

마멸현상에서 발생하는 회전기 시스템의 진동·마모·온도의 상관 관계 연구

The Study on the Correlation of Vibration, Wear and Temperature for Rubbing in Rotating Machinery

백두진*, 이용복†, 김승종*, 윤의성*, 김창호*, 공호성*, 장건희**

Du-Jin Baek, Yong-Bok Lee, Seong-Jong Kim, Eui-Sung Yoon, Chang-Ho Kim,
Ho-Sung Kong, Gun-Hee Jang

Key Words : Rubbing(마멸), Rotating Machinery(회전 기계), Condition Monitoring(상태 감시), Fault Diagnosis(결함 진단)

ABSTRACT

In this paper, the correlation among vibration, wear and temperature are experimentally investigated when rubbing is caused by static and dynamic forces. Each measurement reflects the characteristics of the system and is useful in detecting and diagnosing the current status of rotating machinery. For experiment, the rotor system with lubricating equipment such as trochoid pump, oil tank and wear detecting sensor is implemented to simulate the rubbing condition. Experimental results show that significant change in wear quantity can be notified when vibration signal is changed by rubbing. The results can be applied to system monitoring and fault diagnosis in rotating machinery.

1. 서론

증기터빈, 모터, 펌프, 압축기 등 회전기계의 회전자와 고정자의 접촉에 의한 이상 진동현상을 마멸(rubbing)이라 한다. 이러한 현상은 편심, 축정렬불량(misalignment) 등의 요인에 의하여 회전자가 선회운동(whirling motion)을 하여 고정자와 접촉하게 되면서 발생한다. 회전기계의 운전 중 마멸이 발생하면 고주파, 큰 진폭의 진동이 발생하며 심한 경우 회전기계의 파손을 일으키게 되므로 운전을 중지해야 하는 사태가 발생한다.^(1,2)

이와 같이 고속, 고성능의 회전기계의 운전, 유지를 위해서는 마멸 현상에 대한 연구가 필요하다.

산업계에서 사용되는 회전기계에는 운전상태를 감시(monitoring)하기 위해 각종 센서가 부착되어 있고, 설비보안의 측면에서 유용하게 활용되고 있다. 이를 위하여 진동 신호뿐만 아니라 마모, 온도 등의 신호들도 감시 대상이 되고 있는데 이러한 신호들은 회전기계의 건전성을 나타내는 중요한 지표가 되고, 이상이나 고장의 초기검지에 유익한 자료가 되고 있다. 그러나, 이상이나 고장이 발생하였을 경우, 측정된 신호들로부터 원인을 추정하는 데에는 매우 전문적인 지식과 오랜 경험이 필요하다.⁽³⁾ 반면에 이런 현장 전문가들이 부족한 현실이다. 이에 대한 대안으로 전문가를 대신할 상태 진단 시스템의 필요성이 대두되었으며 현재 여러 곳에서 연구 개발되고 있다.

현재 기계시스템의 상태진단은 각각의 측정신호들의 경향분석에 크게 의존, 수행되고 있다. 보다 정확한 상태진단을 위해서라면 위에 서술된 모든 진단정보들을 종합하여 판단하는 것이 제일 합리적인 것이다. 그러나 모든 기계시스템에 측정 가능한 모든 센서를 부착하고, 그에 따른 모든 정보를 얻어내는 것

† 책임저자, 정회원, 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터
E-mail : lyb@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5663, Fax : (02) 958-5659

* 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

** 한양대학교 정밀기계공학과

은 경제적으로나 기계의 성능 자체로도 그다지 합리적이라고 할 수 없다.⁽⁴⁾

따라서 본 논문에서는 산업 현장의 회전 기기를 모사한 실험 장치를 제작하고 이에 흔히 발생하는 파손 원인을 인위적으로 발생시켜 마멸 현상을 유도하고 발생 시 진동, 마모와 온도의 세 가지 측정요소들을 모두 수집하여 이들 간의 상호 관계 규명을 통해서 마멸 현상에 대해서 면밀히 연구하여 이를 회전 기기 시스템의 상태 진단 시의 자료로 축적하고자 한다.

2. 실험장치

2.1 시뮬레이터

기계 시스템의 마멸에 의한 이상 발생 현상을 인위적으로 재현하고 이에 따르는 진동, 마모와 온도의 상호 관계의 규명을 통해서 종합적으로 회전 기기 시스템의 상태를 분석하기 위한 실험장치를 제작하였다. 이는 윤활유가 공급되는 베어링, 시일, 기어 등 마찰 요소들의 진폭, 속도, 가속도 등을 실시간으로 측정함으로써, 회전 기계요소의 진동 현상을 파악하고, 운전 상태 진단에 대한 실험을 수행할 수 있도록 설계하였다. 최대 5마력 출력, 최고 회전수 3500rpm의 유도 전동기와 최대 13800rpm까지 회전 속도의 증속과 감속을 위한 기어 박스, 전동기에 의한 축 영향 줄이기 위한 유연 커플링(flexible coupling), 볼 베어링 및 저널 베어링 요소, 시일 요소, 정하중 기기 등이 유니트화되어 있어, 실험 목적에 맞게 재구성성이 용이하며, 시스템의 각 윤활 부위에 공급 유량 제어, 부가 하중의 제어, 축의 불균형량 및 정렬 불량도 (misalignment degree) 등의 조절이 가능하도록 설계되었다. 축은 직경 17mm인 기계구조용 탄소강 (SM45C) 재질을 사용하였으며 이 때 곱힘 모드는 3450rpm에서 발생한다. 정하중 부과 장치는 실험 장치 양 쪽 저널 베어링 사이에 설치되어 있으며 이를 이용하여 베어링에 0에서 80kgf까지의 하중을 가할 수 있다. 그리고 가해지는 하중을 정확히 측정하기 위하여 로드셀(load shell)을 실린더와 하중 부과 지점 사이에 설치하였다. 트로코이드 펌프(trochoid pump)를 이용하여 오일 저장 탱크로부터 오일(ISO VG 46)을 각 요소들에 순환시키며 이들의 온도, 유량, 유압은 실험장치 패널에 설치되어 있는 계측기들에 의해서 표시가 된다.

이러한 실험 장비를 통해서 기계 요소의 마모와 진

동 사이의 관계를 파악하고 시스템의 건전성 유무 및 파손 진행 상태 분석을 위한 실험을 수행할 수 있다. Figure 1은 제작된 실험장치를 나타내며 Table 1은 실험 요소들의 사양을 나타내고 있다.



Fig. 1. Integrated condition monitoring simu

Table 1. Specification of experimental elements

	Specification
Motor	Inductance Motor 5HP
	Max 3450 rpm
Inverter	LG starvert-iG 5HP 3.7KW 16
Gear Box	Gear ratio 1:1 Helical gear
Journal Bearing	Brass l/d=1 d=17mm
Seal	Brass l/d=1 d=17mm
Loading Bearin	Brass l/d=1.43 d=17mm

2.2 측정 및 분석 장치

진동, 마모와 온도 데이터 획득과 전송을 위해서 본 실험에서는 여러 종류의 센서와 이를 통해 얻어진 데이터를 PC에 전송하기 위한 A/D 변환기를 이용하였다. Figure 2는 측정 데이터와 이를 위한 각 센서 그리고 데이터 수집과 전송의 과정을 나타내는 그림이다.

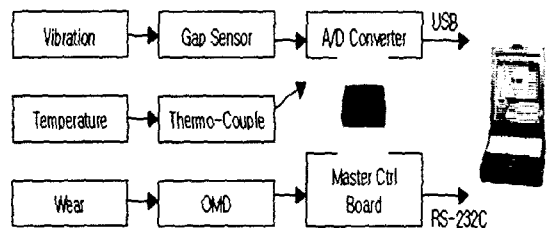


Fig. 2. The flow of data acquisition and processing

본 시스템의 각 요소들마다의 축 부분에 비접촉

변위 센서(Bently Nevada 3000 series Gap Sensor)를 X와 Y방향에 설치하여 각 방향의 진폭 성분과 축 궤적을 얻을 수 있도록 하였다. 또한 각 요소들에 순환되는 오일을 이용하여 마모량을 측정할 수 있는 OMD(optical magnetic detector) 센서를 오일 탱크 내에 설치하였다.^(5,6) 이는 광센서를 이용하여 광을 투과시키면 투과되는 광양(光量)의 변화 즉 광학 밀도가 변화되는 측정 결과에 의하여 오일 내에 함유되어 있는 오염도를 정량적으로 측정한다. 측정값인 마모지수(Wear Index)는 다음 식(1)과 같은 신유와 사용유의 로그 대수비를 통해서 사용유 내의 마모량을 나타낸다.

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

J_1 : 신유의 광학 밀도
 J_2 : 사용유의 광학 밀도

기계 시스템의 요소 부위인 베어링, 실의 온도는 베어링, 실과 회전 축 간의 최소 유막 두께가 존재하는 위치에 베어링 표면의 1mm 후단까지 구멍을 가공하고 열전대(Thermo couple TP-100 Ω)을 삽입하여 온도를 측정하였다.

앞의 센서들을 이용해서 수집된 데이터는 16채널, 최대 100kHz의 샘플링 주기, 해상도 12bits 성능의 NI사의 보드(National Instrument DAQ-PAD 6020E)를 통해 A/D 변환된 후 USB(Universal Serial Bus)를 통하여 일방 전송(isochronous transfer)에 의해 PC로 전송된다. USB는 컴퓨터와 주변기기간의 표준화된 인터페이스 방식으로 12Mbps의 대용량 전송속도, Hot plugging, 자체 전원 공급, PNP(plug and play)등의 특징이 있다. 이는 기존의 병렬 포트(parallel port)나 직렬 포트(serial port)에 비하여 고속의 데이터 전송이 가능하기 때문에 실시간 전송 시 매우 적합하며 허브(hub)를 이용하면 최대 127채널의 신호 입력이 가능하므로 복잡한 기계에도 적용될 수 있다. Figure 3는 연구 개발된 OMD 센서와 앰프를 나타내며 Figure 4는 연구 개발된 모듈 타입의 데이터 처리 하드웨어를 나타낸다.

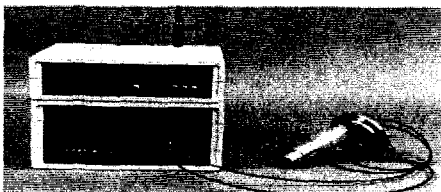


Fig. 3. OMD Sensor and amplifier

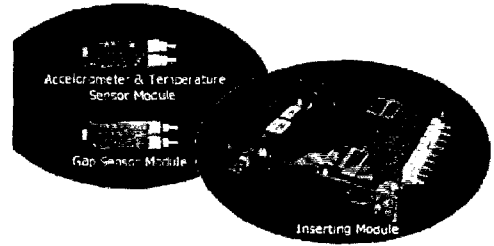


Fig. 4. Monitoring Hardware and module type sensor input

PC로 전송된 데이터는 실시간 측정, 해석, 진단 모듈로 구성된 상태 감시 및 진단 소프트웨어를 통해서 분석된다. 실시간 측정을 통해서 진동, 마모와 온도의 신호 변화를 실시간으로 파악할 수 있으며 해석 모듈을 통해서 각 데이터의 변화 추이와 축 궤적 선도(orbit), 주파수 분석(FFT) 등의 해석을 통해서 현재 대상 기계의 상태를 정밀하게 분석할 수 있다. 마지막 단계인 진단 모듈에서는 전체 정보를 기반으로 기계의 이상 상태 파악 및 결함 진단, 처방을 통해서 고장 원인과 수리를 할 수 있다.⁽⁷⁾

3. 실험

본 시뮬레이터를 이용하여 회전체 진동 현상 중 마멸에 대하여 정하중, 동하중 사례들에 관해 실험하였다. 회전수 및 정하중과 동하중의 조건과 그의 변화량, 순환되는 오일의 유량 변화, 표면 거칠기 등의 실험 조건에 따라 진동, 마모량 그리고 온도의 변화를 측정하여 마멸 발생 시 시스템의 각각의 특성 및 상호 연계성을 연구하였다. Table 2는 실험 시 각 실험 요소들의 조건들을 나타낸다.

Table 2. Operation conditions of simulation test

	Rotation Speed(rpm)	Oil Flow (ml/min)	Loading	Remarks
Static Loading(I)	1900	50	40kgf	.
Static Loading(II)	1900	20	5,10kgf	Shaft Knurling
Dynamic Loading	2200	20	13,27g Unbalance	Shaft Knurling

3.1 정하중 실험

회전수가 1,900rpm이고 50ml/min의 유량 공급의 실험 조건으로 저널 베어링에 의해 지지되는 Fig.5와 같은 시스템에 정하중을 가하였을 때 48 시간 동안의 각 회전수의 1x, 2x, 3x의 조화 성분들의 변화를 관찰하였다. Figure 6을 보면 초기 하중을 부가하기 전에 비하여 1x 성분은 약간 변화하였으나 2x, 3x의 고주파 조화 함수의 크기는 하중을 부가하기 전에 비하여 크게 증가하였는데 이는 하중 부가에 따른 축의 베어링에 대한 마멸에 기인한 것이며 특히 고주파 성분이 민감함을 알 수 있다. 반면에 Figure 7을 보면 정하중의 부가에도 불구하고 마모의 지수는 거의 변화하지 않았음을 볼 수 있다. 온도 변화의 경우 하중을 40kgf를 준 순간부터 3°C 온도 상승이 있었지만 이후 크게 변화하지는 않았는데 이는 베어링 틈새 유막이 잘 형성되었기 때문이다.

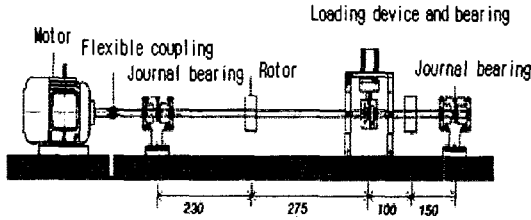
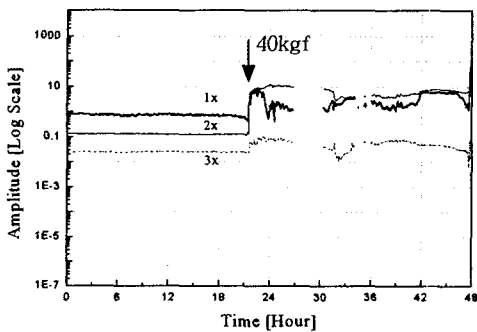


Fig. 5. Schematic view of static loading test

위의 실험은 축과 베어링의 표면 상태가 양호한 경우 진동과 마모 그리고 그러한 형상에 기인한 온도 변화의 영향을 고찰하였고 다음으로 축의 표면이 베어링에 비해서 상대적으로 거친 조건에서 정하중 실험을 수행하였다. 축과 베어링의 표면 거칠기 조건을 변화 하고자 축의 표면에 모듈이 0.3mm, 피치 0.942mm, 깊이 0.3mm의 깔주기 처리(knurling)를 하여 마멸이 쉽게 유발될 수 있도록 하였다.



(a)

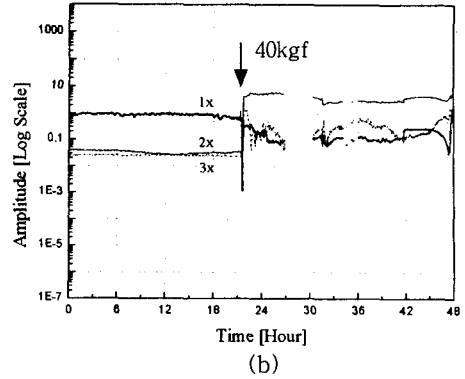
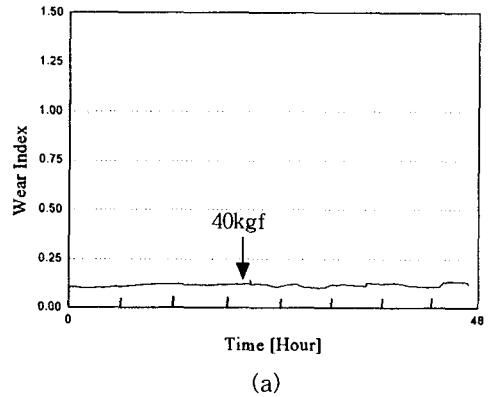
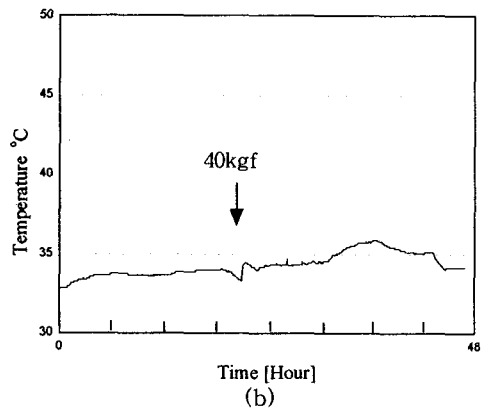


Fig. 6. Frequency trend analysis in (a) x direction and (b) y direction of static loading (no knurling)



(a)



(b)

Fig. 7. Trend analysis of (a) wear and (b) temperature tested under static loading (no knurling)

실험 조건으로는 유량을 20ml/min로 공급하였으며, 하중을 5kgf 씩 단계적으로 추가하였다. Figure 8을 보면 초기 5kgf의 정하중을 주었을 경우 1x의 성분은 약간 감소하였으나 3x의 성분은 크게 증가하였다, 이는 1x의 성분은 정하중에 따른 접촉 시 구속에 의한 진폭의 감소와 그 때 마멸 현상 때문에 발생하는 고주파 성분의 증가 현상으로 나타난다. 그 후 다시 10kgf로 하중을 증가하였을 경우는 전반적으로 전체 진동의 크기가 약간 증가하였다. 반면 마모의 지수는 Figure 9에 나타나듯이 하중의 부가에 따라 민감하게 작용하였는데 진동에 따른 변화보다도 현격히 구분이 되었다. 5kgf 하중을 준 후 초기 마모 지수보다 약간 증가하였다가 10kgf 하중을 준 후는 급격히 증가하였다. 이는 앞서 표면 상태가 좋았던 경우에 비하여 표면 상태의 거칠기가 큰 경우 마모 지수에 더욱 민감하게 적용 될 수 있음을 시사한다. 온도의 경우는 각각의 하중 부가 시 순간적으로 급격히 증가하고 계속 그 상태가 유지됨을 알 수 있었지만 베어링 파손 시 까지 지속적인 온도 상승은 일어나지 않았다. 이는 마멸의 유발을 쉽게 하기 위하여 축 표면을 깔주기 처리의 의한 상대적인 접촉 면적의 감소로 인한 것으로 사료된다.

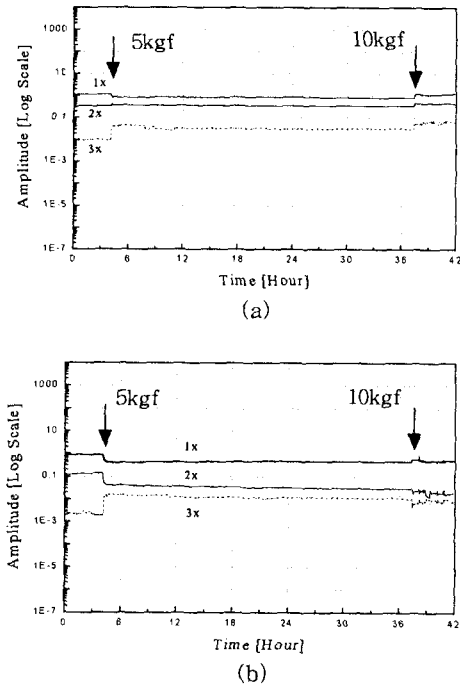


Fig. 8. Frequency trend analysis in (a) x direction and (b) y direction under static loading (knurling)

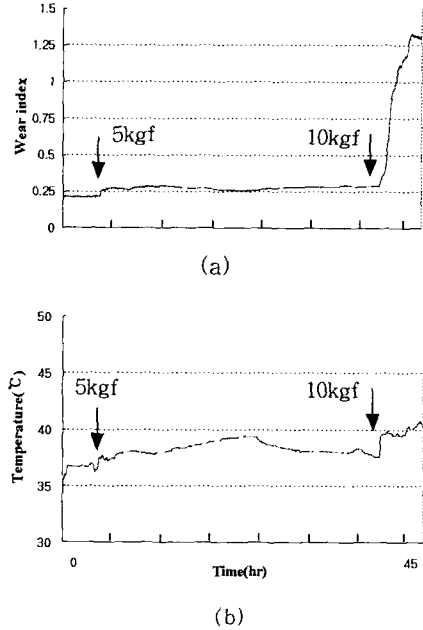


Fig. 9. Trend analysis of (a) wear and (b) temperature tested under static loading (knurling)

3.2 동하중 실험

많은 회전 기기의 파단 원인 중 불균형에 따른 동하중의 반복으로 마모 또는 피로 파괴에 의한 시스템의 파손으로 사고가 발생하는 경우가 자주 있다. 특히 프로펠러나 팬의 경우 파손에 따른 불균형은 큰 진폭의 유도로 베어링의 표면에 마멸 현상을 발생시킨다. 이러한 현상을 모사 하기 위하여 고속 외팔보 형태의 회전체에 임의로 불균형을 주어 그에 따른 진동 및 마모 그리고 온도 변화에 따른 영향을 고찰하고자 한다. 축은 2개의 저널 베어링에 의해 지지되며 오른쪽 끝에 원판을 부착하여 그 가장자리에 불균형 질량을 추가하여 동하중을 유도하였으며 운전 조건은 2200 rpm으로 정하고 윤활유의 량을 20ml/min으로 설정하였다. Figure 10는 동하중 실험을 위한 실험장치를 나타낸다.

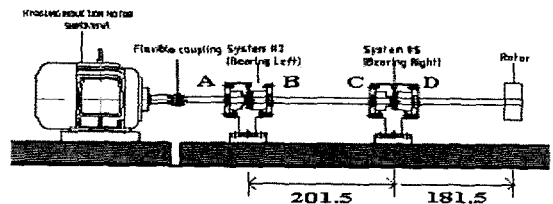


Fig. 10. Schematic view of dynamic loading test

불균형을 유도하기 위하여 불균형 질량을 13.5g, 27g의 두 가지 경우에 대하여 단계적으로 외팔보 회전체에 적용하였다. 그 결과 Figure 11을 보면 초기 상태에 비하여 1x 성분은 동하중의 증가와 더불어 크게 증가하였으나 그 상태가 지속적으로 유지되었으며 2x 성분은 거의 변화가 없었다. 또한 3x 성분은 그 변화량이 미세하나 증가하였다. 이를 보면 진동은 시스템의 순간적인 변화에는 민감하나 지속적인 시스템의 파손 경향을 빠르게 반영하지 못함을 알 수 있었다. 반면 Figure 12를 보면 마모량은 동하중의 변화에 비교적 안정적으로 특성을 띄었지만 베어링의 파손 진행 시에는 그 정도에 민감하게 반응하였다, 온도는 하중의 부가와 함께 미소하게 증가하다가 다시 안정적인 온도를 유지하였는데 이는 표면 거칠기의 차이에 의한 것으로 거칠기가 양호한 경우에는 온도의 변화는 마모처럼 베어링 파손 시 온도가 급격하게 올라간다. 정하중과 비교하였을 때 동하중에서의 특성은 순간적인 변화에는 진동이 민감하였고 마모는 동하중에 따른 파손의 진행 정도에 민감함을 알 수 있었다. 온도도 마모와 유사한 경향을 나타내었다.

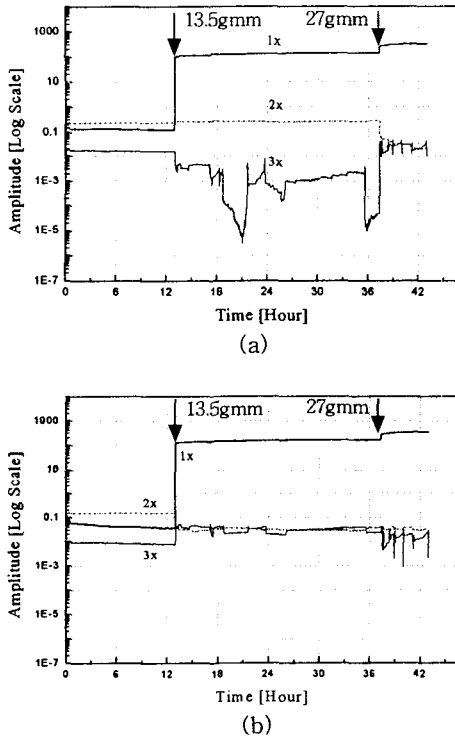


Fig. 11. Frequency trend analysis in (a) x direction and (b) y direction under dynamic loading

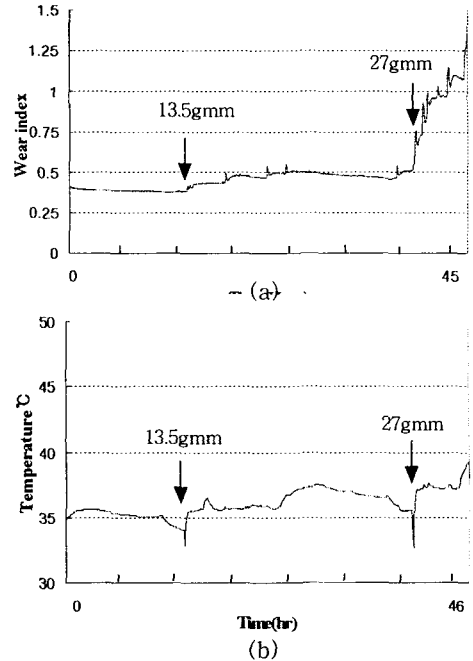


Fig. 12. Trend analysis of (a) wear and (b) temperature tested under dynamic loading

4. 결론

본 연구에서는 산업용 회전 기계 시스템을 모사하여 실험 장치를 제작하고 이를 이용하여 인위적으로 발생된 마멸 현상 시 시스템의 운전 상태를 나타내는 진동, 마모 그리고 온도 데이터를 실시간으로 측정하고 그들의 변화 특성을 고찰하였다. 정하중 및 동하중을 이용한 마멸 실험 결과 마멸의 발생 시 각 측정 요소들의 변화와 그 경향을 통해서 각각의 특성과 관계를 고찰하였다. 진동의 경우 시스템의 상태 변화 시 실시간 측정을 통해서 그 변화와 시스템의 이상 유무를 빨리 알 수 있을 장점이 있었다. 이는 실시간 선도, 축 궤적 선도 등을 통해서 그 상태를 자세히 규명할 수 있다. 마모와 온도의 경우 축과 베어링의 표면 상태에 영향을 많이 받는 특징과 함께 순간적인 변화보다는 이상 상태가 점차로 발전하는 경향을 파악하는데 적합함을 알 수 있었다. 이와 같이 여러 측정 요소들을 바탕으로 한 마멸 현상 분석은 그 발생 시점과 진행 현상을 파악하는 등 종합적으로 분석할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 자료들은 회전기기의 상태 감시와 진단에 매우 큰 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- (1) 최연선, 2001, "회전기계에서의 회전마멸 현상", 제11권 제5호, pp.609-618
- (2) B.K.N. Rao, 1996, "Handbook of condition mointoring", Elsevier Science
- (3) 양보석, 장우교, 임동수, 김호종, 1996, "회전기계의 이상진동진단시스템의 개발", 한국소음진동공학회지 제6권 제3호, pp.325-332
- (4) 장래혁, 강기홍, 공호성, 최동훈, 2001, "기계시스템 파손에 따른 상태진단 파라미터의 상관관계 해석에 관한 연구", 제34회 한국윤활학회 추계학술대회
- (5) 오일 오염도 측정 장치, 대한민국 특허 출원 99-49045, 1999
- (6) Machine Health Monitoring 기술 개발, 한국과학기술연구원 연구보고서 N131-2432-2, 1986
- (7) 이태욱, 이용복, 김승중, 김창호, 임윤철, "산업용 회전 기기의 현장 이상 진단을 위한 지식 기반 전문가 시스템 개발", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp663-639