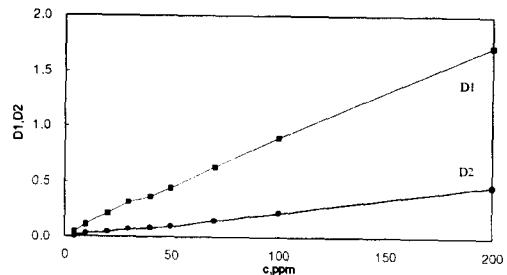


Fig. 8. Optical density changes( $D_1$ ,  $D_2$ ) in a OMD with the CIP contamination.

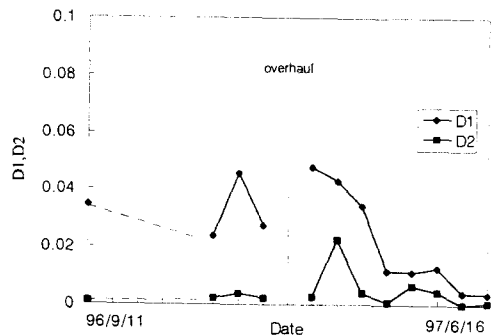


Fig. 9. Change in OMD reading( $D_1$ , $D_2$ ) with the time period.

는 모두 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. Fig. 9는 OMD를 사용하여 측정된 사용유에 대한 광학밀도의 변화를 보여주고 있는데, 97년 3월 정기보수작업 후 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 종합 상태진단 모니터링 시스템

본 연구에 적용한 상태진단기기들 각각의 측정결과들을 시스템의 정비 이력 결과들과 비교하여 살펴보면, 어느 하나의 측정 결과만으로는 시스템의 마모 상태 및 손상 유무를 정확하게 예측 및 판단하기 어려우며, 또한 시스템 내의 어느 기계요소 부위가 어떠한 이유로서 문제점을 보이는 지를 알아낼 수 없음을 알 수 있다. 상기의 결과는 대형 기계시스템의 효과적인 예견정비를 위하여 종합적 측면에서의 상태진단 모니터링 시스템의 구축이 절대적으로 필요하다는 것을 의미한다. 기계 요소 부위에서 피로마모되어 파손이 갑작스럽게 발생할 수 있는 측면을 고려하면 상기의 상태진단 모니터링이 가능하면 실시간 측정으로 적용되어야 하며, 상태진단기술에 적용된 다수의 측정결과들을 종합적으로 관리하고 판정하는 소프트웨어 알고리즘의 개발도 필수적일 것으로 사료된다. 본 연구에서는 상기 목적의 달성을 위하여 다음과 같은 종합 상태진단 모니터링 시스템의 한 예를 제시하고자 한다.

종합 상태진단 모니터링 시스템은 시스템의 마모 발생을 연속적으로 측정 분석할 수 있도록 On-line OMD system을 기반으로 하였다. 상기 시스템은 기존의 OMD 기기에서의 오일 샘플링 기능을 전자 밸브 등을 사용하여 자동화하고 PC를 이용하여 측정 결과의 분석 및 저장 등을 행하며 전자 밸브의 작동을 조절하

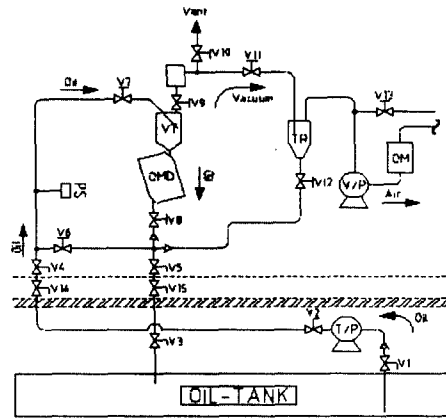


Fig. 10. Schematic view of oil circulating flow and vacuum flow in the on-line wear monitoring system.

고 또한 PC와 외부 통신망과 접속하여 데이터의 전송이 가능케 한 일종의 독립적인 측정 시스템이다.

시스템의 구성을 살펴보면, 마모 입자를 측정하는 OMD 센서부, 윤활유 탱크로부터 측정기기로의 윤활유 공급부, 윤활유 내의 기포를 제거하기 위한 진공 장치부, 시스템의 운전 및 윤활유 공급과 진공 장치부의 솔레노이드 밸브를 제어하기 위한 PLC 제어부, 그리고 데이터의 표시, 저장 및 분석을 위한 종합 분석부로 구성되어 있다.

Fig. 10은 윤활유 탱크로부터 OMD로 분석 대상의 윤활유를 온라인으로 공급하고 순환시키는 윤활 라인과 윤활유 내의 기포를 제거하기 위한 진공 장치의 진공 라인의 흐름도를 보여주고 있다.

또한 종합상태진단을 구현하기 위하여 측정결과들을 종합 관리하고 모니터링 결과를 출력하는 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 11은 개발한 소프트웨어의 기본 화면으로 OMD 측정기기로부터 실시간으로 출력되는 측정 데이터를 보여주고 있

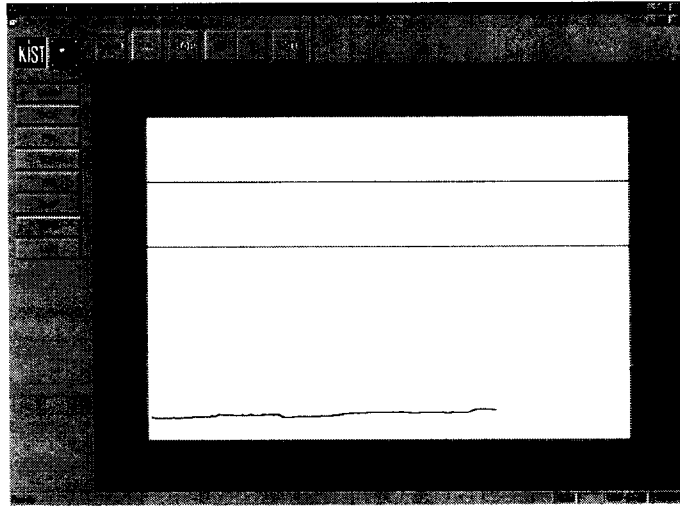


Fig. 11. Integrated wear monitoring software

다. 컴퓨터언어는 Visual C++을 사용하였으며 상기시스템의 자동제어, OMD 측정 데이터의 실시간 출력, 다양한 오프라인 데이터의 입력과 기간별 출력을 할 수 있으며 종합분석을 위해 모든 측정결과들은 데이터베이스화 되어 있다.

Fig. 11에서 보는 바와같이 개발된 소프트웨어는 OMD, dCA, PQ, ICP, VIB(진동 측정결과), TMP(온도 측정결과), RPD, LUB(윤활유 주요 물성 및 화학적 변화 등)의 8종류의 소그룹으로 구성되어 있다. 여기에서, OMD는 시간에 따른 사용 오일내의 마모량의 변화를 연속적으로 실시간 출력하며 동시에 원하는 기간별 변화도 파악할 수 있다. dCA에서는 오프라인으로 측정한 마모입자 수, 마모입자의 중량, ISO 등급, SAE 등급, NAS 등급의 데이터를 입력하며 원하는 기간별 데이터를 출력하여 그 경향을 알아볼 수 있다. 마찬가지로 PQ에서는 PQ Index 데이터를 입출력하며, ICP에서는 사용유내 마모입자들의 각 원소별 변화량을 볼 수 있다. RPD에서는 마모입자를 Image analyzer를 이용하여 정성분석한 데이터

를 RPD 분석용 차트 형식으로 보여준다. 이외에 종합적인 상태진단을 위하여 기존의 상태진단기술들에서 측정한 VIB, TMP, LUB 데이터의 경향도 비교하여 볼 수 있도록 하였다. 그리고 상기에서 보여준 모든 오프라인 데이터는 OMD의 실시간 출력 중에도 자유롭게 입출력이 가능하도록 하였다.

이와 같이 본 연구에서 제시된 종합 상태진단 모니터링 시스템은 각기 유용한 측정결과들을 나타낼 수 있는 다수의 상태진단 기기들로서 구성되어 있다. 종합 상태진단을 위한 소프트웨어는 현재까지는 다수의 출력 값들을 하나의 틀 속에 묶어 종합적으로 입출력하고 사전 경보하는 것에 불과한 정도이나, 입력된 기계 상태 정보를 종합 판정하고 기계 시스템에 이상 징후가 발생할 경우에는 이들의 조건부적인 파손 원인을 색출해 내는 알고리즘의 추가가 금명간에 예정되어 있다.



## 참고문헌

1. Williams, Davies and Drakes, 'Condition-baesd Maintenance and Machine Diagnostics', Chapman & Hall, 1994.
2. Trevor M. Hunt, 'Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids', Elsevier Applied Science, 1992.
3. Trevor M. Hunt, 'Condition Monitoring of Mechanical and Plant', Chapman & Hall, 1996.
4. 박홍식, "Neural Network에 의한 기계 윤활면의 마멸분 해석", 한국윤활학회지, Vol. 21, pp.65-71, 1995.
5. O.K. Kwon, H. Kong, C.H. Kim and P.K. Oh, "Condition Monitoring Techniques of an Internal Combustion Engine", Tribology International, Vol.20, No.3, pp.153-159, 1987.
6. N.K. Myshkin, O.K. Kwon, A.Ya. Grigoriv, H-S. Ahn, H. Kong, 'Classification of wear debris using a neural network', International Conference of Wear of Material '97, San Diego, USA.
7. N.K. Myshkin, L.V. Markova, M.S. Semenyuk, H. Kong, 'Main Trends in Desing of On-Line Wear Monitoring Systems', Int. Proc. 5th International Conference on PROFITABLE CONDITION MONITORING, Harrogate, UK, pp.71-80, 1996.