



가스 터빈용 복합 베어링의 유동 해석

신현장^{a,*}

CFD Analysis of a Combined Bearing for Gas Turbine Generator

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	October	2024
Revised	29	October	2024
Accepted	30	October	2024

Keywords:

2-FSI (2 way-fluid structure interaction)
CFD (computational fluid dynamics)
Thrust bearing
DOE (design of experiment)
Combined bearing

ABSTRACT

A combined bearing, which functions as both a journal and thrust bearing, is used to support the rotor of a gas turbine generator and has a compact size. The primary objective of this study was to confirm the oil flow lines of a thrust bearing using computational fluid dynamics (CFD). The oil nozzles between the thrust pads were confirmed to supply oil to the thrust pads. Another objective was to simulate the performance of the bearing, using two-way fluid-structure interaction (FSI). The load capacity of the bearing was found to be inferior due to the incorrect position of the pivot, which is crucial for the load capacity and minimum oil gap. A design of experiment (DOE) was performed to improve the minimum oil gap. The optimal point was selected using local sensitivity curves, in which yielded a 2.7 times increase in the minimum oil gap compared to the previous pivot position.

1. 서론

가스 터빈용 발전기에 사용되는 회전축을 지지하기 위해서는 오일을 이용하는 유체 베어링을 사용한다. 반경 방향을 지지하는 저널 베어링과 축 방향을 지지하는 스러스트 베어링이 사용 된다. 저널 베어링과 스러스트 베어링은 각각 독립적인 구조를 가지고 따로 설치를 하게 되는데 부피를 많이 차지하게 되고 각각 설치하게 되면서 설치 비용도 증가하는 문제가 있게 된다. 이 때문에 저널 베어링과 스러스트 베어링을 결합하는 형태가 연구되고 있으며 본 연구에서는 저널 베어링과 스러스트 베어링을 결합한 일체형 베어링을 CFD를 이용해서 성능을 예측하고자 한다. 일체형 베어링은 소형 가스 터빈 발전기에 적합하도록 설계되었으며 유지 보수 또한 용이 하도록 설계하였다^[1]. 이번 연구의 주된 관심사는 틸팅패드 스러스트 베어링 부분이며 오일이 원활하게 공급되는지 확인

하는 부분과 베어링의 성능을 예측하는 부분이다. 오일을 이용한 틸팅패드 스러스트 베어링^[2]의 경우 오일의 유체부와 고체부 틸팅패드가 상호 작용을 통해서 하중을 지지하기 때문에 고체부와 유체부를 동시에 해석을 하는 2-FSI(fluid structure interaction) 방법을 사용하여 성능을 예측하였고 DOE(design of experiment) 해석을 수행하여 스러스트 베어링의 성능을 최대화하는 방법을 도출하고자 하였다.

2. 일체형 베어링 구조

Fig. 1은 A 기업에서 개발 중인 일체형 베어링의 구조를 나타낸다. 저널 베어링과 스러스트 베어링이 일체화된 구조로 되어 있으며 스러스트 베어링용 틸팅패드부와 저널 베어링용 패드, 오일 입구와 출구, 회전축을 나타내고 있다. 특히 스러스트 베어링은 13

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

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

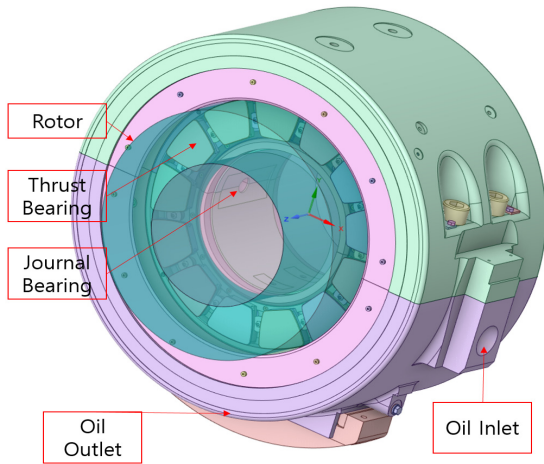


Fig. 1 Layout of Combined bearing

Table 1 Combined bearing specifications

Type	Journal	Thrust
Bearing loading [N]	200,000	400,000
Shaft diameter [mm]	325	600
Inlet oil temperature [°C]	45	
Speed [rpm]	3000	
Flow rate [LPM]	500	
Oil type	VG32	

개의 틸팅 패드를 가지고 있다. 일체형 베어링의 규격은 Table 1과 같다.

3. 유동 해석

3.1 일체형 베어링 유동 해석

새롭게 개발된 일체형 베어링의 오일 분포 성능을 예측하기 위해서 열유동 해석을 진행하였다. 열유동 해석을 수행하는 목적은 오일의 공급 경로를 확인하고 베어링 부분에 오일이 정상적으로 공급되는지 확인하기 위함이다. Fig. 2에 유동을 위한 메쉬를 나타내었다. 노드수는 5,297,966, 요소수는 26,853,079개이다. 로터와 베어링이 만나는 부분에는 면분할을 통해서 육면체 요소가 생성되도록 했으며 육면체 생성이 어려운 부분에는 사면체 요소를 사용했으며 벽면에는 삼각 기둥 요소를 생성해서 경계층을 효율적으로 계산하도록 하였다. 해석은 상용 CFD 도구인 ANSYS CFX를 사용하였으며 작동 유체는 가스터빈 베어링에서 가장 보편적으로 사용하는 윤활유 VG32, 난류 모델은 SST, 열해석 모델은 Thermal Energy 모델로 해석을 수행했다. 상기 조건은 기존 저널 베어링 연구 논문을 참고하였다^[3]. 경계조건은 Table 1을 참조하여 인가하였다.

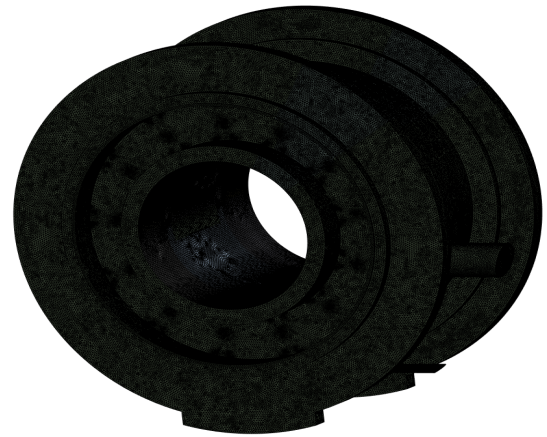


Fig. 2 Mesh for CFD analysis

3.1.1 유동 해석 결과

일체형 베어링은 복잡한 오일 공급 유로를 가지고 있기 때문에 특정 영역에 오일이 공급되지 않는 문제를 예측하는 것이 중요하다. 유동 해석 결과를 Fig. 3에 나타냈다. (a)는 입력 분포를 나타내고 있으며 (b)는 스러스트 베어링 주변으로 오일이 어떻게 공급되는지 나타내는 유선이다.

13개의 스러스트 베어링 사이사이에는 오일을 공급하기 위한 노즐이 배치되어 있는데 (c)는 노즐에서 공급되는 오일의 속도를 나타내고 있다. (d)는 (c)에서 보이는 노즐의 단면에서의 속도 분포를 나타낸다. 노즐 단면의 속도 분포를 보면 오일이 노즐을 통해서 공급되고 있음을 알 수 있다. 현재의 입, 출구 조건에서 노즐을 통해서 오일이 스러스트 베어링 쪽으로 공급이 되고 있음을 알 수 있다.

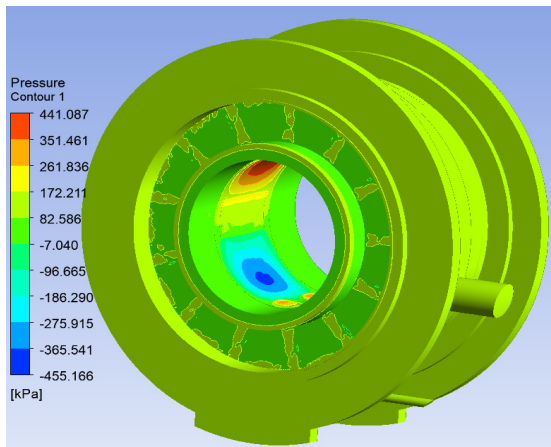
3.2 스러스트 베어링 2-FSI 해석

스러스트 베어링의 성능을 예측하기 위해 2-FSI 해석을 진행했다. 2 way-FSI(fluid structure interaction)는 고체부 변형이 유동에 영향을 주고 유체부 역시 고체부의 움직임에 영향을 주는 경우에 해석하는 기법을 의미한다. 베어링과 같이 고체부와 유체부가 상호 작용을 하는 경우에는 고체부와 유체부를 동시에 풀어야 한다^[3,4].

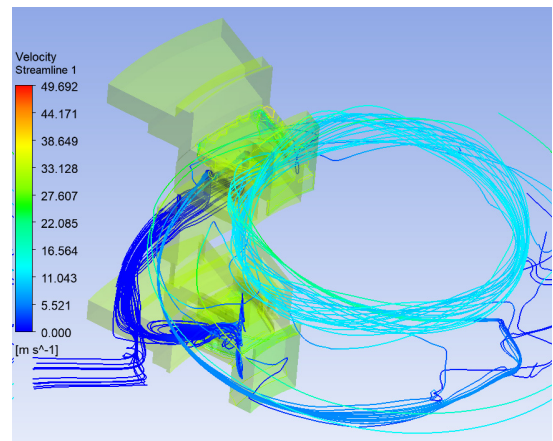
고체부와 유체부로 나뉘어서 해석을 진행하고 고체부는 유체부에 변위, 힘, 대류 열전달 계수 정보를 넘기고 유체부는 고체부에 힘, 열전달 계수, 변위 증가분, 온도 데이터를 넘기게 된다. Fig. 4는 유체부 해석 영역을 나타내고 있으며 파란색 화살표는 출구경계조건 위치를 나타낸다. Fig. 5는 고체부 해석 영역과 피벗의 형태를 나타낸다.

3.2.1 스러스트 베어링 2-FSI 해석 결과

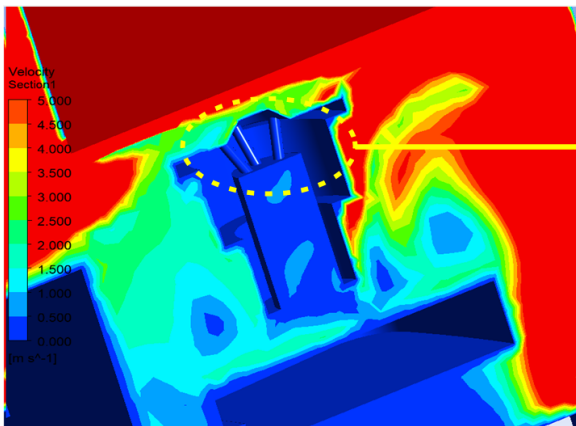
Fig. 6은 유체부 해석 결과를 나타낸다. 유체부의 압력 분포를



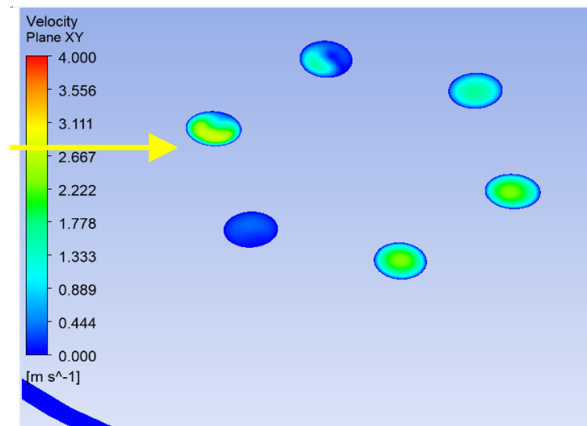
(a) Pressure distribution



(b) Streamline from inlet



(c) Oil supplying nozzle for thrust bearing



(d) Velocity of oil supply nozzles in section

Fig. 3 CFD analysis results of combined bearing

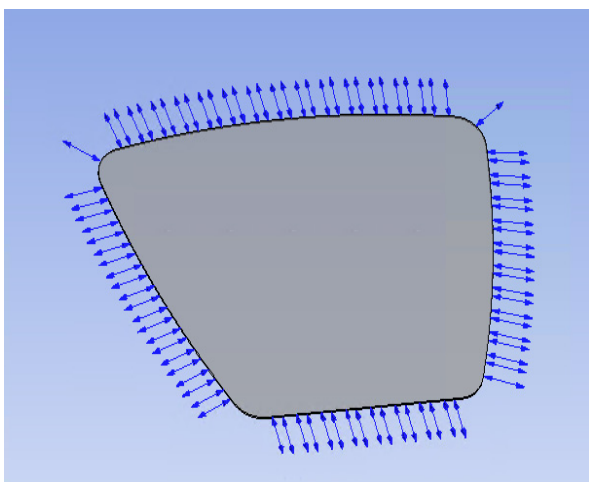


Fig. 4 Fluid part of 2-FSI

나타내고 있으며 이때 하중 지지 능력은 5135N로 계산되었다. Fig. 7은 고체부 스러스트 틸팅 패드 상면의 변형량을 나타낸다. Table 1에 나타난 것처럼 스러스트 베어링의 하중지지 능력은 400,000 N이다. 13개의 패드가 있기 때문에 1개 패드의 지지 능

력은 30,769 N 이어야 한다. 하지만 해석 결과를 보면, 5135 N 밖에 되지 않으며 틸팅 패드도 거의 평면 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 해석을 통해서 스러스트 베어링에 문제가 있음을 확인하였고 하중 지지 능력 개선을 위한 설계 변경을 진행하였다.

3.2.2 스러스트 베어링 피벗 위치 변경 해석

틸팅 패드 스러스트 베어링의 경우 피벗 위치에 따라서 하중 지지 능력이 많이 달라지게 된다⁵⁾. 피벗 위치 선정이 잘못되었다고 판단하고 피벗 위치를 변경하고 해석을 진행했다. 초기 피벗 위치가 y 방향에 대해서 너무 중간에 있다고 판단하여 음의 방향으로 이동하고 2-FSI 해석을 진행하였다. Fig. 8은 틸팅 패드 베어링 하부의 피벗 위치 이동을 나타낸다. Fig. 9에 유체부의 압력 분포를 Fig. 10에 패드의 변형량을 나타냈다. 이때 하중 지지 능력은 30,140 N, 최소 유막 두께는 9 μm 로 계산되었다. 이 같은 결과를 바탕으로 기존 피벗 위치에 오류가 있음을 확인하였고 피벗 위치가 하중 지지 능력과 최소 유막 두께에 중대한 영향을 준다는 사실을 확인하였다.

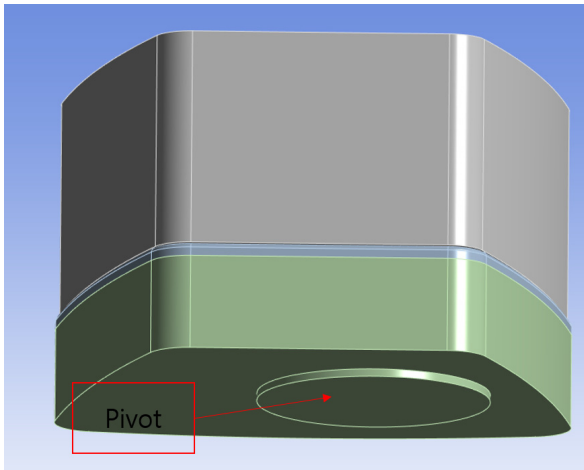


Fig. 5 Solid parts of 2-FSI

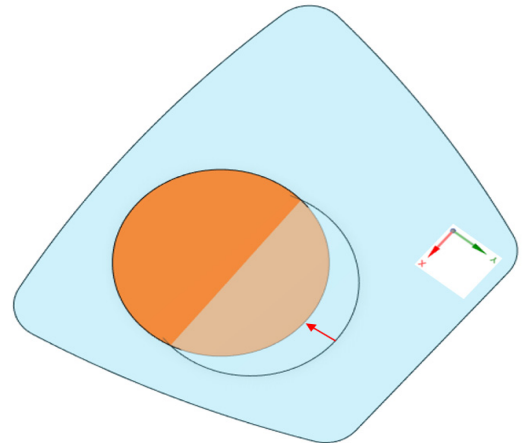


Fig. 8 Moving of pivot position

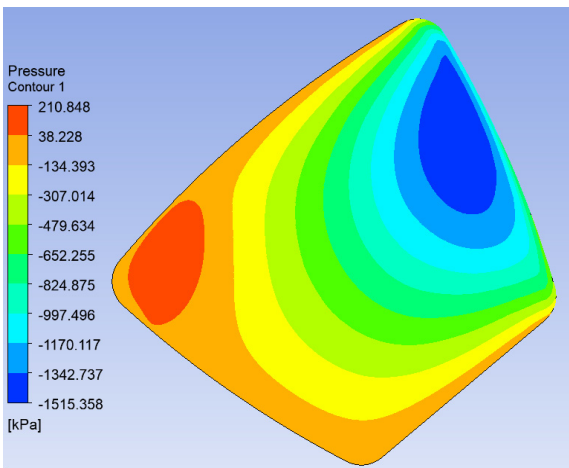


Fig. 6 Pressure distribution of fluid part

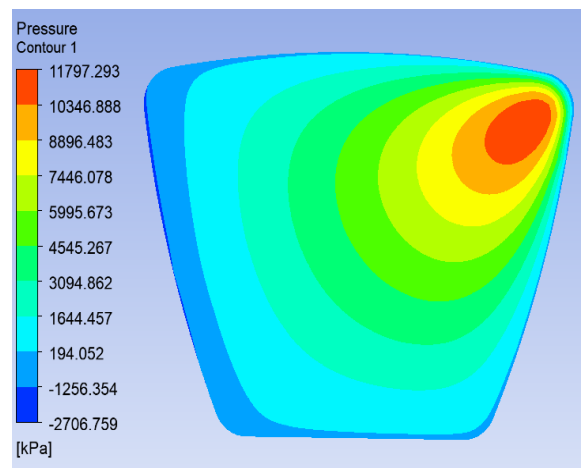


Fig. 9 Pressure distribution of moved pivot

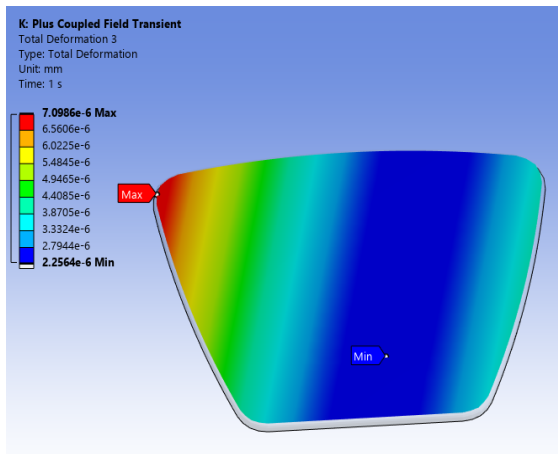


Fig. 7 Displacement of tilting pad surface

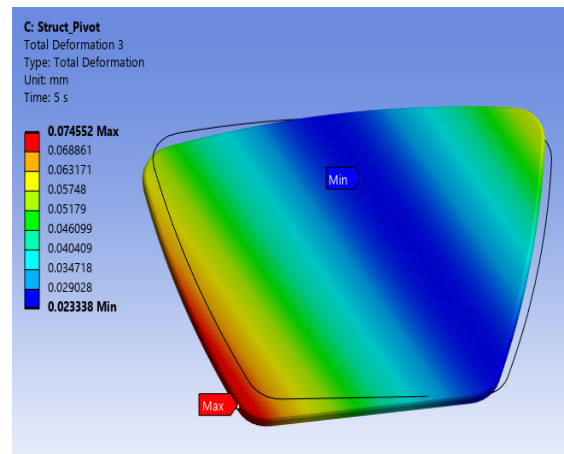


Fig. 10 Displacement of tilting pad surface with the moved pivot

3.2.3 피벗 위치 DOE(design of experiments) 해석

피벗 위치에 의해서 하중지지 능력과 최소 유막 두께가 많은 영향을 받는 것을 확인했다. 최적의 피벗 위치를 결정하기 위해서 DOE 해석을 진행했다. DOE 해석은 입력값과 출력값 사이의 관

계를 도출하는 해석이기 때문에 입력값과 출력값이 필요하게 된다. 입력값은 피벗의 x, y 축 변위, 출력값은 최소 유막 두께와 하중 지지 능력을 정했다. 같은 하중지지력을 갖는 상태에서 최소 유막 두께가 크면 온도상승이 적기 때문에 최소 유막 두께를 출력 인자

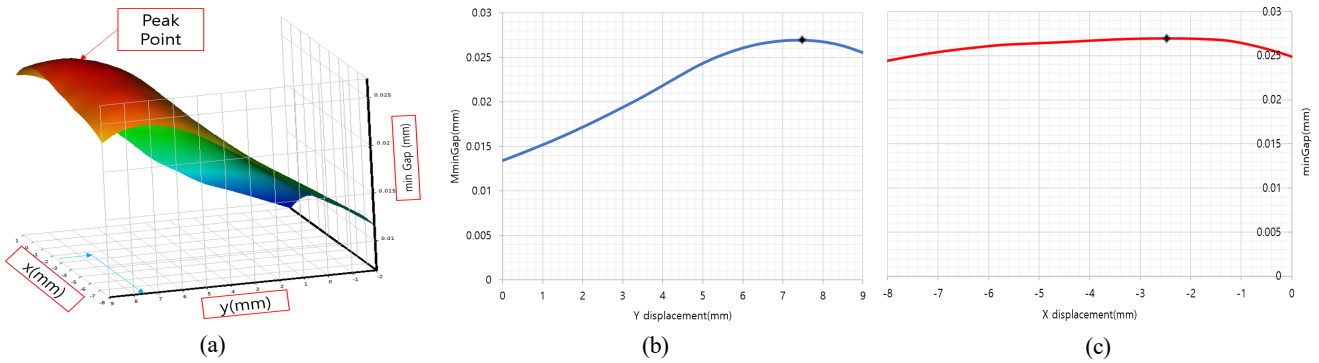


Fig. 11 DOE results

Table 2 Input(X, Y-Dis) and output(minGap, ForceZ) parameters

Name	X-Dis (mm)	Y-Dis (mm)	minGap (mm)	Force (N)
1	-3.5	3.5	0.0208924	30138.8
2	-8	3.5	0.0209474	30148.1
3	-5.75	3.5	0.0210927	30149.2
4	1	3.5	0.0122327	25537.4
5	-1.25	3.5	0.0201555	30112.1
6	-3.5	-2	0.0103775	30120
7	-3.5	0.75	0.0144292	26062.1
8	-3.5	9	0.0245992	30144.8
9	-3.5	6.25	0.0268388	30140.1
10	-8	-2	0.0115953	30135.7
11	-5.75	0.75	0.0159942	30174.9
12	1	-2	0.00736532	30124.6
13	-1.25	0.75	0.0145417	30120.7
14	-8	9	0.022676	30180.8
15	-5.75	6.25	0.026425	30146.8
16	1	9	0.0239379	30040.7
17	-1.25	6.25	0.0261956	30116.9

로 선정했다. Table 2는 입력값과 출력값을 나타낸다. 입력값 생성 방법은 Central Composite Design, Face-Centered을 사용했다^[6,7]. 생성된 관계점들 기반으로 해석을 다시 수행했으며 해석 결과는 Fig. 11에 나타났다. (a)는 x, y방향 이동량에 대한 최소 유막 두께의 변화를 3차원 표면으로 나타난 그림이다. (b)는 y방향 이동량에 따른 최소 유막 두께의 변화를 나타낸 그림이며 검은 점으로 최대값을 표시했다. (c)는 x방향 이동량에 따른 최소 유막 두께의 변화를 나타낸 그림이며 검은 점은 최대값을 나타낸다. 이 그래프를 통해서 x는 -2.5 mm, y는 7.5 mm 값에서 최소 유막 두께가 가장 큰 값을 가지는 것으로 예측되었다. 이렇게 계산된 결과는 DOE에서 추출한 입력과 출력의 관계이기 때문에 데이터가 정확하지 않을 수 있다. 예측한 결과값을 다시 해석해서 결과를 검증하였다. 데이터가 많으며 많을수록 결과값은 정밀해 지지만 해석

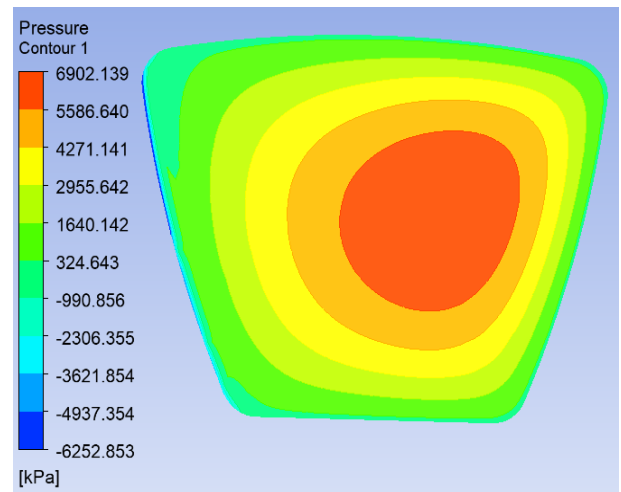


Fig. 12 Pressure distribution at optimal point

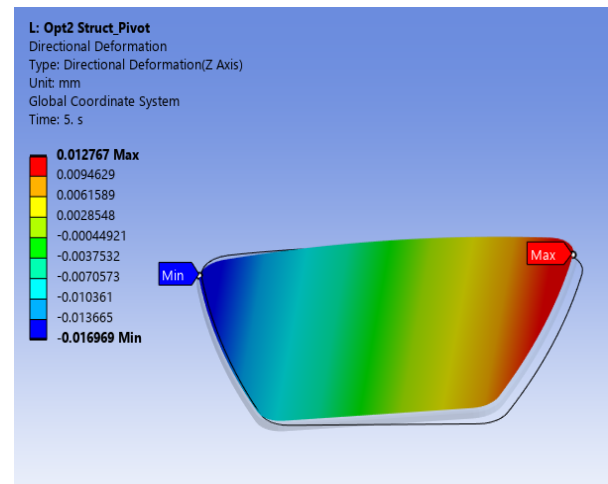


Fig. 13 Displacement of tilting pad at optimal point

시간이 과도하게 소요되는 단점이 있다.

3.2.4 최적화 해석

DOE에서 예측한 유막 두께가 가장 두꺼울 것이라 예상되는 점을 기반으로 모델링 수정 후 다시 2-FSI 해석을 진행했다. Fig.

12는 유체부의 압력 분포를 Fig. 13은 고체부 틸팅 패드의 변형량을 나타낸다. 이때 하중지지 능력은 30,170 N, 최소 유막 두께는 24 μm 로 계산되었다. 최적화 이전에 계산된 최소 유막 두께는 9 μm 이었기 때문에 최적화를 통해서 최소 유막 두께가 2.7배 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

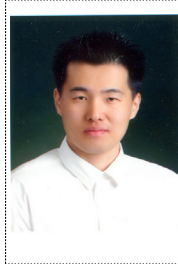
4. 결론

일체형 베어링의 유동 라인이 제대로 설계되었는가를 확인하기 위해 유동 해석을 수행했고 스러스트 베어링의 성능을 예측하기 위해 2-FSI 해석을 진행하였다. 스러스트 베어링 사이에 설치된 오일 공급 노즐은 틸팅 패드에 오일을 공급하는 역할을 할 수 있다고 예측되었으며 스러스트 베어링의 성능을 예측하기 위해서 2-FSI 해석을 진행했다. 해석 결과, 피벗 위치가 잘못 선정되어 하중지지력이 현저히 부족한 것으로 예측되었다. 피벗 위치 개선을 위해서 DOE 해석을 진행했으며 해석 결과를 바탕으로 유막 두께가 가장 커질 것이라 예상되는 위치를 선정하였다. 선정된 결과를 바탕으로 설계 변경 후 재해석을 진행했으며 그 결과 최소 유막 두께가 2.7배 증가하는 결과를 얻었다.

추후 실험을 통해서 본 연구 결과를 검증할 예정이다.

References

- [1] DYM, 2019, Final Project Report of Complex Generation Steam Turbine 16 Tilting 2-pad Bearing Development, Government Project Report sponsored by Ministry of SMEs and Startups, KOREA.
- [2] Bassani R, Ciulli E, Forte P., 1998, An Investigation on Thrust Bearing Tilting Pads, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 212:4 271-277, <https://doi.org/10.1243/1350650981542083>.
- [3] 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>.
- [4] ANSYS, 2024, CFX user's manual, ANSYS, USA.
- [5] Galvão, M. M., Menon, G. J., Schwarz, V. A., 2017, Numerical Study of the Influence of the Pivot Position on the Steady-state Behavior of Tilting-pad Thrust Bearings, J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 39 3165-3180, <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0805-x>.
- [6] ANSYS, 2024, DesignXplorer User's Guide, ANSYS, USA.
- [7] Hatami, M., Jafaryar, M., Ganji, D. D., Gorji-Bandpy, M., 2014, Optimization of Finned-tube Heat Exchangers for Diesel Exhaust Waste Heat Recovery using CFD and CCD Techniques, Int. Commun. Heat Mass Transf., 57 254-263, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.015>.



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