

외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠 측정

Measuring Stiffness and Damping of Externally Pressurized Air Bearings

*박인황¹, #박상신², 장우영²

*I. H. Park¹, #S. S. Park(pss@ynu.ac.kr)², W. Y. Jang²

¹현대위아 선행연구팀, ²영남대학교 기계공학부

Key words : Air bearing, Stiffness and damping coefficients, Magnetic actuator

1. 서론

최근 다면경 가공기나 초정밀 절삭기와 같은 초정밀 가공기에서, 주축의 지지를 구름 베어링을 대신해서 회전 정밀도가 좋은 외부가압 공기베어링이 사용되고 있다. 이는 외부가압 공기베어링의 특성, 즉 비접촉 지지를 통한 높은 회전 속도, 높은 회전 정밀도, 높은 동강성등에 기인한다. 하지만, 외부가압 공기베어링은 부하 용량이 작고, 고속 회전시 선회 운동에 의한 불안정¹⁾이 나타난다. 따라서, 불안정성을 회피하기 위해, 로터-베어링 시스템 설계시 정확한 베어링의 동특성에 대한 지식이 필요하다.

본 논문에서는 외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠 계수의 측정 이론을 전개하였으며, 이를 검증하기 위하여 실험장치를 구성하여 강성 및 감쇠 계수를 실험적으로 측정하였다.

2. 강성 및 감쇠 계수 측정 이론

Fig. 1와 같이 로터-베어링계를 질량, 강성, 감쇠계로 모델링하여 운동방정식을 만들면 (식 1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m \\ m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{Bmatrix} \quad (\text{식 1})$$

여기서 m 은 로터의 질량, c 는 외부가압 공기베어링의 감쇠, k 는 외부가압 공기베어링의 강성, 그리고 $f(t)$ 는 시스템에 가해지는 외부 가진력을 의미한다.

(식 1)의 방정식에서 로터에 가해지는

가진력과 변위는 (식 2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(t) &= A_{xc} \cos \omega t + A_{xs} \sin \omega t \\ F_y(t) &= B_{yc} \cos \omega t + B_{ys} \sin \omega t \\ x &= X_{1c} \cos \omega t + X_{1s} \sin \omega t \\ y &= Y_{1c} \cos \omega t + Y_{1s} \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{식 2})$$

(식 2)를 (식 1)에 대입하여, cosine항과 sine항을 분리하면, 4개의 식을 얻을 수 있다. 하지만 (식 1)의 방정식에는 미지수가 8개 이므로 실험하고자 하는 회전 속도에서 다른 진폭과 주파수를 갖는 가진력을 주어 2번의 실험을 하면 다음과 같은 행렬식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_{1c} & Y_{1c} & 0 & 0 & \omega_1 X_{1s} & \omega_1 Y_{1s} & 0 & 0 \\ X_{1s} & Y_{1s} & 0 & 0 & -\omega_1 X_{1c} & -\omega_1 Y_{1c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{1c} & Y_{1c} & 0 & 0 & \omega_1 X_{1s} & \omega_1 Y_{1s} \\ 0 & 0 & X_{1s} & Y_{1s} & 0 & 0 & -\omega_1 X_{1c} & -\omega_1 Y_{1c} \\ X_{2c} & Y_{2c} & 0 & 0 & \omega_2 X_{2s} & \omega_2 Y_{2s} & 0 & 0 \\ X_{2s} & Y_{2s} & 0 & 0 & -\omega_2 X_{2c} & -\omega_2 Y_{2c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{2c} & Y_{2c} & 0 & 0 & \omega_2 X_{2s} & \omega_2 Y_{2s} \\ 0 & 0 & X_{2s} & Y_{2s} & 0 & 0 & -\omega_2 X_{2c} & -\omega_2 Y_{2c} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{yx} \\ k_{xy} \\ c_{xx} \\ c_{yy} \\ c_{yx} \\ c_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{xc} + m\omega_1^2 X_{1c} \\ A_{xs} + m\omega_1^2 X_{1s} \\ A_{yc} + m\omega_1^2 Y_{1c} \\ A_{ys} + m\omega_1^2 Y_{1s} \\ B_{xc} + m\omega_2^2 X_{2c} \\ B_{xs} + m\omega_2^2 X_{2s} \\ B_{yc} + m\omega_2^2 Y_{2c} \\ B_{ys} + m\omega_2^2 Y_{2s} \end{Bmatrix} \quad (\text{식 3})$$

여기서 아래첨자 1, 2는 실험 횟수이고, ω 는 가진 주파수이다. 두 번의 실험을 통하여, 가진 주파수에 해당하는 각각의 성분을 FFT 처리를 통하여 추출한 후, (식 3)에 대입하면 최종 강성과 감쇠 계수를 구할 수 있다.

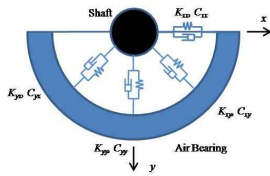


Fig. 1 Modeling of rotor-bearing system

3. 실험 장치

본 논문에서는 외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠 계수를 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 실험 장치는 크게 로터 구동을 위한 터빈 드라이브 버킷, 반경/축 방향 외부가압 공기베어링, 로터의 거동을 측정하기 위한 비접촉 변위 센서, 로터에 가해지는 힘을 측정하기 위한 힘센서, 그리고 로터에 하중을 비접촉으로 부가할 수 있는 전자석 가진기로 구성된다.

전자석 가진기는 NNSS 배열을 통해 자기장의 누설을 최소화 하였으며, x축은 sine파, y축은 cosine파로 로터를 가진하였다. 전자석 가진기의 경우, 정현파의 신호 부호에 상관없이 견인력이 작용하기 때문에, Fig. 3와 같이 클리퍼 회로를 사용하여 정확한 정현파를 생성하였다.

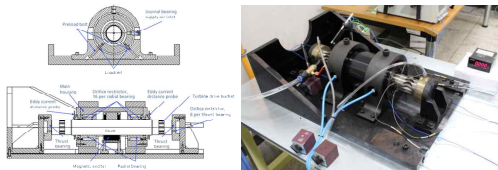


Fig. 2 Test Rig

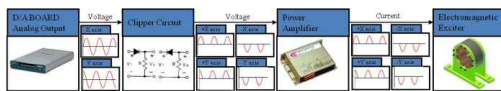


Fig. 3 Actuating system

4. 실험 결과

외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠 계수 측정 실험을 수행하였다. 실험은 5bar, 6bar, 그리고 7bar의 베어링 공급 압력을 가지고, 주축 회전 속도 2,500RPM에서 6,000RPM까지 1,000RPM간격으로 수행되었다.

실험을 통해 측정된 외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠 계수를 이론적으로

예측한 값과 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

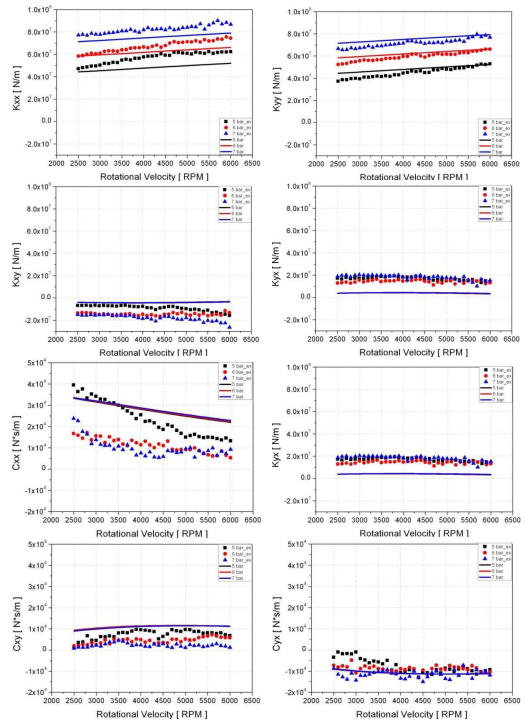


Fig. 4 Measured stiffness and damping coefficients

5. 결론

본 논문에서는 외부가압 공기베어링의 강성 및 감쇠계수 측정에 관한 이론을 전개하였으며, 이를 실험적으로 구현하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 주 강성계수는 공급압력의 증가에 의해 증가하나 연성 강성은 공급압력에 거의 영향을 받지 않는다.
2. 주 감쇠 및 연성 감쇠계수는 공급압력에 영향을 거의 받지 않는다.
3. 외부가압 공기베어링의 설계 데이터를 확보할 수 있었다.

참고문헌

1. Lund, J. W., "A Theoretical Analysis of Whirl Instability and Pneumatic Hammer for a Rigid Rotor in Pressurized Gas Journal Bearings", Journal of Lubrication Technology, Vol. 89, No. 2, 154-166, 1967.