

회전기계 파손에 따른 마멸 및 진동 특성(I)

강기홍, 윤의성, 장래혁, 공호성, 김승중, 이용복, 김창호
한국과학기술연구원 트라이볼로지연구소

An Experimental Study on the Wear and Vibrational Characteristics Resulted from Rotordynamics System Failure(I)

Ki-Hong Kang, Eui-Sung Yoon, Raehyuk Chang, Hosung Kong,
Seong-Jong Kim, Yong-Bok Lee, Chang-Ho Kim
Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology

Abstract - Condition monitoring plays a vital role since it sustains the reliable operation of industrial plant and machinery in the pursuit of economic whole life operation. In order to achieve this goal, it is needed to monitor various parameters of mechanical system such as vibration, wear, temperature, and etc., and finally to diagnosis the root causes of any possible abnormal machine condition. In this work, we constructed a rotor system where various types of functional machine failures occurred frequently in industry were induced. Characteristics of the machine failure were monitored simultaneously by the on-line measurement of vibration, wear and temperature. Result showed that these parameters responded differently to the induced functional machine failure. The availability of each parameter on effective condition monitoring was discussed in this work.

Key words - rotor system, condition monitoring, machine failure, wear, vibration

1. 서론

산업이 발전하고 기술이 발달함에 따라 제품 생산의 중요성만큼이나 각종 시스템에 대한 유지, 보수 및 진단에 대한 인식이 높아져 가고 있으며 이미 커다란 경제적인 영역을 형성하고 있다. 상태진단기술(condition monitoring)이란, 기계시스템의 예기치 않은 고장 또는 부품파손으로 인한 작동불능으로 발생하는 막대한 경제적, 인적 손실을 줄이기 위하여, 기계시스템의 운전상태를 지속적으로 또는

정기적으로 감시하며 이상 발생현상을 사전에 검지하여 예방, 조치하는 기술을 말하며, 온도, 압력 등의 물리량 측정에서부터 진동, 소음 측정과 마멸에 의한 재료손실검지에 이르기까지 매우 다양하다[1,2].

정비분야에서 중요한 기술로 대두되고 있는 상태진단에 대해 지금까지는 현장의 경험에 의존하는 경향이 많았으나, 보다 체계적이고 과학적인 접근을 위하여 많은 시도가 이루어지고 있다. 국제표준화기구(International Organization for Standard, ISO)에서는 상태진단에

대한 통론에서부터 측정위치, 진동, 마멸 등의 위험기준, 상태진단 담당자 교육에 이르기까지, 전 분야에 대한 표준지침을 제시하고 있으며[3], 독일기술자협회(VDI), 미국석유협회(API), 미국립항공규격(NAS), 한국공업규격(KS)[4] 등 각국에서는 마멸, 진동 한계에 관한 규정을 두고 있다.

측정 정보 중, 진동 정보는 회전기계의 건정성을 판단하는데 매우 중요한 자료로 이용되고 있다. 최근 데이터 습득 기술과, 진동 분석에 관한 분야에는 괄목할 만한 성장이 있었으며, 진동 신호의 패턴과 기계의 건전성과의 직접적인 관계는 왜 진동신호가 회전 기계분야에서 중요한 위치를 차지하게 하는 가를 알 수 있게 한다[1,5].

진동 정보와 함께 기계상태진단의 대표적인 기법인 기계마멸상태진단(wear monitoring)은 기계시스템 내에서 발생하는 마멸량을 측정, 분석하므로써 시스템의 파손여부 및 건전성을 판단케 하는 것으로 인간의 신체 내에 흐르고 있는 혈액의 역할과 특성에 자주 비교된다 [6,7]. 진동 정보에서 얻을 수 없는 중요한 정보를 추출할 수 있으며 동작 중인 상태에서 기계의 분해작업 없이 기계요소 부품들의 파손정도 및 여부를 관찰, 검지할 수 있다는 장

점이 있다. 그 외 소음과 온도 등을 이용한 상태진단기법들이 사용되고 있다.

현재 기계시스템의 상태진단은 대개 위에 나열한 여러 가지 진단정보 중 어느 하나를 택하여 그에 관한 전문적인 해석과 진단을 내리고 있는 것이 현실이다. 보다 정확한 상태진단을 위해서라면 위에 서술된 모든 진단정보들을 종합하여 판단하는 것이 제일 합리적인 것이다. 그러나 모든 기계시스템에서 측정 가능한 모든 센서를 부착하고, 그에 따른 모든 정보를 얻어내는 것은 경제적으로나 기계시스템 성능 자체로도 그다지 합리적이라고 할 수 없다. 즉 상태진단 대상기계시스템의 잦은 고장 원인과 그 파손특성을 미리 알 수 있다면, 보다 효과적이고, 효율적인 상태진단 기법을 적용할 수 있을 것이다[8].

본 논문에서는 이를 위해 산업 설비 및 회전기계류를 모사할 수 있는 실험장치를 제작하고, 회전체 파손 원인들 중 많은 비중을 갖는 조건들을 실험장치에 적용하여, 파손 원인별 마멸, 진동 및 온도 특성을 파악하여 이들의 상관관계를 규명하고, 마멸, 온도 및 진동 데이터를 통한 기계시스템의 파손 경향 및 원인을 규명할 수 있는 기계시스템 상태진단 기술의 기초 자료로 이용하고자 한다.

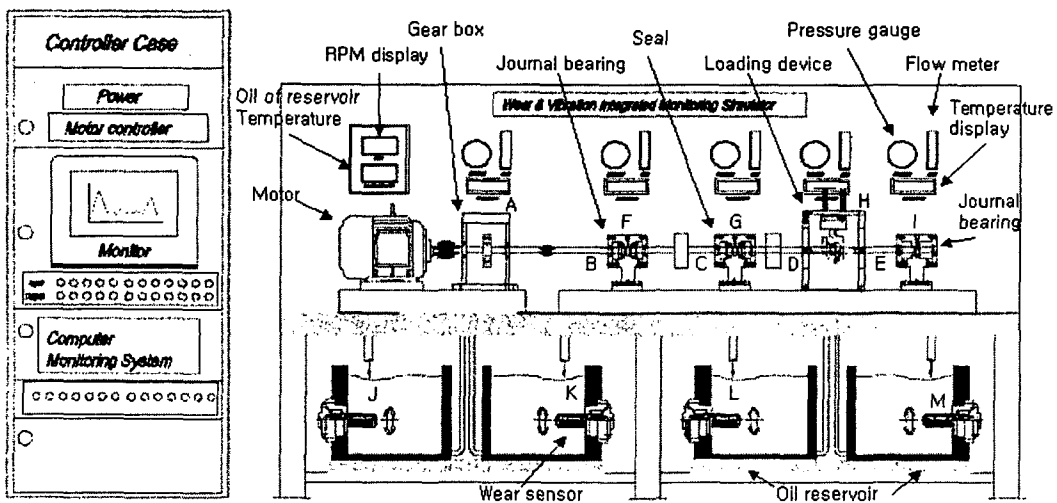


Fig. 1. Integrated condition monitoring simulator.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

기계시스템의 이상 발생에 따른 진동과 마멸간의 상호 유기 관계를 파악하고, 통합적으로 기계시스템의 상태를 분석 진단하는 시스템을 개발하기 위해, 실험실적으로 이상 발생 현상을 모사하여 실험할 수 있는 모사시험장치(simulator)를 제작하였다(Fig. 1, Table 1 참조).

본 실험장치는 회전기에서 발생하는 진동뿐만 아니라 윤활유가 공급되는 기계요소들(베어링, 시일, 기어 등)의 마멸 상태와 온도를 실시간으로 측정함으로써, 시스템의 건전성 유무 및 파손 진행 상태를 진단할 수 있도록 설계하였다. 구동 동력 장치는 최대출력 5마력, 최고 회전수가 3450rpm인 전동기와 헬리컬 기어로 구성된 증속기에 의해 최대 13800rpm까지 회전이 가능하며, 전동기 및 기어박스가 축에 미치는 영향을 줄이기 위하여 유연 커플링으로 축을 연결하였다. 축은 직경 17mm인 기계구조용 탄소강(SM45C) 재질을 사용하였다.

모사시험장치의 회전 기계요소 부분은 양단에 저널 베어링에 의해 축이 지지되도록 되어 있으며, 저널베어링은 황동 재질로 제작하였다. 하중 부과를 위하여 정하중 부과장치를 양단 저널베어링의 사이에 설치하였으며

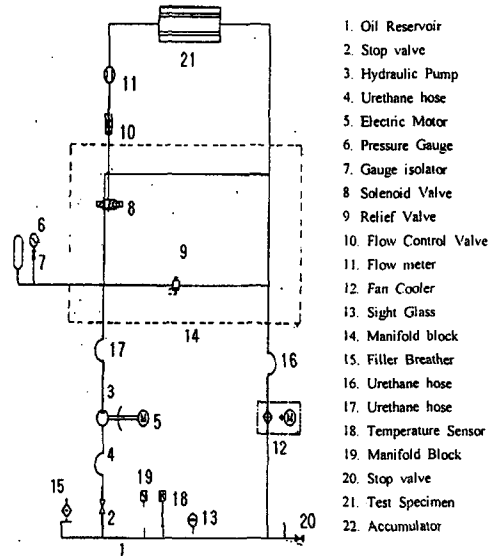


Fig. 2. Oil supply flow circuit.

하중 부과 장치의 저널베어링에 의해 하중이 가해진다. 하중은 공압 실린더를 이용하여 0 ~ 80kgf까지 부과할 수 있도록 하였으며, 실제 가해지는 하중을 실시간으로 측정하기 위하여 로드셀을 공압 실린더와 하중 부과용 저널베어링 하우징 사이에 설치하였다.

저널베어링들과 기어박스 각각에 윤활공급 장치(Fig. 2 참조)를 설치하여 윤활유를 공급하면서 기계 시스템이 마멸되는 현상을 마멸진단

Table 1. Measurement parameters

[] : location of sensor in Fig. 1

	Specification	Measurement		
		Wear	Vibration	Temperature
Motor	Inductance motor 5HP Max RPM : 3450		Acceleration	
Gear Box	Gear ratio 1:1 Helical Gear	Wear index (OMD)	Acceleration (Accelerometer)	Temperature (Thermocouple) [A]
Journal Bearing	Material = brass, l/d=1 d=17mm	Wear index [J,M] (OMD)	Displacement X,Y [B,E] (Gap sensor)	Temperature (Thermocouple) [F,I]
Seal	Material = brass, l/d=1 d=17mm	Wear index [K] (OMD)	Displacement X,Y [C] (Gap sensor)	Temperature (Thermocouple) [G]
Loading bearing	Material = brass, l/d=1.43 d=17mm	Wear index [L] (OMD)	Displacement X,Y [D] (Gap sensor)	Temperature (Thermocouple) [H]

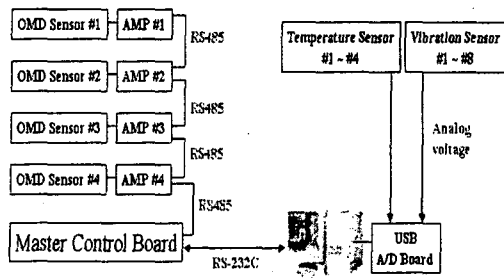


Fig. 3. Block diagram of data acquisition and processing system.

센서를 이용하여 모니터링 할 수 있도록 하였다. 윤활시스템은 윤활유 탱크로부터 펌프(trochoid pump)를 이용하여 윤활유(ISO VG 46)를 기계 시스템에 공급하였으며, 베어링 등에 공급되는 윤활유의 온도, 유량, 유압 등은 실험장치 패널에 설치되어 있는 온도계, 유량계, 유압계 등에 의해 표시되며, 유량 조절 밸브에 의해 유량이 제어되도록 하였다.

2.2 측정 및 분석장치

Fig. 1에서와 같이 모사시험장치의 좌측에는 펌프 및 전동기의 작동을 제어할 수 있는 장치와 시험장치로부터 측정되는 신호를 저장, 분석하고 표시하여 주는 장치 및 기계시스템을 분석 진단하는 컴퓨터 시스템을 보여주고 있다.

Fig. 1에서 A~E는 기어박스 및 베어링 부위 측의 X, Y방향 진동 변위 측정 위치이며, F~I는 각 베어링의 온도 측정 위치이다. Table 1에 각각에 대한 사양을 나타내었다. 최대로 마멸은 5부위, 진동은 9부위, 온도 5부위를 측정할 수 있도록 하였으나, 본 연구에서는 마멸 3부위, 진동 8부위, 온도 3부위만을 측정하였다.

마멸량 측정은 각 베어링 등의 윤활 요소에서 발생하는 마멸 입자들이 윤활유를 따라 순환하므로, 윤활유 탱크로 되돌아오는 곳에 광량을 이용한 마멸량 측정 센서(OMD)[9,10]를 설치하여 측정하였다. 마멸량 측정값인 마모지수(wear index)는

식(1)과 같이 신유와 사용유의 대수 비로써, 사용유의 오염도를 나타낸다[9].

$$\text{Wear Index} = \ln \frac{J_1}{J_2} \quad (1)$$

J_1 : 신유의 광학밀도

J_2 : 사용유의 광학밀도

기어박스(위치 A)의 진동량은 접촉형 가속도센서를 사용하여 가속도량을 측정하였으며, 축진동은(위치 B~E) 비접촉 변위센서인 proximity probe를 사용하여 90도의 위상을 갖는 위치에서 X와 Y 방향의 변위량을 측정하였다.

기계 시스템의 요소부위인 베어링의 온도는 베어링과 축간의 최소 유막 두께가 되는 위치에 베어링 표면의 1mm 후단까지 열전대(thermo-couple, TP-100.Ω)를 삽입하여 온도를 측정하였다.

통합 모니터링 시스템의 전체 데이터 전달 경로는 Fig. 3과 같다. 각 기계요소에서 측정되는 온도와 진동 신호는 12bit A/D 변환기에서 디지털화되어 USB케이블을 통하여 PC로 전달되며, 마멸 신호는 자체 앰프를 거쳐 RS-232C를 통하여 PC로 데이터를 전달한다. A/D 변환기(DT9802, data translation)의 샘플링 속도는 16채널에 대하여 각 채널 당 1024Hz로 하였다.

PC로 전달된 데이터는 크게 실시간 측정, 해석, 진단 모듈을 갖는 실시간 통합상태진단 소프트웨어에 의해 분석된다. 실시간 측정에서는 진동, 마멸, 온도의 변화 경향을 실시간으로 측정하고 보여주며, 해석 모듈에서는 마멸, 진동, 온도 등의 경향을 분석할 수 있고, 진동 신호로부터 축의 궤적(orbit), 주파수분석(FFT)등을 수행한다. 마지막 단계인 진단에서는 전 단계들의 정보를 바탕으로, 기계상태에 대한 최종 진단 및 처방을 할 수 있도록 구성되어 있다.

Table 2. Conditions of simulation test

Parameter Test	Shaft RPM	Oil flow (ml/min)	Load	Remarks
Static Load	1900	0.2	5, 10kgf (Loading device)	Shaft Knurling
Dynamic Load	2200	0.2	13, 27g Unbalance (Weight)	Shaft Knurling
Oil Contamination	2200	0.1	20kgf (Loading device)	Contaminant ACMTD 200ppm

2.3 실험 방법

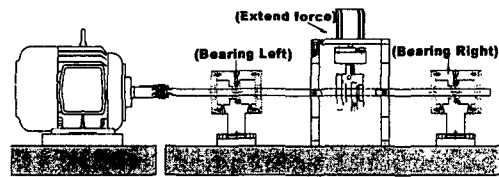
기계 시스템의 파손 원인들로는 축 정렬 불량(misalignment), 불균형(unbalance), 베어링 결함, 오일오염 등 여러 파손 요인들이 있으나, 본 연구에서는 이들 중 정적인 과하중(overloading), 불평형으로 인한 동하중, 오일 오염(oil contamination)에 대하여 고찰하였다.

정적인 과하중 실험(Fig. 4(a) 참조)에서는 축의 양 끝단에서 저널베어링에 의해 축을 지지하게 하고, 1900rpm으로 회전하는 축의 중앙부에서 하중 부과 장치를 이용하여 축에 하중을 5kgf, 10kgf로 단계적으로 부과하였다. 축과 베어링간의 러빙(rubbing)에 의한 마멸의 유발을 쉽게 하기 위하여, 축 면에 모둘이 0.3mm, 피치 0.942mm, 깊이 0.3mm의 널링(knurling) 가공한 축을 사용하였다(Fig 5 참조).

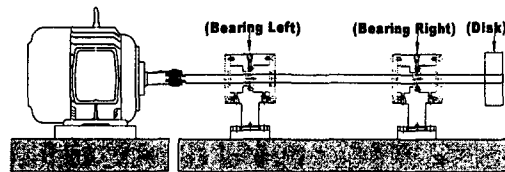
동하중 실험(Fig. 4(b) 참조)에서는 정하중 실험과 마찬가지로 널링 처리한 축을 사용하여 2200rpm으로 회전시켰다. 축이 2개의 저널베어링에 의해 지지되며, 축의 오른쪽 끝에 원판을 부착하고 가장자리에 추를 달아 불평형에 의해 동하중을 유도하였다. 평형상태로 구동 후 13.7g과 27g으로 불평형 질량을 증가시키며 실험하였다.

오일 오염 실험은 정하중 실험과 같은 실험 장치를 사용했으며(Fig. 4(a) 참조), 널링하지 않은 축으로 2200rpm의 축 회전 속도로 운전하며, 정하중 20kgf를 부과하였다. 오염물질로는 ACMTD(air cleaner medium test dust)를 사용하였으며, 오염도 200ppm인 오일을 하중부과장치의 저널베어링에 공급하였다.

오일샘플링은 기계시스템 파손시까지 하중 부과 전후, 오염물질 투입 후 3시간마다 하였다. 기계시스템의 파손은 마모지수가 2배 이상, 또는 베어링 온도가 100℃이상 되거나, 하중 부과로 인한 절대 처짐으로부터 진동 변위량이 27.5µm이상 변화되었을 때를 기준으로 하여 시스템을 정지하였다[4].



(a) Static Loading



(b) Dynamic Loading

Fig. 4. Schematic view of test apparatus.

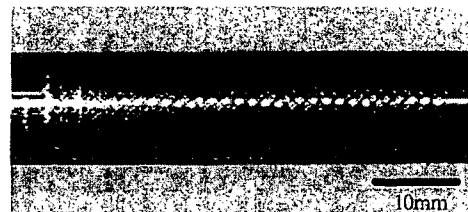


Fig. 5. Shaft machined with knurling.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 과하중에 의한 영향

Fig. 6과 Fig. 7은 기계 파손의 원인 중 과하중에 의한 영향을 고려하기 위하여 양단 지지되는 저널베어링 증상에 공압 시스템을 이용한 하중 부과 장치를 이용하여 과하중을 부과한 상태에서 시뮬레이터의 회전 요소 부품이 파손될 때까지 측정된 마멸, 진동, 온도 및 진동 스펙트럼의 변화 경향을 보여주고 있다. 정하중이 5kgf, 10 kgf로 증가함에 따라 마멸, 진동, 온도가 순간적으로 증가하여 시스템이 파손되기 전까지는 증가된 상태 그대로 유지되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 6의 시스템의 마멸 경향 데이터로부터 베어링의 마멸이 10 kgf의 하중 부과 후부터 점차적으로 증가하며 베어링이 파손되었음을 알 수 있었다. 시스템 정지 후 샘플링된 오일시료를 RDE Spectrometer[12]를 이용하여 오염입자의 성분을 분석한 결과 Fe 성분은 0.3ppm으로 거의 증가하지 않았으나, 베어링 재질인 Cu와 Zn이 5.3ppm, 4.7ppm으로 각각 증가하였다. 즉 베어링이 파손되었음을 알 수 있었으며, Fig. 8은 이때 베어링에서 발생된 마멸 입자의 모습을 보여주고 있다. 또한, 진동 및 온도에서도 크지는 않지만 증가 경향을 찾아 볼 수 있었으나, 실험초기 및 파손 후 진동스펙트럼의 비교에서는 큰 변화가 나타나지 않았다(Fig. 9 참조). 진동 스펙트럼의 경향을 분석해보면 1X, 2X 및 3X 성분 크기 모두에서 하중 증가에 따른 미소 변화를 측정할 수 있었다(Fig. 7 참조). 특히 메탈 대 메탈(metal-to-metal) 접촉에 의해 발생하는 마멸은 마찰열에 의한 온도 상승을 항상 수반하는데, 본 실험에서는 축과 베어링 간의 러빙에 의한 마멸의 유발을 쉽게 하기 위하여 축 표면을 널링 가공하였기 때문에, 마찰 온도가 상대적으로 낮았던 반면에, 커다란 들기들에 의한 절삭 효과에 의해 마멸이 많이 발생하였을 것으로 사료된다. 따라서, 추후 정상적으로 가공된 축으로 실험한다면 마모와

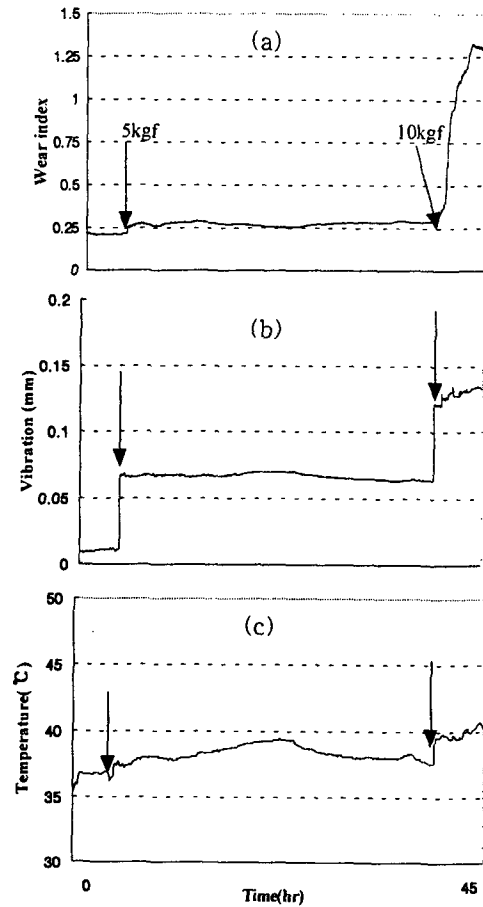


Fig. 6. Trend analysis of (a) wear, (b) vibration and (c) temperature tested under the static loading.

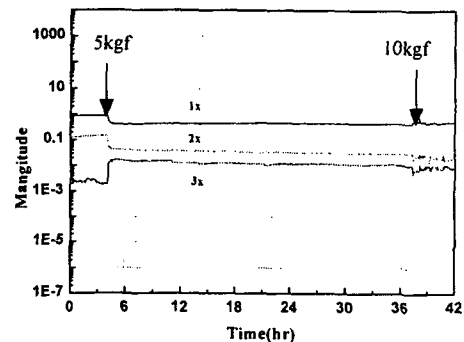


Fig. 7. Trend of multiple harmonics of operating speed tested under the static loading.

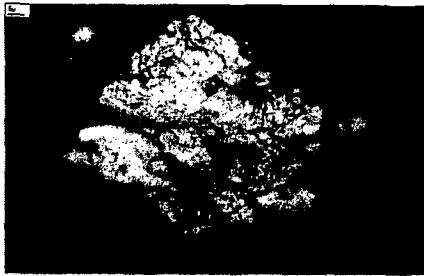
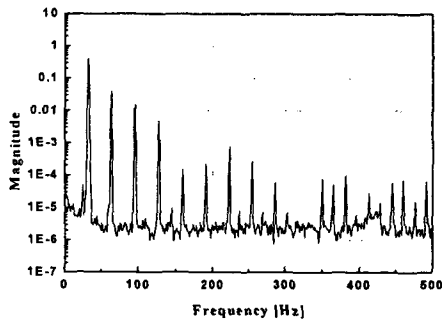
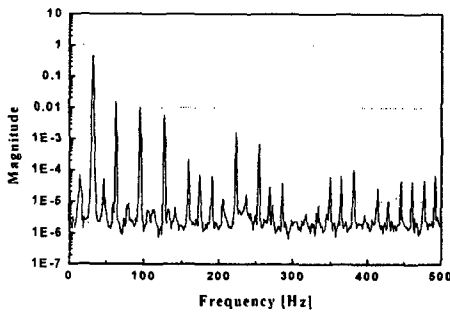


Fig. 8. Severe wear particle generated from the journal bearing.



(a) before failure



(b) after failure

Fig. 9. Power spectrum at loading bearing.

온도의 상관관계에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 상기 시험 결과로부터 진동은 점진적 파손 경향보다는 시스템 변화에 의한 순간적 변화의 감지에 유용하였으나, 정하중에 의한 파손은 마멸에 의한 경향 관리를 함으로써 기계시스템상태 진단에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 동하중에 의한 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 동하중에 의한 영향을 고려하기 위해 양단 지지되는 저널 베어링의 우측 편 축의 끝 부분에 불균형을 줌으로써, 반복되는 동하중에 의해 회전체 시스템이 파손될 때까지 측정된 마멸, 진동, 온도 및 진동 스펙트럼의 변화 경향을 보여주고 있다. 동하중 변화를 위하여 질량을 13.5g, 27g을 부과함에 따라 진동은 순간적으로 증가하여 시스템이 파손되기 전까지는 증가된 상태 그대로 유지되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10의 시스템의 마멸 경향 데이터로부터 베어링의 마멸이 27g의 동하중 부과 후부터 점차적으로 증가하며 베어링이

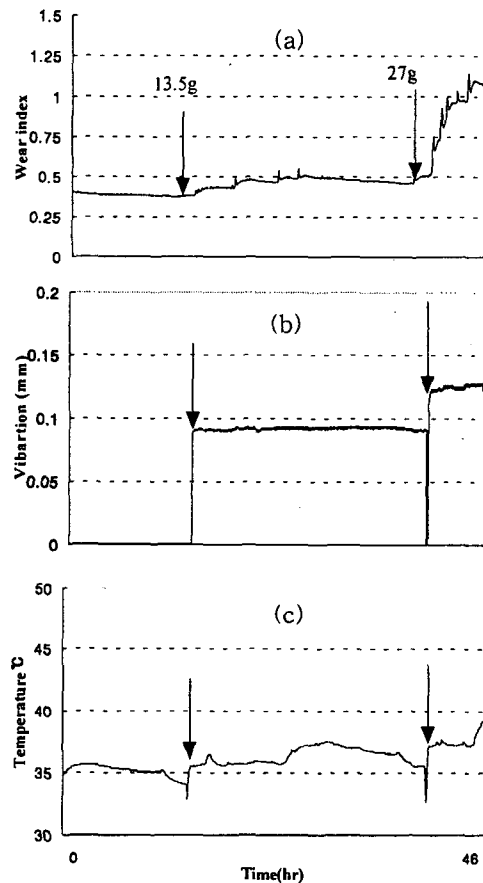


Fig. 10. Trend analysis of (a) wear, (b) vibration and (c) temperature tested under the dynamic loading.

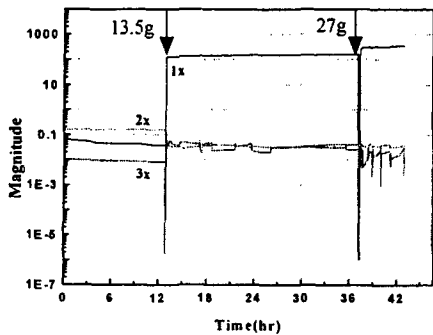


Fig. 11. Trend of multiple harmonics of operating speed tested under the dynamic loading.

파손되었음을 알 수 있었다. 진동 스펙트럼의 결과에서는 1X의 성분이 동하중 증가에 따라 현저한 증가를 보이며 그 크기가 유지되었으며, 2X, 3X 성분에서는 큰 변화가 없었다. 즉, 진동은 시스템의 변수가 변함에 따라 현저한 변화를 보였으나, 계속 반복되는 동하중에 의해 발생하는 시스템의 파손의 경향은 관찰할 수 없었다. 따라서 진동 결과로부터 시스템의 순간적 이상 상태를 감지하고, 마멸 데이터를 이용하여 그 파손 정도를 유추하므로써 회전 기계 파손 상태를 진단하는 것이 좋은 방법으로 사료된다.

3.3 오일오염에 의한 영향

Fig. 12와 Fig. 13은 윤활유의 오염에 의한 영향을 고려하기 위해 순환하는 오일을 ACMTD로 200ppm 오염시켜 실험한 결과를 보여주고 있다. Fig. 12의 마모지수 결과 분석에서는 ACMTD 오염입자로 오일을 오염시키기 전까지 마모지수가 약간씩 증가하였고, 그 후 오염 입자에 의해 갑자기 마모지수가 증가하였으며, 점차적으로 마모지수가 증가하는 현상을 볼 수 있었다. 즉, 오염입자 투입 후 기계 시스템이 점차 파손되고 있음을 알 수 있었다. Table 3의 오염 입자들의 스펙트로 성분 분석 결과로부터 저널베어링 재질인 Cu와 Zn이 오염입자 투입 후부터 점차적으로 증가하였고 축의 재질인 Fe도 점

차적으로 증가하였으므로, 기계 시스템 점차로 파손되었음을 확인할 수 있었다. Fig. 14는 시험 후 파손된 축과 베어링의 모습을 보여주고 있다. Table 3에서 베어링 재질보다 경한 축 재질의 성분인 Fe의 마모량이 많이 발생한 결과로부터, 축의 파손뿐만 아니라 트로코이드 펌프에서도 오염입자에 의해 파손이 발생한 것으로 사료된다. 그러나, 진동 및 온도 측정 결과에서는 시험 조건 변화에 따른 변화는 크게 발생하였으나, 단지 시간 경과에 따른 변화만 있을 뿐 기계시스템의 파손 경향은 볼 수 없었다. 또한 진동 스펙트럼의 변화에서도 그 경향이 크게 나타나지 않았다. 따라서, 오일 오염에 의한 시스템의 파손은 마모지수가 잘 대변하여 주고 있음을 알 수 있었다.

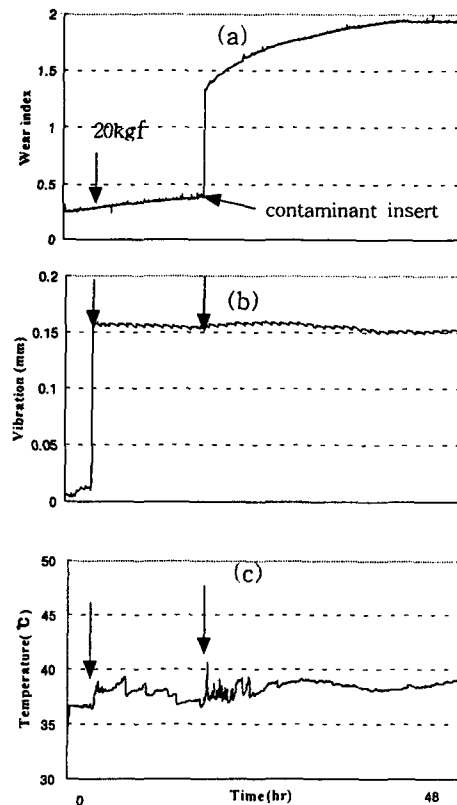


Fig. 12. Trend analysis of (a) wear, (b) vibration and (c) temperature tested under the contaminated oil.

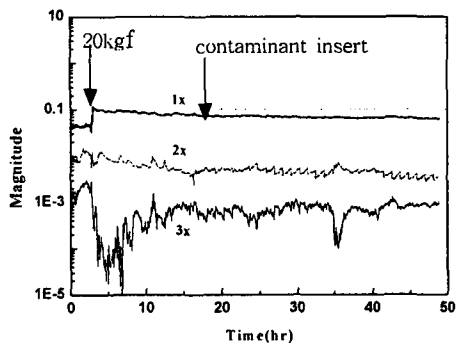
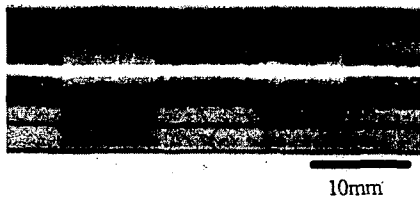


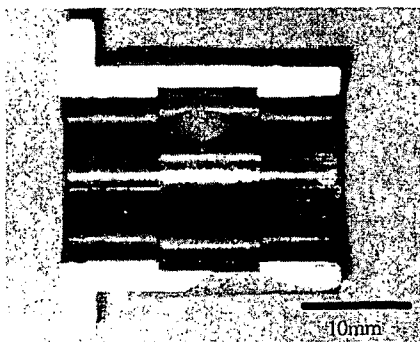
Fig. 13. Trend of multiple harmonics of operating speed tested under the contaminated oil.

Table 3. Filtered RED spectrometric analysis of the contaminated oil(0.5cc) unit : ppm

	Fe	Cu	Zn
Before contamination	5.1	0.1	0.3
1hr After contamination	24.1	0.7	1.2
12hr	44.0	2.0	1.9
21hr	77.5	4.5	3.3



(a)



(b)

Fig. 14. (a) Shaft and (b) bearing tested under the contaminated oil.

4. 결론

본 연구에서는 대형 회전 기계 시스템을 모사하여 시스템의 운전 상태를 실시간으로 측정 분석하며, 파손 원인 규명을 위한 실험을 수행할 수 있는 모사시험장치를 제작하였으며, 기계 시스템의 파손 원인별 실험을 통하여 기계 시스템의 파손 발생에 따른 마모, 진동, 온도 등의 경향을 파악하고 상호 측정결과를 고찰하였다. 기계 파손의 원인 중 정적인 과하중 및 불균형에 의한 동하중의 경우에는 진동 변위는 점진적 파손 경향 보다는 시스템 변화에 의한 순간적 변화의 감지에 유용하였으며, 마모지수 데이터는 순간적 변화에도 변화를 하고 특히 점진적 파손 상태를 잘 대변하여 주고 있음을 알 수 있었다. 기계 파손 원인 중 오일 오염의 경우에는 마모지수가 파손의 경향을 잘 대변하여 주고 있었다. 따라서, 상기 원인들에 대하여는 진동 결과로부터 시스템의 순간적 이상 상태를 감지하고, 온도 및 마모 데이터를 이용하여 그 파손 정도를 유추함으로써 회전 기계 파손 상태를 진단하는 것이 좋은 방법으로 사료된다.

참고 문헌

1. RAO, B.K.N., Handbook of Condition Monitoring, Chapter 1, Elsevier Advanced Technology, 1996.
2. Kong, H., Yoon, E.S., Kwon, O.K., Song, J.S., Um, H.S., Markova, L.V., Myshkin, N.K., "Case Study of Wear Monitoring of a High-Duty Air-Compressor System by Using an On-line Opto-Magnetic Detector", Proceedings of the 11th International Conference on COMADEM, Vol. 2, pp. 511-518, 1998.
3. ISO/DIS 14830, Condition monitoring and diagnostics of machine. - Tribology-based

- monitoring and diagnostics of machine. - General guideline, Oct. 2001.
4. KS B 0142(1991), 회전속도 10-20 rev/s 로 운전되는 기계의 진동-진동 평가기준 의 기본사항.
 5. Mitchell, John S., Machinery Analysis and Monitoring, Pennwell Publishing, 1981.
 6. Hunt, Trevor M., Handbook of Wear Debris Analysis and Particle Detection in Liquids, Elsevier Applied Science, 1992.
 7. 광양제철소 대형기계 윤활시스템의 상태 진단기술 최적화, 한국과학기술연구원 연구보고서, 2000.
 8. 장래혁, 강기홍, 공호성, 최동훈, “기계시 스템 파손에 따른 상태진단 파라미터의 상관관계 해석에 관한 연구,” 제34회 한국윤활학회 추계학술대회, 2001.
 9. 오일 오염도 측정 장치, 대한민국 특허 출원 99-49045, 1999.
 10. Machine Health Monitoring 기술개발, 한국과학기술연구원 연구보고서 N131 -2432 -2, 1986.
 11. 지능형 시스템 모니터링 기술개발, 한국 과학기술연구원 보고서, 2000.
 12. 공호성, 한홍구, 권오관, “분광분석법을 이용한 윤활유 오염물 및 마모입자 분석에 있어서의 문제점 고찰,” 한국윤활 학회지, Vol. 15, No.2, pp.131~140, 1999.