



수소전기차용 공기압축기 스러스트 베어링 열흔 해석

신현장^{a,*}

Computational Fluid Dynamics Based Thermal Stain Analysis of Air Foil Thrust Bearings in Hydrogen Electric Vehicle Compressors

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received	22	October	2025
Revised	28	October	2025
Accepted	31	October	2025

Keywords:

Thermal stain
Computational fluid dynamics (CFD)
Air foil thrust bearing
Hydrogen electric car

ABSTRACT

This study examined the thermal behavior of airfoil thrust bearings used in high-speed air compressors for hydrogen electric vehicles. These bearings operate at extreme rotational speeds, generating heat owing to air viscosity, which can cause thermal stains and bearing coating degradation. Temperature distribution and thermal damage causes were accurately predicted using a full-model computational fluid dynamics analysis. Simulations showed that an air thickness of 4.5 μm is optimal for identifying the rotor's equilibrium position based on axial force balance, resulting in a peak temperature of 211.5°C, which is below the thermal limit of 230°C. Temperature saturation tests confirmed the simulation's accuracy, with thermal stain patterns closely matching the predicted heat flux and temperature contours. Conduction heat transfer was found to play a more important role than convection in thermal stain formation. These findings provide valuable insights for improving the thermal durability and design of thrust bearings in hydrogen-powered automotive applications.

1. 서론

수소전기차용 공기압축기는 연료전지에 압축 공기를 공급해서 연료전지 스택에서 수소와 반응시켜 전기를 생산하는 수소전기차의 주요한 부품 중 하나이다. 공기압축기는 11만 rpm 정도로 고속으로 회전하면서 공기를 압축하여 연료전지 스택에 압축 공기를 공급하기 때문에 고속 회전을 유지하기 위한 베어링의 역할이 중요하다^[1]. 공기압축기는 전기모터 회전축에 압축을 위한 임펠러가 장착되는 구조를 가지게 되는데 이를 지지하기 위해서 저널 베어링과 스러스트 베어링을 사용하게 된다. 저널 베어링은 반경 방향을 지지하게 되고 스러스트 베어링은 축 방향을 지지하게 된다.

축 방향을 지지하는 스러스트 베어링은 에어포일 타입을 사용하고 디스크 로터의 회전 운동에 의해서 공기의 스퀴즈 효과에 의해서 지지력이 생성되는 구조를 갖는다. 디스크 로터의 고속 회전에 의해 지지력을 생성하는 방식이기 때문에 공기 점성에 의해서 고온이 발생하게 된다. 스러스트 베어링은 공기압축기 내 여러 부품 중에서 발열량이 가장 높은 부품 중 하나이다^[2]. 이러한 높은 발열로 인해서 베어링의 코팅막은 나쁜 영향을 받게 되는데, 이러한 문제 때문에 스러스트 베어링의 온도 예측은 공기압축기의 가장 중요한 요소이다. 스러스트 베어링의 온도 분포를 정확하게 예측하는 것은 공기압축기의 성능과 내구성에 직접적인 영향을 주기 때문에 스러스트 베어링의 온도 분포를 예측하기 위해서 CFD 해석을 진

* Corresponding author. Tel.: +82-55-7512077

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

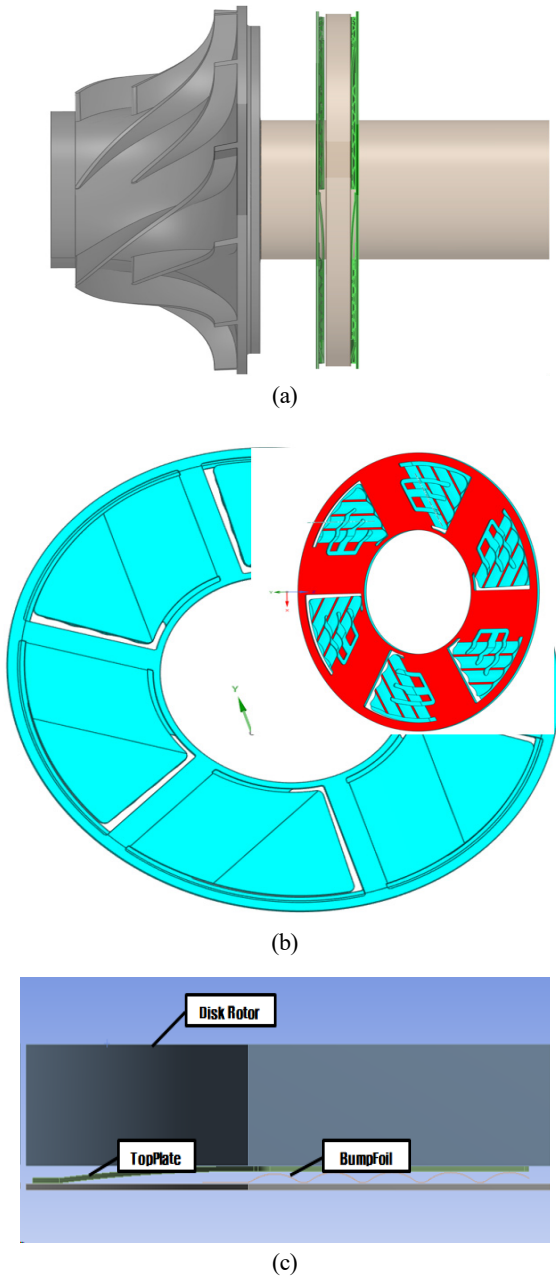


Fig. 1 Air foil thrust bearing structure

행하고 결과를 실험 결과와 비교하였다.

2. 스러스트 베어링 구조

Fig. 1은 스러스트 베어링의 구조를 나타낸다. Fig. 1(a) 그림에서 녹색으로 표시된 부분이 스러스트 베어링 부분이며 디스크 로터 앞뒤에 전방 베어링과 후방 베어링 1쌍이 배치되어 축 방향을 지지하는 역할을 하게 된다. 본 연구에는 6 패드 타입의 스러스트 베어링을 사용하였다. Fig. 1의 (a)는 임펠러가 장착된 회전축과 디스크 로터와 스러스트 베어링을 나타내며 (b)는 전방 베어링을

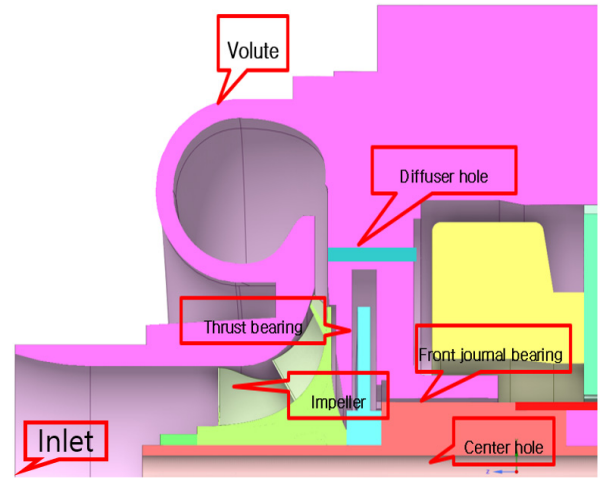


Fig. 2 Section view of air compressor

나타낸다. (c)는 스러스트 베어링을 구성하는 디스크 로터, 탑 포일, 범프 포일을 나타내고 있다.

3. 스러스트 베어링 해석

3.1 전체 모델 해석 방법(Full model FEA)

스러스트 베어링의 작동 온도를 예측하는 것은 대단히 어렵다. 기존 연구에서는 스러스트 베어링 단품의 성능을 예측하기 위한 실험을 수행했지만 순수하게 스러스트 베어링 단품만 실험 장치에 장착하고 실험을 수행하기 때문에 실제 작동 조건과 동일한 온도를 예측하기는 어려웠다^[3]. 작동 조건을 실험 장치와 공기압축기 내부의 조건을 동일하게 맞추는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 실제 작동 조건은 모터 실 내부의 온도도 높고 냉각을 위한 냉각 홀이 많이 존재하기 때문이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Diffuser hole과 같은 다수의 냉각 라인이 존재하기 때문에 단품 실험 장치에서는 이러한 상황을 구현하기 어렵기 때문이다. 현재 상황에서는 CFD를 이용해서 예측하는 방법이 가장 현실적인 방법이다. 스러스트 베어링을 해석하는 방법은 두 가지 방법이 있다. 하나는 공기압축기 전체에 대한 열유동 해석을 수행하고 스러스트 베어링 부분만 확인하는 방법이다. 다른 하나는 스러스트 베어링 부분만 단품 해석하는 Fluid Structure Interaction(2-FSI) 기법을 이용해서 해석하는 방법이다. 전체 모델 해석 방법은 공기압축기 전체를 해석하기 때문에 베어링의 온도 분포를 정확하게 예측하는 것이 가능하다. 스러스트 베어링 주변의 구조와 온도, 압력, 유속 등 모든 부분을 고려하기 때문이다. 단점은 해석 시간이 오래 걸리고 유막 두께를 찾는 것이 굉장히 까다롭다는 단점이 있다. 2-FSI를 이용하는 방법은 비교적 빠르고 Topfoil과 Bumpfoil의 변형까지도 고려한 해석이 가능하고 유막 두께도 자동으로 계산된다는 장점이 있지만 온도 분포를 정확히

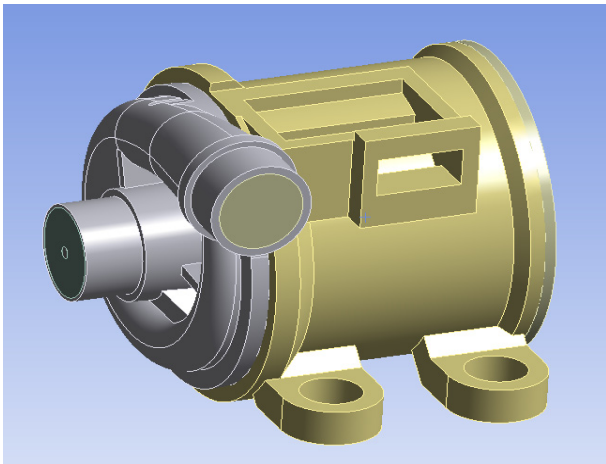


Fig. 3 3D model of air compressor

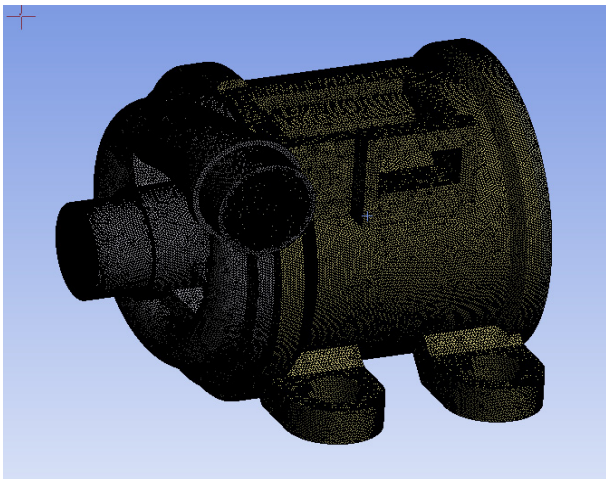


Fig. 4 Mesh for CFD

알기 어렵다는 단점이 있다. 이 부분은 기존 연구 내용에 언급되어 있다^[4]. 고체부 온도와 유체부 입구 온도를 경계조건으로 입력해야 하기 때문이다. 본 연구의 목적이 스러스트 베어링의 온도 분포를 정확히 예측한 것이기 때문에 전체 모델 해석 방법을 사용하였다. 전체 모델은 Fig. 3과 같다. Fig. 4는 메쉬를 나타내고 있으며 노드 수는 50,139,892, 요소수는 239,254,809개이다. Table 1에 공기압축기 성능과 모터를 포함한 손실량을 표시했다.

해석은 상용 CFD 도구인 CFX를 사용하였으며 로터 회전수 110k rpm, 압축성 공기 효과를 고려한 Ideal Air, 난류 모델은 SST turbulence model, 열 해석은 Total Energy 조건을 이용하여 해석을 진행했다^[5]. 정적 해석을 수행했으며 해석 시간은 64 Core 기준 18시간 정도 소요되었다.

3.2 전체 모델 해석 결과

디스크 로터와 스러스트 베어링의 간격은 스러스트 베어링 온도 해석에서 아주 중요한 요소이다^[6]. 공기막 두께에 따라서 온도가

Table 1 Specification of air compressor

	Target	Unit
Max pressure	2.9	bar
Max mass flow	622	kg/h
Iron+copper+sleeve	1212	W

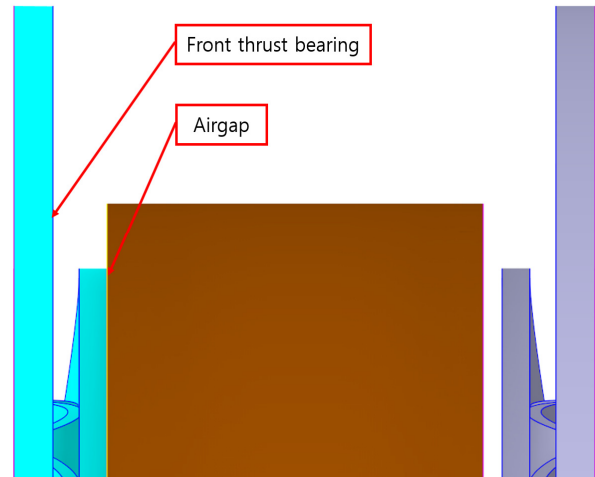


Fig. 5 Airgap between front thrust bearing and disk rotor

많이 차이 나기 때문이다. 실제 조건과 가장 유사한 두께를 찾기 위해서 두께를 바꿔 가면서 해석을 진행했다. 유막 두께를 3, 4.5, 4.7, 5 μm 변경하면서 해석을 진행하고 결과를 비교하였다. Fig. 5에 나타난 것처럼 Air gap을 모델링 단계에서 수정하고 메쉬를 하고 동일한 경계조건으로 CFD 해석을 진행했다.

3.2.1 유막 두께 3 μm 해석 결과

다른 조건은 그대로 두고 유막 두께만 3 μm 수정한 결과이다. Fig. 6은 전방 스러스트 베어링의 온도 분포를 나타내었다. 최고온도는 234.9도 이다. 각 그림은 온도 범위를 190~200도로 선정하였다. 공극에 따른 온도 분포를 명확히 하기 위함이다. 3 μm 두께에 대한 압축기 회전축에 대한 축 방향 힘을 구했다. 임펠러, 디스크 로터의 축 방향 힘을 모두 더하여 '0'이라는 값이 나오면 그 위치가 회전축의 평형 위치라 볼 수 있다. 공기압축기는 Fig. 2에서 있는 것처럼 임펠러, 디스크 로터는 고속으로 회전하면서 압력이 생성되고 이로 인해서 축방향 힘을 발생시키게 된다. 임펠러 부분에 발생 되는 축력과 디스크 로터 쪽에서 발생 되는 축력의 합이 0이 되면 바로 그 위치가 힘의 평형을 이루는 위치가 되고 그때의 위치가 스러스트 베어링의 공극에 해당한다. 임펠러 축력은 -197.3 N 디스크 로터의 축력은 278.5 N 둘의 합은 81.2 N 로 계산되었다. 축력 계산은 CFX의 Post processing에서 force_z()@Impeller와 같은 함수를 이용해서 구했다. 방향은 Fig. 2의 흡입구(inlet) 쪽이다. 축력이 양으로 계산되었다는 것은 유막이 너무 작아서 베어링

Table 2 Temperature, axial force as a function of air gap

Air gap	3	4.5	4.7	5	μm
Max temp.	234.9	211.5	206	202.8	$^{\circ}\text{C}$
Axial force	81.2	2.1	-11.8	-15	N

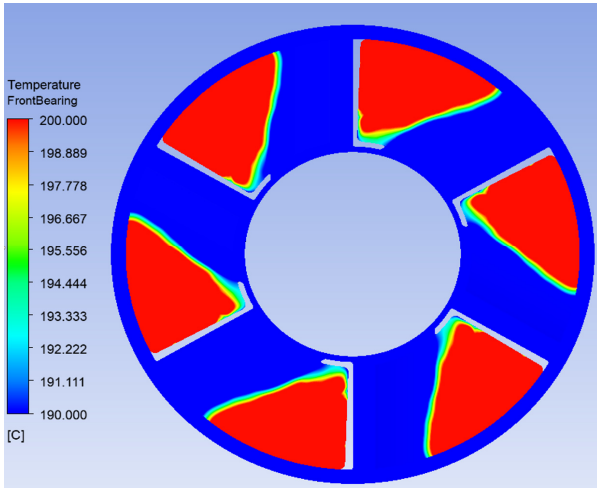


Fig. 6 3 μm Front bearing temperature distribution

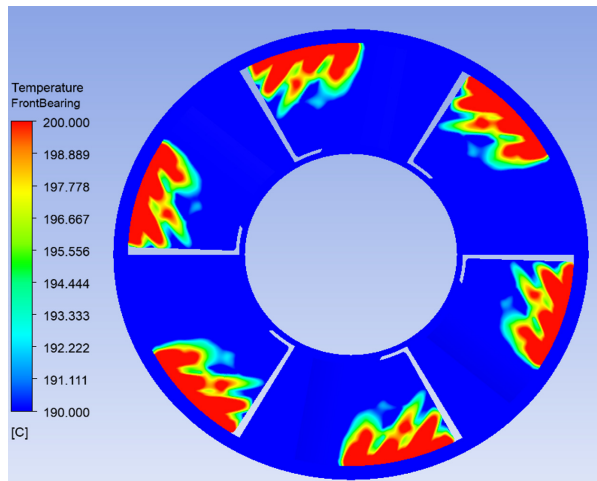


Fig. 7 4.5 μm Front bearing temperature distribution

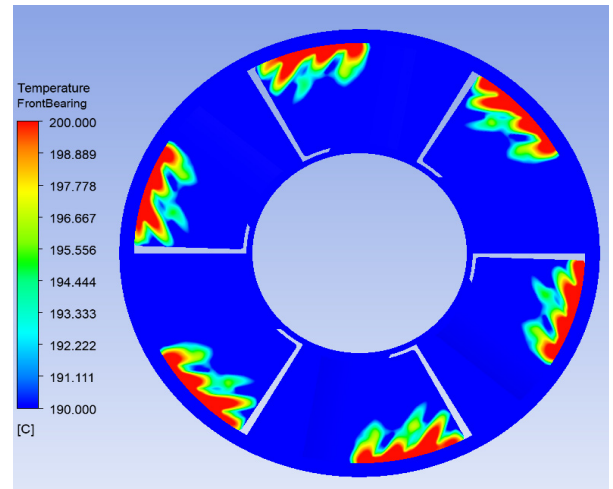


Fig. 8 4.7 μm Front bearing temperature distribution

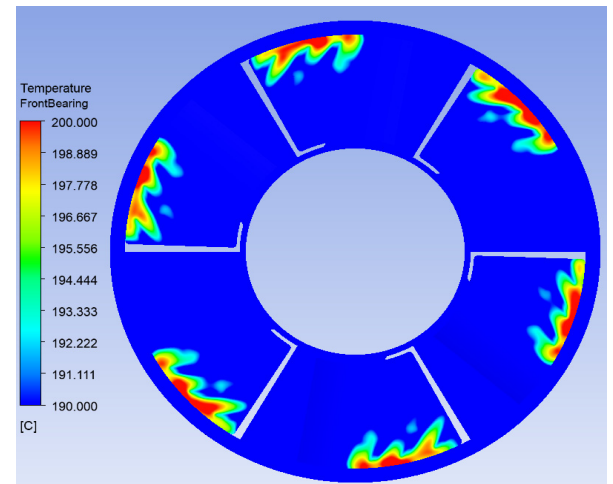


Fig. 9 5.0 μm Front bearing temperature distribution

에서 강한 반력이 발생한다는 의미이고 3 μm 은 너무 가깝게 예측했다는 것이다.

3.2.2 유막 두께 4.5 μm 해석 결과

유막 두께를 4.5 μm 수정하고 재해석을 수행하였다. 온도 분포는 Fig. 7에 나타냈으며 최고온도는 211.5도, 축력은 각각 -197.4 N, 199.5 N이며 합력은 2.1 N으로 계산되었다.

3.2.3 유막 두께 4.7 μm 해석 결과

유막 두께를 4.7 μm 수정하고 재해석을 수행하였다. 온도 분포는 Fig. 8에 나타냈으며 최고온도는 206.0도, 축력은 각각 -198.5

N, 186.7 N이며 합력은 -11.8 N으로 계산되었다.

3.2.4 유막 두께 5.0 μm 해석 결과

유막 두께를 5.0 μm 수정하고 재해석을 수행하였다. 온도 분포는 Fig. 9에 나타냈으며 최고온도는 202.8도, 축력은 각각 -197.8 N, 182.8 N이며 합력은 -15.0 N으로 계산되었다. Fig. 6~Fig. 9 온도 분포를 보면 공극이 길어지면서 고온부 면적이 줄어드는 것을 알 수 있다. 각각의 공기 두께에 대한 축력의 결과를 보면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 공기막 두께가 4.5~4.7 μm 사이에서 축력의 부호가 변하는 것을 확인하였다. 이 근처에서 0에 해당하는 값이 존재하리라는 것을 예측할 수 있다. 지금까지 공기막 두께는 설계업체가 보유한 스러스트 베어링 설계 프로그램(in-house code)을 통해서 공극을 예측하였다. 여기서 나온 결과를 바탕으로 CFD 해석 시 공극 두께로 설정하였다. 하지만 이 프로그램은 경험식 기반으로 개념 설계용 프로그램이기 때문에, 몇 초 만에 대략적

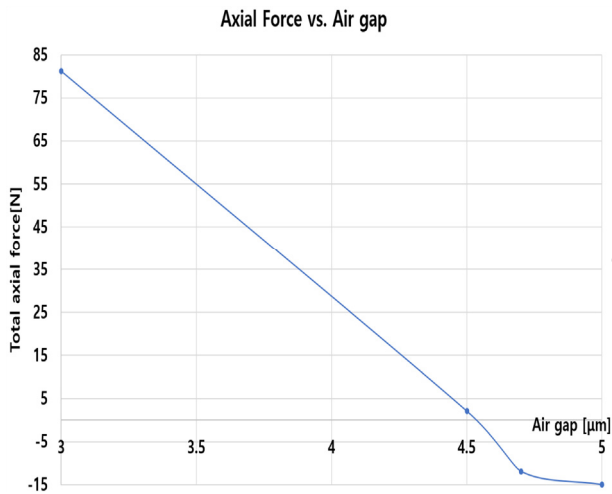


Fig. 10 Air gap distance vs. Axial force of rotor

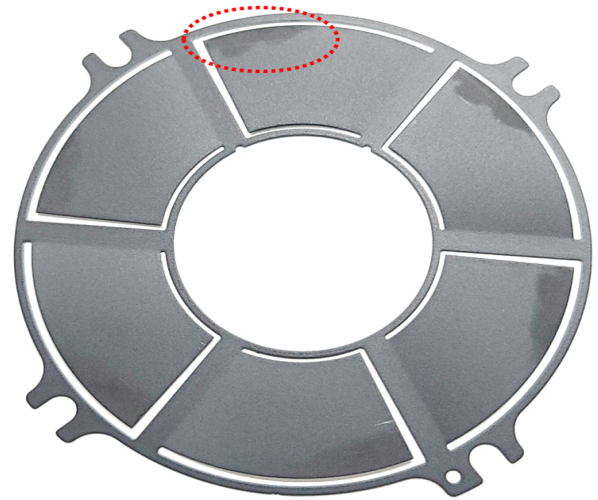


Fig. 12 Thermal stain on thrust bearing surface after temperature saturation test

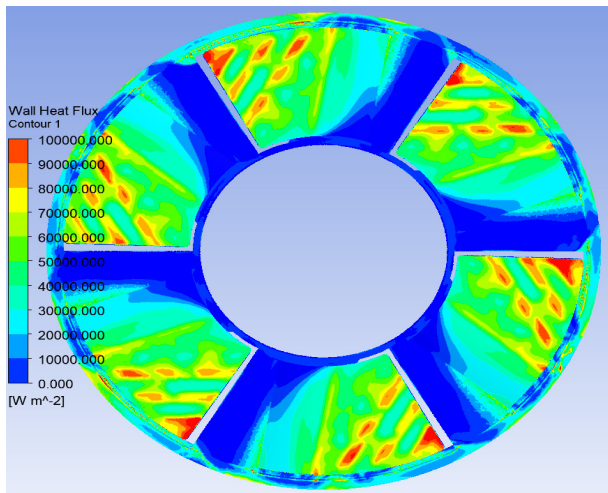


Fig. 11 Wall heat flux distribution of front bearing

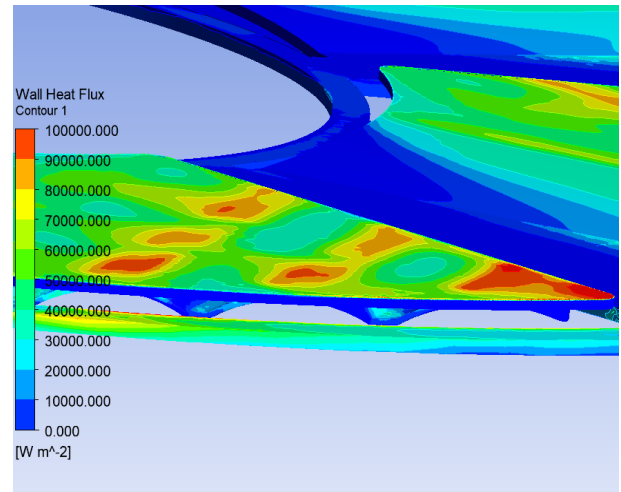


Fig. 13 Wall heat flux distribution in the red-dotted region of the front thrust bearing

인 수치를 도출할 수 있지만 오차가 크다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 공극을 직접 이동시켜 가면서 CFD 해석을 하고 축력을 비교해서 예측한 공극의 타당성을 검증하는 방법을 선택하였다. Table 2에 공극에 따른 결과를 정리하였다.

3.3 베어링 온도 해석 결과

축력 계산 결과를 토대로 합력의 크기가 가장 작은(2.1 N) 공기막 두께 4.5 μm를 평형조건으로 선정하고 그 결과를 바탕으로 베어링 부분에 대한 열분포 분석을 진행했다. Fig. 7의 결과를 보면 최고온도는 211.5도 이다. 베어링의 온도는 코팅막 내열 온도 230도 보다 낮게 유지하는 것이 중요하다. 스러스트 베어링은 베어링 주변의 공기와 열을 교환하는 대류 방식과 하우징으로 전도를 통해서 열을 전달하는 두 가지 방식으로 열을 전달하게 된다. 베어링 냉각에 있어서 대류와 전도 중에 어떠한 열전달 방식이 열흔에 주요한 영향을 주는지 분석하였다. Fig. 11은 전방 베어링의 Wall

heat flux 분포를 나타낸다. 전방 베어링 Fig. 1(b)에서 바닥을 제외한 부분이 대류를 담당하고 바닥 부분(붉은색 부분, 베어링 뒷면)은 전도를 담당하게 된다. 이러한 Wall heat flux 중에서 공기와 접촉하는 부분과 고체와 접촉하는 부분에 대해서 CFD-Post에서 제공하는 면적분 함수(areaInt)를 이용해서 각각의 열전달량을 구했다^[5]. 대류에 의한 열전달량은 45.5 W, 전도에 의한 열전달량은 33.0 W로 계산됐다. 로터 회전으로 인한 공기 점성에 의해서 발생한 열의 58%는 대류로 42%는 전도를 통해서 열전달이 이뤄지는 것을 알 수 있다.

3.3.1 실험 결과와 비교

온도 포화 실험은 공기압축기를 11만 rpm 속도로 충분히 오랫동안(30분이상) 작동시키는 실험이다. 실험이 끝난 후 공기압축기를 분해

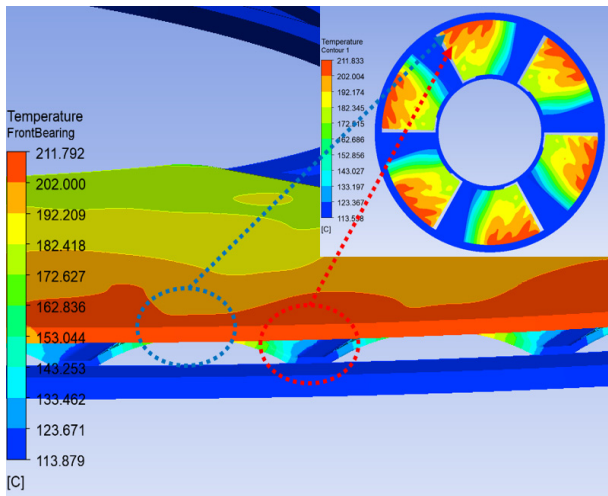


Fig. 14 Temperature distribution between bumps on the front thrust bearing

해서 스러스트 베어링 표면을 사진으로 찍은 결과는 Fig. 12와 같다. 붉은 점선 안의 열흔(thermal stain) 이라고 하는 국부적 과열에 의한 코팅막에 자국이 발생하는 현상을 볼 수 있다. Fig. 12와 Fig. 7을 보면 열흔 발생 위치와 형태가 상당히 유사함을 알 수 있다. 이러한 열흔이 발생하는 이유는 불균일한 열전달에 기인하는 것으로 생각된다. Fig. 13, Fig. 14는 붉은색 점선 부분에 대한 Wall heat flux와 온도분포를 나타낸다. 열흔이 발생하는 위치는 베어링 끝부분, 속도가 가장 높은 곳이고 해안선처럼 들쭉날쭉한 모습은 범프의 산과 골 부분에 일치하는 것을 볼 수 있다. 범프 산 부분은 탑 포일과 닿게 되고 이 부분은 전도를 통해서 하우징으로 열을 전달하게 된다. 하지만 범프의 골 부분은 대류를 통해서만 열을 전달하게 되는데, 대류에 의한 열전달이 전도를 통한 열전달보다 적기 때문에 들쭉날쭉한 열흔 형태를 보이는 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에선 에어포일 스러스트 베어링의 열 분포를 정확히 예측하는 것을 목표로 연구를 진행했다. 스러스트 베어링의 공극을 바꿔 가면서 해석을 진행했고 이를 통해서 추력의 합이 '0'이 되는 지점을 로터의 평형 위치로 선정하였다. 이렇게 계산해서 공극이 $4.5 \mu\text{m}$ 인 경우를 평형 위치라 선정하였다. 30 분 이상 11만 rpm으로 회전시키는 온도 포화 실험을 통해서 스러스트 베어링 표면의 열흔을 확인하였고 열흔의 위치와 형태가 해석과 거의 유사하다는 사실을 확인하였다. 이와 같은 열흔 형태는 스러스트 베어링의 열전달에 있어서 모터 하우징 쪽으로 전달되는 전도 성분이 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 열흔 개선에 있어서 대류 성분보다는 전도를 개선하는 것이 더 효과적임을 확인하였다.

References

- [1] Shin, H. J., 2018, CFD Analysis of an Air Compressor for a Hydrogen Electric Car, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, 42:12 853-859, <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2018.42.12.853>.
- [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/ksmt.2020.29.6.422>.
- [3] Kim, T. H., Park, M. S., Lee, T. W., 2017, Design Optimization of Gas Foil Thrust Bearings for Maximum Load Capacity, *J. Tribol.*, 139:3 031705, <https://doi.org/10.1115/1.4034616>.
- [4] Shin, H. J., Park, G. W., 2019, 2-FSI Analysis of an Air Foil Thrust Bearing of Air Compressor for a Hydrogen Electric Car, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 29:6 762-769, <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2019.29.6.762>.
- [5] ANSYS, 2024, CFX user's manual, ANSYS, USA.
- [6] Ravikumar R. N., Rathanraj, K. J., Arun Kumar, V., Supreeth, S., 2023, Experimental and CFD Analysis of a Gas-Lubricated Foil Thrust Bearing for Various Foil Configurations, *FME Transaction*, 51:4 532-540, <https://doi.org/10.5937/fme.2304532R>.



Hyun Jang Shin

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology. His research interests include a Motor Sound and Vibration Reduction and FEA.

E-mail: shin7@yc.ac.kr