

# 실시간 마모량 측정을 통한 대형 기계윤활시스템의 파손발생 진단사례

윤의성 · 장래혁 · 공호성 · 한흥구 · 권오관 ·

송재수\* · 김재덕\* · 엄형섭\*

한국과학기술연구원 트라이블로지연구소

포항제철 광양제철소 설비기술부\*

## A case study on the failure diagnosis of plant machinery system by implementing on-line wear monitoring

Eui-Sung Yoon, Raehyuk Chang, Hosung Kong, Hung-Gu Han,

Oh Kwan Kwon, Jae-Soo Song\*, Jae Deok Kim\* and Hyoung Sub Em\*

*Tribology Research Center, KIST*

*Maintenance Technology Dept., Kwangyang Steel Works, POSCO\**

**Abstract** - This paper presented a case study on the application of on-line wear monitoring technique to a high duty air-turbo-compressor system. Main objects monitored were a gear unit and metal bearings, both shown frequent troubles due to the severe operation conditions at heavy dynamic load. The air-turbo-compressor system needs secure condition monitoring because it is one of the main utilities in steel making industry. Temperature and vibration characteristics have been mainly on-line monitored in this system for a predictive maintenance; however, it has been shown that they are not fairly good enough to give an early warning prior to the machine failure. In this work, an on-line Opto Magnetic Detector(OMD) was implemented for an on-line wear monitoring, which quantitatively measured the contamination level of both ferrous and non-ferrous wear particles by detecting the change in optical density of used oil. Results showed that the application of on-line OMD system was satisfactory in diagnosis of the machine system.

**Key words** - condition monitoring, on-line wear monitoring, proactive maintenance.

### 1. 서 론

상태진단기술은 기계설비 및 부품의 예기치 않은 고장 또는 부품파손에 의한 작동불능으로 인하여 야기되는 막대한 경제적 손실이나 인명피해를 줄이기 위

해, 기계시스템의 운전 상태를 지속적 또는 정기적으로 감시하며 이상 발생현상을 사전에 감지하여 예방·조치 하는 첨단 기술로서 선진국들을 중심으로 1980년대 초부터 연구개발되고 있으며 [1-3], 국내에서는 아직까지 이 분야의

신기술 적용 및 개발사례 등이 전무한 실정이다.

상태진단기술로 현재 국내외에 걸쳐 가장 활용이 잘되고 있는 기술로는 기계류 시스템의 진동 및 온도 측정을 통한 동특성 해석과 온도 경향 분석을 들 수 있다. 동특성 해석에 의한 상기 기술은 관련 분야의 이론정립 및 측정기기류의 활발한 개발에 힘입어 많은 발전을 하여 왔다. 그러나, 상기 기술을 실제에 적용하는데 있어서 측정 신호들 상호간의 간섭 및 전기적 외란 등의 복합적 요인들에 의하여 부정확하게 측정될 수 있어 이들에 관한 정밀한 신호처리기법을 개발하여야 하는 어려움이 있다. 또한 상기 기술은 일반적으로 기계시스템이 저속에서 동작할 경우에는 파동에너지를 적절하게 측정 및 분석하기 어려우며, 측정센서류의 위치 선정에 따라 측정결과가 크게 좌우될 수 있으므로 관리자에 상기 분야의 전문적 기술인력이 요구된다[2].

기계시스템 내에서 발생하는 마모량을 측정하고 분석함으로써 기계시스템의 파손 여부 및 건전성을 판단하는 마모분석을 통한 상태진단기술은 진동특성 해석에 의한 상태진단기술의 단점들을 보완함과 동시에 혹은 진동량 측정기술에서 얻을 수 없는 귀중한 정보를 추출할 수 있는 장점들을 지니고 있다. 상기 기술은 윤활유내 마모입자를 분석함으로써 윤활시스템을 사용하는 기계시스템에서 발생하는 마모량 및 마모특성을 분석하는 것으로서, 인체 내의 혈액을 분석하여 인체의 건강을 판단하는 것과 유사하여 기계건강진단기술(Machine Health Monitoring)로도 불리운다.

이러한 마모에 의한 재료손실 탐지기술은 기계 동작 중인 상태에서 기계의 분해작업 없이 기계요소 부품들의 파손

정도 및 여부를 수시로 혹은 연속적으로 검지할 수 있다는 장점을 지니고 있는 상태진단기술분야 중 핵심기술이다[2].

본 연구에서는 실시간으로 상자성 입자 및 비자성 입자를 구별하여 측정할 수 있는 마모량 측정기술을 대형 공기압축기 시스템의 윤활시스템을 대상으로 적용하여 설치하였다. 최근 공기압축기 시스템이 정상 가동 중 급작스런 파손이 발생하여 가동이 중단되는 결과를 초래하였다. 따라서, 이러한 파손 발생 사례로부터 기존에 시스템의 진단에 활용되고 있는 진동량 및 온도 등의 상태진단기술 결과와 새롭게 적용한 실시간 마모량 측정기술의 진단 결과들을 종합 분석 비교함으로써 상기 시스템의 파손 경향을 보다 정확하게 유추하고 향후 상기 시스템의 선행정비(proactive maintenance)를 실현시킬 수 있는 상태진단기법을 제시하고자 한다.

## 2. 대상 시스템

본 연구에서의 대상 시스템은 Fig. 1에 보여주는 바와 같이 모터, 증속기, 압축기를 주요 구성으로 하는 대형 공기 압축기의 기계윤활시스템이며, 상기 시스템의 주요 제원은 Table 1과 같다. 대상 시스템의 운전 상태를 파악할 수 있는 정비이력을 살펴보면, 초기 설치 이후 현재까

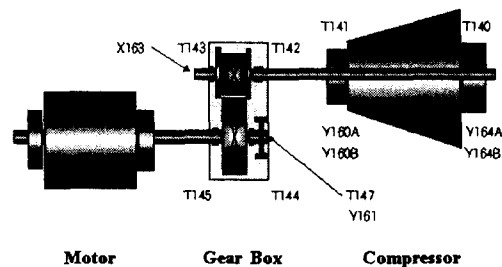


Fig. 1. Air-turbo-compressor system.

**Table 1. Specification of the Air-turbo-compressor system**

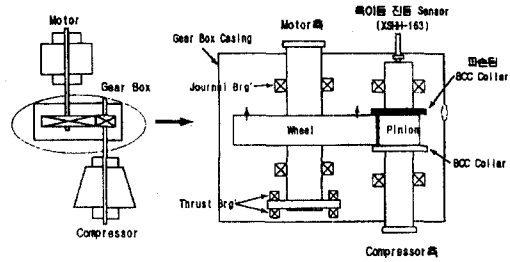
Air-turbo-compressor system
• Main Component
- Motor(8,500 kW), Oil Reservoir
- Compressor, Gear Unit
• Main Machine Elements
- Main Journal Bearing (Motor)
- Tilting Pad Bearing (Compressor)
- Gears, and Thrust Bearing
• Lubrication System
- Oil Viscosity: 46 cSt @ 40°C (ISO VG46)
- Operating Temperature: about 60°C
- Oil Tank Capacity: about 5,500 L

지 2년 주기로 정기 보수가 시행되고 있으며 비정기적인 이상발생으로 인하여 수 차례의 설비 수리가 시행된 바 있다.

현재 대상 시스템에 설치 운영되고 있는 상태진단기술을 살펴보면, 회전기기에 적용되고 있는 대표적인 기술인 진동량 측정 및 온도 측정을 적용하여 실시간으로 하고 있다. 진동량은 축의 변위 및 위상 변화, 진동가속도, 축방향 변위를 측정하고 있으며, 온도는 각 베어링부 표면에 센서를 부착하여 측정하고 있다. 또한, 사용 윤활유의 주요 물성치들(동점도, 점도 지수, 수분가, 전산가, 협잡물)의 변화를 1분기에 1회씩 수집, 분석하고 있다.

### 3. 파손 발생사례

대상 공기압축기 시스템이 정상 운전 중 진동값의 상승(Trip:  $60\mu m$ )으로 인하여 운전이 중단되었다. 시스템을 분해하여 본 결과 Fig. 2에서와 같이 증속기의 종동 피니언의 축방향 밀림방지용 collar



**Fig. 2. Schematic view of Air-turbo-compressor system.**

및 기어박스의 상부 케이싱(casing)이 파손되어 있었다. 파손 원인으로서는 Fig. 2에서 압축기와 증속기 종동축의 축추력 사이의 균형이 깨어져 축방향 밀림방지를 위해 설치된 collar가 지속적으로 매우 큰 축추력을 받은 것으로 추정되었으며, 축어긋남(misalignment)에 의해 힘의 균형이 깨진 것으로 판단되었다. 이러한 파손발생으로 인하여 시스템의 가동이 중단되어 경제적으로도 큰 손실을 초래하였다.

### 4. 기존 상태진단시스템의 진단 결과

대상 공기압축기에 적용되어 설치 운영되고 있는 기존의 실시간 상태진단기술인 진동과 온도에 대한 측정 개소는 Fig. 1에 나타나 있다.

진동량은 증속기 부위의 가속도(Y161, G), 종동축에서의 축방향 변위(X163, mm), 압축기 입출력 부분에서의 진동변위(Y160A; Y160B; Y164A; Y164B,  $\mu m$ ) 등을 측정하고 있다.

이들 중 파손 발생시 실제 가장 높은 진동값을 보였던 압축기 출력축 변위와 증속기 부위의 진동가속도를 Fig. 3과 Fig. 4에 운전이 중단된 기간을 전후로 하여 약 3개월 동안의 측정 결과들을 보여주고 있다. 이들 측정 결과를 전반적으로 살펴보면, 파손발생 시점(1998/2/1) 약

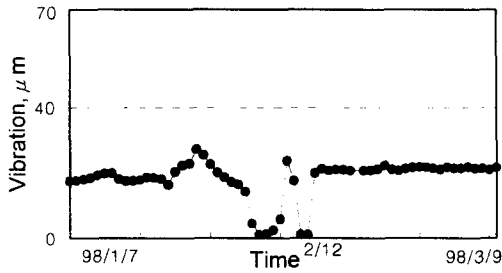


Fig. 3. Vibration variation of Y160A.

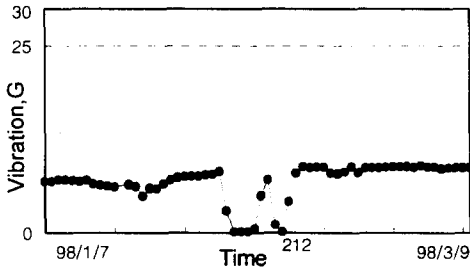


Fig. 4. Vibration variation of Y161.

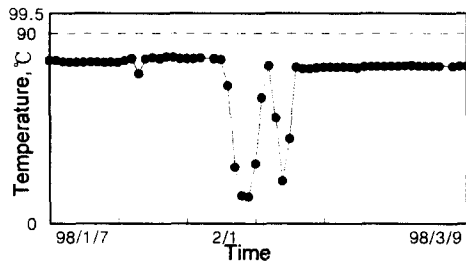


Fig. 5. Temperature variation of TE141.

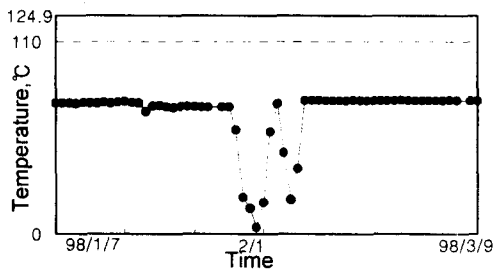


Fig. 6. Temperature variation of TE147.

10일 전부터 측정값이 감소하였다가 서서히 증가 추세를 보였으나, 각 측정값들이 관리 기준치(Warning:  $40\ \mu\text{m}$ , Trip:  $60\ \mu\text{m}$ ) 이하로 현저하게 작은 값이었으므로, 상기 시스템의 파손 발생을 사전에 예방할 수 없었다.

온도는 구동축과 연결된 휠기어 양단 부위의 저널베어링(TE144, TE145), 종동축 피니언 양단의 저널베어링(TE142, T143), 압축기 입출력 부분 로터 지지용 저널베어링(TE140, TE141), 축방향 하중을 지지하는 틸팅-패드 스러스트 베어링(TE147) 등을 실시간으로 측정하고 있다. 온도 측정값 중 압축기 출력단과 스러스트 베어링에서의 온도 측정 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 진동값과 마찬가지로 운전이 중단된 기간을 전후로하여 약 3개월 동안의 측정 결과들을 보여주고 있다.

이들 측정 결과들을 살펴보면, 파손 발생 이전에 온도의 측정값에는 변화가 거의 없이 일정하였으며, 각 측정값들은 관리 기준치(각 그림 내에 점선으로 표시) 이하로 낮게 운전되고 있었음을 알 수 있었다. 진동과 마찬가지로 파손 발생의 사전 예측이 불가능 하였음을 알 수 있었다.

## 5. 실시간 마모량 측정 시스템의 상태진단 결과 및 고찰

### 5.1 측정 시스템

Fig. 7은 대상 공기압축기시스템에 설치 가동중인 실시간 마모량 측정 시스템인 On-line wear monitoring system의 모습이다.

상기 시스템은 기존의 마모입자량을 측정하는 측정기기들의 단점을 보완하여 윤활유 내의 상자성입자와 비자성 입자를 구별하여 측정할 수 있도록 고안된

측정 시스템이다. 상기 시스템의 측정 원리는 측정 오일에 빛을 입사시킨 후 투과되는 빛의 양, 즉 광학밀도를 측정함으로써 오일 내에 함유되어 있는 총마모입자를 정량적으로 측정한다. 측정되는 광학밀도의 변화는 윤활유 종류 및 자력장의 유무에 따라 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

따라서, 상기 시스템에서 측정하는  $D_1$ ,  $D_2$  값은 신유와 사용유의 광학밀도 대수비로서 물리적으로는 광감쇠 정도를 뜻하며, 상기 값은 표준입자(ACTMD, Carbonyl Iron Powder)에 의해 ppm단위로 보정(calibration)하여 윤활유의 오염도를 측정할 수 있다. 시행된 표준입자 보정값의 예를 들면 100 ppm의 Carbonyl Iron Powder는  $D_1$ 이 0.89,  $D_2$ 가 0.22, ACTMD의 경우 100 ppm에서  $D_1$ 이 0.7 정도의 값을 나타내고 있다. 보정에 사용된 표준입자들이 성분 및 입자크기들에 있어 윤활유내의 오염입자들과 다른 것은 사실이지만, 상

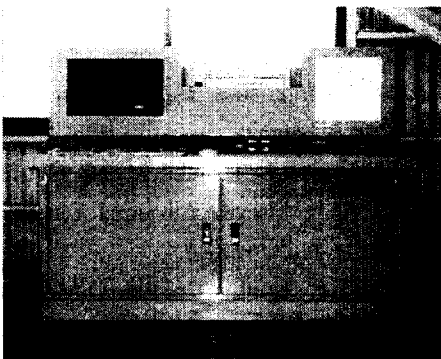


Fig. 7. On-line wear monitoring system.

기입자들을 국제적으로 표준 오염도 측정에 사용하고 있으므로 상기보정값이 절대적인 오염도를 나타내지는 않으나 상대적인 오염도를 판정하는 기준으로 활용할 수 있다.

실시간 마모량 측정시스템은 상기 측정 기기를 이용하여 지속적으로 윤활시스템의 실시간 상태진단이 가능하도록 구성한 것이다. 대상 공기압축기에 설치된 시스템 운용은 시스템 내의 오일을 자동적으로 샘플링하여 오일 내에 함유되어 있는 기포를 제거한 후, 총 마모입자량 및 자성 마모입자량을 각각 구별하여 측정하고 있다. 상기의 실시간 측정 결과들은 컴퓨터에 데이터베이스화 되어 저장된다[8-9].

## 5.2 진단 결과 및 고찰

Fig. 8과 Fig. 9는 파손 발생 한 달 전부터 실시간 마모량 측정시스템에서 측정된 대상시스템의 마모량 변화 추이를 나타내고 있다. 오일 내의 총마모입자량( $D_1$ ) 및 상자성체 마모입자량( $D_2$ )의 측정 결과들이 매우 유사한 경향을 보이면서 변화하였음을 알 수 있다. 따라서 대상 공기압축기 시스템에서의 마모 발생이 주로 증속기 내의 휠 및 피니언 기어 부위 및 기타 상자성체 재료로 구성되어 있는 기계 요소 부위에서의 마모가 주도적으로 발생하고 있음을 추정하게 한다.

또한, Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 마모량 측정결과로부터 대상 시스템에 중요한 변화들이 나타나고 있음을 검지할 수 있다. 파손 발생 25일 전(1/5)에 시스템 이상 마모발생 징후가 조기에 나타났으며, 파손 발생 10일 전(1/20)부터는 측정 결과들이 현저하게 증가되어 나타나고 있다.

## 6. 결 론

대형 공기압축기의 유허시스템에서 발생한 파손에 대해 기존에 운영중인 상태진단기술과 새로 적용된 실시간 마모량 측정시스템에서의 상태진단결과를 정리하면 다음과 같다.

상기 시스템에서 발생한 증속기 내 collar 파손과 관련하여 기존에 설치되어 있던 진동 및 온도 측정 기반의 상태진단기술이 파손 발생을 사전에 검지하지 못함으로써 적절한 대책 수립이 불가능하였음을 알 수 있었다.

공기압축기의 유허시스템에 새로 적용하여 가동중이던 실시간 마모량 측정시스템에서는 파손 발생과 관련하여 가장 민감하게 발생 10일 전부터 파손을 사전에 검지하였으며, 공기압축기 시스템의 파손을 예측할 수 있었다.

이상의 결과로부터, 공기압축기의 유허시스템에 적용된 실시간 마모량 측정시스템이 기존의 진동, 온도 측정의 상태진단기술보다도 파손을 사전에 예측할 수 있었으며, 현재 국내의 산업계 전반에 걸쳐 기반을 두고 있는 진동, 온도 측정의 상태진단기술과 함께 향후에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Williams, Davies and Drakes, "Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics", Chapman & Hall, 1994.
2. B.K.N. Rao, "Handbook of Condition Monitoring", Elsevier Advanced Technology, 1996.
3. Trevor M. Hunt, "Condition Monitoring of Mechanical and Plant", Chapman & Hall, 1996.

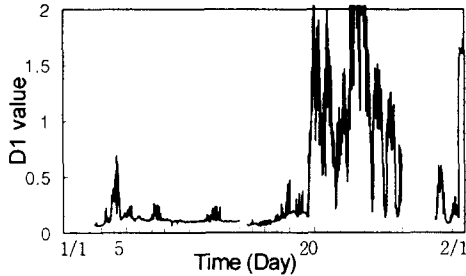


Fig. 8. Variation of OMD  $D_1$  value.

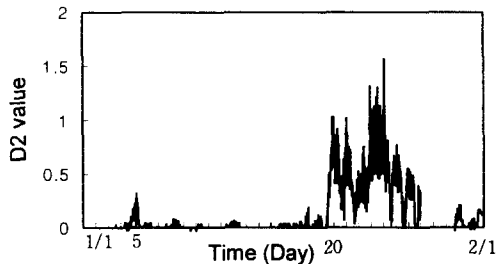


Fig. 9. Variation of OMD  $D_2$  value.

$D_1$  및  $D_2$ 의 측정 결과는 파손 발생 10일전부터 급격하게 증가하여, 파손 발생 5일전 경에 최고 값을 보이며 다소 감소하다가 파손이 발생시(2/1)에 재차 증가하는 결과를 보였다. 따라서, Fig. 8 과 Fig. 9에 나타난 실시간 마모량 측정 시스템에서의 측정 결과에 의하면, 대상 시스템에서의 이상 마모는 파손 발생 10일전부터 파손 발생 5일전까지 사이에 주로 발생된 것으로 판단할 수 있다. 따라서 공기 압축기 시스템에 기존에 설치 운영되던 상태진단기술과 비교해 보면 본 연구에서 신규로 상태진단에 적용한 실시간 마모량 측정시스템이 파손 발생 검지 및 예측에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

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, L.V. Markova, M.S. Semenyuk, H. Kong, "Main Trends in Design of On-Line Wear Monitoring Systems", Int. Proc. 5th International Conference on Profitable Condition Monitoring, Harrogate, UK, pp.71-80, 1996.
7. 윤의성, 장래혁, 공호성, 한홍구, 권오관, 송재수, 김재덕, 엄형섭, "마모발생의 통합분석을 통한 대형기계윤활시스템의 상태진단기술 적용", 한국윤활학회 '97년 추계학술대회논문집, pp.191-199, 1997.
8. 한국과학기술연구원 연구보고서(UCE 1360-5710-2), "광자기량 밀도 측정을 통한 윤활시스템내 마모량 평가기기의 On-line화 개발(I)", 1996.4.
9. 한국과학기술연구원 연구보고서(UCE 1405-5837-9), "광자기량 밀도 측정을 통한 윤활시스템내 마모량 평가기기의 On-line화 개발(II)", 1996.12.