



열변형을 고려한 4패드 저널 베어링 열유동 해석

신현장^{a,*}

CFD Analysis of four-pad Journal Bearing with thermal Expansion

Hyun Jang Shin^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 November 2024
Revised 26 November 2024
Accepted 27 November 2024

Keywords:

2-FSI (2 way-fluid structure interaction)
CFD (computational fluid dynamics)
4 pad tilting pad journal bearing
Gas turbine generator
Thermal expansion

ABSTRACT

The effect of thermal expansion on the performance of tilting pad journal bearings (TPJBs) supporting gas-turbine generator rotors was investigated. As the temperature of the tilting pad increases to about 100°C, thermal expansion can have a significant effect on the bearing performance. In this study, two-way fluid-structure interaction (2-FSI) simulations were performed with and without considering thermal expansion, and the results were compared with a 50% scaled-down model experiment. The tilting pad temperature measured in the experiment was 100.9°C. The simulation without considering thermal expansion predicted a temperature of 88.7°C, and the simulation considering thermal expansion predicted a temperature of 99.7°C. Compared to the experimental results, the simulation without thermal expansion showed an error of 12.1%, and the simulation considering thermal expansion showed an error of 3.9%. These results indicated that the thermal expansion of the tilting pad should be considered to improve the accuracy of the computational fluid dynamics (CFD) simulation.

1. 서론

가스 터빈용 발전기에 사용되는 회전축을 지지하기 위해서는 오일을 이용하는 유체 베어링을 사용한다. 반경 방향을 지지하는 저널 베어링은 틸팅 패드 방식을 주로 사용하는데 틸팅 패드 베어링은 회전축의 움직임에 따라서 틸팅 패드가 움직이면서 하중을 지지하고, 고하중 지지, 흡진성, 내충격성 등의 특징을 가지고 있다^[1]. 틸팅 패드의 피벗 운동을 만들기 위해서 가공이 어렵고 구조가 복잡해지고 높은 비용이 요구되는 단점에도 우수한 안정성 때문에 가스 터빈과 같은 고속기에 사용되고 있다. 틸팅 패드는 경험치와 설계 프로그램을 이용해서 설계가 주로 이뤄졌으며 제작하고 성능 검증이 대단히 어려운 게 현실이었다. 틸팅 패드 베어링

을 실제 크기로 제작해서 성능을 측정하기엔 너무 많은 비용이 들기 때문이다. 본 연구에서는 실물의 50% 축소 모델에 대한 2-FSI 해석을 진행하고 그 결과를 실험 결과와 비교하고자 한다. 기존 연구에서 4패드 저널 베어링 2-FSI(2-way fluid structure interaction) 해석 결과는 설계 프로그램 결과와 비교했으나^[2] 이번 연구에서는 실험 결과와 비교하여 해석의 신뢰도를 검증하고자 한다. 또한 틸팅 패드의 온도가 100도까지 상승하기 때문에 틸팅 패드에 열변형이 생기고 이로 인한 해석 오차에 어떠한 영향을 주는지 확인하고자 연구를 진행했으며 열변형을 고려한 해석과 열변형을 고려하지 않은 해석 결과를 실험 결과와 비교 분석하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-2077

E-mail address: shin7@snu.ac.kr (Hyun Jang Shin).

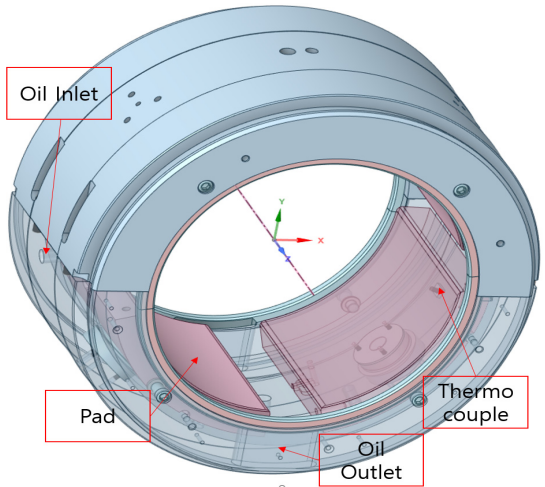


Fig. 1 Layout of tilting pad journal bearing

Table 1 Journal bearing specifications

Type	4 tilting pad
Bearing loading [kg]	6804
Shaft diameter [mm]	104.78
Inlet oil temperature [°C]	54.4
Speed [rpm]	7200
Flow rate [LPM]	107.5
Oil type	VG32

2. 틸팅 패드 베어링 구조

Fig. 1은 (주)동양메탈공업에서 설계한 실험용 50% 축소 모델에 대한 모델링을 나타낸다. 오일 공급을 위한 구멍과 출구 위치 4개의 패드를 나타낸다. 오일 공급은 4개의 구멍을 통해서 70도, 107.5 LPM으로 공급된다. 실험용 베어링의 규격은 Table 1과 같다.

3. CFD 해석

3.1 2-FSI 해석

2-FSI 해석은 양방향 Fluid Structure Interaction을 의미한다. 틸팅 패드 저널 베어링은 로터 축의 이동에 따라서 유체부 압력이 변화하고 이러한 압력은 다시 고체부인 로터와 틸팅 패드의 각도 변화와 변위를 발생시키게 된다. 고체부와 유체부의 상호 작용에 의해서 베어링의 지지능력이 발생하기 때문에 틸팅패드 저널 베어링은 2-FSI 해석이 필수적으로 필요하게 된다. 기존 연구^[2]에서는 고체부와 유체부에 대한 2-FSI 해석을 수행하고 그 결과를 해석 프로그램 결과와 비교를 했다. 기존 연구에서는 고체부의 온도 변화에 따른 변화를 반영하지 못했다. 본 연구에서는 고체부 온도 변화에 따라서 틸팅패드의 열변형까지 고려한 해석을 진행해서 해

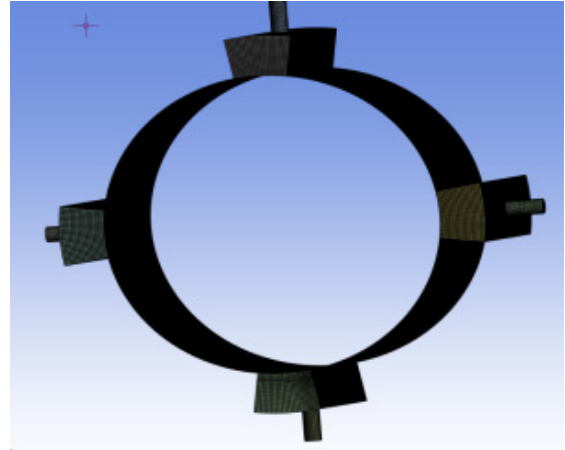


Fig. 2 Mesh for CFD analysis

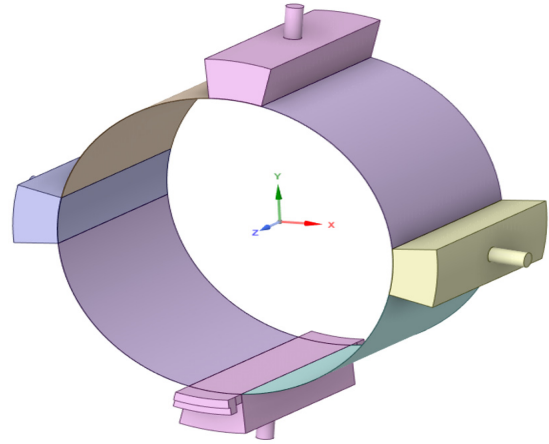


Fig. 3 Fluid part of 2-FSI

석의 정밀도를 높이고자 하였다. Fig. 2는 유체부 메쉬를 나타내고 있다. 노드 수는 487192, 요소 수는 451937개 이다. 해석은 상용 CFD 도구인 ANSYS CFX를 사용하였으며 작동 유체는 VG32, 난류 모델은 SST, 열해석 모델은 Thermal Energy 모델로 해석을 수행했다^[3]. 경계조건은 Table 1을 참조하여 인가하였다.

3.2 열변형 없는 2-FSI 해석

50% 축소 모델에 대해서 열변형을 고려하지 않은 기존의 해석 방법을 적용하여 2-FSI 해석을 진행했다. Fig. 3은 유체부 영역을 나타내고 Fig. 4는 고체부 영역을 나타낸다. 고체부에는 로터의 중력 하중 조건과 4개의 틸팅패드에 대해서는 피벗 위치에 회전을 허용하는 조건을 인가했다. 로터와 패드 사이에는 접촉 조건을 인가하였다. Fig. 5는 로터의 초기 위치를 나타내며 원점에서 0.11 mm 중력 방향으로 이동한 상태에서 해석을 진행했다.

3.2.1 열변형 없는 저널 베어링 2-FSI 해석 결과

Fig. 6은 유체부 해석 결과를 나타내고 있으며 유체부의 압력

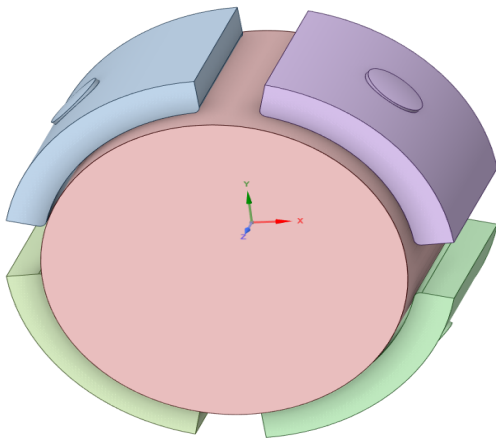


Fig. 4 Solid parts of 2-FSI

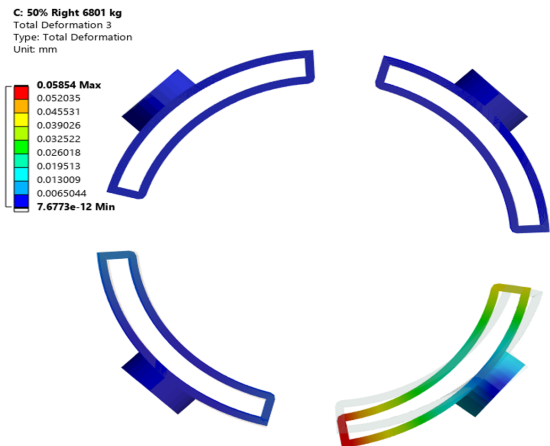


Fig. 7 Displacement of tilting pads without thermal expansion

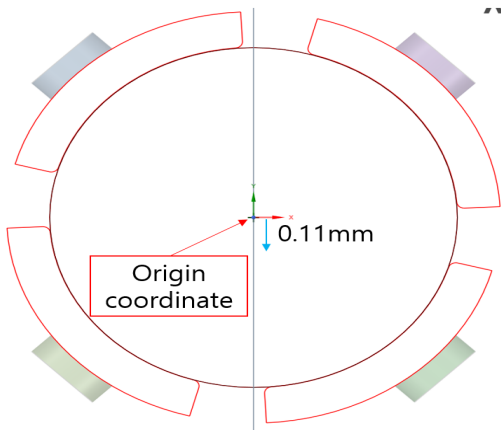


Fig. 5 Initial position of rotor

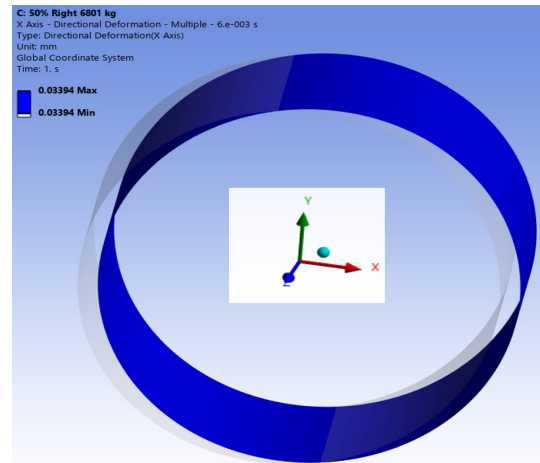


Fig. 8 x-directional displacement of rotor without thermal expansion

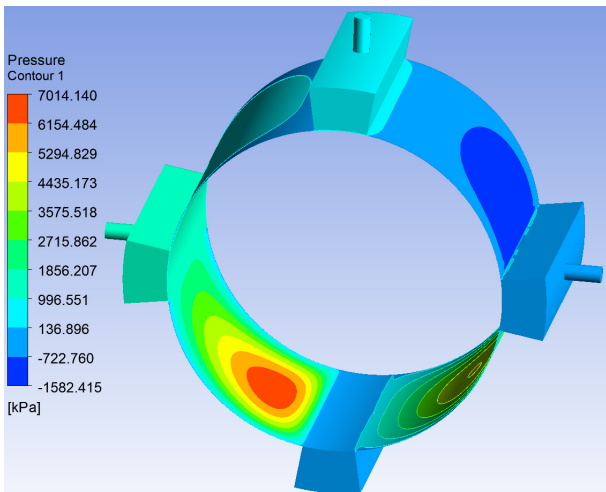


Fig. 6 Pressure distributions of fluid part without thermal expansion

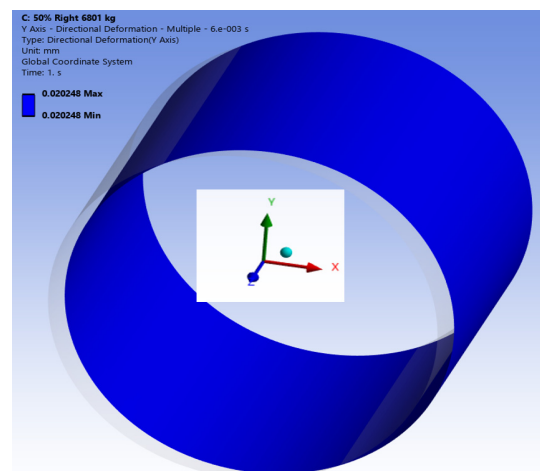


Fig. 9 y-directional displacement of rotor without thermal expansion

분포를 나타낸다. Fig. 7은 고체부 틸팅패드의 변위량을 나타낸다. 4시 방향 틸팅 패드가 가장 많은 변형량을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 로터의 x 방향 변위량을 나타내고 있으며 Fig. 9는 로터

의 y 방향 변위량을 나타낸다. 로터는 초기 위치에서 x 방향으로 0.034 mm, y 방향으로 0.020 mm 이동하였다. 이때 유체부의 최

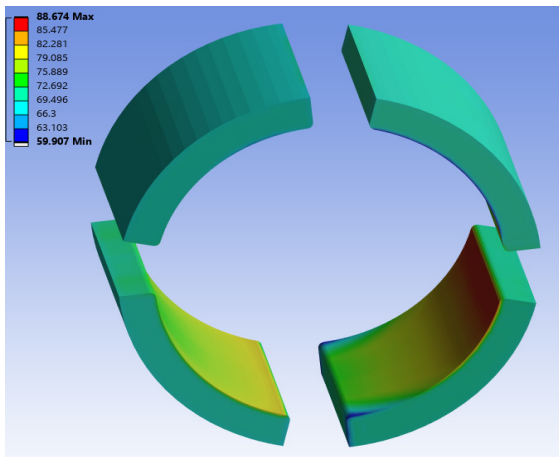


Fig. 10 Temperature distributions of tilting pads without thermal expansion

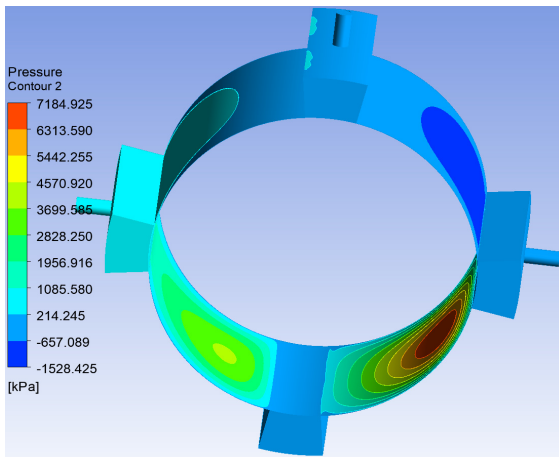


Fig. 11 Pressure distribution of fluid part with thermal expansion

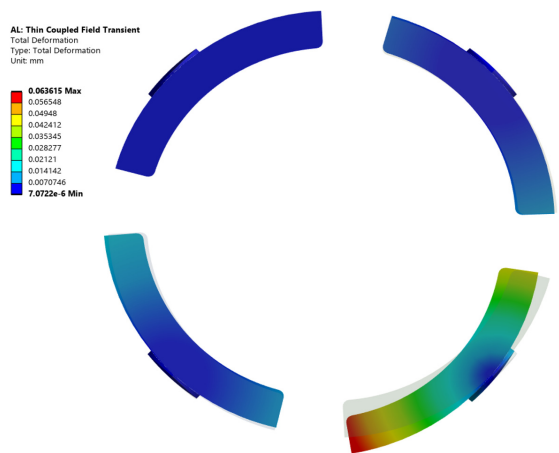


Fig. 12 Displacement of tilting pads with thermal expansion

소 유막 두께는 33 μm 로 계산되었다. Fig. 10은 고체부 틸팅 패드의 온도를 나타낸다. 틸팅 패드의 최고 온도는 4시 방향 틸팅 패드이며 88.7도로 계산되었다.

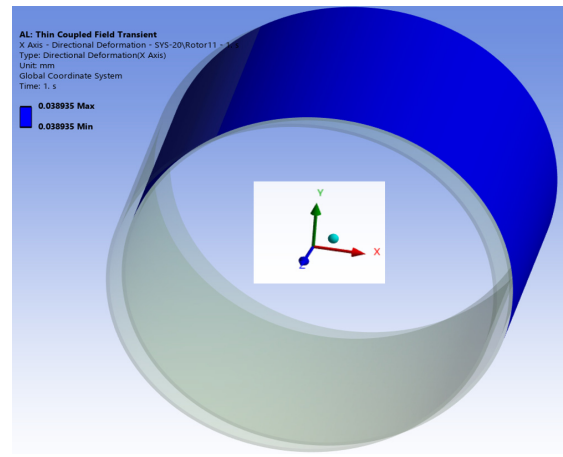


Fig. 13 x-directional displacement of rotor with thermal expansion

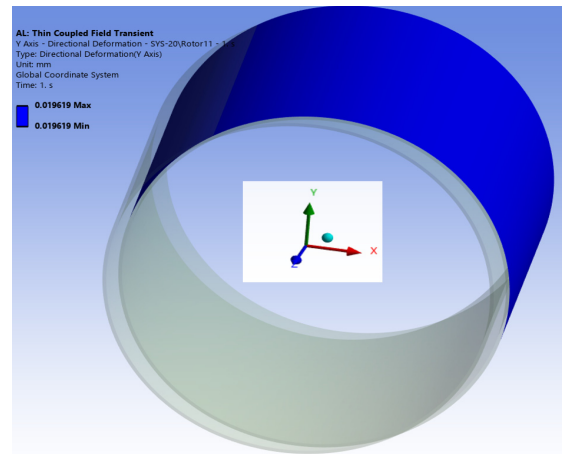


Fig. 14 y-directional displacement of rotor with thermal expansion

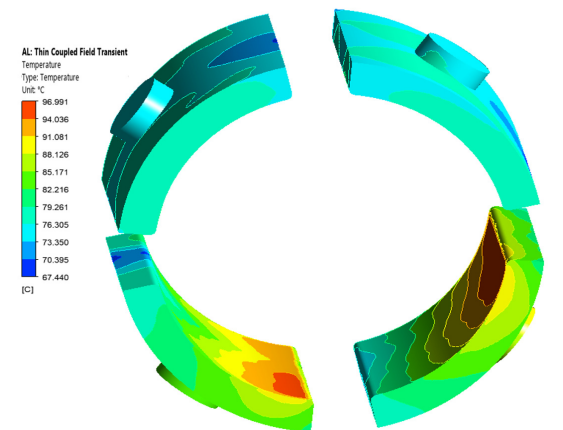


Fig. 15 Temperature distributions of tilting pads with thermal expansion

3.3 열변형 고려한 2-FSI 해석

해석 결과를 보면 틸팅 패드의 최고 온도는 88.7도 정도이다. 틸팅패드의 열변형이 베어링의 성능에 가장 큰 영향을 준다는 사실은 기존 연구에서 밝혀졌다^{4,6}. 대략 90도 정도의 온도에 의해서

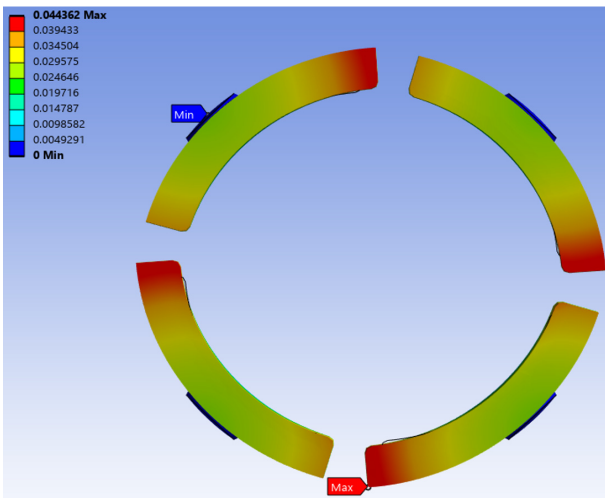


Fig. 16 Thermal expansions of tilting pads

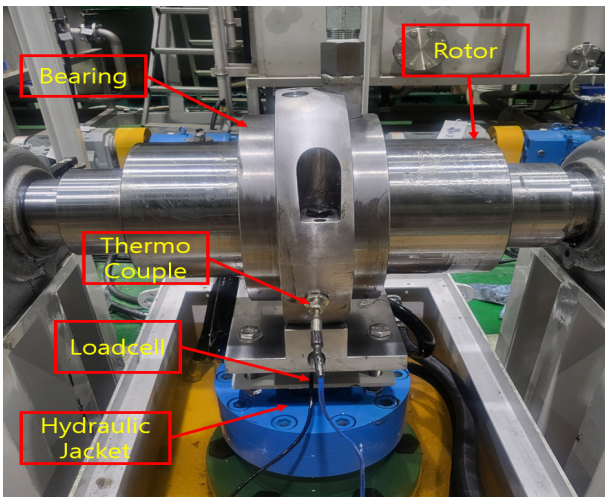


Fig. 17 Experimental jigs for tilting pad journal bearing

틸팅 패드는 열변형을 하게 되고 이를 고려하는 경우 베어링의 성능에 어떠한 영향을 주는지 파악하기 위해서 열변형을 고려한 2-FSI 해석을 진행했다. 해석 조건은 열변형을 고려하지 않은 경우와 동일하게 조건을 입력했으며 틸팅패드의 변형을 고려하기 위해서 ANSYS Coupled Field Transient 모듈을 사용하여 해석을 진행했다.

3.3.1 열변형 고려한 2-FSI 해석 결과

Fig. 11은 열변형을 고려한 2-FSI 해석의 유체부 압력 분포를 나타낸다. Fig. 12는 고체부 틸팅패드의 변위량을 나타낸다. Fig. 13은 로터의 x 방향 변위량을 나타내면 Fig. 14는 로터의 y 방향 변위량을 나타낸다. 로터는 x 방향으로 0.039 mm, y 방향으로 0.020 mm 이동하는 것으로 계산되었다. Fig. 15는 틸팅 패드의 온도분포를 나타낸다. Fig. 16은 이러한 온도분포에 대해서 열적으로 얼마나 팽창되었는지를 나타내는 그림이다. 틸팅 패드의 최

Table 2 Experimental results of tilting pad journal bearing

	Test result			
	1 st	2 nd	3 rd	Average
Rotor speed [rpm]	7,210	7,240	7,206	7,219
Rated load [kg]	6,847	6,837	6,809	6,831
Rated oil flow [LPM]	106.7	107.8	106.8	107.1
Inlet oil temp. [°C]	54.6	54.6	54.2	54.5
Pad temperature [°C]	101.8	100.5	100.4	100.9

고 온도는 97도로 계산되었으며 틸팅 패드는 원주 방향으로 최대 44 μm 팽창하는 것으로 계산되었다. 이러한 패드의 팽창은 2-FSI 계산과정에서 자동으로 고려하여 계산이 진행된다. 최소 유막 두께는 32 μm 로 계산되었다. 로터가 x 방향으로 열변형을 고려하지 않은 경우보다 5 μm 더 이동하는 것으로 계산되었다.

3.4 실험 결과와 고찰

Fig. 17은 실험 장치를 나타낸다. 저널 베어링을 중앙에 설치하고 하부에 로드셀을 설치하고 하부에서 유압 실린더로 하중을 부여하는 구조로 되어 있으며 입구, 출구 오일의 온도와 틸팅패드 베어링의 온도를 측정하는 온도 센서를 설치하여 패드의 온도를 측정하였다. Table 2는 실험 결과를 나타낸다. 3번 실험을 수행했으며 하부에 있는 패드의 온도는 평균 100.9도 측정되었다. 열변형을 고려하지 않은 해석의 패드 온도는 88.7도, 열변형을 고려한 해석의 패드 온도는 97도로 계산되었으며 실험 결과와 오차는 열변형을 고려하지 않은 해석은 12.1%의 오차를 열변형을 고려한 해석은 3.9%의 오차를 나타냈다. 이러한 오차 저감의 원인은 열변형으로 패드가 팽창하게 되고 로터는 좀 더 이동할 공간이 생기게 된다. 이로인해서 로터와 패드 사이의 최소 유막 두께가 감소하기 때문에 패드의 온도가 좀더 상승하는 것으로 생각된다.

4. 결론

틸팅 패드 저널 베어링의 패드의 온도는 90도 가까이 상승하게 된다. 이러한 온도는 패드의 열변형을 초래하게 되고 열변형을 고려하는 경우와 고려하지 않은 경우의 차이를 확인하기 위해서 해석을 진행하였다. 열변형을 고려하지 않은 해석의 경우 패드의 온도는 88.7도로 예측되었고 열변형을 고려한 해석의 경우 패드의 온도는 97도로 예측되었다. 해석의 검증을 위해서 실험장치를 구축하여 실험을 진행하였으며 패드의 온도는 100.9도로 측정되었다. 열변형을 고려하지 않은 경우의 오차는 12.1%이고 열변형을 고려한 해석은 3.9%이다. 패드의 열변형을 고려한 해석이 그렇지 않은 경우보다 훨씬 정확하게 온도를 예측하는 것을 알 수 있다.

열변형에 의해서 패드가 늘어나게 되고 이로 인해서 회전자와 패드 사이의 간격이 축소되기 때문에 온도가 좀 더 상승하는 것으로 예상된다. 저널 베어링의 경우 온도에 의한 열변형을 고려하는 것이 정확한 온도 예측에 도움이 된다는 사실을 확인하였다.

References

- [1] DYM, 2019, Final project report of Complex generation steam turbine 16 tilting 2-pad bearing development (Government project report), Ministry of SMEs and Startups, Korea.
- [2] Shin, H. J., 2020, Two-Fluid Structure Interaction Analysis of a Four-pad Journal Bearing in a Two-phase Fluid. *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 29:6 422-428, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.6.422>.
- [3] ANSYS, 2024, CFX user's manual, ANSYS Inc.
- [4] Brockwell, K., Dmochowski, W., 1992, Thermal effects in the tilting pad journal bearings, *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 25:3 384-392, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/25/3/008>.
- [5] Fillon, M., Desbordes, H., Frêne, J., Wai, C. C. H., 1996, A Global Approach of Thermal Effects Including Pad Deformations in Tilting-Pad Journal Bearings Submitted to Unbalance Load, *J. Tribol.-Trans. ASME*, 118:1 169-174. <https://doi.org/10.1115/1.2837074>.
- [6] Chun, Y.-D., Lee, J., Lee, J., Suh, J., 2023, Thermal Preload for Predicting Performance Change Due to Pad Thermal Deformation of Tilting Pad Journal Bearing, *Lubricants*, 11:1 3, <https://doi.org/10.3390/lubricants11010003>.



Hyun Jang Shin

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology.

His research interest is a Motor Sound and Vibration Reduction and FEA.

E-mail: shin7@yc.ac.kr