한국윤활학회지(1992), 제 8권 제 1호
Journal of KSLE(1992) Vol. 8, No. 1, pp.44~47

난류영역에서 운전되는 유한폭 저어널베어링에서의 성능특성에 관한 실험적 연구

이득우* · 김경웅**

*한국기계연구소 공작기계실
**한국과학기술원 정밀공학과

Experimental Study on the Performance of Finite Journal Bearing Operating in Turbulent Regime

Deug Woo Lee* and Kyung Woong Kim**

**KIMM Machine Tools Lab.*
***KAIST Dept. of Precision Eng. and Mechatronics*

Abstract—The performance of finite journal bearing operating in turbulent regime was investigated experimentally. In order to obtain experimental data containing surrounding conditions (thermal deformation, machining error etc.) of journal bearing, this study mounted a pressure sensor and a gap sensor on the journal. The data for continuous pressure profile and continuous film thickness profile were presented in this paper.

1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 생산성 향상을 목적으로 사용기계가 고속화되고, 대형화되며, 또한 소비동력 등을 줄이기 위한 저 점도의 윤활제 사용이 많아졌다. 이에 따라 베어링내에서의 유동도 층류를 벗어나 난류상태에까지 이르고 있다. 이같이 유동이 난류가 되면 성능특성들은 층류상태를 가정한 예측치에 비해 크나큰 차이를 나타내며, 난류영역에서 운전되는 베어링의 설계를 위해서는 이 영역에 대한 정확한 성능예측이 필요하다.

저어널베어링에서 유동이 난류가 됨에 따라 구별되는 효과는 1949년 Wilcock[1]에 의해 처음으로 보고되었는데, 그는 운전속도에 따른 마찰손실, 온도상승, 편심율의 변화 등을 제시하였고, 층류에서 난류로의 천이점을 확인하였다. 그 외 Smith & Fuller[2] 등의 연구자[3, 4]에 의해 실험적으로 난류윤활에 대한 성능특성과 이론적 예측의 기초자료를 제공하고 있다.

그러나 현재까지의 실험결과들은 아직 난류윤활에 대한 성능특성파악과 이론의 검정자료로는 부족한 점이 있다. 이들은 주로 외부의 베어링부에서 편심율과 압력을 측정함에 따라 산란도가 높고, 특히 베어링 가공오차 또는 운전중의 온도상승에 따른 열변형 등을 실험값에 적절히 고려하지 못하고 있다. 또한 저어널베어링의 확산영역에 대한 정보의 부족으로 경계조건의 결정이 어렵다.

그러므로 본 연구에서는 운전상태의 영향이 최대한 포함된 실험자료를 얻으므로서 난류유체윤활상태의 보다 정확한 성능특성파악 및 이론해석에 대한 검정자료를 제시하고자 한다. 이를 위해 저어널내부에 계측기를 설치하여 압력 및 베어링 간극을 연속적으로 측정하였다. 그 결과 압력분포 및 유막두께의 변화 등을 알 수 있었고, 부압영역에 대한 경계조건의 선정에 대한 자료 및 이론예측을 위한 기초자료를 얻었다.

2. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 전체는 시험베어링부, 하중부, 동력전달부, 급·배유부 및 계측부로 구성되어 있다. 시험축은 양 끝단에서 볼베어링으로 지지되어 있고, 가운데 부분에 위치한 저어널위에 시험

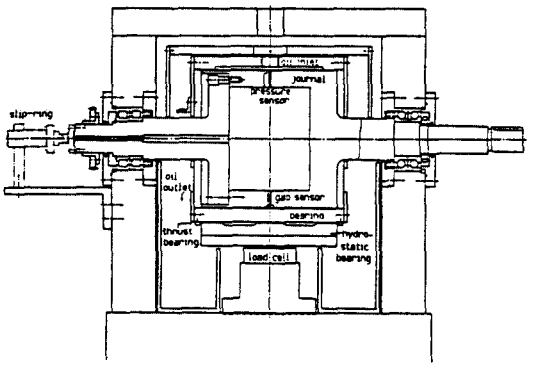

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

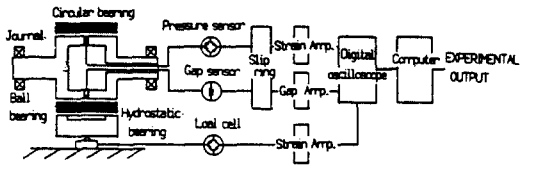

Fig. 2. Schematic diagram of the measurement system

베어링이 놓여 있다. 그리고 시험베어링을 지지하는 정압베어링이 그 아래 설치되어 있다. 윤활제는 베어링상부에서 공급한다.

시험 축은 베어링에서 발생하는 유막압력과 베어링사이의 간극을 연속적으로 측정하기 위해 내부에 계측기를 설치할 수 있도록 제작되었고, 저어널부의 축방향 중앙에 소형 압력계와 간극측정기를 설치하였다. 저어널부의 직경은 200.07 mm이고, 길이는 200 mm이다.

시험베어링에는 윤활제의 급유를 축방향으로 균일하게 하기 위해 축방향 긴급유홈을 만들었고, 입구부에 급유압력을 측정하기 위한 압력계가 설치되었다. 베어링의 내경은 200.53 mm로 저어널과의 평균간극이 0.23 mm이다.

정압베어링은 압력을 조절하여 시험베어링에 하중을 가하도록 설계되었으며, 압력은 최대 15기압까지 조절할 수 있었다.

3. 실험방법

본 실험에서는 난류상태인 저어널베어링의 성능을 조사하기 위해 물을 윤활제로 사용하였다. 급유온도는 일정하게 유지시켜 공급하였으며, 이를 위해 대형의 급유탱크를 이용하여 윤활제를 냉각시켰다. 급유온도는 급유탱크에서 열전대(Thermocouple)를 사용하여 측정하였다. 급유는 베어링의 상부에서 이루어지며, 급유구에

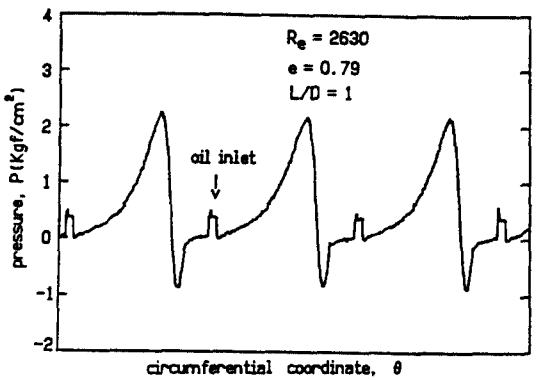

Fig. 3. Typical pressure distribution

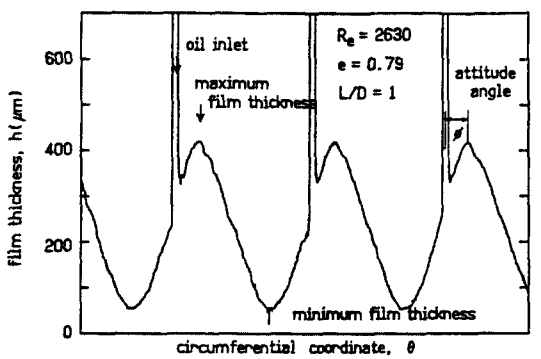

Fig. 4. Typical film thickness distribution

설치된 압력계에서 압력을 측정하고, 그 값을 축내부에 설치된 박판 압력계의 급유구에서의 기준값으로 설정하여 회전에 따른 원심력의 영향을 보정해 주었다. 배유는 자유낙하식으로 급유탱크로 순환되며, 베어링 하부의 출구부에서 열전대를 이용하여 배유온도를 측정하였다.

하중은 정압베어링 하부에 설치된 하중계에서 측정하였다. 하중계의 최대용량은 1 ton이다. 축의 회전수는 외부에 타코메타를 설치하여 측정하고 이를 기준으로 실험을 수행하며, 결과자료에 제시한 값은 압력 및 간극의 출력값에서 주기를 측정하여 얻었다.

Fig. 2는 측정방법에 대한 계통도를 보여준다. 저어널 내부에서 연속적인 압력 및 간극신호가 비접촉식 슬립링(Slip-ring)을 통해 디지탈 오실로스코프(Digital Oscilloscope)로 받아져 처리된다.

실험에 사용된 측정기들의 보정(calibration)은 실험장치에 설치된 상태에서 수행하여 설치에 따른 값의 오차를 제거하였다.

4. 실험결과 및 고찰

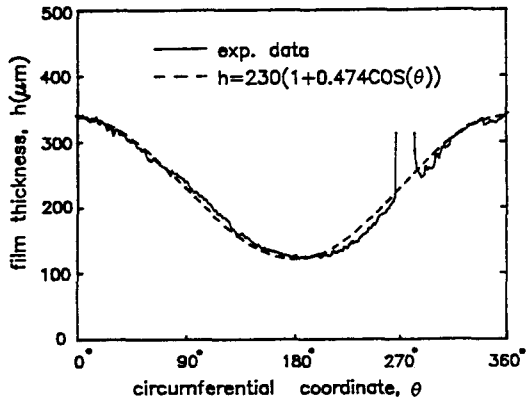

Fig. 5. Film thickness in circumferential direction

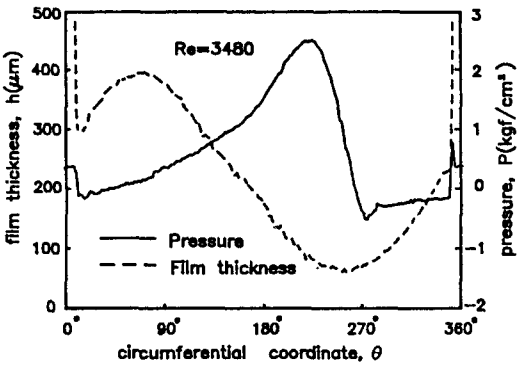

Fig. 7. Pressure and film thickness in circumferential direction

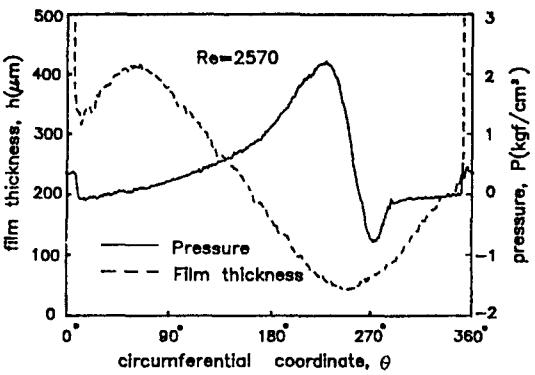

Fig. 6. Pressure and film thickness in circumferential direction

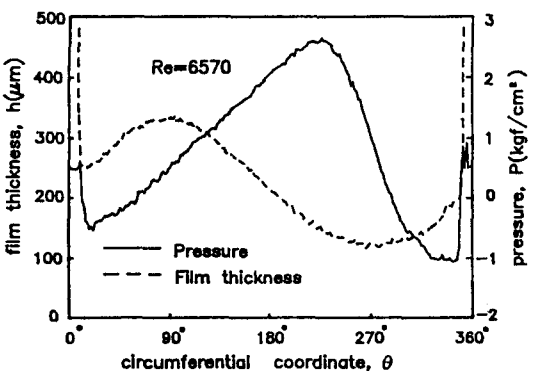

Fig. 8. Pressure and film thickness in circumferential direction

Fig. 3, 4는 저어널베어링에서의 연속적인 압력분포와 유막두께분포를 보여주고 있다. 운전조건은 Reynolds수 2630으로 회전수 1090 rpm이고, 편심율 0.79인 경우이다. Reynolds수와 편심율은 다음 식으로 계산하였다.

$$Re = UC/\nu \quad (1)$$

$$e = (h_{max} - h_{min})/2C \quad (2)$$

여기서 Re : Reynolds 수, U : 저어널속도, C : 유막의 평균간극, ν : 동점성계수, e : 편심율, h : 유막두께.

그림에서 간극의 급격한 변화가 있는 곳이 급유구이고, 그 부분에서 압력도 급격한 변화를 나타내고 있으며, 급유압력 값을 알 수 있다. 이 급유압력과 외부에서 측정된 급유압력을 비교하여 박판압력계에 미치는 원심력의 영향을 보정하였다. 하중방향은 정압베어링에서 수직방향으로 주어짐으로 베어링의 상부에 위치한 급유구의 방향과 동일하게 되며, 따라서 급유구에서 최대유막두께까지의 각도로 편심각을 알 수 있다.

Fig. 5는 일반적으로 이론해석시 사용되는 근사식 h=230(1+0.474COS(θ))에서의 값과 실험에서의 유막두께 측정값과의 비교를 보여주고 있다. 여기서 h의 단위는 μm이며, 그 차이는 약 10 μm 정도이다. 베어링에서의 변형은 베어링 가공시 생기는 가공오차, 운전중의 열변형 및 하중에 의한 탄성변형c등이 복합되어 나타날 수 있는 것으로 실험에 반드시 수반되는 오차이다. 그런데 베어링에서의 유동은 매우 좁은 간극하에서 이루어지므로 이 정도의 오차에서도 성능에 큰차이를 나타낼 것으로 생각되며, 이같은 오차가 포함된 운전상태에서의 정확한 실험결과를 얻는 것이 중요한 문제이다. 그러므로 저어널면에서 실제 운전상태 중에 연속적으로 간극을 측정하고 동시에 압력을 측정하는 방법이 가장 실제에 접근된 실험결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 6-9는 급유구를 기준으로 1주기에 대한 압력 및 간극변화를 비교하여 나타내었다. 운전조건은 각각 Reynolds 수 2570, 3480, 5120, 6570으로 회전수 1067, 1445,

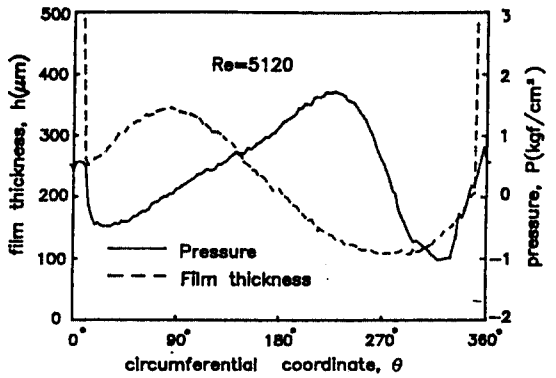

Fig. 9. Pressure and film thickness in circumferential direction

2125, 2728 rpm인 경우이다. 압력분포는 베어링의 수렴영역에서 증가하여 최소유막두께를 기점으로 확산 영역에 들어 급격히 감소하여 캐비티영역에서 비교적 균일한 압력을 유지하는 형상으로 측정되었다. 급유구를 기준으로 유막두께의 변화에 따른 압력값의 변화를 비교할 수 있으므로 이론해석결과와의 비교자료로 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

Fig. 10은 편심율에 따른 부하용량의 변화를 보여주고 있다. 여기서 나타낸 편심율은 일반적으로 식 (2)와 같이 최대유막두께와 최소유막두께의 값만에 의해 계산된 것이므로 Fig. 5에서 본 것과 같이 진원도 오차에 의한 성능차이가 실험오차로 포함되어 나타나게 된다. 그러므로 기존의 참고문헌들에서 나타낸 편심율에 따른 실험결과들은 값의 산란(오차영역)를 가지고 있다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 난류영역에서 운전되는 저어널베어링의 운전상태를 포함한 압력분포, 유막두께 등을 측정하는 실험방법을 제시하였다. 또한 기존의 실험자료에서 부족한 연속적인 유막두께 및 압력분포, 부하능력을 측정하여, 난류영역에서 운전되는 베어링의 성능을 파악하고

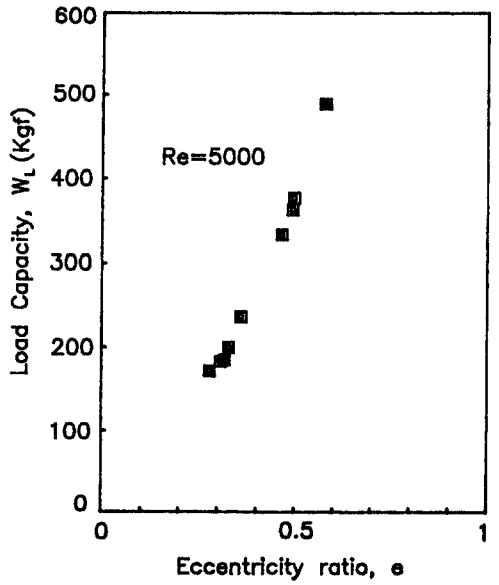

Fig. 10. Load capacity vs. eccentricity ratio

이론 예측의 검정자료를 제시하였다.

참 고 문 헌

1. Wilcock, D.F. "Turbulence in High-Speed Journal Bearing" Trans ASME, Vol.72, pp.825, 1950.
2. Smith, M.I. and Fuller, D.D. "Journal Bearing Operation at Superlaminar Speeds" Trans. ASME, pp. 469, 1956.
3. Burton, R.A. and Carper, H.J. "An Experimental Study of Annular Flows with Applications in Turbulent Film Lubrication" ASME J. of Lub. Tech., pp. 381, 1967.
4. Gardner, W.W. and Ulschmid, J.G. "Turbulence Effects in Two Journal Bearing Applications" ASME J. of Lub. Tech., pp.15, 1974.
5. Kato, T. and Hori, Y. "Turbulent Lubrication Theory Using k-ε Model for Journal Bearings" JSLE, Vol.28, pp.907, 1983.