

## 저널베어링의 윤활상태 판별 기법에 관한 연구

김명환<sup>†</sup> · 이상돈 · 조용주<sup>‡</sup>

부산대학교 기계공학부

### A Study on the Identification Method of Lubrication Characteristics for Journal Bearing

MyungHwan Kim<sup>†</sup>, SangDon Lee and YongJoo Cho<sup>‡</sup>

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received December 16, 2008; Revised January 7, 2009; Accepted January 14, 2009)

**Abstract** – A journal bearing is used in a hydrodynamic lubrication state, but it becomes a boundary lubrication state that asperity of a contact part touch each other when pressure is too high and an enough oil film is not formed by viscosity change due to lubricating oil temperature. At this time, abrasion due to contact between a journal and a bearing is unavoidable, and scuffing damage that the journal adheres to the bearing occurs if the process is repeated. Damage of the journal bearing is an important problem because it gives huge damage to a machine and can generate large accidents such as economic loss and human life damage. In this study, method for using the pull-up resistor concept was introduced as the monitoring technology. This monitoring system is important to enhance reliability of the engine.

**Key words** – journal bearing(저널 베어링), hydrodynamic lubrication(유체 윤활), pull-up resistor(풀업 저항), oil film thickness(윤활막), reliability(신뢰성)

#### 1. 서 론

저널 베어링은 유체 윤활 상태에서 사용되나, 압력이 지나치게 높거나 윤활유 온도에 따른 점도의 변화에 의하여 충분한 유막이 형성되지 못할 경우 접촉부의 돌기가 서로 닿게 되는 경계윤활 상태가 된다.

이때 저널과 베어링의 접촉으로 인한 마멸은 불가피하고 이런 과정이 반복되면 저널과 베어링이 들러붙게 되는 스커핑(scuffing) 파손이 일어나게 된다.

저널 베어링의 파손은 기계에 큰 손상을 주며 또한 경제적 손실 및 인명피해 등 대형사고로 이어질 수 있다는 점에서 중요한 문제이다.

현재 베어링의 마멸 파손을 감지할 수 있는 진단기

술로 윤활유의 온도측정, 진동해석 등을 적용하고 있으나 이들 방법은 대부분 베어링의 손상이 어느 정도 진행된 후에야 알 수 있다는 단점이 있다.

또 다른 방법으로 정전용량을 이용하여 유막두께를 측정하는 방법이 있으나 유전율이 바뀔수록 인한 측정오차가 심하고 최소 유막 두께가 생기는 지점에 설치를 못할 경우 실제로 저널이 베어링에 닿고 있음에도 불구하고 유막이 형성된 걸로 판단할 수 있는 위험성이 존재한다.

이에 본 논문은 전기적 특성을 이용하여 저널과 베어링의 접촉 여부를 2분법적으로 판단할 수 있는 판별 방식을 제안하고자 한다.

#### 2. 저널베어링 윤활 시험기 제작

##### 2-1. 실험장치

이 논문에서는 구름마찰 시험기로 제작된 RNB社의

<sup>†</sup>주저자 : hwani@pusan.ac.kr

<sup>‡</sup>책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

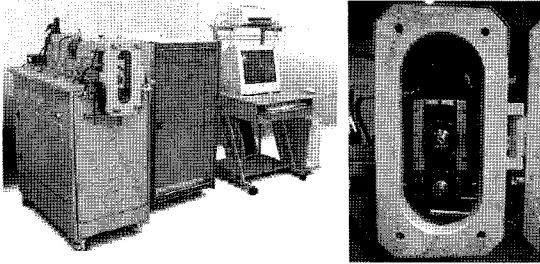


Fig. 1. Rolling contact wear tester (RC-106).

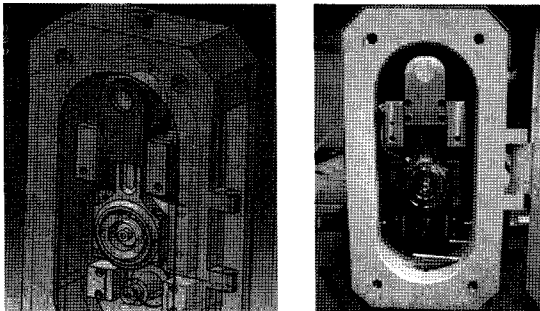


Fig. 2. Experiment device of a journal bearing.

RC-106 장비를 이용 저널 베어링 실험에 맞게 개조하여 사용하였다.

상용으로 만들어진 장비를 사용함으로써 정확한 하중 및 속도를 실험에 사용 할 수 있고 또한 계측된 값의 신뢰성을 높일 수 있다.

Fig. 1은 기존의 장비 사진이고 Fig. 2는 저널 베어링 실험에 맞게 개조한 장비 사진이다.

Jig 설계 시 최대 실험 하중은 300 kg, 회전속도는 2000 rpm을 기준으로 설계하였다.

CATIA를 이용하여 가상으로 실험 장치를 설계함으로써 설계 시 문제점을 사전에 파악할 수 있고 설계변경이 용이하도록 하였다.

## 2-2. 윤활장치

윤활유의 공급압력은 일반적으로, 하중을 받는 접촉 면적에서 발생하는 유체동압보다 크게 낮은 70~350 kPa 정도이다.

저널베어링에 윤활유를 공급할 수 있도록 Fig. 3과 같은 장치를 구성하였고 오일펌프에 과부하가 걸리지 않도록 오일의 입수량과 출수량을 맞추기 위하여 출구 쪽에 바이패스밸브(bypass valve)를 달았다.

자동차의 경우 저널베어링에 공급되는 윤활유는 크

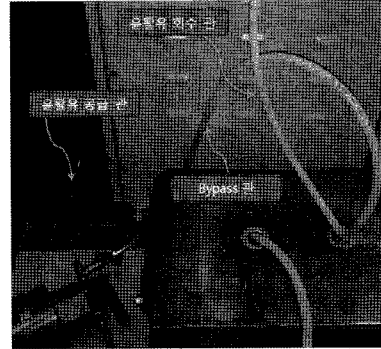


Fig. 3. Lubrication device.

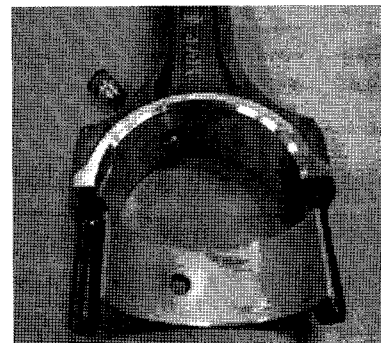


Fig. 4. Oil hole.



Fig. 5. Oil heating device.

랭크축에 가공 되어있는 오일 홈으로부터 공급되지만 이 시험 장치에서는 저널에 오일 홈을 가공하는 대신 커넥팅로드에 오일 홈을 가공하여 윤활유를 공급하고자 한다.

자동차의 크랭크축에 가공되어있는 홈의 직경이 일반적으로 6 mm인 점을 들어 같은 직경의 홈을 upper bearing과 connecting rod 의 11시 방향에 가공하였다. (Fig. 4 참조)

또한 윤활유의 온도에 따른 유막 두께의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 오일 통에 히터를 설치

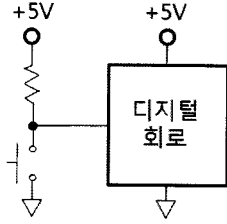


Fig. 6. Concept of Pull-up Resistor.

하여 윤활유의 온도를 제어할 수 있도록 하였다.

2-3. 윤활 판별 회로

저널 베어링의 경우 정지 상태에서는 저널과 베어링이 고체접촉의 상태에 있다가 저널 또는 베어링이 회전함으로써 썸기효과에 의해 저널과 베어링이 분리된다.

저널 베어링의 가장 이상적인 상태는 저널과 베어링이 분리된 유체윤활 상태이나 작동조건의 변화에 의해 저널과 베어링이 접촉되는 상황이 발생하게 된다.

여기서 저널과 베어링이 서로 분리되어 작동하는 유체 윤활 상태와 소수의 돌기가 남아있는 혼합 윤활 상태를 판별하기 위해 풀업저항 개념을 도입하여 회로를 구성하고 시험기에 부착하였다.

풀업저항(pull-up resistor)에 대한 개념은 Fig. 6을 보면 알 수 있다.

스위치를 누르지 않은 상태는 회로에 항상 5V가 걸린다. 중간에 저항이 있음에도 불구하고 양단에 전압차이가 발생하지 않는 이유는 폐회로가 아닌 개회로 상태이기 때문이다. 스위치를 누르게 되면 폐회로 상태가 되어 전류는 흐르게 되고 이때 디지털 회로 쪽의 전압은 접지와 같은 전위를 가지므로 0V가 된다.

이러한 원리를 이용하여 저널과 베어링의 접촉 여부를 판단 할 수 있고 분리된 상태는 녹색 LED로 접촉된 상태는 적색 LED를 이용하여 눈으로 확인할 수 있도록 하였다.

Fig. 7은 회로를 저널과 베어링에 연결 할 개념적 그림이다.

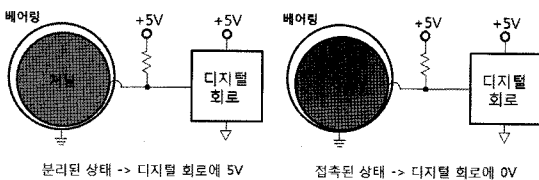


Fig. 7. Conceptual diagram of the circuit.

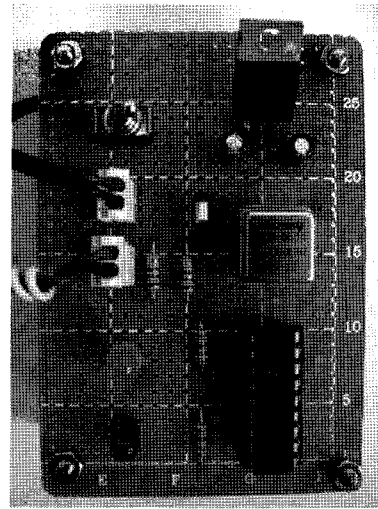


Fig. 8. Identification circuit.

Fig. 8은 마이크로 컨트롤러를 사용하여 기판에 회로를 구성한 모습이다.

2.4. 윤활해석

윤활 판별 회로를 통해서 유막의 형성 여부는 알 수 있지만 유막의 두께는 측정이 불가능하다. 이에 수치적인 절차를 통하여 유막두께를 구하고 실험 data와 비교 분석하여 유막두께를 예측해보고자 하였다.

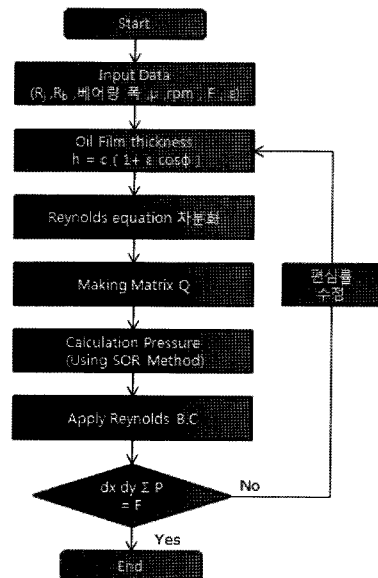


Fig. 9. Flow chart of the lubrication analysis.

Fig. 9의 flow chart를 이용하여 프로그램을 구성하였고 절차는 다음과 같다.

우선 속도, 점도, 베어링 반경, 저널 반경, 편심율을 입력한다. 처음 입력한 편심율을 가지고 유막두께를 계산한다. 그 다음 압력을 구하기 위하여 차분화된 레이놀즈 방정식을 매트릭스 꼴로 구성하고 SOR법으로 연립방정식을 푼다.

Reynolds B.C.을 적용하고 구해진 압력을 다 더한 뒤 미소면적을 곱하여 힘을 구한다. 구해진 힘과 초기에 베어링에 작용하는 힘과 같은지 판단하여 같으면 루프를 빠져 나오고 같지 않으면 초기에 가정한 편심율을 조정하여 같을 때 까지 반복 계산한다.

### 3. 실험 및 실험결과

#### 3-1. 실험장비

저널 베어링 윤활 실험 장비로 Fig. 1의 장비를 개조하여 사용하였고 커넥팅로드와 베어링은 다음과 같은 상용제품을 이용하였다.

- con-rod: 현대 모비스 23510 42002
- bearing: 현대 모비스 23060 42001

상용 커넥팅 로드와 베어링을 사용함으로써 실험 시편의 일관성을 갖고자 하였다.

저널 부분의 폭은 베어링 폭보다 넓게 가공하였고 저널과 베어링의 간극은 100 μm~50 μm 사이에 있도록 공차를 주어서 가공하였다.

저널과 커넥팅 로드의 직경은 다음과 같다.

- con-rod:  $\Phi 53_{-0.014}^{+0.036}$
- journal :  $\Phi 53_{-0.064}^{-0.036}$

윤활유는 S-Oil의 Diesel Engine Oil:SAE 10W-40을 사용하였다.

#### 3-2. 실험방법

실험 하중 및 저널의 회전 속도를 달리하여 유막의 형성 여부에 관심을 두고 test를 하였다.

저널과 베어링의 접촉여부는 판별 회로에 부착되어 있는 LED를 통하여 확인 하였다.

이때 녹색은 저널과 베어링이 분리된 상태를 말하며 적색은 접촉되어 있는 상태를 말한다.

실험 방법은 하중을 고정시킨 후 저널의 회전 속도를 단계적으로 내려서 저널과 베어링의 비접촉 상태에서 접촉상태로 바뀌는 시점을 관찰하여 기록하였다.

Table 1. A result of the experiment

| 하중 (Kg) | RPM |    |    |    |     |     |
|---------|-----|----|----|----|-----|-----|
|         | 30  | 40 | 50 | 60 | 100 | 200 |
| 25      |     | ○  | ○  | ○  | ○   | ○   |
| 30      |     | ○  | ○  | ○  | ○   | ○   |
| 35      | ×   |    | ○  | ○  | ○   | ○   |
| 40      | ×   |    |    | ○  | ○   | ○   |
| 45      | ×   | ×  |    |    | ○   | ○   |
| 50      | ×   | ×  | ×  |    | ○   | ○   |

○: 베어링과 저널의 비접촉 상태(유막 형성)

×: 베어링과 저널의 접촉 상태

■: LED가 깜박이는 구간

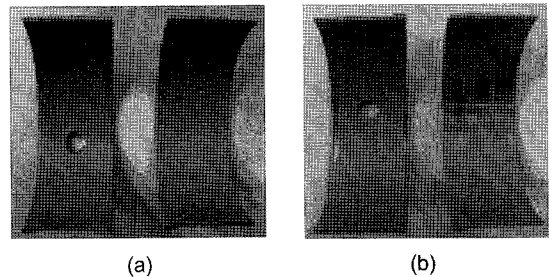


Fig. 10. Bearing specimens after testing.

#### 3-3. 실험결과

Table 1의 조건으로부터 실험한 결과 동일 하중에서 RPM이 증가할수록 또는 동일 RPM에서 하중이 낮을수록 유막이 잘 형성된다는 것을 알 수 있고 이것은 기존의 저널베어링 유막형성 지식과 잘 맞아 떨어진다 고 할 수 있다.

실험이 끝난 후 베어링 시편을 꺼내어 내면을 관찰한 결과(Fig. 10 참조) (a) 시편보다 (b) 시편에서 마멸의 흔적이 더 뚜렷한 걸로 보아 적색LED가 켜진 상태에서 돌아간 베어링은 저널과 접촉으로 인해서 마멸이 일어났다고 할 수 있다. 따라서 윤활 판별기로 판단한 유체윤활 상태와 혼합 윤활상태의 구분은 비교적 정확하다고 할 수 있다.

그러나 윤활 판별기로는 저널과 베어링의 접촉 여부만 알 수 있고 정량적인 유막두께는 알 수가 없다. 따라서 윤활 해석을 통하여 실험결과와 비교 후 유막두께를 예측해보고자 하였다. Table 2는 윤활해석 결과이다.

윤활해석 결과 하중 50 kg rpm 60일 때 윤활 막 크기는 2.944 m로 유막 두께가 형성되는 것으로 나왔

Table 2. Results of the lubrication analysis.

| [kg] | rpm   |       |       |       |       |        |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|      | 30    | 40    | 50    | 60    | 100   | 200    |
| 25   | 2.963 | 3.682 | 4.342 | 4.956 | 7.086 | 11.196 |
| 30   | 2.57  | 3.207 | 3.791 | 4.338 | 6.244 | 9.953  |
| 35   | 2.274 | 2.848 | 3.375 | 3.867 | 5.599 | 8.992  |
| 40   | 2.044 | 2.564 | 3.046 | 3.496 | 5.083 | 8.221  |
| 45   | 1.856 | 2.335 | 2.78  | 3.196 | 4.668 | 7.586  |
| 50   | 1.701 | 2.146 | 2.557 | 2.944 | 4.319 | 7.056  |

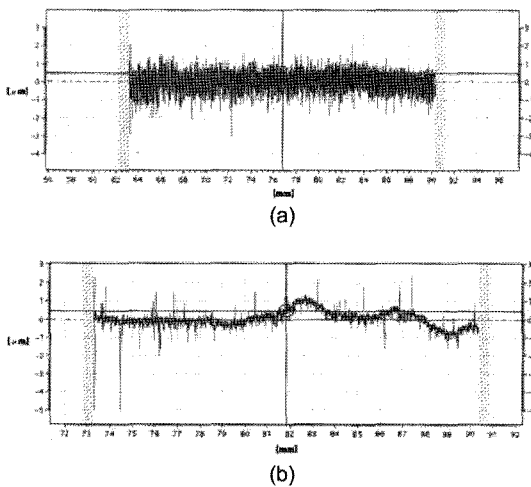


Fig. 11. Surface roughness of the journal and bearing. (a : journal, b : bearing)

으나 Table 1을 보면 LED가 깜빡이는 구간으로 돌기가 닿는 부분이라는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 11의 지널과 베어링의 표면 거칠기에서 볼 수 있듯이 평균 위치에서 표면 거칠기가 가장 높은 곳까지의 거리의 합과 비슷함을 알 수 있다. 따라서 실험적인 data와 수치적인 data를 비교하면 대략적인 유막두께를 언

을 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

윤활 상태를 판별 할 수 있는 윤활 판별기를 이용하여 유체윤활 상태와 혼합 윤활상태를 파악 할 수 있었으며 베어링 내면을 관찰한 결과 윤활 판별기의 신뢰성을 얻을 수 있었다.

그리고 윤활해석을 통하여 얻은 수치적인 유막두께 값을 실험과 비교, 분석한 결과, 표면 거칠기를 고려한 경우, 수치적으로 계산한 유막두께 값이 실험 값과 잘 맞아 떨어짐을 알 수 있었다.

이에 본 논문에서 제시한 윤활 판별 기법을 이용한다면 베어링 파손 감지 시스템으로 활용 가능할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국 산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

#### 참고 문헌

1. Q. Wang, H.S. Cheng, G.A Caracostas and M.E. Fine, "Wear of Aluminum Alloy Matrix Composites in lubricated Conformal Contact with Case Hardened Steel", *Tribology Transactions*, Vol. 37, pp. 735-742, 1994.
2. Kenneth Irani, Mats Pekkari and Hans-Erik, "Oil Film Thickness Measurement in the Middle Main Bearing of a Six-cylinder Supercharged 9 Litre Diesel Engine using Capacitive Transducers", *Wear*, Vol. 207, pp. 29-33, 1997.
3. 지준근, "[Technical Tips] 풀업 저항과 풀다운 저항", *전력전자학회, 전력전자학회지* 제8권, 제1호, pp. 37-40, 2004.
4. 오정원, "PIC 마이컴용 C언어 CCS-C실전기이드", 컴파일 테크놀로지, 2001.