

나선홈을 가진 공기 동압베어링의 동역학적 거동 해석

신용호(고려대 대학원 기계공학과), 최우천*(고려대 기계공학과)

Analysis of Dynamic Behavior of Spiral Grooved Air-Dynamic Bearings

Y. H. Shin(Mech. Eng. Dept., Korea Univ.), W. C. Choi(Mech. Eng. Dept., Korea Univ.)

ABSTRACT

Air dynamic bearings are inherently unstable in dynamic behavior due to the varying angle of a force produced and the nonlinear characteristics of stiffness. In this study, such dynamic behavior is obtained and compared with experimental results. A body axis coordinate system is employed to avoid the change of a moment of inertia. FDM is used to calculate the pressure distribution on the bearing surface and then the force acting on the rotor was calculated by integrating the pressure distribution. By integrating accelerations which are calculated from the equations of motion using the 4th order Runge-Kutta method, the pose of the bearing at each time step is obtained.

Key Words : Air dynamic bearing (공기 동압베어링), Spiral Groove (나선홈), Clearance (간극), Eccentricity (편심), Force application angle (힘의 작용 각도), Body axis coordinate system (회전 좌표계)

1. 서론

공기 동압베어링은 공기를 윤활제로 사용하기 때문에 기계식 볼베어링의 단점인 접촉으로 인한 소음, 발열, 마모 등이 적게 발생한다. 그리고 공기 동압베어링은 고속 경량회전체의 지지에 적합하므로 컴퓨터 산업과 멀티미디어 산업의 발전에 따라 레이저 프린터, 스캐너, 하드디스크 등에서 점차 기계식 베어링을 대체하여 사용될 전망이다.

이러한 공기 베어링에 대해서 여러 연구결과가 발표되었다. 공기 윤활 나선형 홈의 반구형 베어링의 부하하중과 축방향 강성의 관계 및 진동특성⁽¹⁾, 편심된 유한한 길이의 공기 동압 저널베어링의 압력분포와 성능에 대한 연구⁽²⁾, 나선형 홈을 가진 반구형 및 원추형 베어링의 압력분포에 관한 연구⁽³⁾, 나선홈을 가진 헤링본 무늬 저널베어링의 뽀뽀효과⁽⁴⁾, 편심된 나선형 홈의 반구형 베어링에 대해 평면 해석 이론을 적용하여 베어링의 여러 제작 조건이 부하하중에 미치는 영향을 해석한 연구⁽⁵⁾, 나선홈을 가진 공기 동압베어링의 성능 실험과 해석⁽⁶⁻⁹⁾과 진구도 오차가 나선홈을 가진 반구형 공기 동압베어링에 미치는 영향⁽¹⁰⁾ 등 공기 베어링에 관련된 여러 가지 연구보고가 있다.

본 연구에서는 나선 홈을 가진 공기 동압베어링의 동역학적 거동을 수치해석적으로 연구한다. 베어링 표면의 압력분포를 유한차분법으로 구하고, 이 압력분포로부터 베어링이 받는 힘을 계산하고 모멘트를 구한다. 운동방정식에 힘과 모멘트를 적용시키고, 적분하여 자세를 구한다. 지금까지의 타 연구에서는 이와 같은 동역학적 거동을 직접적으로 다루지 않았다. 공기 동압베어링은 고속, 고정밀을 필요로 하는 기기에 많이 쓰이므로 떨림은 성능에 큰 영향을 미친다. 떨림이 일어나는 근본적인 원인과 그 양상을 연구한다.

2. 동역학 모델링

2.1 베어링의 강체모델링

Fig. 1과 같은 상반구와 하반구로 구성된 나선홈을 가진 반구형 공기 동압베어링의 회전자를 Fig. 2와 같이 강체로 모델링한다. 베어링은 회전자의 상반구와 하반구가 모두 반구형이므로 표면의 압력에 의하여 발생하는 힘은 회전자의 하반구와 상반구의 중심에 작용한다. 그러므로 3차원으로 작용하는 스프링이 상반구와 하반구의 중심에 연결되어 있으면서 회전을 하는 형상으로 모델링을 한다. 해석에 쓰

인 모델링의 기본적인 변수는 다음과 같다.

- 기본간극 : $c = 4 \mu\text{m}$
- 홈깊이 : $\Delta G = 4 \mu\text{m}$
- 회전각속도 : $\omega = 13,000 \text{rpm} = 1361 \text{rad/s}$

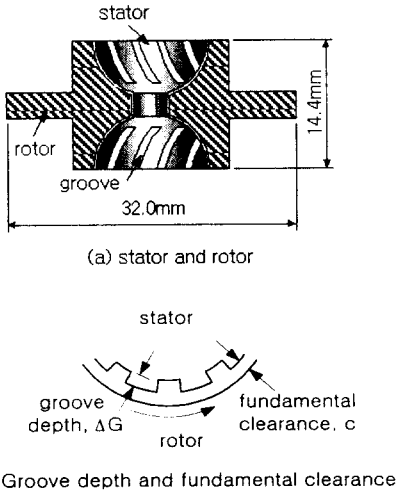


Fig. 1 Schematic of a hemispherical spiral grooved air-dynamic bearing.

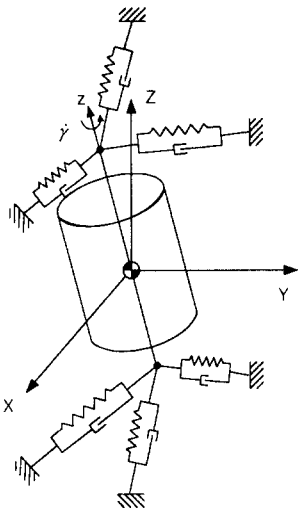


Fig. 2 Simplified model of a rotor.

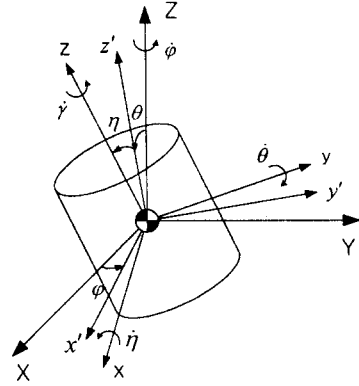


Fig. 3 Coordinate systems.

2.2 좌표계의 선정

좌표계는 먼저 고정좌표계를 정한 뒤 회전자에 부착된 회전좌표계(body axis coordinate system)를 정의한다. 회전자에 부착된 회전 좌표계를 사용하면 회전자의 운동에 따라서 회전좌표계가 함께 움직이므로 고정좌표계에서는 계속 변하는 관성모멘트가 회전좌표계에서는 일정한 값을 가지게 된다. 회전좌표계는 Eulerian description이므로 고정좌표계에서 구한 모멘트는 회전좌표계의 모멘트로 변환시켜야 한다. η 와 θ 는 회전 좌표계의 틸팅운동을 표현하며, ϕ 는 회전 좌표계의 Z축 회전이며, $\dot{\gamma}$ 는 회전자의 회전 각속도를 나타낸다. Fig. 3에서 X-Y-Z는 고정좌표계이며, x-y-z는 회전 좌표계이다. 회전자는 회전 각속도가 일정하게 유지되므로 5자유도를 가지며, 회전 좌표계는 6자유도를 갖는다.

2.3 스프링의 모델링

일반적인 선형 스프링 모델은 $F = kx$ 로 표현되지만, 공기 동압베어링은 비선형성이 강하며 힘의 작용방향이 편심의 위치에 따라서 함께 변화하므로 다른 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 유한차분법을 이용하여 수치해석적 방법으로 회전자의 각각의 위치에 대하여 먼저 베어링 표면의 압력을 구한 뒤, 이 압력을 면적으로 적분하여 힘과 작용각도를 구한다. 이러한 과정은 참고문헌⁽⁹⁾에 잘 나타나 있다. 유한차분법으로 각각의 타임스텝마다 풀면 많은 시간이 소요되므로 대표점들을 정하여 미리 데이터를 구한 뒤, 각각의 타임스텝마다 이 값들을 다항식 커브 피팅을 하여 반경방향 힘과 축방향 힘을 구한다.

3. 운동방정식과 해석방법

3.1 운동방정식의 유도

다음의 식들에서 x, y, z는 무게중심의 운동 나타내며, 나머지 각도에 관련된 기호는 Fig. 3에 나와있

는 것과 같다. 다음 식은 힘의 운동방정식으로서 이 식으로부터 운동가속도를 구한다.

$$\begin{aligned} F_x &= m\ddot{x} + b_x\dot{x} + k_x x & \ddot{x} &= F_{x1} / m \\ F_y &= m\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y & \ddot{y} &= F_{y1} / m \\ F_z &= m\ddot{z} + b_z\dot{z} + k_z z & \ddot{z} &= F_{z1} / m \end{aligned} \quad (1)$$

모멘트의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sum \mathbf{M} &= (\dot{\mathbf{H}})_i + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} \\ &= \begin{bmatrix} I_a(\dot{\theta}\dot{\gamma} + \dot{\theta}\dot{\phi} + \dot{\phi}\dot{\eta} + \dot{\phi}^2\eta) + I_z(\dot{\eta} - \dot{\phi}\dot{\theta} - 2\dot{\phi}\dot{\theta} + \dot{\phi}\dot{\eta}\dot{\theta}\eta - \dot{\phi}^2\eta) \\ I_1(\dot{\theta} + \dot{\phi}\dot{\eta} + 2\dot{\phi}\dot{\eta} - \dot{\phi}^2\theta) - I_a(\dot{\eta}\dot{\gamma} + \dot{\eta}\dot{\phi} - \dot{\phi}\dot{\gamma}\dot{\theta} - \dot{\phi}^2\theta) \\ I_a(\dot{\gamma} + \dot{\phi} - \dot{\phi}\dot{\theta}\dot{\theta} - \dot{\phi}\dot{\eta}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\eta} &= \{M_x - I_a(\dot{\theta}\dot{\gamma} + \dot{\theta}\dot{\phi} + \dot{\phi}\dot{\eta} + \dot{\phi}^2\eta) + I_z(\dot{\phi}\dot{\theta} + 2\dot{\phi}\dot{\theta} - \dot{\phi}\dot{\eta}\dot{\theta}\eta + \dot{\phi}^2\eta)\} / I_z \\ \ddot{\theta} &= \{M_y + I_a(\dot{\eta}\dot{\gamma} + \dot{\eta}\dot{\phi} - \dot{\phi}\dot{\gamma}\dot{\theta} - \dot{\phi}^2\theta) - I_z(\dot{\phi}\dot{\eta} + 2\dot{\phi}\dot{\eta} - \dot{\phi}^2\theta)\} / I_z \\ \ddot{\phi} &= M_z / I_a + \dot{\phi}\dot{\theta}\dot{\theta} + \dot{\phi}\dot{\eta}\dot{\eta} \end{aligned} \quad (3)$$

3.2 해석방법

타임스텝, 초기자세, 회전속도 그리고 베어링의 반경방향 힘과 축방향 힘에 관한 데이터가 입력값으로 주어진다. 4th order Runge-Kutta method을 이용하여 운동방정식으로부터 구한 무게중심의 가속도와 각가속도를 두 번 적분하여 새로운 자세를 구한다. 새로운 자세에서 작용하는 반경방향 힘과 축방향 힘을 다항식 커브 피팅으로 구하여 적분을 수행하여 다음 타임스텝에서의 자세를 구하는 과정을 반복한다. 각각의 타임스텝에서의 자세를 출력값으로 하여 그래프를 그려서 해석을 수행한다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 수치해석적 방법으로 구한 회전자의 상반구 중심의 운동을 나타낸 것이다. Fig. 5는 수치해석적 방법으로 구한 회전자의 하반구 중심의 운동을 나타낸 것이다. Fig. 6은 실험에서 측정된 결과로서 회전자의 중심과 중심 부근의 운동이다. 여기서 x, y 운동은 간극으로 표준화한 값이다. 실험에서는 중심의 정확한 위치 보정이 어려워서 센터위치의 좌표등은 차이가 있지만 기본적인 양상은 시뮬레이션과 거의 유사함을 볼 수 있다. 그리고 펄럼의 폭은 회전자의 최대 편심가능량인 기본간극의 두 배정도의 크기가 된다.

Fig. 7(a)는 편심이 되기 전의 고정자와 회전자의 위치를 보여주고, Fig. 7(b)는 x방향으로 편심이 된 후의 힘의 작용각도 α 를 보여준다.

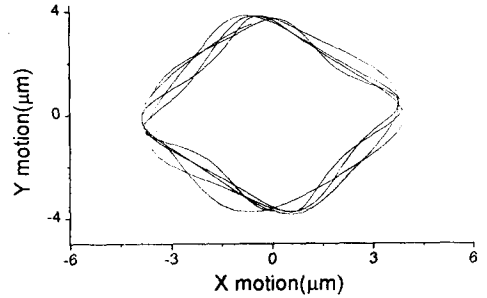


Fig. 4 X-Y motion of the top center of a rotor.

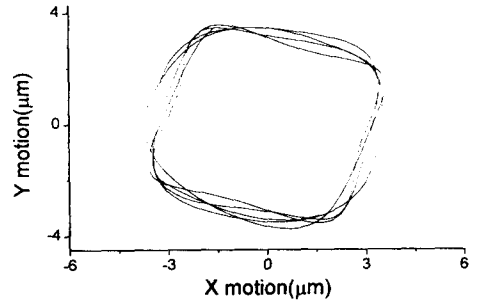


Fig. 5 X-Y motion of the bottom center of a rotor.

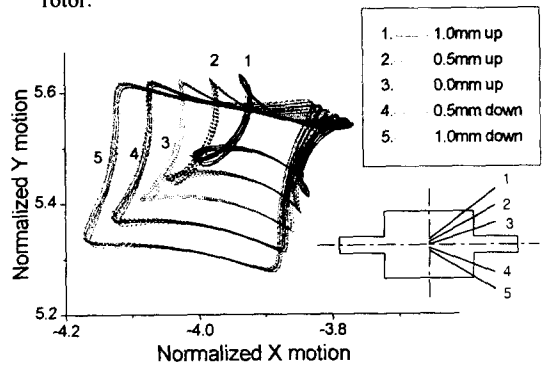


Fig. 6 Experimental results of X-Y motions at various axial positions of the rotor.

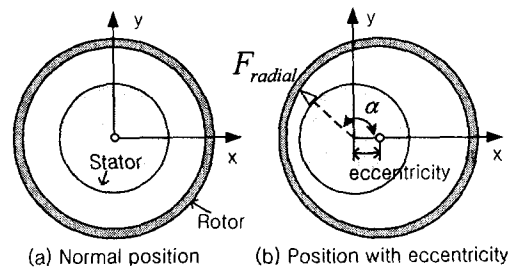


Fig. 7 Force application angle.

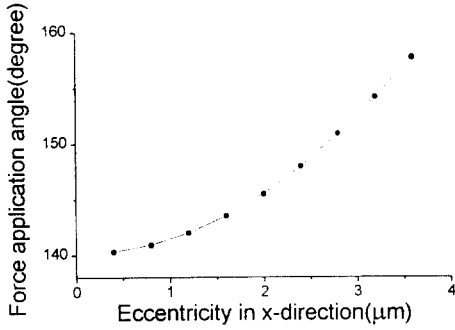


Fig. 8 Force application angle vs. eccentricity.

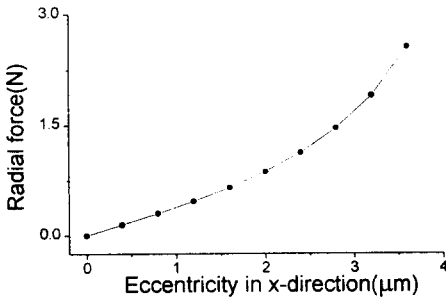


Fig. 9 Radial force vs. radial eccentricity.

Fig. 8는 편심의 변화에 대한 힘의 작용각도 α 를 수치 해석적 방법으로 구한 그래프이다. 편심이 작을 때는 α 가 작으나, 편심이 커지면 α 가 커짐을 알 수 있다. 이로 인하여 편심이 클 경우, 회전자가 고정자의 중심에 가까운 방향으로 운동을 하지만, 중심에 가까워질수록 고정자의 중심에서 벗어나게 하는 힘을 받게 된다. 그리고 다시 편심이 커지면 중심방향으로 움직임이 일어나게 된다. Fig. 9는 편심의 변화에 대한 반경방향 힘의 변화를 수치해석적 방법으로 구한 그래프이다. 편심값이 커지면서 급격히 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 편심이 증가하여 고정자와 회전자가 가까워지면 회전자는 강하게 밀어내는 힘을 받게 되며, 회전자의 운동방향이 갑자기 바뀌게 된다. 힘의 작용각도의 변화와 반경방향 힘의 비선형성의 영향에 의하여 회전자의 운동은 Fig. 6과 같이 큰 떨림을 가지게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 공기 동압베어링의 회전자의 동역학적 기동을 해석하였다. 상반구와 하반구의 중심의 운동을 실험과 비교하고, 떨림의 원인을 고찰하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 회전자의 떨림을 일으키는 요인은 힘의 작용각도의 변화와 반경방향 힘의 비선형성이다.

- 힘의 작용각도는 편심이 커질수록 고정자의 중심방향으로 작용하며 편심이 작아지면 회전자가 고정자의 중심에서 벗어나게 하는 힘이 작용하여 떨림이 발생한다.

- 떨림은 회전자의 최대 편심가능량인 기본간극의 두 배 정도의 크기가 된다.

참고문헌

1. Saito, Y., Makino, H., and Tamura, A., "Characteristics of gas-lubricated spherical spiral groove bearings". Journal of JSLE, Vol. 28, No. 3, pp.221-227, 1983.
2. Czyzewski, T., and Titus, P., "Analysis of an arbitrarily misaligned self-acting gas film journal bearing of finite length," Wear, Vol. 114, pp. 367-379, 1987.
3. Bootsma, J., "Spherical and conical spiral groove bearings," ASME J. of Lubrication Technology, pp 236-249, 1975.
4. Kawabata, N., Ashino, I., Sekizawa, M., and Yamazaki, S., "Spiral grooved bearing utilizing the pumping effect of a herringbone journal bearing," JSME Int. Journal, series III, Vol. 34, No. 3, pp.411-418, 1991.
5. Murata, S., Miyake, Y., and Kawabata, N., "Exact two-dimensional theory of spherical spiral groove bearings," ASME J. of Lubrication Technology, vol. 102, 1980.
6. 박근형, 최정환, 최우천, 김권희, 우기명, 김승곤, "나선홈을 갖는 반구형 공기 동압베어링의 반경방향 성능 측정", 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 2, 1999, pp. 23-30.
7. 최우천, 신용호, 최정환, "나선홈을 가진 공기 동압 베어링의 곡률에 대한 압력분포", 1999 추계 정밀공학회 발표논문집, pp. 870~873.
8. Woo Chun Choi, Keun Hyung Park, Jung Hwan Choi, Kwonhee Kim, and Byung Chun Koh, "Study on the Performance of Spiral-Grooved Semi-Spherical Air Bearings Using Taguchi Method", JSME International Journal Series C, Vol. 43, No. 1, 2000.
9. 최우천, 신용호, 최정환, "다양한 곡률을 가진 공기 동압베어링의 축방향 부하특성 해석", 한국정밀공학회지, 제17권, 제3호, pp. 129-135, 2000.
10. 최우천, 신용호, 최정환, "나선 홈을 가진 반구형 공기 동압베어링에서 진구도 오차의 영향 해석" 한국정밀공학회지, 제17권, 제9호, pp. 145-150, 2000.