

능동 제어 유체 윤활 베어링으로 지지된 축-베어링 시스템의 동특성에 관한 연구

노병후*, 김경웅*

A Study on Dynamic Characteristics of a Rotor-Bearing System Supported by Actively Controlled Fluid Film Journal Bearing

Byoung-Hoo Rho* and Kyung-Woong Kim*

ABSTRACT

The paper presents the dynamic characteristics of a rotor-bearing system supported by an actively controlled hydrodynamic journal bearing. The proportional, derivative and integral controls are adopted for the control algorithm to control the hydrodynamic journal bearing with an axial groove. Also, the cavitation algorithm implementing the Jakobsson-Floberg-Olsson boundary condition is adopted to predict cavitation regions in the fluid film more accurately than conventional analysis, which uses the Reynolds condition. The speed at onset of instability of a rotor-bearing system is increased by both proportional and derivative control of the bearing. The proportional control increases the stability threshold without affecting the whirl ratio. However, for the derivative control of the bearing, increase of stability threshold speed is accompanied by a parallel reduction of the whirl ratio. The integral control has no effect on stability characteristics of hydrodynamic journal bearing. The PD-control is more effective than proportional or derivative control. Results show the active control of bearing can be adopted for the stability improvement of a rotor-bearing system.

Key Words : Active Control (능동 제어), Cavitation (공동), Hydrodynamic Bearing (동압 베어링), Stability (안정성)

기호설명

C = bearing clearance
 c_{ij} = damping coefficients of the bearing
 D = diameter of bearing
 e = mass eccentricity
 g_s = cavitation index
 h = film thickness
 K_d = derivative control gain
 K_i = integral control gain

K_p = proportional control gain
 k_{ij} = stiffness coefficients of the bearing
 L = length of bearing
 m = mass of journal
 p = oil pressure
 p_c = cavitation pressure of oil
 P_s = nondimensional pressure, $p_s LD/W$
 p_s = oil supply pressure
 t = time
 V_x = surface velocity in x direction

2001년 3월 8일 접수
 * 한국과학기술원 기계공학과

- V_z = surface velocity in z direction
- W = static load of the journal bearing
- x, y, z = coordinates
- β = fluid bulk modulus
- μ = oil viscosity
- θ = angular coordinate
- θ_f = fractional film content
- ρ = oil density
- ρ_c = oil density at the cavitation pressure

1. 서론

산업 기술의 발달로, 발전기, 압축기 및 터빈과 같은 회전 기계들이 대형화 및 고속화 되고 있다. 그러나, 이러한 회전 기계를 지지하는 베어링은 “휠 불안정성”이라는 불안정 현상이 존재하며, 이 불안정 개시 속도가 축-베어링 시스템의 고속화에 걸림돌로 작용하고 있다. 축-베어링 시스템의 축 진동과 불안정 현상을 억제하기 위한 많은 연구들이 수행되었다. 특히, 틸팅-패드 혹은 플로팅 링 그리고 비진원형 베어링 등은 진원형 베어링에 비하여 보다 효율적이며, 시스템의 운전 영역을 확장시킬 수 있다^[1-3]. Burrows^[4] 등은 회전 기계의 진동을 억제하기 위한 수단으로서 공급구에서의 압력을 능동 제어하였으며, Hathoul^[5] 등은 축의 진동을 능동 제어하기 위하여 하이브리드 스쿼즈 필름 댐퍼를 이용한 능동 제어에 대해서 연구하였다. 그러나 이러한 형식들은 진원형 베어링에 비하여 성능이 우수하나, 설계가 복잡하고 제작 비용이 많이 드는 단점을 갖게 된다. Lee^[6] 등은 외부가압 공기 베어링으로 지지된 회전축 시스템에 대하여 베어링을 능동 제어함으로써 시스템의 안정성이 향상된다고 보고하였다. 그러나, 발전기 등의 회전 기계들은 대부분 동압 베어링으로 지지되고 있으며, 따라서 동압 베어링으로 지지된 회전 기계의 동특성 향상을 위한 능동 제어가 현실적으로 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유체로 윤활되는 동압 베어링으로 지지된 축-베어링 시스템에 대하여 베어링을 능동 제어함으로써 축 진동과 불안정 현상이 어떻게 변화되는지에 대하여 연구하였다. 또한 베어링 내 해석을 어렵게 하는 공동 현상을 보다 정확하게 예측하기 위하여 엘로드 알고리즘을 이용하여 해석하였다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

축방향 급유형 베어링의 좌표계를 Fig. 1 에 나타내었다. 정적평형위치에서의 베어링 중심이 좌표 원점에 해당된다. 본 연구에서 채택한 축방향 급유형은 발전기 등의 회전 기계에 많이 채택되고 있는 형식이다.

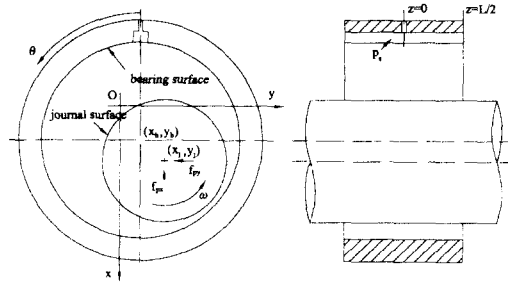


Fig. 1 Axially grooved journal bearing

축과 베어링은 진원형이며 강체이다. 베어링의 급유형에서는 일정한 공급압력의 윤활제로 채워져 있다고 가정하였다. 유체의 압축성 효과를 고려한 이차원, 층류상태의 비정상상태 유니버설 레이놀즈 방정식은 다음과 같다^[7].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta g_i h^3}{12\mu} \frac{\partial \theta_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\beta g_i h^3}{12\mu} \frac{\partial \theta_f}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\theta_f h V_x}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\theta_f h V_z}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\theta_f h) \quad (1)$$

여기서 μ 는 유체의 점성계수, β 는 유체의 체적탄성계수, h 는 유막두께, g_i 는 스위치함수로서 공동 영역에서는 0의 값을 갖으며, 완전유막영역에서는 1의 값을 갖는다. V_x, V_z 는 x, z 방향의 저널 면 선속도이다. 그리고 유막함유율 θ_f 는 다음과 같다.

$$\theta_f = \rho / \rho_c \quad (2)$$

여기서 ρ_c 는 공동압력에서의 윤활제 밀도로서 상수값을 갖는다. 추가적으로, 완전유막영역에서의 압력은 유체의 체적탄성계수와 유막함유율로 표현된다^[8].

$$p = p_c + \beta(\theta_j - 1) \quad (3)$$

여기서 p_c 는 윤활제의 공동에서의 압력으로 상수 값을 갖는다. 압력에 대한 경계조건은 기하학적 형상과 급유조건에 의하여 결정되며 다음과 같다.

$$p = \begin{cases} p_s & \text{at the oil supply groove} \\ 0 & \text{at the edge of the bearing} \end{cases} \quad (4)$$

식 (1)을 수치해석하기 위하여 엘로드 알고리즘을 적용하였으며, 컬럼방법을 이용하였다. 대칭성을 이용하여 베어링의 축방향 반쪽면에 대해서 수치 해석하였으며, 사용한 격자수는 등간격으로 원주 방향 및 축방향에 대하여 각각 151 개와 21 개로 분할하였다.

2.2 운동방정식

능동 제어 베어링은, 시스템의 정적평형위치로부터의 축 중심의 변위에 대하여 다음과 같이 제어되도록 하였다.

$$\Delta x_b = -K_p \Delta x_j - K_d \Delta \dot{x}_j - K_i \int \Delta x_j dt \quad (5.1)$$

$$\Delta y_b = -K_p \Delta y_j - K_d \Delta \dot{y}_j - K_i \int \Delta y_j dt \quad (5.2)$$

여기서 Δx_b , Δy_b 와 Δx_j , Δy_j 는 정적평형위치로부터의 베어링 중심과 축 중심의 변위이다. 그리고 K_p , K_d 와 K_i 는 각각 베어링의 비례, 미분 및 적분 제어 게인이다. 이 능동 제어 베어링은 축의 위치를 센서로 감지하는 센서부와, 베어링을 구동시키는 구동부, 그리고 구동부에 제어 신호를 발생시키는 제어부로 그 구현이 가능할 것이다. 시스템의 정적평형위치 근방에서의 미소 진동에 대하여, 베어링 내 유막반력은 선형화 이론에 의하여 근사화 시킬 수 있으며, 베어링의 선형화된 모델 계수인 강성과 감쇠 계수는 Lund^[9]가 제안한 섭동법을 이용하여 구하였다. 이 선형화 계수들을 이용하면, 축-베어링 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

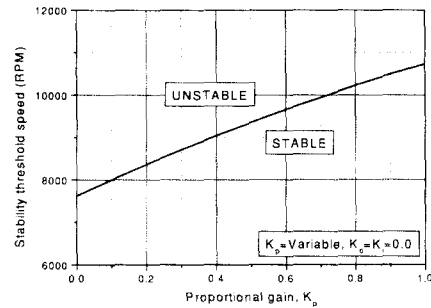
$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{x}_j \\ \Delta \ddot{y}_j \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_j - \Delta \dot{x}_b \\ \Delta \dot{y}_j - \Delta \dot{y}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_j - \Delta x_b \\ \Delta y_j - \Delta y_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 c_{ij} 와 k_{ij} 는 베어링의 선형화된 감쇠와 강성계수이며, 운전조건에 따라서 변화되는 계수

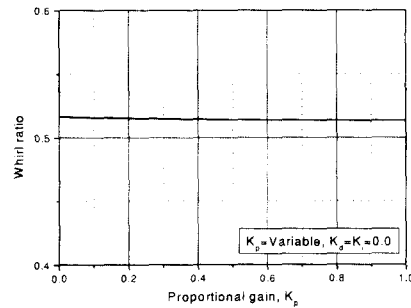
이다. 그리고 f_x 와 f_y 는 축에 작용하는 각 방향으로의 외력이다. 식 (5)와 (6)으로부터 시스템의 특성방정식을 얻을 수 있으며, Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 시스템의 안정한계속도와 율비를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

주어진 외부 하중과 속도에 대하여, 베어링 내 발생하는 유막력이 외부 하중과 같게 되는 저널 중심의 정적 평형 위치를 이차원 뉴턴-랩슨법을 이용하여 구하였으며, 이 위치로부터 섭동법을 이용하여 계산된 베어링의 선형화 모델 계수를 이용하여 시스템의 특성방정식을 구하였다. 이 특성방정식으로부터 Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 시스템의 안정성을 판별하였다. 또한 시스템의 축 진동을 알아보기 위하여 불균형 질량이 있는 경우의 축-베어링 시스템의 불균형 응답을 주어진 운동방정식으로부터 계산하였다.

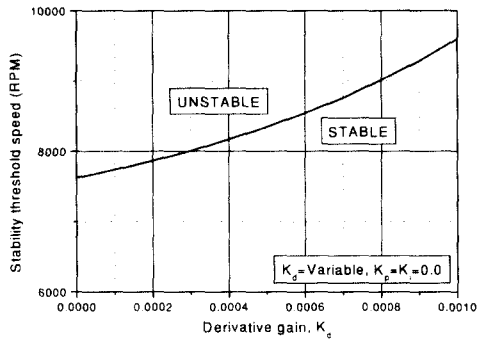


(a) Stability threshold speed

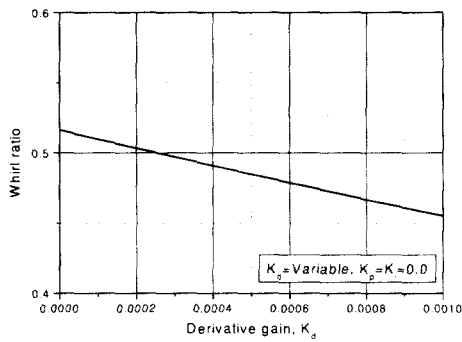


(b) Whirl ratio

Fig. 2 Stability characteristics for proportional control



(a) Stability threshold speed

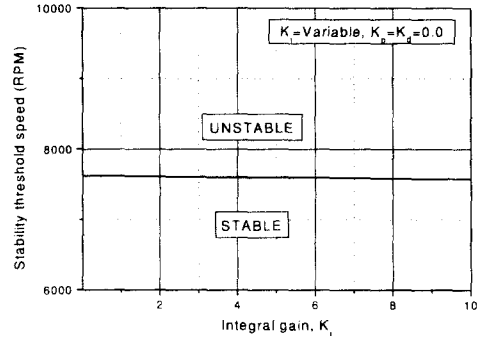


(b) Whirl ratio

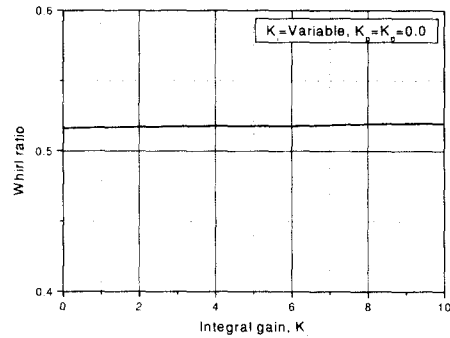
Fig. 3 Stability characteristics for derivative control

본 해석에 사용한 시스템 변수들은 Table 1 에 나타내었으며, 이 시스템의 안정한계속도는 7623 rpm 이며, 이 속도에서의 율비는 0.516 이다. Fig. 2 는 비례 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도와 율비의 변화를 보여주고 있다. 비례 게인이 증가할수록 시스템의 안정한계속도가 선형적으로 향상되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 안정한계속도에서의 율비는 비례 게인에 의하여 크게 영향을 받지 않는다. Fig. 3 은 미분 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도와 율비의 변화를 보여주고 있다. 미분 게인이 증가할수록 시스템의 안정한계속도는 이차원 함수로 향상되고 있음을 알 수 있으며, 또한 안정한계속도에서의 율비는 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4 는 적분 제어되는 경우의 안정한계속도와 율비의 변화를 보여주고 있다. 축-베어링 시스템의 안정한계속도와 율비는 적분 제어에 의하여 크

게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 결국 비례 제어나 미분제어를 통하여 축-베어링 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) Stability threshold speed



(b) Whirl ratio

Fig. 4 Stability characteristics for integral control

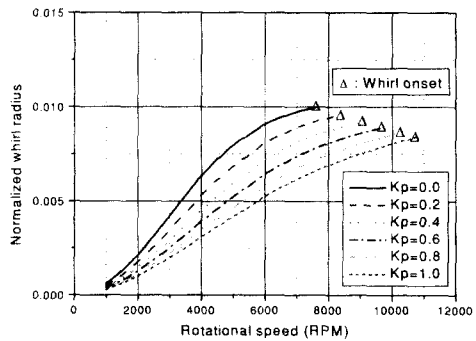


Fig. 5 Unbalance responses for proportional control

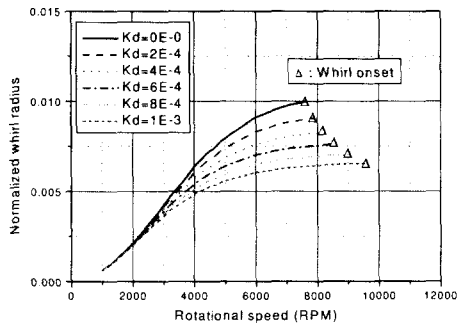
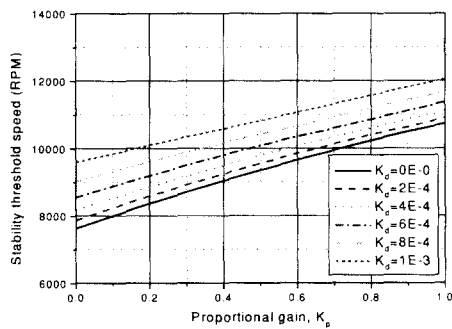


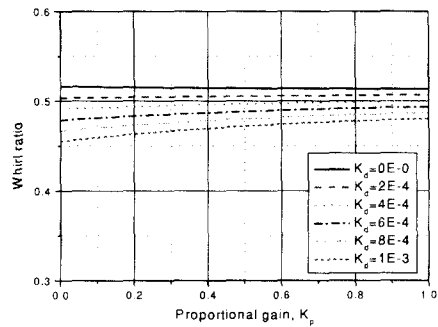
Fig. 6 Unbalance responses for derivative control

또한 시스템의 안정한계속도도 향상되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6 은 미분 제어되는 경우에 회전 속도에 따른 축-베어링 시스템의 불균형 응답을 보여주고 있다. 미분 계인을 증가시킬수록 주어진 운전 조건에서의 축 진동 진폭이 감소하고 있으며 비례 제어와 비교시 저속보다는 고속에서 불균형 응답의 저감 효과가 큰 것으로 나타나고 있다.

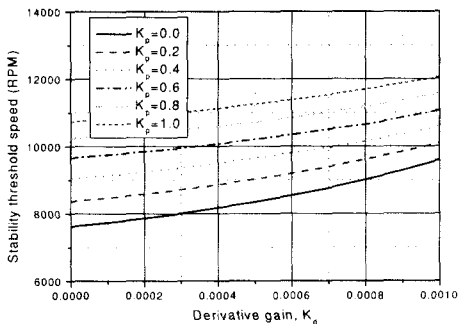
Fig. 7 은 비례-미분 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도 변화를 보여주고 있다. 비례 제어나 미분 제어되는 경우에 비하여 비례-미분 제어되는 경우, 보다 효과적으로 시스템의 안정한계속도를 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.



(a) K_p varied for various K_d



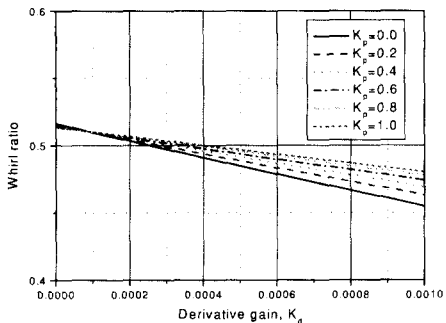
(a) K_p varied for various K_d



(b) K_d varied for various K_p

Fig. 7 Stability threshold speed for PD-control

비례 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 불균형 응답을 Fig. 5 에 나타내었다. 이 불균형 응답의 크기는 베어링 간극으로 무차원시킨 값이다. 비례 계인을 증가시킬수록 주어진 회전속도에서의 축 진동 진폭이 감소하고 있음을 알 수 있으며,



(b) K_d varied for various K_p

Fig. 8 Whirl ratio for PD-control

Fig. 8 은 비례-미분 제어되는 경우의 안정한계속도에서의 휨비 변화를 보여주고 있다. 안정한계속도에서의 휨비는, 고정된 비례 계인에 대하여 미분 제어 계인을 증가시킬수록 감소하며, 고정된 미분 계인에 대하여 비례 제어 계인을 증가시킬수록

록 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4. 결론

능동 제어되는 유체윤활 베어링으로 지지된 축-베어링 시스템의 안정성 및 불균형 질량에 의한 축 진동에 대한 동특성을 이론적으로 해석하였으며, 능동 제어되는 베어링의 비례, 미분 및 적분 제어 특성에 대하여 수치적으로 해석한 결과 다음의 결론을 얻었다. 베어링 중심의 위치를 축 중심의 변위에 대하여 비례, 미분 제어하는 경우에 축의 불균형 질량에 의한 축 진동을 효과적으로 억제시킬 수 있으며, 또한 축-베어링 계의 안정한계속도를 효과적으로 향상시킬 수 있다. 안정한계속도에서의 윗비는 베어링의 미분 제어에 의한 특성으로 인하여 감소한다.

Using HSFDs," ASME J. of Tribology, Vol. 119, pp. 49-56, 1997.

6. Lee, J. B., and Kim, K. W., "A Study on Stability Characteristics of Actively Controlled Externally Pressurized Air Journal Bearings," JSME International Journal, Series C, Vol. 42, No. 2, pp. 427-434, 1999.

7. Vijayaraghavan, D., and Keith, T. G., "Effect of Cavitation on the Performance of a Grooved Misaligned Journal Bearing," Wear, Vol. 377-397, 1989.

8. Elrod, H. G., "A Cavitation Algorithm," ASME J. of Lubr. Tech., Vol. 103, No. 3, pp. 350-354, 1981.

9. Lund, J. W., "Review of the Concept of Dynamic Coefficients for Fluid Film Journal Bearings," ASME J. of Tribology, Vol. 109, pp. 37-42, 1987.

Table 1 Specifications and parameter values

$W = 981.0$ (N)	$D = 80$ (mm)
$L/D = 0.5$	$C = D/1000$
$P_s = 0.0$	$\beta = 1.0 \times 10^8$ (Pa)
$\mu = 0.0290$ (Pa·s)	$me = 0.080$ (gr·cm)

참고문헌

1. Adams, M. L., and Payandeh, S., "Self-Excited Vibration of Statically Unloaded Pads in Tilting-Pad Journal Bearings," ASME J. of Lubr. Tech., Vol. 105, pp. 377-384, 1983.

2. Cheong, Y. M., and Kim, K. W., "An Analysis of the Circumferentially Grooved Floating Ring Journal Bearing Considering the Variation of Cavitation Region," JSME International Journal, Vol. 37, No. 4, pp. 804-811, 1994.

3. Vaidyanathan, K., and Keith, T. G., "Numerical Prediction of Cavitation in Noncircular Journal Bearings," STLE Tribology Transactions, Vol. 32, No. 2, pp. 215-224, 1989.

4. Burrows, C. R., Sahinkaya, M. L., and Turkay, O. S., "An Adaptive Squeeze Film Bearing," ASME, 83-Lub-23, 1983.

5. Hathout, J. P., El-Shafei, A., and Youssef, R., "Active Control of Multi-Mode Rotor-Bearing Systems