

혈겁게 지지된 저널베어링의 마모 및 진동특성 실험적 연구

장래혁 · 편성관 · 윤의성 · 공호성 · 최동훈*

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터
한양대학교 기계공학부*

An Experimental Study on the Wear and Vibrational Characteristics of a Loosely supported Journal Bearing

Rae-Hyuk Chang, Sung-Kwan Pyun, Eui-Sung Yoon, Hosung Kong, Dong-Hoon Choi*

*Tribology Research Center, KIST
School of Mechanical Engineering, Hanyang University**

Abstract - Condition monitoring plays a vital role since it sustains reliable operation of industrial plants 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, a machine failure caused by mechanical looseness was experimentally simulated and on-line measurement of the vibration, wear and temperature were simultaneously measured. For the quantitative analyses of machine wear, several statistical parameters of the wear particle size distribution were obtained through the center moment method of the Weibull distribution function, and they were compared to vibrational characteristics. Results showed that the wear and vibrational characteristics did not reveal a strong correlation each other in a loosely supported journal bearing.

Key words - looseness, Weibull distribution function, integrated condition monitoring.

1. 서론

산업이 발전하고 기술이 발달함에 따라 제품 생산의 중요성만큼이나 각종 시스템에 대한 유지, 보수 및 진단에 관한 인식이 높아져 가고 있으며 이미 커다란 경제적인 영역을 형성하고 있다[1]. 상태진단기술(condition monitoring technology)이란, 기계시스템의 예기치 않은 고장 또는 부품 파손으로 인한 작동불능으로 발생하는 막대한 경제적, 인적 손실을 줄이기 위해 기

계시스템의 운전상태를 지속적으로 또는 정기적으로 감시하며 이상발생현상을 사전에 검지하여 예방, 조치하는 기술을 말하며, 온도, 압력 등의 물리량 측정에서부터 진동, 소음 측정과 마멸에 의한 재료손실 검지에 이르기까지 매우 다양하다[2-3].

현재 국내외를 통하여 실용화된 상태진단기술들을 특성에 따라 분류하면, 시스템 작동변수(온도, 압력, 유량 등)들을 측정하는 방법, 기계부품 혹은 윤활유의 물리화학적 변화를 측정하는 방법, 마찰손실에너

서 발생하는 진동 특성뿐 아니라 기계장치 내의 윤활유의 오염도를 정량적으로 온라인 측정함으로써 기계요소별 마모와 진동 사이의 유기적 관계를 파악하고, 시스템의 건전성 유무 및 파손 진행의 상태 진단을 수행할 수 있도록 제작되었다[9].

본 실험을 위한 시스템의 주요구성은 Table 1과 같다. 축의 회전은 최대출력 5마력의 모터와 헬리컬 기어로 구성된 기어박스에 의해 구동된다. 모터와 기어가 축에 미치는 영향을 줄이기 위해 유연 커플링을 사용하였으며, 축은 직경 17 mm인 기계구조용 탄소강(SM45C) 재질을 사용하였다. 축에 불평형 질량을 부가할 수 있도록 디스크로터를 축 끝단과 저널베어링 사이에 설치하였다.

축은 길이대 축의 직경의 비가 1인 황동 재질의 양단 저널베어링에 의해 지지되며 알루미늄 재질의 하우징에 체결되어 베이스에 고정되어 지지된다. 양단 베어링과 기어박스는 독립적인 오일순환라인을 통하여 윤활유탱크로부터 펌프에 의해 터빈유(ISO VG 46)가 공급되어지도록 하여, 각 기계요소의 오염도변화를 분리, 측정할 수

Table 1. Specification of simulator

Integrated Condition Monitoring System	
• Main Component	
- Motor(5 HP), Oil Reservoir	
- Gear Unit: gear ratio 1:1, helical gear	
- Journal Bearing: brass 1/d=1	
- Loading Device: load cell, pneumatic	
• Lubrication	
- Oil Viscosity: 46 cSt @ 40°C (ISO VG46)	
- Oil Reservoir: about 2 L	
• Sensor	
- OMD: Total contamination	
- Accelerometer X, Y, Z	
- Velocitymeter	
- Gap Sensor X, Y	

있도록 하였다.

하우징 체결 헐거움에 따른 마모 및 진동특성을 고찰하기 위해, 다양한 상태 진단용 센서를 설치하였다. 베어링의 파손진행에 따른 윤활유내의 오염도의 실시간 측정을 위해 광량을 이용한 마멸량 측정센서(OMD)[8]를 윤활유 탱크에 설치하였으며, 최소 유막두께 위치의 베어링 표면 1 mm 부근에 열전대(thermocouple, TP-100Ω)를 설치하여 온도측정을 하였다.

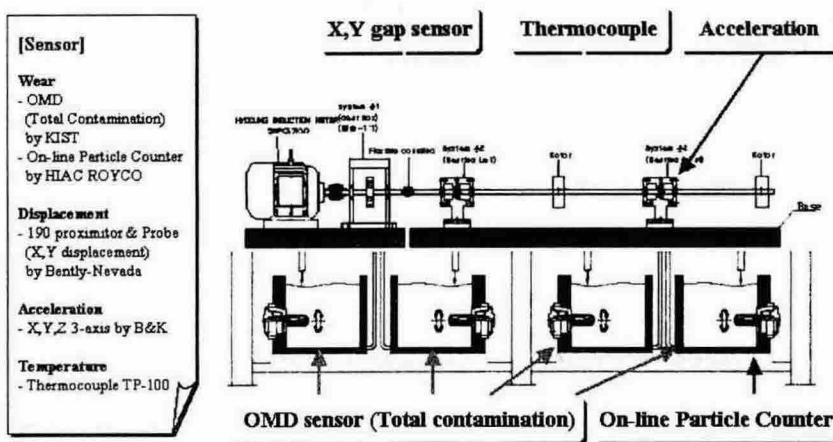


Fig. 2. Integrated Condition Monitoring Simulator.

지(진동/소음)를 측정하거나 마멸에 의한 재료손실을 감지하는 방법 등이 있다.

이들 중 현재 국내외에 걸쳐 가장 많이 활용되고 있는 상태진단기술은 기계류 시스템의 진동 및 온도측정을 통한 동특성 해석과 온도경향 분석을 들 수 있다. 상기 기술은 관련 분야에서의 이론정립 및 측정 센서의 활발한 개발에 힘입어 많은 발전을 거듭해 왔으나, 측정신호들간의 상호간섭 및 전기적 외란 등의 복합적 요인들에 의한 부정확한 측정과 이에 따른 정밀신호처리 기법의 개발 및 전문인력의 필요성 등의 어려움이 여전히 남아 있다[1-2].

기계시스템 내에서 발생하는 마멸량을 측정, 분석함으로써 기계부품의 파손여부 및 건전성을 판단하는 마멸분석을 통한 상태진단기술은 진동특성해석에 의한 제반단점을 보완함과 동시에 기계의 분해작업 없이 기계요소 부품들의 파손정도 및 여부를 정기적으로 혹은 연속적으로 감지할 수 있다는 장점을 지닌 신기술로써, 인체 내의 혈액을 분석하여 인체의 건강을 판단하는 것과 유사하여 기계건강진단기술(machine condition monitoring)이라 불리운다[2].

그러나, 상기의 다양한 진단기술 중 어

는 하나의 측정결과만으로는 시스템의 이상발생여부 및 파손상태정도를 정확하게 진단 및 예측하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 기계시스템 이상발생에 따른 효과적인 진단 및 예측을 위해서는 Fig. 1에서 보듯이 서로의 장단점을 보완할 수 있는 진동 및 마멸측정을 중심으로 한 통합상태진단기술이 적용되어야 한다[5-6].

본 연구에서는 다양한 파손유형에 따른 시스템의 건전성 유무 및 파손진행상태를 통합적으로 수행할 수 있도록 제작된 기계시스템 모사시험장치를 이용하여, 회전기계시스템의 주요 파손 요인 중 하나인 체결 헐거움에 따른 마모 및 진동특성의 상관관계를 고찰하였다. 또한, 파손진행에 따른 마모입자 크기별 분포데이터로부터 Weibull 분포함수 및 주요 통계적 파라미터들을 적용함으로써 마모입자의 특성변화를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2는 본 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 보여준다. 이 장치는 회전기에

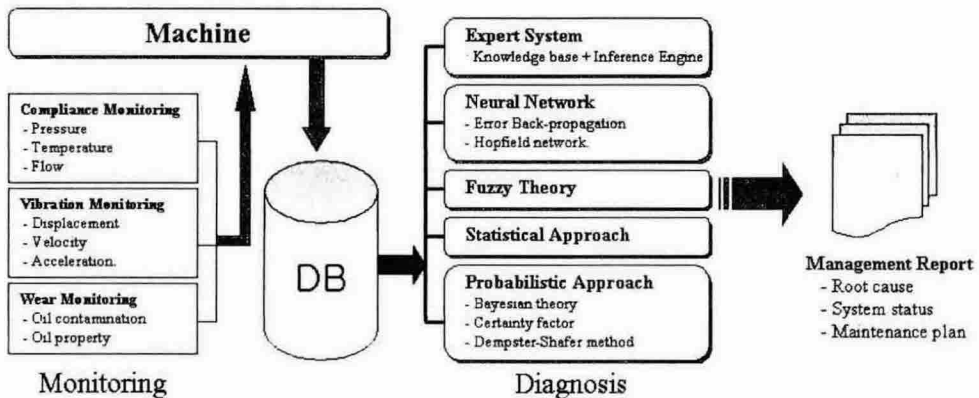


Fig. 1. Integrated Condition Monitoring & Diagnosis.

헐거움에 따른 축에 가해지는 힘의 변화와 고주파응답특성측정을 위해 B&K 사의 3축 가속도센서(accelerometer 4370)를 하우징 상단에 설치하였으며, 축의 진동을 측정하기 위해 속도센서와 비접촉 변위센서인 190 proximity probe(Bently-Nevada 제품)를 설치하여 저주파특성을 관찰할 수 있도록 하였다.

모든 측정신호의 데이터전송은 실시간으로 이루어진다. 각 기계요소의 진동, 온도 신호는 A/D 변환기로 각 채널당 1024 Hz의 샘플링속도로 수집되며 마모신호는 자체앰프를 거쳐 시리얼포트를 통해 PC로 전달된다. 수신된 모든 측정값은 실시간으로 데이터베이스화되어 관리된다.

2.2 실험방법

베어링하우징의 헐거움은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 하우징을 고정하기 위한 볼트를 이용하여 조절하였다. 헐거움 정도를 정량적으로 나타내기 위해 볼트의 피치를 기준으로 0 피치에서 1/2 피치까지 각 1/8 피치 간격으로 진행하였으며, 실험도중 진동에 따른 볼트의 자동풀림 방지를 위해 2중 고정너트를 사용하여 고정하였다. 또한, 각 로터에 18.5g의 불평형 질량을 부가하여 헐거움에 따른 진동발생과 마모발생을 가속화하도록 하였다. Fig. 4는 각 헐거움

Bolt M8 Hexagon head bolt (KS B 1002)

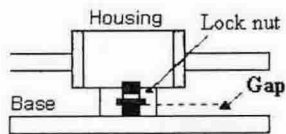


Fig. 3. A schematic view of looseness.

Test	Gap size
case 1	Fix.
case 2	pitch×1/8
case 3	pitch×2/8
case 4	pitch×3/8
case 5	pitch×4/8

pitch = 1.25mm

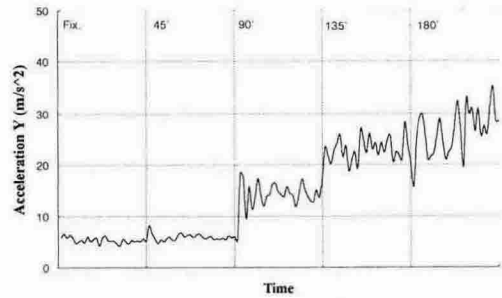


Fig. 4. Trend of Y-acceleration by the housing looseness.

조건에 따라 해당 기계요소에 가해지는 충격량을 정량적으로 고찰하기 위해 측정된 가속도 변화를 보여주고 있다. 풀림 각도의 증가에 따라 베어링하우징의 가속도량이 증가함을 알 수 있다.

축의 회전수는 1800 rpm으로 하였으며 동점도 46 cSt를 갖는 윤활유로 베어링을 윤활하였다. 파손진행에 따른 마모입자의 크기별 분포변화를 살펴보기 위해 일정시간 간격으로 윤활유를 샘플링하여 Particle counter(HIAC ROYCO, MODEL 8000A)를 사용하여 오염입자분포를 측정하였다.

윤활유 저장탱크 내 입자의 침전을 방지하여 균일한 입자분포를 갖도록 교반기를 설치하였으며, 윤활유 샘플링은 오일순환 라인 중 베어링을 거쳐 탱크로 유입되는 부위에서 동일방식으로 이루어졌다.

기계시스템의 1차 파손 기준은 마멸지수

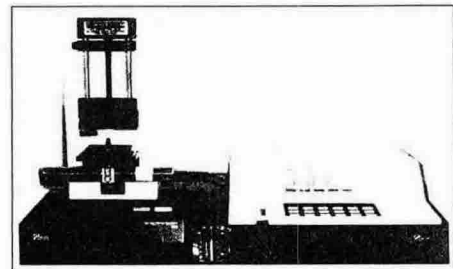


Fig. 5. Particle counter.

2배 이상, 베어링 온도 100℃, 초기 중마모 입자(sever wear particle)수의 2배 수준으로 임의로 설정하였다.

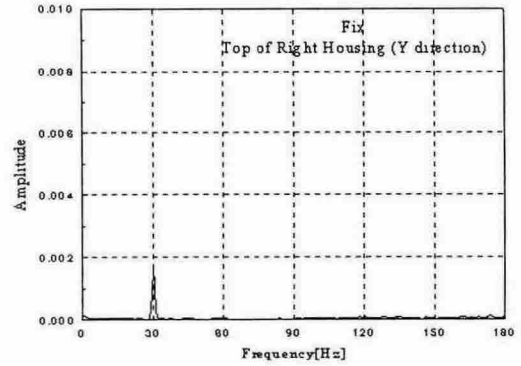
3. 실험결과 및 고찰

고정단에서 1/2 피치까지의 각 실험은 헐거움 폭에 따라 대체적으로 선형적인 진동, 마모입자수의 증가를 보였으며, 헐거움 폭이 가장 큰 1/2 피치 실험결과를 토대로 마모, 진동특성의 상관관계를 살펴보았다.

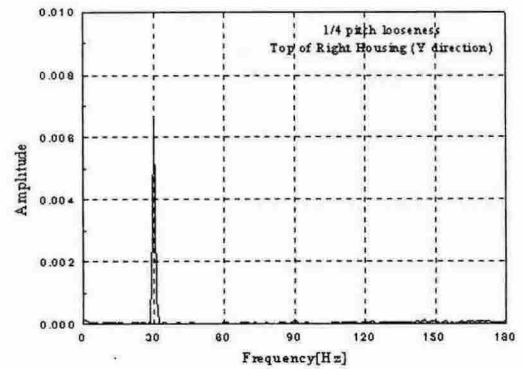
3.1 진동 특성

Fig. 6에 헐거움 폭 증가에 따른 베어링 하우징의 진동가속도 스펙트럼 결과를 보여주고 있다. 고정단과 1/4 피치 헐거움의 경우 동기주파수 성분인 1X(30Hz, 1,800 rpm)만이 뚜렷하게 나타났으며 1/2 피치 헐거움 폭을 가진 경우 과도하게 높은 1X 성분 이외에도 2X, 3X, 4X 등 동기성분들이 모두 높게 나타났다. 헐거움의 정도에 따라 베어링하우징의 진동량이 증가함을 알 수 있었으며, 이에 의해 축에 가해지는 힘이 헐거움의 정도에 따라 증가한다는 것을 알 수 있었다.

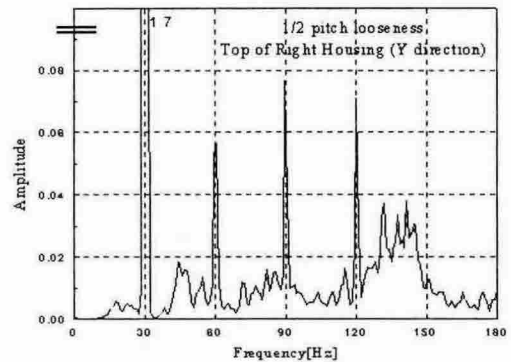
헐거움에 따른 진동성분이 가장 높게 나온 1/2 피치실험시의 다른 성분들을 살펴보면, Fig. 7의 하우징의 진동스펙트럼의 결과에서는 1X, 2X, 3X 동기성분 모두 헐거움 부가 시점에서 현저한 증가를 보였으나, 이후의 실험 진행시간 동안에는 뚜렷한 변화를 볼 수는 없었다. Fig. 8의 속도 성분 역시 초기 헐거움이 없을 경우에 비해 헐거움 부과시 현저한 증가를 보이며 반응하고 있음을 알 수 있다. 온도는 Fig. 9에서와 같이 파손진행에 따라 뚜렷한 증



(a) Fix.



(b) 1/4 pitch looseness



(c) 1/2 pitch looseness

Fig. 6. Spectrum of acceleration (Y axis) at the housing.

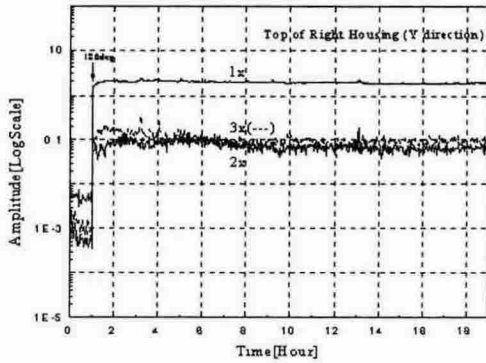


Fig. 7. Trend of multiple harmonics of housing under 1/2 pitch looseness.

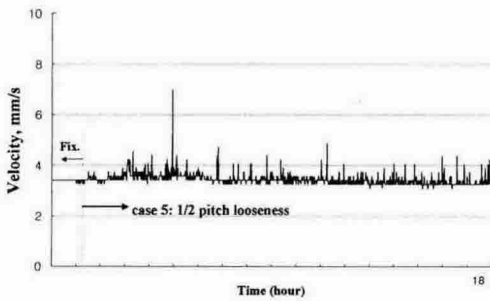


Fig. 8. Trend of velocity at the housing.

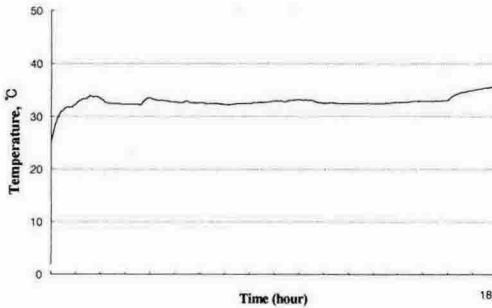


Fig. 9. Trend of temperature for bearing.

가를 보이지 않았다. 상기 결과로부터 진동의 경우, 헐거움 부가시점에는 민감한 응답특성을 보였으나 이후 베어링 파손이 진행되어 가는 추이를 감지하는 데에는 주요한 정보를 얻을 수 없었다.

3.2 마모 특성

마모특성은 오염도 기준의 국제표준으로 널리 사용되는 ISO 4406(New standard code, ISO 11171)을 기준으로 $5\mu\text{m}$ 와 $15\mu\text{m}$ 보다 큰 입자의 변화에 대해 주로 고찰하였다. Table 2는 하우징 헐거움이 가장 큰 조건인 1/2 피치 하에서 실험시간에 따른 윤활유의 오염도 등급변화를 보여주고 있으며, Fig 10은 10 ml 당 총 마모입자 수와 중마모입자($>15\mu\text{m}$) 수의 변화를 나타내고 있다. Table 2에서와 같이 18 시간의 실험시간동안 ISO 등급이 초기 17/14에서 20/17 까지 3 등급 상승하였으며, 실험시작 약 5 시간 후부터 중마모입자의 증가에 따라 오염등급이 증가하기 시작하였음을 알 수 있다. 결과적으로 헐거움 폭 증가에 따라서 1/8 피치 폭일 경우 24 시간 이상, 1/4 피치에서는 약 18 시간 그리고 1/2 피치의 경우 약 5 시간 경과시 중마모입자 증가에 따른 ISO 오염도 등급이 증가되기 시작하였다. 따라서 헐거움 정도가 커짐에 따라 베어링 마모발생 경향이 조기에 발생되기 시작함을 알 수 있었다.

Table 2. Oil cleanliness levels

ISO 4406 classification of particle count	
Sampling time	ISO grade($>5/>15$)
1 hour	17/14
2 hour	17/14
3 hour	18/14
4 hour	18/14
5 hour	19/15
6 hour	18/15
8 hour	19/16
10 hour	19/16
12 hour	19/16
14 hour	19/16
16 hour	20/17
18 hour	20/17

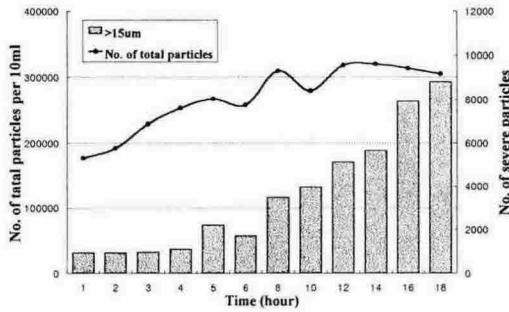


Fig. 10. Trend of number of particles.

3.3 마모입자 통계적 분석

실험시간 경과에 따라 정기적으로 샘플링한 오일에 대한 마모입자의 측정결과로부터 통계적 분석을 수행하였다. 이를 위하여 베어링 피로수명 및 신뢰도 등의 통계처리에서 일반적으로 널리 적용하였다.

Weibull 분포함수는 마모입자크기 분포를 가장 잘 나타내는 함수로 알려져 있으며, 3개의 변수를 가지는 지수함수의 수정된 형태로 식(1)과 같이 표시된다. Weibull 밀도함수는 변수에 따라 분포함수의 범위 및 형태를 달리하며, $\beta > 1$ 일 경우는 벨모양 형태(bell-shaped)를 지니며, $0 < \beta \leq 1$ 일 경우는 d의 증가에 따라 함수가 감소하는 J모양 형태(J-shaped) 형태로 나타난다. 마

$$P(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d-d'}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

for $d > d'$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$

where P(d): cumulative distribution function

α : scale parameter

β : slope of distribution(shape parameter)

d : particle size

d' : lower limit of particle size

모입자 크기의 분포함수의 모멘트는 자체적으로 마모현상에 관한 몇가지 중요한 의미를 찾을 수 있는데, mean, variance, skewness, kurtosis 등의 통계적 변수가 그것이며 다음과 같다.

$$\text{mean } d_m = \sum_{i=1}^N d_i p(d_i)$$

$$\text{where } d_i = \frac{d_j + d_{j-1}}{2} \quad (j-1 < i < j)$$

$$p(d_i) = \left(\frac{\text{No. of particles between } d_j \text{ and } d_{j-1}}{\text{No. of total particles}}\right)$$

$$\text{variance } V = \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^2 p(d_i)$$

$$\text{skewness } S = \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^3 p(d_i)$$

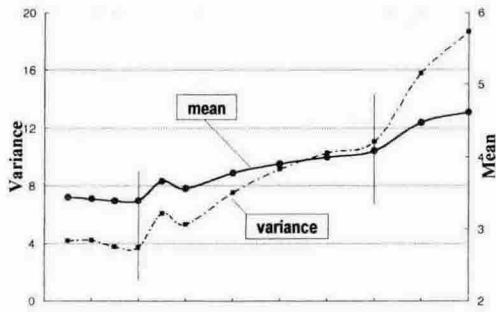
$$\text{kurtosis } K = \sum_{i=1}^N (d_i - d_m)^4 p(d_i)$$

$$\text{relative skewness} = S/V^{3/2}$$

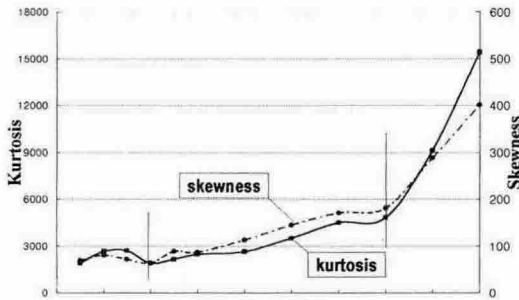
$$\text{relative kurtosis} = K/V^2$$

Table 3. The statistical parameters of wear particles distribution

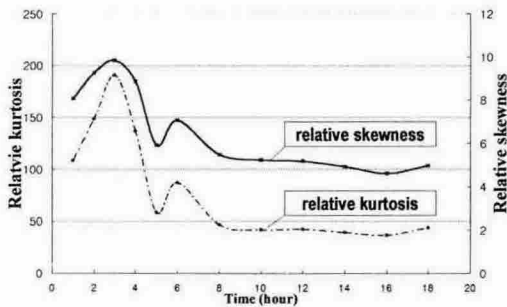
Sampling (hour)	No. of particles		Weibull		Moment					
	No. of total particles(10ml)	>15 μ m	α	β	Mean	Variance	Skewness	Kurtosis	Relative skewness	Relative kurtosis
1	177177	936	0.21	0.44	3.44	4.20	69.6	1920	8.08	108.8
2	192109	932	0.15	0.41	3.42	4.24	80.9	2673	9.27	148.7
3	229411	971	0.13	0.39	3.39	3.78	72.2	2720	9.84	190.7
4	253794	1103	0.12	0.39	3.39	3.73	63.9	1912	8.86	137.2
5	267492	2210	0.35	0.48	3.67	6.09	89.2	2170	5.93	58.4
6	258269	1717	0.28	0.47	3.56	5.33	86.9	2477	7.07	87.4
8	309751	3492	0.41	0.49	3.78	7.53	113.4	2653	5.49	46.8
10	280370	3963	0.48	0.51	3.91	9.16	145.2	3517	5.24	42.0
12	318652	5132	0.47	0.51	4.00	10.29	171.3	4515	5.19	42.6
14	320788	5664	0.51	0.50	4.09	11.07	182.0	4848	4.94	39.6
16	313997	7926	0.68	0.51	4.48	15.76	288.7	9144	4.62	36.8
18	305561	8782	0.70	0.49	4.62	18.67	402.1	15439	4.98	44.3



(a) mean & variance



(b) skewness & kurtosis



(c) Relative skewness & kurtosis

Fig. 11. Trend of statistical parameters.

Table 3은 샘플링된 각 오일에 대한 마모입자의 분석결과를 정리하여 나타낸 것으로서, 총마모입자 수와 중마모입자 수, 통계적 파라미터인 mean, variance, skewness, kurtosis, relative skewness, relative kurtosis의 변화를 보여주고 있다. Fig. 11은 이들 통계적 변수들의 실험시간 경과에 따른 변

화추이를 보여주고 있으며, 이들 결과로부터 파손 진행에 따른 각 파라미터의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

ISO 오염등급의 상승정도에 따라 시스템의 상태를 나누어 고찰하였다. Fig. 11에서와 같이 첫 번째 단계는 실험시작 4 시간까지 하우징 헐거움과 불평형 요소에 따른 마모발생의 초기단계로, $5 \mu\text{m}$ 이하의 작은 마모입자들이 주로 증가하였으며 기계요소의 파손과 밀접한 연관이 있는 중마모입자는 크게 증가하지 않았다. 평균 마모입자 크기도 크게 증가하지 않았으며 Fig. 11(b)의 skewness와 kurtosis 값에도 큰 변화를 찾아볼 수 없었다.

두 번째 단계는 실험시작 4 시간 이후부터 14 시간까지 ISO 오염등급이 점차적으로 증가하는 단계로, $5 \mu\text{m}$ 이하의 작은 마모입자들의 증가는 크지 않았으나, 중마모입자 수의 증가가 점차적으로 나타났다. 따라서 평균 마모입자 크기가 증가하였으며 variance, skewness, kurtosis도 점차적으로 증가하였음을 알 수 있다.

세 번째 단계는 14 시간 이후 오염도가 높은 상태의 단계로, $15 \mu\text{m}$ 이상의 중마모입자들이 급격하게 증가하였다. 따라서 평균마모입자크기도 크게 증가하였으며, variance, skewness, kurtosis 모두 이전보다 훨씬 급격하게 증가하였다.

Fig.11(a)-(b)에서 파손진행에 따른 윤향유의 오염도 증가에 따라 평균 마모입자 크기보다는 variance가 민감하게 나타났으며, skewness와 kurtosis는 더 민감한 반응을 보였는데, 이는 중마모입자들이 발생됨에 따라 차수가 높은 모멘트의 반응으로 볼 수 있다.

Fig. 11(c)의 relative skewness와 relative

kurtosis의 경우, 초기 큰 값을 갖다가 급격한 하락과 더불어 이후 점진적인 감소를 보여주고 있다. 초기 증가는 작은 마모입자 수만의 증가에 따라 variance 감소로 인하여 마모입자 분포가 평균 입자크기 주위로 편중되면서 나타난 변화이며, 이후 지속적인 하락은 중마모입자 발생의 증가와 그에 따른 variance의 점진적인 상승으로 인해 마모입자 분포가 초기시점보다 점진적으로 비대칭성이 감소하고 평탄한 모양의 확률밀도함수 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 기계시스템의 모사시험장치를 통해 헐겁게 지지된 베어링의 파손실험을 수행하였으며, 파손에 따른 마모 및 진동특성의 변화를 고찰하였다.

헐거움의 정도가 증가함에 따라 마모발생에 의한 오염도가 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 진동의 경우에 있어서는 점진적 파손의 경향보다는 헐거움 부과시점에 따라서는 빠른 응답을 보였으나, 베어링파손이 진행되어 가는 추이를 감지하는 데에는 뚜렷한 반응을 보여주지 않았다.

마모입자 크기의 통계적 분석을 통하여 파손단계를 작은 마모입자의 발생단계, 점차적 중마모입자의 발생단계, 많은 중마모입자의 발생단계의 3단계로 구분하였다. 각 단계별로 주요 파라미터인 평균 마모입자크기, variance, skewness, kurtosis 모두 파손진행에 따른 오염도 변화와 밀접한 상관성을 보여주었으며, 중마모입자들의 발생에 따라 차수가 높은 모멘트가 더욱 민

감하게 반응하였다.

본 연구에서는 대형기계시스템의 on-line monitoring을 위해 모사시험장치를 이용한 진동, 마모, 온도 등의 통합적 상태진단연구를 시도하였으며, 향후에는 보다 다양한 전형적인 다른 기계파손요인들에 대해 마모 및 진동간의 상관관계규명과 진단파라미터에 관한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

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. Zhang A. H, Monitoring and Diagnostic Technique for Mechatronic Equipment, Publishing House of Northwest University of Technology, 1995.
4. W. Mendenhall & R.L. Scheaffer, Mathematical Statistics with Application, University of Florida, 1994.
5. 윤의성, 장래혁, 공호성, 한홍구, 권오관, 송재수, 김재덕, 엄형섭, "마모발생의 통합분석을 통한 대형 기계윤활시스템의 상태진단기술 적용", 한국윤활학회지, Vol. 14, pp.75-81, 1998.
6. 강기홍, 윤의성, 장래혁, 공호성, 김승중, 이용복, 김창호, "회전기계 파손에 따른 마모 및 진동 특성(I)", 한국윤활학회 2001 추계학술대회.
7. 양보석, 전순기, 김호중, "퍼지이론을 이용한 회전기계의 진동진단법", 대한기계학회, Vol. 20, No. 5, pp.1411-1418, 1996.

8. 한국과학기술연구원 연구보고서(UCE 1360-5710-2), "광자기량 밀도 측정을 통한 윤활시스템내 마모량 평가기기의 On-line화 개발(I)", 1996.4.
9. Yan Liu, Zhong Liu, Youbai Xie, Zhigang Yao, "Research on an on-line wear condition monitoring system for marine diesel engine", Tribology International, Vol. 33, pp.829-835, 2000.
10. Weibull, Waloddi, "A Statistical Distribution of Wide Applicability", J. of Applied Mech, Vol. 18, pp. 193-297, 1951.
11. Anand prabhakaran, C.R. Jagga, "Condition moitoring of steam turbine-generator through contamination analysis of used lubricating oil", Tribology International, Vol. 32, pp. 145-152, 1999.