3 패드 가스 포일 저널 베어링의 프리로드 증가에 따른 성능 해석

이종성¹ · 김태호^{2†}

¹국민대학교 대학원 기계설계학과 대학원, ²국민대학교 기계시스템공학부

Analysis of Three-Pad Gas Foil Journal Bearing for Increasing Mechanical Preloads

Jong Sung Lee¹ and Tae Ho Kim^{2†}

¹Graduate School, Dept. of Mechanics and Design, Kookmin University

²School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin University

(Received August 8, 2013 ; Revised September 20, 2013 ; Accepted September 22, 2013)

Abstract – In this study, a three-pad gas foil journal bearing with a diameter of 40 mm and an axial length of 35 mm was modeled to predict the static and dynamic performances with regard to an increasing mechanical preload. The Reynolds equation for an isothermal and isoviscous ideal gas was coupled with a simple elastic foundation foil model to calculate the hydrodynamic pressure solution iteratively. In the prediction results, the journal eccentricity, journal attitude angle, and minimum film thickness decreased, but the friction torque increased with the preload. A quick comparison implied a lower load capacity but higher stability for a three-pad gas foil bearing compared to a one-pad gas foil journal bearing. The direct stiffness coefficients increased with the preload, but the cross-coupled stiffness coefficients decreased. The direct damping coefficient increased in the horizontal direction but decreased in the vertical direction as the preload increased. These model predictions will be useful as a benchmark against experimental test data.

Keywords – gas foil bearing (가스 포일 베어링), oil-free (무급유), preload (프리로드/예압), load capacity (하중지지력), stiffness (강성), damping (감쇠), high-speed stability (고속 안정성)

1. 서 론

가스 포일 베어링(gas foil bearing)은 고유의 무급유(oil-free)윤활 특성과 우수한 고속 안정성으로 인해 소형 회전기계의 친환경, 고효율화 구현을 가능케 한다. 가스 포일 베어링은 가스 또는 공기를 윤활 유체로 사용하기 때문에 오일 윤활 베어링이나 구름 요소 베어링에 비해 하중지지능력과 강성 및 감쇠력이 작은 단점이 있지만, 회전축계를 고려한 적절한 설계를 통해 다양한 초소형 터보기계에 효과적으로 적용되어 왔다

[1]. 특히, 베어링 내면을 이루는 금속 포일(foil)로 이루어진 탄성 구조체(elastic foil structure)는 일반적인 가스 베어링에 비해 더 넓은 범위에 걸쳐 최소유막두께 구역(minimum film thickness zone)을 형성하여 베어링의 하중지지능력(load capacity)을 높이고[2, 3], 포일 사이의 마찰(dry-friction)은 구조감쇠(Coulomb/structural damping)효과를 발생시켜 베어링의 동적 성능을 향상시킨다[4]. 과거 40년동안 많은 연구자들이 가스 포일 베어링의 성능 향상을 위한 연구를 수행하였다. Heshmat 등[5]은 포일의 강성 및 배치형태에 변화를 주거나 구리 코팅(Cu coating)을 하여 베어링의 하중지지능력을 향상시켰고, DellaCorte와 Valco[6]는 과거 수

[†]Corresponding author : thk@kookmin.ac.kr

많은 연구자들이 다양한 노력으로 가스 포일 베어링의 하중지지능력을 10배 이상 향상시킨 과정 및 결과를 정리하여 논문으로 발표하였다. Kim과 San Andres[7]는 범프(bump) 아래 120도 간격으로 3개의 메탈 심(shim)을 삽입하여 프리로드 (mechanical preload)를 부여함으로써 고속 안정성을 향상하였다. 또한, 최근의 연구에서 Sim 등[9]은 프리로드를 갖는 가스 포일 베어링이 무급유 터보차저(oil-free turbocharger)의 고속 안정성을 향상할 뿐 아니라, 유막 간극(clearance)을 줄인 베어링에 비해 마찰 손실이 작음을 보였다.

소수의 연구자들만이 포일 패드(foil pad)의 개수를 1개에서 3개로 증가시킴으로써 성능을 개선하려는 노력을 하였다. Heshamt등[5]은 실험을 통해 포일 패드의 개수를 1개에서 3개로 증가시킴으로써 고속 동적 안정성이 향상됨을 보였으며, Kim 등[6]은 비선형 해석을 통해 3 패드 가스 포일 베어링의 고속 안정성 향상을 예측하였다.

본 논문에서는 아직까지 문헌에 보고된 적이 없는 프리로드 증가가 3 패드 가스 포일 저널 베어링의 성능에 미치는 영향을 예측한다. 성능 예측을 위해 실험실에서 보유하고 있는 3 패드 가스 포일 저널 베어링을 수학적으로 모델링 한 후 프리로드 변화에 따른 하중지지능력 등의 정적 성능과 강성 및 감쇠계수 등의 동적 성능을 예측하고 비교하였다. 해석을 위해 제 1 저자가 과거 개발한 해석 프로그램[2]을 일부 수정하여 사용하였다.

2. 3 패드 가스 포일 저널 베어링

Fig. 1은 베어링 내경과 길이가 각각 약 40 mm와 35 mm를 갖는 3 패드 가스 포일 저널 베어링의 사진

Fig. 1. Photo of 3 pad gas foil journal bearing.

Fig. 2. Measurement of housing inner radius of 3 pad gas foil journal bearing.

Fig. 3. Clearance model for 3 pad gas foil journal bearing, Comparison with measurement.

을 보여준다. 120도의 원주각을 갖는 탑 포일(top foil)과 범프(bump)로 구성된 포일 패드는 키(key)에 용접된 후 하우징 내면에 원주방향으로 120도 간격으로 가공된 슬롯(slot)에 착탈이 가능하게 고정된다.

Fig. 2는 3점식 내측 마이크로미터를 이용하여 3 패드 가스 포일 저널 베어링 하우징의 내측 곡률 반지름을 측정한 결과이다. 하나의 포일 패드(탑포일과 범프)가 위치하는 120도 범위에 대해서 10도 간격으로 측정하였다. 베어링의 간극은 측정된 하우징 내측 반지름에서 포일 셋의 높이(0.670 mm)와 회전축의 반지름(20 mm)을 빼주어 계산이 가능하다. 이러한 방법으로 계산한 베어링 간극(c_m)을 Fig. 3에 나타내었으며, 식 (1)을 이용하여 모델링하여 비교하였다.

$$c_m(\Theta) = c - r_p \cos \{N_f(\Theta - \Theta_p)/2\} \quad (1)$$

여기서 c , c_m , r_p , N_f , Θ , Θ_p 는 각각 베어링의 최대

간극(radial clearance = 130 μm), 조립간극(assembly radial clearance), 프리로드(mechanical preload = 60 μm), 포일의 개수(Number of foils = 3), 프리로드 오프셋 각도(preload offset angle = 60 deg)이다. 해석 모델은 측정된 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 해석 모델

3 패드 가스 포일 베어링의 상온성능을 예측하기 위해 식 (2)와 같이 등온, 등점성의 이상기체를 위한 레이놀즈 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(p h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \mu \Omega R \frac{\partial (p h)}{\partial x} + 12 \mu \frac{\partial (p h)}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, p , h , x , z , R , t , μ , Ω 는 각각 윤활 공기유막의 압력, 공기유막 두께, 원주방향 좌표, 축방향 좌표, 저널 반지름, 시간, 공기 점도, 회전 각속도를 나타낸다.

회전축 정렬불량이 없는 조건에서 공기유막의 두께는 식 (3)과 같이 베어링의 조립간극 (c_m), 회전축의 수직방향 및 수평방향 편심량(e_x , e_y), 그리고 공기유막

Table 1. Bearing geometry and material property

Parameter Values	
Number of top foil	3
Bearing diameter	40 mm
Bearing length	35 mm
Bearing radial clearance	130 μm
Bearing Preload	60 μm
Preload offset	0.5
Foil 1 – arc length	120 deg
Top foil thickness	127 μm
Bump height	0.50 mm
Bump pitch	4.57 mm
Bump half length	1.81 mm
Foil Modulus of elasticity	214 GPa
Foil Poisson's ratio	0.29

압력에 의한 포일의 변형량 (w_d)에 의해 결정된다.

$$h = c_m(\Theta) + e_x \cos(\Theta) + e_y \sin(\Theta) + w_d \quad (3)$$

수치해석 방법은 유한차분법을 사용하였으며, 자세한 내용은 참고문헌[1]을 따른다. 다만, 본 논문에서 정의한 프리로드의 정의가 참고문헌[1]에서의 그것과 다름에 유의한다.

Fig. 4는 (a) 3 패드와 (b) 1 패드를 갖는 가스 포일 저널 베어링의 개략도 및 해석에 사용된 좌표계를 보여준다. 베어링 하우징 내면에 일정한 크기로 가공된 프리로드에 의해 탑포일의 곡률이 점선으로 표시한 원과 정확히 일치하지 아니하고 로브(lobe)의 형태를 갖는 것을 알 수 있다. Table 1은 해석의 대상이 되는 포일 베어링의 구성 및 각 설계치를 보여준다. 베어링 내경 및 길이, 최대간극, 프리로드 등은 앞서 설명하였다. 포일의 치수와 재료 특성을 고려한 범프 강성은 참고문헌[10]을 이용하여 계산이 가능하였으며, 단위면적 당 약 9.33 GN/m³의 강성을 갖는다. 해석을 위해 범프간의 마찰계수와 히스테리시스 감쇠 계수[3]는 모두 0.1을 사용하였다.

4. 베어링 정적 성능 예측

Fig. 5는 100,000 rpm으로 고속 회전하며, 수직방향 (X)으로 0.2 N의 작은 하중을 갖는, 프리로드

Fig. 4. Schematic views of gas foil journal bearings with mechanical preload: (a) 3 pad, (b) 1 pad bearings.

Fig. 5. Pressure distribution with small static load of 0.2 N at rotor speed of 100,000 rpm, 3 pad GFB.

Fig. 6. Journal eccentricity versus rotor speed for increasing preloads: (a) 3 pad, (b) 1 pad gas foil bearings.

($r_p = 40 \mu\text{m}$)를 갖는 3 패드 가스 포일 저널 베어링의 공기 유막 압력 해석 결과를 보여준다. 회전축의 정렬 불량인 없는 저널 베어링의 경우 압력분포는 축방향으로 대칭이므로 반쪽의 면적에 대해서만 수치해석을 수행하였다. 압력분포는 프리로드의 오프셋 각도가 위치한 60도, 180도 300도에서 피크를 보이며 하중이 가해지는 180도에서 최대값을 갖는 것을 알 수 있다.

이후의 결과는 10.8 N의 하중 조건에서 베어링이 성능 해석 결과를 보여준다. Fig. 6은 회전속도의 증가에 따른 저널 편심량의 변화를 다양한 프리로드에 대해 나타내었다. 일반적으로, 저널 편심량은 회전속도가 증가함에 따라 그리고 프리로드가 증가함에 따라 감소함을 보인다. Fig. 7에서 저널 자세각은 프리로드가 없을 때는 회전속도의 증가에 따라 증가하는 양상을 보이지만, 프리로드가 커짐에 따라 반대로 회전속도의 증

Fig. 7. Journal attitude angle versus rotor speed for increasing preloads: (a) 3 pad, (b) 1 pad gas foil bearings.

Fig. 8. Bearing torque versus rotor speed for increasing preloads: (a) 3 pad, (b) 1 pad gas foil bearings.

가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 저속에서는 프리로드가 없을 때에 자세각의 최소값을 갖는다. Fig. 8은 회전속도의 증가에 따른 베어링의 마찰 토크의 변화를 다양한 프리로드에 대해 나타내었다. 베어링 토크는 회전속도의 증가에 따라 선형적으로 증가하며 프리로드가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 9와 Fig. 10은 3 패드 가스 포일 저널 베어링의 정적 성능을 1 패드 가스 포일 저널 베어링과 비교하였다. Fig. 9는 (a) 3 패드와 (b) 1 패드 가스 포일 저널 베어링에 대해서 회전속도의 증가에 따른 베어링 최소유막두께를 다양한 프리로드에 대해 나타내었다. 회전속도가 증가함에 따라 그리고 프리로드가 감소함에 따라 최소유막두께는 비선형적으로 증가한다. 130,000 rpm에서 3 패드 베어링이 1 패드 베어링보다 약 12% 작은 유막두께를 갖는다. Fig. 10은 회전속도가 10,000 rpm에서 130,000 rpm까지 증가함에 따른

Fig. 9. Minimum film thickness versus rotor speed for increasing preloads: (a) 3 pad, (b) 1 pad gas foil bearings.

회전축 중심의 궤적을 변화하는 프리로드에 대해 나타내었다. 수평축은 Y 방향의 저널 편심량(e_y)을 수직방향은 X 방향의 저널 편심량(e_x)을 보여준다. 일반적으로 회전속도가 증가함에 따라 그리고 프리로드가 증가함에 따라 저널의 중심은 베어링의 중심에 가까이 다가가는데 3 패드 베어링의 경우 1 패드 베어링에 비해 수평방향 변위 변화 (e_y)가 적은 것을 알 수 있다. 회전속도 증가에 따른 작은 수평방향의 변위 변화는 베어링의 교차강성 유발 효과가 적어 고속 회전 시 동적 안정성에 도움이 되는 것으로 알려져 있다[3]. 3 패드 베어링은 1 패드 베어링과 다른 동적 성능 변화를 갖지만, 그 변화가 프리로드에 의한 그것보다 상대적으로 작기 때문에 이후의 내용은 1 패드 베어링의 동적 성능 예측 결과를 생략하기로 한다.

5. 베어링 동적 성능 예측

Fig. 11은 회전속도의 증가에 따른 베어링의 회전

Fig. 10. Journal center trajectory depicted with journal eccentricities in vertical and horizontal direction at varying speeds from 10 krpm to 130 krpm for increasing preloads: (a) 3 pad, (b) 1 pad gas foil bearings.

동기 (synchronous) 강성계수의 변화를 다양한 프리로드에 대해 나타내었다. 직교강성(K_{xx} , K_{yy})은 해석 영역에서 모두 양의 값을 가지며 K_{xx} 가 K_{yy} 보다 크다. K_{xx} 는 프리로드가 없을 경우 회전속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가지며, K_{yy} 는 회전속도에 관계없이 거의 일정한 값을 유지한다. 그러나, 이들 직교강성은 프리로드가 증가함에 따라 모두 증가하는 데 특히

Fig. 11. Synchronous stiffness coefficients versus rotor speed for increasing preloads. 3 pad gas foil bearing.

Fig. 12. Synchronous damping coefficients versus rotor speed for increasing preloads. 3 pad gas foil bearing.

고속의 영역에서 증가세가 뚜렷하다.

교차강성(K_{xx} , K_{yy})은 그 절대 크기가 일반적으로 직교강성(K_{xx} , K_{yy})보다 작으며, K_{xx} 는 프리로드가 클 경우 음의 값을 가진다. 교차강성은 회전속도가 높아짐에 따라 그리고 프리로드가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 12는 회전속도의 증가에 따른 베어링의 회전 동기 (synchronous) 감쇠계수의 변화를 다양한 프리로드에 대해 나타내었다. 직교감쇠(C_{xx} , C_{yy})는 해석 영역에서 모두 양의 값을 가지며 C_{xx} 가 C_{yy} 보다 크다. C_{xx} 는 회전속도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 갖는데, 프리로드의 증가는 저속의 구간에서는 감쇠계수를 감소시킨다. C_{yy} 는 회전속도가 증가함에 따라 완만하게 감소하는 경향을 보이는데, C_{xx} 와는 반대로 프리로드가 증가함에 따라 뚜렷한 증가의 경향을 보인다.

교차감쇠(C_{xy} , C_{yx})는 그 절대 크기가 일반적으로 직교감쇠(C_{xx} , C_{yy})보다 작으며, C_{xy} 는 프리로드의 크기와 관계없이 음의 값을 가진다. 교차감쇠는 회전속도가 높아짐에 따라 그 절대 크기가 작아지며, 프리로드가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 3 패드 가스 포일 저널 베어링에 대한 해석적 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 일반적으로 프리로드가 증가할수록, 저널 편심량, 저널 자세각, 최소유막두께는 감소하고 마찰토크는 증가하는 경향을 갖는다.

2. 3 패드 가스 포일 저널 베어링은 1 패드 가스 포일 저널 베어링에 비해 작은 최소유막두께를 갖지만, 저널 중심의 궤적 변화에 있어 수평방향 변화가 적어 동적 안정성이 더 뛰어남을 유추할 수 있다.

3. 프리로드가 증가할수록 직교강성은 증가하고 교차강성은 감소한다.

4. 일반적으로 프리로드가 증가할수록 수직방향 직교감쇠는 감소하고 수평방향 직교감쇠는 증가한다. 교차강성은 모두 감소한다.

상기 연구결과는 현재 수행하고 있는 다양한 프리로드를 가진 3 패드 가스 포일 베어링 지지의 회전체 고속구동 실험결과에 의해 검증될 것이다.

Nomenclature

c ,	Bearing radial clearance [m]
c_m	Assembly radial clearance [m]
$C_{ij=X,Y}$	Bearing damping coefficients [N-s/m]
$e_{f=X,Y}$	Journal eccentricity [m]
h	Gas film thickness [m]
$K_{ij=X,Y}$	Bearing stiffness coefficients [N/m]
N_f	Number of foils (pads)
p	Gas film pressure [Pa]
r_p ,	Bearing radial preload [m]
R ,	Bearing journal radius [m]
t ,	Time [sec]
w_d	Foil elastic deflection [m]
x, z	Coordinate system on plane of bearing [m]
X, Y	Inertial coordinate system [m]
μ ,	Gas absolute viscosity [Pa-s]
Θ	Pad angular coordinate [rad]
Θ_p	Preload offset angle [rad]
Ω	Rotor angular velocity [rad/s]

Acknowledgements

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20134040200580)와 한국과학기술연구원(KIST)에서 지원하는 “3 pad top foil 가스 포일 베어링의 동특성 및 열해석” 연구과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Agrawal, G. L., “Foil Air/Gas Bearing Technology-an Overview,” ASME paper No. 97-GT-347, 1997.
- [2] Kim, T. H. and San Andrés, L., “Heavily Loaded Gas Foil Bearings: A Model Anchored to Test Data,” ASME J. Eng. gas turbines Power, Vol. 130, No. 1, p. 012504, 2008.
- [3] San Andrés, L. and Kim, T. H., “Analysis of Gas Foil Bearings Integrating FE Top Foil Models,” Tribol. Int., Vol. 42, No. 1, pp. 111-120, 2009.
- [4] Kim, T. H., Breedlove, A. W., and San Andrés, L., “Characterization of a Foil Bearing Structure at Increasing Temperatures: Static and Dynamic Force Perfor-

- mance," ASME J. Tribol., Vol. 131, No. 4, p. 041703, 2009.
- [5] Heshmat, H., Shapiro, W., and Gray, S., "Development of Foil Journal Bearings for High Load Capacity and High Speed Whirl Stability," ASME J. Lubr. Technol., Vol. 104, pp. 149-156, 1982.
- [6] DellaCorte, C., and Valco, M. J., "Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications," NASA/TM-2000-209782, 2000.
- [7] Kim, T. H., San Andres, L., "Effects of a Mechanical Preload on the Dynamic Force Response of Gas Foil Bearings: Measurements and Model Predictions," STLE Tribol. Trans., Vol. 52, No. 4, pp. 569-580, 2009.
- [8] Sim, K., Lee, Y.-B. Kim, T. H., "Effects of Mechanical Preload and Bearing Clearance on Rotordynamic Performance of Lobed Gas Foil Bearings for Oil-Free Turbochargers," STLE Tribol. Trans., Vol. 56, pp. 224-235, 2013.
- [9] Kim, D., "Parametric Studies on Static and Dynamic Performance of Air Foil Bearings with Different Top Foil Geometries and Bump Stiffness Distributions," ASME J. Tribol., Vol. 129, No. 2, pp. 354-364, 2007.
- [10] Iordanoff, I., "Analysis of an Aerodynamic Compliant Foil Thrust Bearing: Method for a Rapid Design," ASME J. Tribol. Vol. 121, pp. 816-822, 1999.