

◆특집◆ 1.2MW급 터보블로워의 가공 및 설계 연구

1.2MW급 터보블로워용 틸팅패드 저널베어링의 설계에 관한 고찰

조현민*, 정훈형*, 김재실#, 조수용**

A Review on the Design of a Tilting Pad Journal Bearing for a 1.2MW Turbo-blower

Hyeon-Min Jo*, Hoon-Hyung Jung*, Chae-Sil Kim#, Soo-Yong Cho**

(Received 3 March 2011; received in revised form 13 April 2011; accepted 22 April 2011)

ABSTRACT

This article provides the systematic design methodology for a tilting pad journal bearing. First the dynamic factors for the bearing are selected with the critical speed analysis. The pad bearing is then designed to have its best mechanical efficiency by simulations with changing of the number of pad and the lubricant flow rate with meeting the design specifications such as metal temperature, clearance and so on. And the simulation results are reviewed to compare with an experimental test. Finally the stability of rotor with the designed bearing is investigated. This methodology is successfully applied to the rotor for 1.2MW turbo-blower.

Key Words : Tilting Pad Journal Bearing(틸팅 패드 저널 베어링), Metal Temperature(메탈 온도), Critical Speed(임계 속도), ARMD (Advanced Rotating Machinery Dynamics)

1. 서 론

식품생산공장에서 미생물과 물질과의 혼합을 하기 위한 폭기용이거나 화학 플랜트의 케미칼 리액션(chemical reaction)과 폐수처리장의 폭기조에 산소공급을 할 경우에 사용되는 대형 고효율 터보블로워의 개발이 요구된다. 고효율을 달성하려면 임펠러의 공력효율 뿐만 아니라 베어링의 기계적인 효율을 높여야 한다. 일반 저널베어링에서 발생하는 오일휠과 오

일휠 등의 불안정현상을 극복을 위하여 개발된 틸팅패드 저널베어링은 내면이 배빗메탈로 입혀져 있는 3~6개의 패드로 구성되어 있고, 운전 시 각 패드에 유막 압력이 최적으로 형성될 수 있도록 축에 따라 자유롭게 경사 및 선회될 수 있는 구조로 되어 있으며 우수한 동적 안정성으로 고속 회전기계에 널리 사용된다. 하지만 기하학적 복잡성과 경계조건의 설정이 어려워 정확한 동특성을 예측하기 어렵다. 따라서 회전축의 안정성 및 베어링의 효율이 최대가 되도록 하기 위한 체계적인 설계기술을 확보하는 것이 필요하다.

Wilcock^[1]는 유막의 온도상승 및 난류현상이 베어링의 동적계수에 미치는 영향과 유막의 온도상승과 유막압력으로 인한 패드의 열탄성 변형이 베어링의 예압과 유막두께에 미치는 영향을 제시하

* 창원대학교 대학원 기계공학전공
교신저자 : 창원대학교 기계공학전공
E-mail : kimcs@changwon.ac.kr
** 경상대학교 항공우주시스템공학과

였다. Knight^[2]는 윤활유의 열전달 특성을 고려한 베어링의 특성을 제시하였고, Hopf^[3]는 층류와 난류의 사이의 과도기적 영역에서 동작 시 베어링의 특성을 제시하였다. Harngozo^[4]는 Differential Lubricant Method의 효과를 제시하였다.

Dmochowski^[5]는 틸팅패드 저널베어링의 그루브 가장자리의 열특성을 제시하였으며 Taniguchi^[6]는 입구온도가 베어링의 열성능을 예측하는데 매우 중요하다고 지적하였다. Knight & Barrett^[7]은 유막 온도의 상승으로 베어링의 강성 및 감쇠계수가 감소된다고 보고하였다. Nilsson^[8]은 피벗의 변형이 베어링의 강성을 작게 한다고 보고하였다.

위와 같이 틸팅패드베어링의 유동 및 열특성 등에 대한 연구는 수행되고 있지만 설계에 대한 발표는 미흡한 실정임으로 본 논문에서는 틸팅패드 저널베어링을 소개하고 회전체 시스템의 안정성을 고려한 터보블로워용 틸팅패드 저널베어링의 체계적인 설계방법에 대해 고찰한다.

2. 틸팅패드 저널베어링 설계

Fig. 1은 틸팅패드 저널베어링이 장착되는 1.2 MW급 터보블로워의 임펠러 축으로써 9,125rpm으로 회전한다. 틸팅패드 저널베어링의 설계 기준은 터보블로워의 특성을 감안하여 0.12 mm의 간극과 75℃ 이하의 메탈온도를 만족하여야 한다.

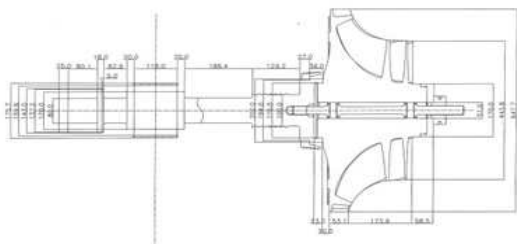


Fig. 1 Schematics of rotor for turbo blower

2.1 베어링 동적 계수 선정

우선 회전체시스템의 고속안정성에 영향을 미치는 베어링의 강성을 결정하기 위해 회전체시스템의 위험속도 해석을 실시한다. Fig. 2는 회전체와

베어링 해석이 동시에 가능한 상용 회전체 해석틀인 ARMD를 사용하여 회전체 시스템과 동일한 질량과 관성모멘트를 가지도록 작성하여 틸팅패드 저널베어링의 장착위치를 정의한 회전체의 유한요소모델을 나타낸다.

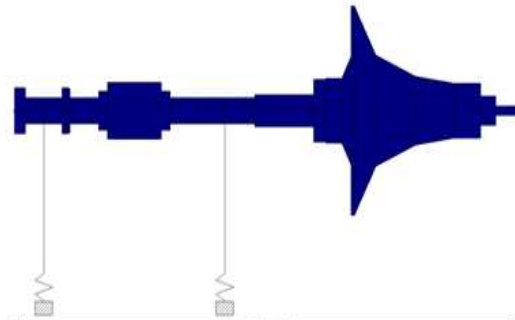


Fig. 2 Finite element model of rotor

Fig. 3는 위험속도 해석결과로 베어링의 강성에 대한 회전체 시스템의 고유진동수를 나타낸다. 9,125rpm의 회전속도에서 공진이 발생하지 않기 위한 틸팅패드 저널베어링의 강성은 $1 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 보다 커야한다.

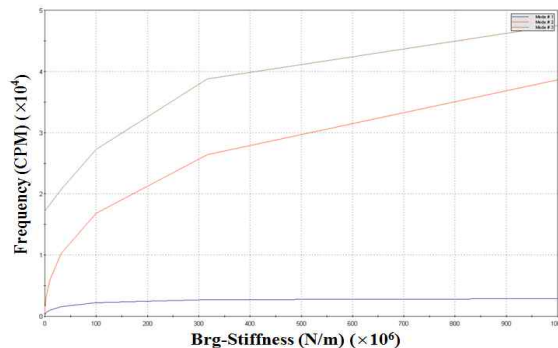
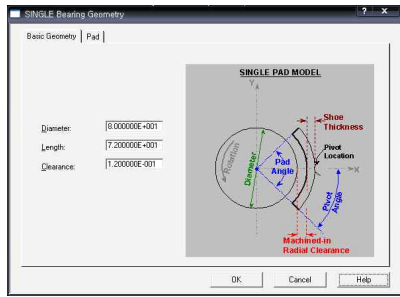


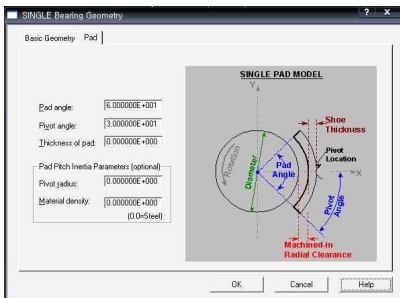
Fig. 3 Critical speed map for the rotor

2.2 패드 형상 설계 및 해석

ARMD를 이용하여 틸팅패드 저널베어링의 설계를 하기 위하여 먼저 Fig. 4에서와 같이 지름, 길이, 간격, 패드각도 및 피벗각도 등 기초형상을 입력한다. 지름의 경우 축의 지름과 동일하며 간격은 설계 조건의 값을 사용한다. Fig. 5는 입력값으로 완성된 틸팅패드 저널베어링의 유한요소모델을 나타낸다.



(a) Geometry



(b) Pad

Fig. 4 Basic geometry of tilting pad journal bearing

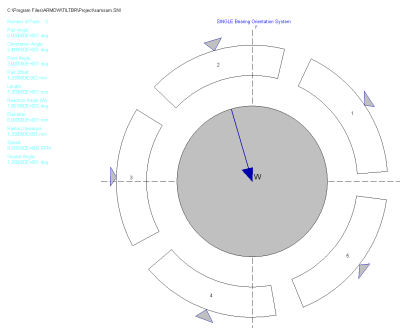


Fig. 5 Finite element model of bearing

다음 Fig. 6에서와 같이 윤활유의 종류와 공급온도, 공급유량을 정의한다. 그리고 베어링 하중, 하중방향, 예비하중을 정의한다. 패드개수와 공급유량은 틸팅패드 베어링의 유막온도에 영향을 미치는 설계변수이므로 패드개수와 공급유량의 변화에 따른 베어링 해석을 다수 실행하여 설계규격인 유막온도 75℃를 만족하는 윤활유의 공급온도와 공급유량을 결정한다. 블로위에 사용되는 윤활유는 ISO Grade 32 Oil이다.

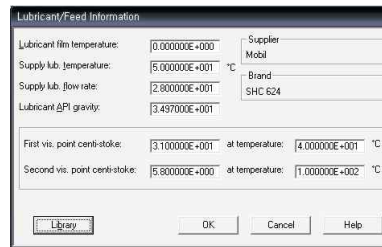


Fig. 6 Lubrication condition of bearing

Fig. 7은 틸팅패드 저널베어링의 해석결과를 나타내며 틸팅패드 저널베어링의 최소유막두께, 동력손실, 유막온도, 메탈온도, eccentricity, 강성과 감쇠를 알 수 있다. Fig. 8은 해석결과를 3차원으로 나타낸다. Fig. 9는 윤활유 유량과 패드의 수에 따른 유막온도를 나타낸다. Fig. 10은 윤활유 공급유량과 패드의 수에 따른 손실동력을 나타낸다. 해석 결과를 바탕으로 윤활유 유량 28 l/min, Pad의 수 5개인 베어링을 설계하였으며 이때의 강성은 $2.161 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 로 강성 조건인 $1 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 이상을 만족한다.

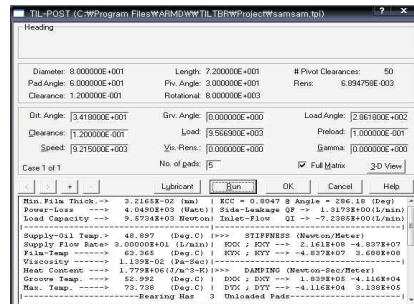
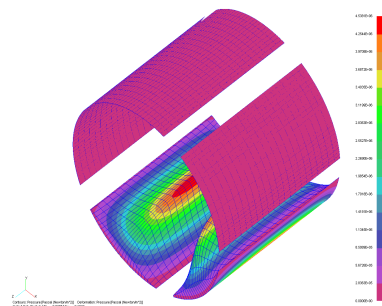
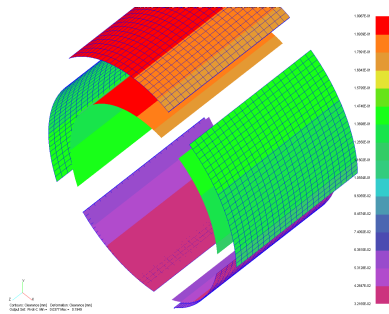


Fig. 7 Analysis result of tilting pad journal bearing



(a) Pressure



(b) Clearance

Fig. 8 3D results for pressure and clearance

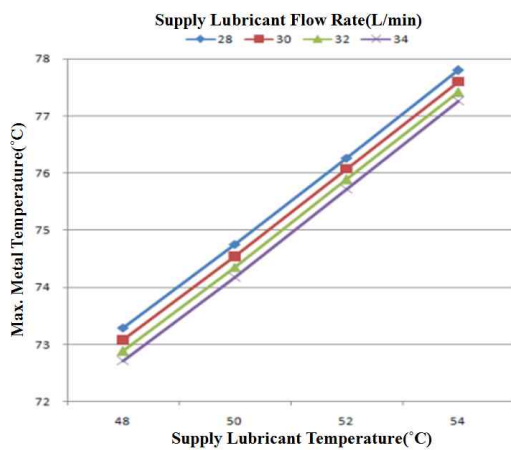


Fig. 9 Metal temperatures according to supply lubricant temperature and supply lubricant flow rate

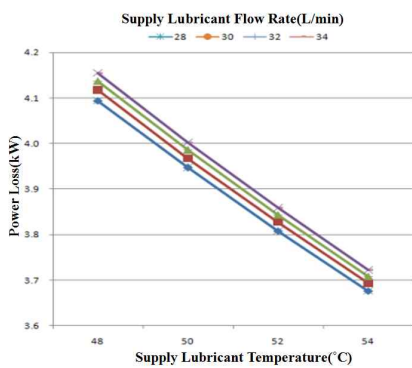


Fig. 10 Power loss according to supply lubricant temperature and supply lubricant flow rate

3.3 설계 검증 테스트

ARMD를 사용한 틸팅패드 저널베어링의 해석 결과의 검증을 위해 5패드 틸팅패드 저널베어링을 제작하여 실험을 실시하였다. Fig. 11은 제작된 5패드 틸팅패드 저널베어링의 모습을 나타낸다. 패드에 온도 센서를 부착하여 베어링 작용하중과 축의 회전속도에 따른 베어링의 메탈온도를 측정하고 해석 결과와 비교하고자 한다.

실험장치는 전원판넬, 모터, 윤활유 공급장치, 시험장치, 공기 벨로우즈, 데이터 측정장치로 구성되어 있다. 전원판넬은 시험 장비의 운전 및 정지, 회전축의 속도를 조절하고 시험베어링 하부에 설치되어 있는 공기 벨로우즈를 통해 압축공기를 주입하여 베어링에 가해지는 하중을 부가한다.



Fig. 11 Prototype of 5 pad tilting pad journal bearing for experiment

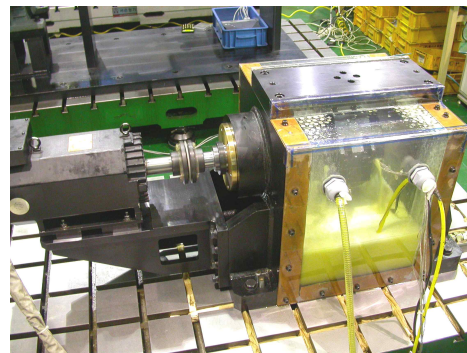
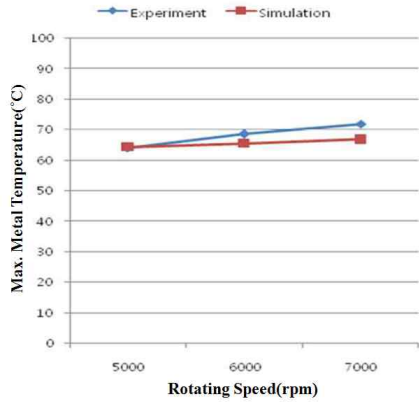
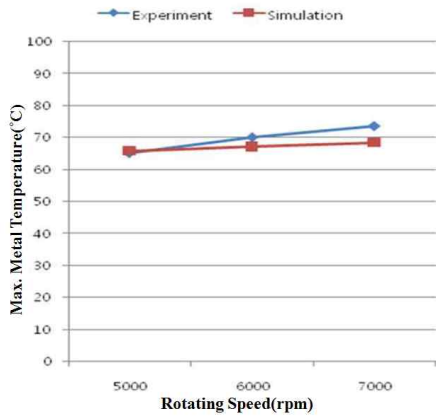


Fig. 12 Running experiment



(a) Load : 865kg



(b) Load : 975kg

Fig. 13 Metal temperature according to bearing load and rotating speed

압력 조절장치에 하중 계측기가 장착되어 있어 하중의 크기가 조절 가능하다. 윤활유 공급장치의 온도 조절장치를 통해 윤활유 공급 온도를 조절 가능하다. 전원판넬을 통해 회전속도를 변경하고 윤활유 공급장치를 통해 윤활유의 공급온도를 변경하면서 데이터 측정장치를 통해 베어링의 메탈 온도를 측정한다. Fig. 12는 가동 중인 실험장치의 모습을 나타낸다.

베어링의 메탈온도 측정실험은 45°C의 윤활유를 28 l/min의 유량으로 공급하면서 베어링 작용하중을 865kg과 975kg으로 축의 회전속도를 5000rpm과 6000rpm 그리고 7000rpm으로 변화 시키면서 실시

한다. Fig. 13은 베어링 작용하중과 축의 회전속도에 대한 베어링 메탈온도의 실험값과 이론값으로 해석과 실험 결과를 비교하였을 때 최대 오차율 4.3% 정도로 매우 유사한 결과를 보인다.

3.4 회전체 시스템의 안정성 분석

회전체 시스템의 안정성 해석을 위해 먼저 축의 유한요소모델에 축의 회전속도에 따른 설계된 틸팅패드 저널베어링의 강성과 댐핑을 적용한다. ARMD Rotor Dynamics 모듈상의 Stability Map 해석을 통해 축의 안정성을 판단한다. 설계된 터보블로워의 안정성 해석 결과는 Fig. 14와 같으며 1차 모드의 고유 진동수는 6,000rpm ~ 1,200rpm 영역이 아닌 3,000rpm에 존재하기 때문에 축의 안정성이 확보되었다고 판단된다.

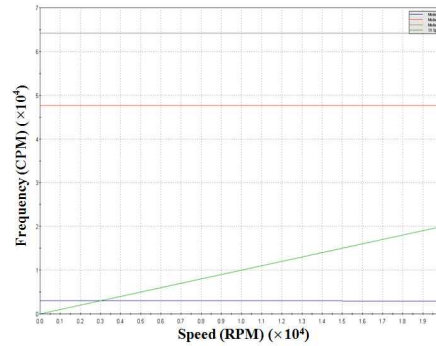


Fig. 14 Stability map of rotor



Fig. 15 Design procedures of tilting pad journal bearing

4. 결 론

본 연구를 통해서 설계조건을 만족하면서 회전축의 안정성이 보장될 수 있는 틸팅패드 저널베어링의 체계적인 설계방법을 Fig. 15와 같이 제시한다. 이를 1.2MW급 터보블로워용 틸팅패드 저널베어링에 적용하여 일련의 설계 과정을 수행해 보았다. 회전축의 위험속도 해석을 통해 강성과 설계조건을 만족하도록 하였고, 틸팅패드 저널베어링의 메탈온도 측정실험을 실시하여 시뮬레이션 값을 검증하였다. 그리고 설계된 터보블로워용 틸팅패드 저널베어링의 강성과 감쇠가 적용된 회전축의 고유진동수 해석을 통해 회전축의 안정성 분석을 실시하였다. 이 설계방법은 향후 틸팅패드 저널베어링을 장착한 회전축의 설계에 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 [RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Wilcock, D. F. and Pinkus, O., 1985, "Effects of Turbulence and Viscosity Variation on the Dynamic Coefficients of Fluid Film Journal Bearing", ASME Journal Tribology, Vol. 107, pp. 256-262.
2. Knight, J. D. and Barret, L. E., 1988, "Analysis of Tilting Pad Journal Bearings With Heat Transfer Effects", ASME Journal Tribology, Vol. 110, pp. 128-133.
3. Hopf, G. and Schuler, D., 1989, "Investigations on Large Turbine Bearings Working Under Transitional Conditions Between Laminar and Turbulent Flow", ASME Journal Tribology, Vol. 111, pp. 628-634.
4. Harangozo, A. V., Stolarski, T. A. and Gozdawa, R. J., 1991, "The Effect of Differential Lubrication Methods on the Performance of a Tilting Pad Journal Bearing", STLE Tribology Transaction, Vol. 34, pp. 529-536.
5. Dmochowski, W., Brockwell, K., DeCamillo, S. and Mikula, A., 1993, "A Study of the Thermal Characteristics of the Leading Edge Groove and Conventional Tilting Pad Journal Bearings", ASME Journal of Tribology, Vol. 115, pp. 219-226.
6. Taniguchi, S., Markino, T., Takeshita, K. and Ichimura, T., 1990, "A Thermohydrodynamic Analysis of Large Tilting Pad Journal Bearing in Laminar and Turbulent Flow Regimes with Mixing", ASME Trans., J. of Tribol., Vol. 113, No. 3, pp. 615-619.
7. Knight, J. D. and Barrett, L. E., 1980, "Analysis of Tilting Pad Journal Bearings With Heat Transfer Effects," ASME Trans., J. of Tribol., Vol. 110, No. 1, pp. 128-133.
8. Nillson, L. R. K., 1978, "The influence of bearing flexibility on the dynamic performance of radial oil film bearings," Proceedings of the fifth Leeds-Lyon Symposium on Tribology, pp. 311-319.