

Multiphysics Software를 활용한 원심 압축기용 틸팅 패드 저널 베어링 특성과 회전체 동역학 분석

문소연¹ · 윤종완¹ · 박상신^{2*}

¹영남대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

²영남대학교 기계공학부 교수

Analysis of Tilting Pad Journal Bearing Characteristics and Rotordynamics for Centrifugal Compressors Using Multiphysics Software

Soyeon Moon¹, Jongwan Yun¹ and Sangshin Park^{2*}

¹Master Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University

²Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received October 23, 2023 ; Revised November 7, 2023 ; Accepted November 8, 2023)

Abstract – This study explores the characteristics of tilting pad journal bearings used in the high-speed rotating shaft systems of centrifugal compressors. A centrifugal compressor is a high-speed rotating machine that is widely used to compress gases or vapors employed in various industrial applications. It transfers the centrifugal force of a fast-spinning impeller to the fluid and compresses it under high pressure. Many high-speed rotating shaft systems, which require high stability, use tilting pad journal bearings. The characteristics of these bearings can vary depending on several properties, and identifying the appropriate characteristics is essential to optimize the design on a case-to-case basis. In this study, the authors perform a time-dependent analysis of the properties of tilting pad journal bearings and the rotordynamics of the rotating shaft system using COMSOL Multiphysics software. Specifically, the authors analyze the characteristics of the tilting pad journal bearings by performing a parametric sweep using parameters such as pad clearance, maximum tilting angle, preload, number of pads, and pad pivot offset. The authors then use the results of the bearing-characteristics analysis to evaluate the vibration of the rotating shaft and verify its operation within a desirable range. The understanding gained from this study will allow us to determine the optimal properties of these bearings and the limiting operational speed using COMSOL Multiphysics software.



© Korean Tribology Society 2023. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – Rotordynamics(회전체 동역학), FEM(유한요소법), Tilting pad journal bearing(틸팅 패드 저널 베어링), Multiphysics(다중물리)

1. 서 론

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 활용하여 원심 압축기용 틸팅 패드 저널 베어링 특성과 회전체 동역

*Corresponding author: SangShin Park

Tel: +82-53-810-3538, Fax: +82-53-810-4627

E-mail: pss@ynu.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-1201-558X>

학 분석을 진행하였다. 원심 압축기는 고속으로 회전하는 임펠러의 원심력을 이용해 유체를 압축하는 용도로써 산업 현장에서 널리 사용된다. 회전체 시스템은 회전 운동 및 토크 전달의 역할을 하는 회전축과 축의 하중 지지 및 원활한 회전 운동을 돕는 베어링 그리고 회전축에 부착되는 다양한 기계 요소로 구성된다. 특히, 회전축은 자전을 통해 동력을 전달하도록 설계되었으나 실제 사용 시 재료 밀도의 불균일한 분포나 편심 질량으로 인해 불균형 상태에서 공전 궤도를 그린다. 회전축의 자전과 공전으로 인한 진동 현상은 실제 작동 상황에서 피할 수 없는 요소로서 이를 사전에 계산하고 사용 가능한 범위 내에 있는지를 파악하는 것이 요구된다[1].

이러한 시스템은 사용되는 용도에 따라 다양한 베어링에 의해 지지될 수 있지만, 고속 회전인 경우 틸팅 패드 저널 베어링이 널리 사용된다[2]. 틸팅 패드 저널 베어링의 특성은 다양한 설계 변수에 따라 달라질 수 있으며, 적절한 상황에 맞도록 최적화해야 한다. Jeong [3]은 틸팅 패드 저널 베어링으로 지지되는 압축기에 대한 회전체 동역학 분석을 진행한 바 있다.

베어링 해석과 축 진동 해석을 연동하기 위한 소프트웨어로는 XL Rotor Software, DyRoBes, SMADYN2000 등이 있으며, 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 효과적으로 활용할 수 있는 방법을 소개하고자 한다. COMSOL Multiphysics는 간단한 변수 변경만으로 모델링 및 해석 조건을 다르게 할 수 있다는 장점이 있으며, Parametric sweep 기능을 통해 다양한 변수에 대한 결과를 한 번에 확인할 수 있다. 이는 여러가지 설계 변수에 종속되는 틸팅 패드 저널 베어링의 특성 해석 및 최적의 베어링 설계 변수를 선정하는데 적합하다. 또한 COMSOL Multiphysics에 포함된 Acoustic 등의 Physics와 연동해 NVH(Noise, Vibration and Harshness) 성능을 고려한 설계할 수 있다.

2. 연구방법 및 내용

본 연구에서 사용된 정격 속도 10,000 rpm에서 동작하는 소형 원심 압축기 회전축의 유한요소 모델과 각 요소에 대한 정보가 Fig. 1과 Table 1에 나타나 있다. 회전축의 전체 길이는 90 mm이며, 20개의 요소와 21개의 노드로 이루어져 있다. 해당 시스템은 2개의 틸팅 패드 저널 베어링으로 지지되며 각각 7번(Bearing 1)과 15번(Bearing 2) 노드를 중앙으로 하여 장착되어 있다.

압축기를 구성하는 기계 요소인 커플링과 임펠러는 디스크 형상으로 무게 및 불평형 질량을 부가하였다. 커플

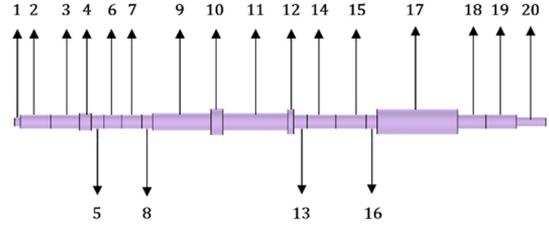


Fig. 1. Finite element modeling for rotor.

Table 1. Element size for rotor

Element	Length [mm]	Diameter [mm]	Element	Length [mm]	Diameter [mm]
1	9.9	30	11	110	58
2	50	47.6	12	10	85
3	50	47.6	13	20	47.6
4	20	60	14	50.8	47.6
5	20	47.6	15	50.8	47.6
6	31.75	47.6	16	20	47.6
7	31.75	47.6	17	135	85
8	20	47.6	18	33.3	47.6
9	100	58	19	66.7	47.6
10	20	90	20	50	30

Table 2. Disk parameter

	Coupling	Impeller
Node	3	19
Density [kg/m ³]	7,800	1,350
Diameter [mm]	48	253.85
Thickness [mm]	100	150
Unbalanced mass [kg·mm]	141.145	20.497

링 디스크는 3번 노드, 임펠러 디스크는 19번 노드에 위치한다. 각 디스크에 대한 물성치 정보는 Table 2에 나타나 있다.

회전축 시스템을 지지하는 두 개의 틸팅 패드 저널 베어링은 LOP(Load on Pad)와 LBP(Load between Pad) 형상으로 모델링 하였다. 본 연구에서는 틸팅 패드 저널 베어링의 특성을 구분 짓는 다양한 설계 변수를 변경시키며 회전축의 동역학적 결과 변화를 확인하였다. 틸팅 패드 저널 베어링의 설계 변수에 대한 자세한 정보는 Table 3에 나타나 있다.

각 베어링은 지름이 47.6 mm이며 베어링 폭은 Bearing 1이 101.6 mm, Bearing 2가 63.5 mm이다. 마지막으로 회전축의 물성치는 일반 강 밀도인 7,800 kg/m³으로 가

Table 3. Tilting pad journal bearing parameters

	Bearing 1	Bearing 2
Configuration	LOP	LBP
Size [mm]	101.6 × 47.6	63.5 × 47.6
Pivot type	Line	
Pivot offset(β)	0.5	
Preload	0.35	
Max. tilting angle [deg]	0.04	
Pad number	5	
Pad thickness [mm]	4	
Pad density [kg/m ³]	7,800	
Clearance [μm]	50	

정하였다.

COMSOL Multiphysics의 Parametric sweep을 사용하여 틸팅 패드 저널 베어링의 설계 변수 변화에 따른 회전축 시스템의 동특성 해석을 진행하였다. Parametric sweep에 사용한 설계 변수는 Clearance, Max. tilting angle, Preload, Pivot offset(β), Pad number이며 추가적으로 회전축의 회전 속도와 임펠러 디스크의 불평형 질량 변화에 따른 동특성 해석도 진행하였다. 가장 먼저 Clearance가 30 μm ~ 70 μm 일 때의 Bearing 1 위치에서의 회전축 공전 궤도가 Fig. 2에 나타나있다.

위 그림에서 볼 수 있듯이 Clearance가 충분하지 않다면 회전축 궤도는 수렴하지 못하고 불안정하게 나타난다. 또한 너무 큰 Clearance로 베어링을 설계한다면 회전 궤도가 발산하는 모습을 볼 수 있으며 적절한

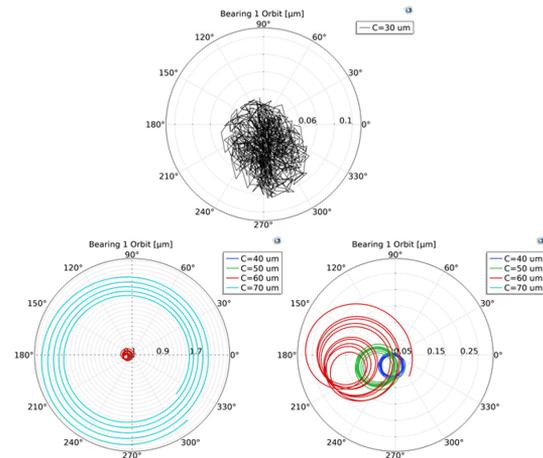


Fig. 2. Clearance sweep result.

Clearance의 선정이 필요한 것을 알 수 있다.

다음으로 Preload, Pivot offset(β), Max. tilting angle, 임펠러 불평형 질량 변화에 따른 회전축 공전 궤도 변화 양상이 Fig. 3에 나타나 있다.

틸팅 패드 저널 베어링의 Preload는 패드의 곡률 중심과 회전축 중심이 일치할수록 즉, Preload 값이 0에 가까울수록 회전축이 안정된 회전 영역에 존재한다[4]. Fig. 3 (a)에서 볼 수 있듯이 Preload가 커질수록 회전축 궤도 반경이 증가하고 중심에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4와 같이 패드와 축 사이의 유막은 패드의 틸팅 및 축의 편심 궤도에 의해 한쪽으로 치우친 압력 분포를 만들어낸다. 이러한 이유로 패드 Pivot의 위치를 적절하

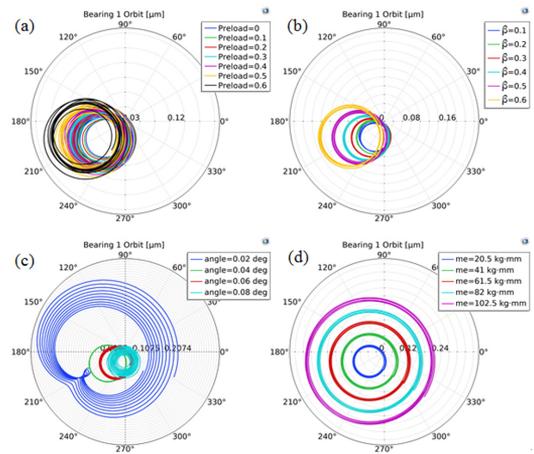


Fig. 3. Parametric sweep results. (a) Preload (b) Pivot offset (c) Max. tilting angle (d) Impeller disk mass unbalance.

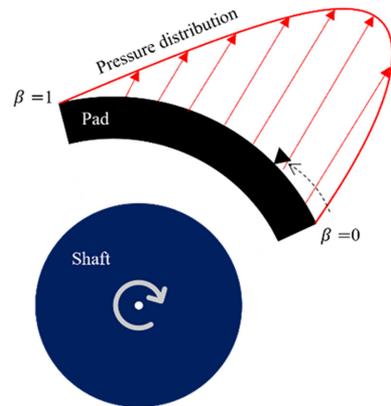


Fig. 4. Pad pressure distribution.

게 선정해야 패드 압력을 안정적으로 지지할 수 있다. 본 해석에서는 $\beta=0.1$ 인 경우 패드 압력을 가장 적절하게 지지할 수 있었다.

Fig. 3(c)는 최대 패드 틸팅 각도에 따른 공전 궤도 변화이다. 최대 패드 틸팅 각도가 0.02 deg일 경우 궤도가 불안정하며 0.06 deg에서 가장 안정적인 모습을 보였다. 이어서 Fig. 3 (d)는 임펠러 디스크의 질량 불평형에 따른 공전 궤도 변화이다. 디스크의 불평형 질량이 커질수록 공전 궤도 반경이 따라서 증가하는 것을 확인할 수 있다.

패드 개수에 따른 회전축 궤도 변화는 Fig. 5를 통해 알아볼 수 있다. 틸팅 패드 저널 베어링은 2 개 이상의 패드로 설계되며 3~5개의 패드가 널리 사용된다. Fig. 5에 볼 수 있듯이 8개 이상의 패드를 사용하면 점점 불안정한 회전 영역으로 들어가기 쉬워지는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 6은 회전축 회전 속도에 따른 공전 궤도 변화이다. 축의 회전 속도가 7,000 rpm일 때 궤도 반경이 증가하였다가 8,000 ~ 11,000 rpm에서 안정된 궤도를 보인다. 이후 13,000 rpm부터 더욱 큰 궤도 반경을 그리며 불안정한 영역에 들어섰음을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics 프로그램을 활용하여 원심 압축기에서 틸팅 패드 저널 베어링 특성 변화에 따른 회전체의 동역학적 변화를 해석하였다. 틸

팅 패드 저널 베어링 특성은 다양한 설계 변수에 종속되어 있으며, 이러한 설계 변수가 변화함에 따라 회전축의 동역학적 결과가 크게 달라지는 것을 COMSOL Multiphysics 프로그램을 통해 확인하였다.

특정 Clearance는 회전축을 불안정한 영역에서 동작하게 할 수 있으므로 최적의 Clearance 선정이 필요한 것을 Fig. 2를 통해 확인하였다. 또한 Preload가 0에 가까울수록 회전축이 안정된 궤도를 돌며 회전하기 때문에 회전축 시스템 설계 시 Preload를 줄일 필요가 있다. 추가적으로 적절한 Pivot offset(β)과 Max. tilting angle이 틸팅 패드 저널 베어링 설계 시 중요한 요소임을 COMSOL Multiphysics 프로그램의 해석 결과를 통해 확인할 수 있었다. 임펠러 디스크의 질량 불평형이 커질수록 회전축 공전 궤도 반경 또한 증가하기 때문에 불평형 질량을 최소화하는 것 역시 중요하다.

틸팅 패드 저널 베어링을 이루는 틸팅 패드의 개수 역시 회전체 시스템 특성을 파악하는 데 중요한 역할을 한다. Fig. 5에 따르면 과도한 패드 개수는 오히려 회전축이 불안정한 영역에 머물도록 하는 것을 볼 수 있다. 즉, 틸팅 패드 저널 베어링 설계 시 적절한 패드 개수 선정이 요구된다. 마지막으로 회전 속도 변화에 따른 회전축의 공전 궤도 및 고유 진동수 영역 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. COMSOL Multiphysics의 Parametric sweep을 이용하여 간편하게 회전축 시스템의 고유진동수 영역 및 불평형 공전 궤도 반경을 파악할 수 있었다.

본 연구에서는 단일 변수에 대한 Parametric sweep만 진행하였지만, 다변수 Parameric sweep 또한 가능하며

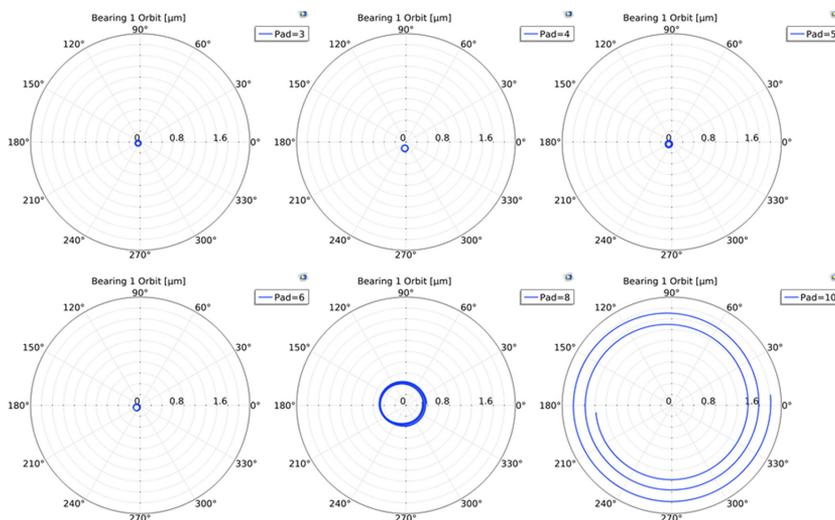


Fig. 5. Pad number sweep result.

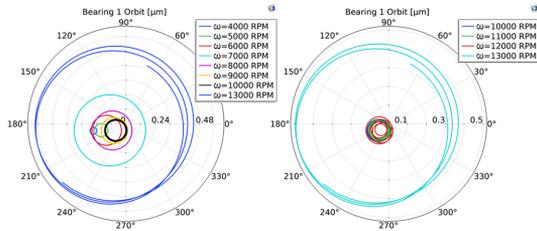


Fig. 6. Rotating speed sweep result.

추후 COMSOL Multiphysics의 다양한 Physics와 연동하여 더욱 심화된 연구를 진행할 수 있을 것이다.

4. 결 론

회전체 베어링 연동 해석을 위한 다양한 프로그램이 유효 및 회전체 동역학 연구에 사용되고 있다. 그 중에서도 COMSOL Multiphysics를 활용하여 효과적으로 틸팅 패드 저널 베어링의 설계 변수를 변화시키며 회전체 동역학 해석 및 회전축 공전 궤도를 계산할 수 있었다. 또한 각 틸팅 패드 저널 베어링 설계 변수마다 어떠한 최적 값을 사용하여야 하는 지 확인할 수 있었으며 이는 추

후 더 복잡한 회전체-베어링 연동 해석에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] Baek, D., "Measurements and Predictions of Rotordynamics Performance of a Motor-Driven Small Turbocompressor Supported on Oil-Free Foil Bearings", *Tribol. Lubr.*, Vol.38, No.2, pp.53-62, 2022, <https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.2.53>
- [2] Jeong, S., "A Study on the Improvement of Rotordynamics Prediction Accuracy of Integrally-gear Turbo Compressor with Tilting Pad Journal Bearing", *Proceedings of the KSFM Winter Conference*, 2022.
- [3] Lee, A., "Design Analysis for Enhancing Rotordynamics Stability of Process High-Speed Light weight Centrifugal Compressor - Part II : Improvements to Rotordynamic Stability", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.30, No.1, pp.9-14, 2014, <https://doi.org/10.9725/kstle.2014.30.1.9>
- [4] J. C. Nicholas., "Tilting Pad Bearing Design", https://dyrobes.com/wp-content/uploads/2016/04/Tilting-Pad-Bearing-Design_linked.pdf