

능동 제어 베어링으로 지지된 축-베어링 시스템의 동특성에 관한 연구

노병후¹(한국과학기술원 기계공학과), 김경웅(한국과학기술원 기계공학과)

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

B. H. Rho(Dept. of Mechanical Eng., KAIST), K. W. Kim(Dept. of Mechanical Eng., KAIST)

ABSTRACT

This 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 axially 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 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), Unbalance Responce (불균형 응답)

1. 서론

산업 기술의 발달로, 발전기, 압축기 및 터빈과 같은 회전 기계들이 대형화 및 고속화 되고 있다. 그러나, 이러한 회전 기계를 지지하는 베어링은 “필 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, Hathout[5] 등은 축의 진동을 능동 제어하기 위하여 하이브리드 스퀴즈 필름 탭핑을 이용한 능동 제어에 대해서 연구하였다. Lee[6] 등은 외부가압 공기 베어링으로 지지된 회전축 시스

템에 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 동압베어링으로 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 위한 엘도드 알고리즘을 이용하여 해석하였다.

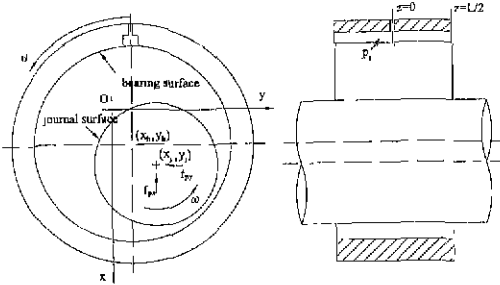
2. 이론해석

2.1 지배방정식

축방향 급유형 베어링의 좌표계를 Fig 1 에 나

다내었다. 정적평형위치에서의 베어링 중심이 좌표 원점에 해당된다. 축방향 급유홀은 발전기 등의 회전 기계에 많이 채택되고 있는 형식이다

Fig. 1 Axial grooved journal bearing



유체의 압축성 효과를 고려한 이차원. 층류상태의 유니버설 레이놀즈 방정식은 다음과 같다[7].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_c \beta g h^3}{12\mu} \frac{\partial \theta_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_c \beta g h^3}{12\mu} \frac{\partial \theta_i}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_c \theta_i h V_r}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_c \theta_i h V_z}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_c \theta_i h) \quad (1)$$

여기서 g 는 스위치함수로서 공동영역에서는 영의 값을 갖으며 완전유막영역에서는 1의 값을 갖는다. 그리고 유막함수를 θ_i 는 다음과 같다

$$\theta_i = \frac{p}{\rho_c} \quad (2)$$

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

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

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

$$p = p_c \quad \text{급유홀에서} \quad (4.1)$$

$$p = 0 \quad \text{축방향 끝단에서} \quad (4.2)$$

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

2.2 운동방정식

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

$$\Delta \dot{x}_b = -K_x \Delta x_i - K_d \Delta \dot{x}_i - K_i \int \Delta x_i dt \quad (5.1)$$

$$\Delta \dot{y}_b = -K_y \Delta y_i - K_d \Delta \dot{y}_i - K_i \int \Delta y_i dt \quad (5.2)$$

여기서 Δx_b , Δy_b 와 Δx_i , Δy_i 는 정적평형위치로부터의 베어링 중심과 축 중심의 변위이다. 그리고 K_x , K_d 와 K_i 는 각각 베어링의 비례, 미분 및 적분 제어 계인이다. 시스템의 정적평형위치 근방에서의 미소 진동에 대하여, 베어링 내 유막판력은 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

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_i \\ \Delta \dot{y}_i \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{x}_i - \Delta \dot{x}_b \\ \Delta \dot{y}_i - \Delta \dot{y}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_i - \Delta x_b \\ \Delta y_i - \Delta y_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_r \\ f_l \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 c_{ij} 와 k_{ij} 는 베어링의 선형화된 감쇠와 강성 계수이며, 운전조건에 따라서 변화되는 계수이다. 그리고 f_r 와 f_l 는 축에 작용하는 각 방향으로의 외력이다. 식 (5)와 (6)으로부터 시스템의 특성방정식을 얻을 수 있으며, Routh-Hurwitz 안정성 판별법을 이용하여 시스템의 안정한계속도와 횡비를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

시스템의 정적평형위치는 이차원 뉴턴-랩슨법으로 구하였으며, 섭동법을 이용한 베어링의 선형화 계수로부터 시스템의 동특성을 해석하였다. 본 해석에 사용한 시스템 변수들은 Table 1에 나타내었으며, 이 시스템의 안정한계속도는 7623 rpm 이며, 이 속도에서의 횡비는 0.516 이다. Fig. 2는 비례 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도 변화를 보여주고 있다. 비례 계인이 증가할수록 시스템의 안정한계속도가 선형적으로 향상된다.

Table 1 Specifications and parameter values

W = 9810 (N)	D = 80 (mm)
L/D = 0.5	C = $D/1000$
P_c = 0.0	β = 1.0×10^8 (Pa)
μ = 0.0290 (Pa s)	m_e = 0.080 (gr-cm)

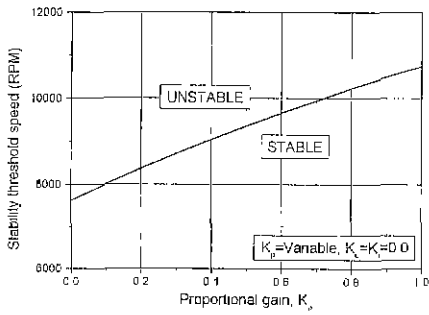


Fig. 2 Stability characteristics for proportional control

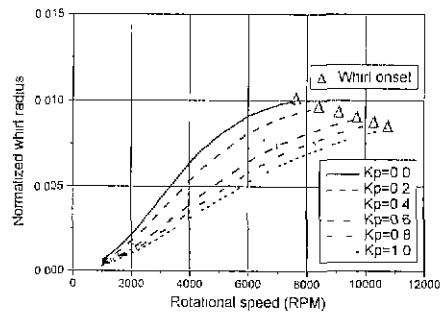


Fig. 5 Unbalance responses for proportional control

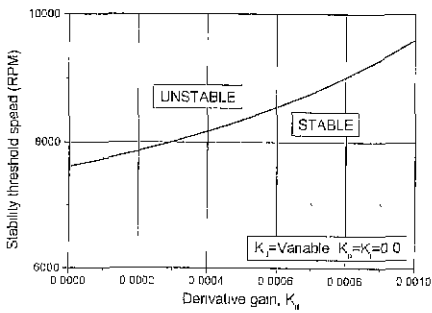


Fig. 3 Stability characteristics for derivative control

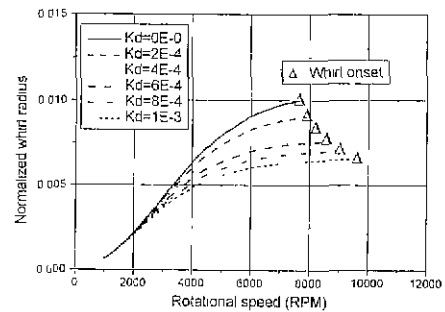


Fig. 6 Unbalance responses for derivative control

Fig. 3은 미분 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도 변화를 보여주고 있다. 미분 게인이 증가할수록 시스템의 안정한계속도는 이차원 함수로 향상되고 있다.

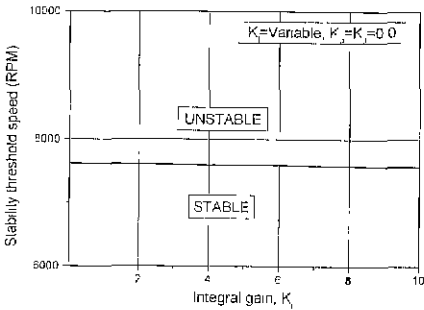


Fig. 4 Stability characteristics for integral control

Fig. 4는 적분 제어되는 경우의 안정한계속도 변화를 보여주고 있다. 축-베어링 시스템의 안정한계속도는 적분 제어에 의하여 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 결국 비례제어나 미분제어를 통하여 축-베어링 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

비례 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 불균형 응답을 Fig. 5에 나타내었다. 이 불균형 응답의 크기는 베어링 간극으로 무차원시킨 값이다. 비례 게인을 증가시킬수록 주어진 회전속도에서의 축 진동 진폭이 감소하고 있음을 알 수 있으며, 또한 시스템의 안정한계속도도 향상되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 미분 제어되는 경우에 회전 속도에 따른 축-베어링 시스템의 불균형 응답을 보여주고 있다. 미분 게인을 증가시킬수록 주어진 운전 조건에서의 축 진동 진폭이 감소하고 있으며, 비례 제어와 비교시 저속보다는 고속에서 불균형 응답의 지감 효과가 큰 것으로 나타나고 있다.

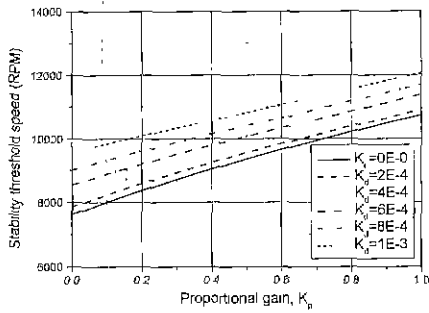
비례-미분 제어되는 경우의 축-베어링 시스템의 안정한계속도와 율비 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 비례 제어나 미분 제어되는 경우에 비하여 비례-미분 제어되는 경우, 보다 효과적으로 시스템의 안정한계속도를 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 안정한계속도에서의 율비는, 고정된 비례 게인에 대하여 미분 제어 게인을 증가시킬수록 감소하며, 고정된 미분 게인에 대하여 비례 제어 게인을 증가시킬수록 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4. 결론

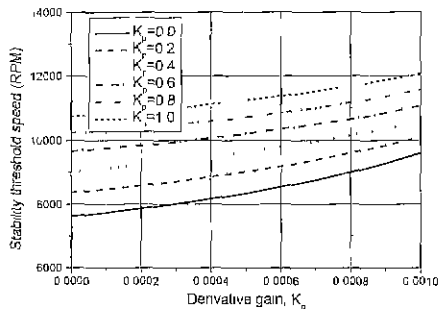
능동 제어되는 동압 베어링의 비례, 미분 및 적분 제어 특성에 대하여 수치해석한 결과 다음의 결론을 얻었다. 첫째, 베어링을 비례 혹은 미분 제어하는 경우에 시스템의 불균형 응답 및 안정성을 효과적으로 향상시킬 수 있으며, 비례 제어시는 선형적으로, 미분 제어시는 이차원 함수로 안정성이 향상된다. 둘째, 베어링의 적분 제어에 의한 시스템의 안정성에 미치는 영향은 없다 셋째, 비례-미분 제어를 이용하면, 효과적으로 시스템의 안정성을 향상시킬 수 있다

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 Turkey, 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 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.

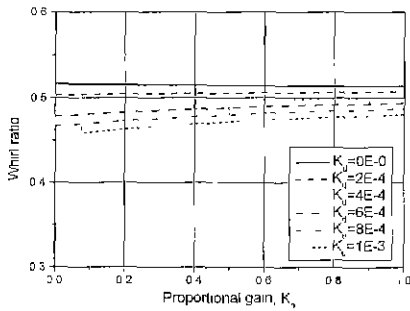


(a) K_p varied for various K_d

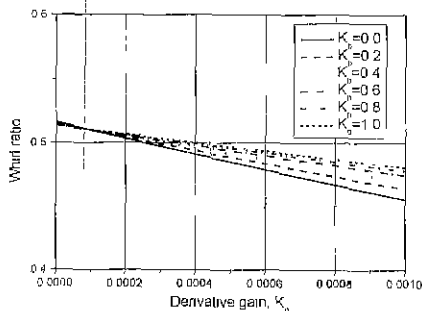


(b) K_d varied for various K_p

Fig 7 Stability threshold speed for PD-control



(a) K_p varied for various K_d



(b) K_d varied for various K_p

Fig 8 Whirl ratio for PD-control