

에어 포일 스러스트 베어링의 탑포일 경사면 형상이 유동특성에 미치는 영향에 대한 수치해석 연구

백건웅¹ · 주원구^{2†} · 문형욱³ · 황성현⁴ · 정성윤³ · 박정구⁵

¹연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정생

²연세대학교 기계공학과 교수

³한화파워시스템 연구원

⁴한화파워시스템 책임연구원

⁵한화파워시스템 수석연구원

The Effects of Inclined Foil Shape on Flow Characteristics in Air Foil Thrust Bearing Using CFD

GeonWoong Baek¹, Won-Gu Joo^{2†}, Hyeong Wook Mun³, Sunghyen Hwang⁴,
Sung-Yun Jeong³ and Jung-Koo Park⁵

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

²Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

³Assistant Research Engineer, Hanwha Power Systems

⁴Senior Research Engineer, Hanwha Power Systems

⁵Chief Research Engineer, Hanwha Power Systems

(Received June 1, 2021 ; Revised July 1, 2021 ; Accepted July 26, 2021)

Abstract—In this study, we perform a 3D CFD conjugate analysis according to the shape of the foil ramp of the air foil thrust bearing, analyze the flow characteristics inside the bearing, and compare the results corresponding to the two shapes. Air has a lower viscosity than lubricating oil. Therefore, the thrust runner of the bearing must rotate at high speed to support the load. The gap between thrust runner and foil is significantly smaller than that of the oil bearing. Hence, it is crucial to analyze the complex flow characteristics inside the bearing to predict the complex flow inside the bearing and performance of the bearing. In addition, flow characteristics may appear differently depending on the ramp shape of the bearing foil, which may affect bearing performance. In this study, we numerically analyze the main flow path of air flowing into the bearing and the secondary flow path used for cooling the bearing using the commercial CFD software ANSYS CFX and compare the flow characteristics for straight and curved foil ramp shapes. Notably, there is a difference in the speed of the flowing air according to the shape of the ramp, which affects the bearing performance.



© Korean Tribology Society 2021. 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—air foil thrust bearing(에어 포일 스러스트 베어링), computational fluid dynamics(전산유체역학), hydrodynamic lubrication(유체윤활), load capacity(하중지지능력), leakage rate(누설 유량)

[†]Corresponding author: Won-Gu Joo

Tel: +82-02-2123-7223

E-mail: joo_wg@yonsei.ac.kr

<http://orcid.org/0000-0002-3027-9220>(Geon Woong Baek)

Nomenclature

bh : Bump Foil height (범프 포일 높이) (m)

c : Thrust bearing clearance (간극) (mm)

e : Energy (내부 에너지) (W)
 FA : Foil arc angle (포일 원주 각) (degree)
 fh : Top Foil height (탑포일 높이) (m)
 ft : Foil thickness (포일 두께) (m)
 h : Film height (유막 두께) (m)
 IA : Foil inclined angle (경사 길이) (degree)
 N : The number of pad (패드수)
 p : Fluid pressure (압력) (Pa)
 p_a : Ambient pressure (주변 압력) (Pa)
 Re : Reynolds number (레이놀즈 수)
 r : Radial coordinate (반경) (m)
 rh : Ramp height (포일 경사 높이) (m)
 r_o : Foil outer radius (포일 바깥 반경) (m)
 r_i : Foil inner radius (포일 안쪽 반경) (m)
 T_a : Ambient temperature (주변 온도) ($^{\circ}C$)
 T_r : Friction drag Torque (마찰토크) (N·mm)
 t : Time (시간)
 U : Fluid velocity (m/s) (속도)
 W : Load capacity (지지하중) (N)
 μ : Eddy viscosity (와점성계수) (cm^2/s)
 μ : Viscosity (공기 점성계수) (Pa·s)
 ρ : Density (kg/m^3) (밀도)
 τ : Molecular stress tensor
 ω : Runner rotating speed (러너 속도) (rad/s)

1. 서 론

에어 포일 스러스트 베어링은 회전 운동하는 축이 시스템에서 이탈하지 않도록 축선에 평행한 하중을 지지하는 축계 기계요소이며, 베어링의 성능이 높을수록 시스템의 신뢰성이 높다. 최근 터보기계가 소형화되고 고효율화되면서 축의 회전속도가 고속화되는 추세이며, 이로 인해 베어링의 발열과 관련된 베어링 내부 유동특성 연구의 중요성이 커지고 있다.

H.Heshmat 등[1]은 에어 포일 스러스트 베어링을 레이놀즈 방정식으로부터 수치해석 하고 형상에 따른 파라미터를 연구하였다. 이 연구에서 포일의 경사면이 포일의 원주방향 길이 45~50도까지 경사를 가질 때 최대 하중지지능력이 나타났다. 이를 통해 경사면의 길이가 베어링 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. Iordanoff[2]는 포괄적인 범프포일 형상 설계 방법을 제안했고, 에어 포일 베어링의 최대 하중지지능력을 예측하였다.

Crytal A. Heshmat 등[3]은 베어링 유막과 포일형상을

연계하여 베어링 유막에서는 유한차분법(Finite Difference Method)을 포일형상에는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 하중지지능력을 예측하는 수치해석 방법을 제시하였다.

Kim 등[4]은 에어 포일 스러스트 베어링의 하중지지능력과 유막두께의 관계를 실험적인 방법으로 찾으려고 노력하였다. Kim은 안쪽 반경과 바깥쪽 반경의 유막두께 편차를 줄이고, 유막 필름의 두께를 줄이면 베어링의 하중지지능력이 증가하는 것을 확인하였다.

Dykas 등[5]은 베어링의 온도에 따른 베어링 성능을 알아보기 위해 냉각 유동에 초점을 맞춰 연구하였다. 특히, 베어링 내부 온도의 증가는 베어링의 하중지지능력을 감소시키는 결과가 나타나기 때문에 베어링의 열전달 문제는 베어링의 연구에 있어서 중요하다는 결론을 제시했다.

Kang 등[6]은 네가지 에어 포일 스러스트 베어링에 대해 회전속도 15000 RPM의 작동조건에서 수치해석을 하였다. 그 결과 스파이럴 그루브 베어링의 하중지지능력이 가장 좋은 것으로 나타났다.

Bruckner[7]는 에어 포일 베어링의 성능 곡선을 위한 실험을 통해 제조과정에 따라 베어링의 성능이 크게 25%까지 달라지는 것을 확인하였다.

San Andres 등[8]은 정적, 동적 베어링 성능의 수치해석 방법을 개발하였다. 유한요소법으로 탑포일과 범프포일을 수치해석 하였고, 그 결과를 실험과 비교하였다.

Kim 등[9]은 베어링 형상에 대한 다양한 연구를 진행하였다. 하중지지능력을 높이는 형상에 대한 파라미터 연구를 진행하였고, 경사도와 경사의 높이가 베어링 하중지지능력에 많은 영향을 주는 것으로 결론을 내렸다.

Ravikumar 등[10]은 베어링의 회전속도, 유막 두께, 포일의 형상이 베어링 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그 결과 축의 원주방향으로의 베어링 배치가 베어링의 하중지지능력을 높이는 것으로 나타났다.

새로운 형상에 대한 연구도 진행되고 있다. Parka 등[11]은 에어 포일 스러스트 베어링의 틸팅상태의 페드면에 대해 유한차분법과 유한요소법으로 수치 해석하였다. Lee 등[12]은 하이브리드 에어 포일 스러스트 베어링에 대해 파라미터 연구를 진행하였고, 오리피스 배치와 작동속도가 베어링의 성능에 영향을 미침을 확인하였다.

위에서 언급한 연구 외에도 에어 포일 스러스트 베어링에 대한 여러 수치해석 모델이 개발 되었지만, 포일의 경사면 형상에 따른 베어링 내부 유동장 및 베어링 성능에 대한 연구는 많지 않다. 이는 베어링 포일과 베어링 내부 유동을 모델링하고 그에 따른 열전달을 예측하기

위한 수치해석 모델링의 어려움 때문이다[13].

이 연구에서는 에어 포일 스러스트 베어링에 대한 3차원 CFD 복합열전달 해석을 통해 베어링 내부의 유동 특성을 분석하고, 두 가지 탑포일 형상에 따른 유동특성 차이를 고찰하였다.

2. 수치해석 모델

2-1. 해석모델

Fig. 1은 해석에 사용된 에어 포일 스러스트 베어링 (Air Foil Thrust Bearing, AFTB)의 개략도를, Table 1은 무차원화된 설계치수를 보여준다. 베어링은 6개의 패드로 구성되어있고, 각 패드는 한 개의 탑포일과 여러 개의 범프포일로 이루어져 있다. 최소유막두께는 8.4 μm로 가정하여 해석하였다.

탑포일의 경사면이 곡선형상(Type 1)과 직선형상

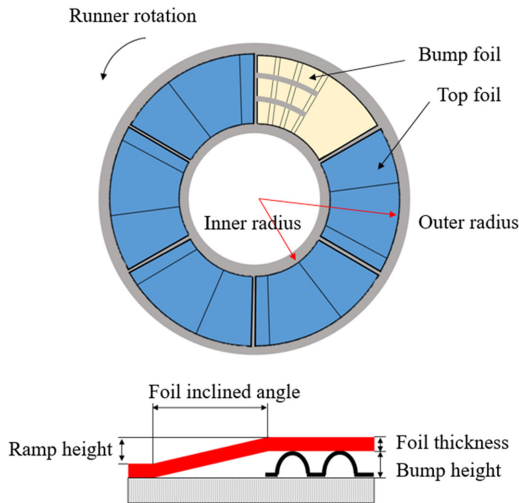


Fig. 1. Schematic view of air foil thrust bearing.

Table 1. Dimensions of air foil thrust bearing

Parameter	Dimension
Number of pad	6
Outer radius, r_o	$r_o/r_o = 1$
Inner radius, r_i	$r_i/r_o = 0.5$
Angular extension of inclined region to pad	0.4
Ramp height to top foil height	0.43
Bump foil height to top foil height	0.71
Foil thickness to top foil height	0.29
Minimum gap height, h	8.4 μm

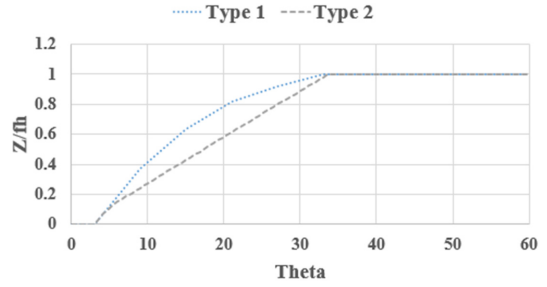


Fig. 2. Type of foil geometry.

(Type 2)인 경우에 대해 수치해석을 수행하였고, CFD 계산 결과로부터 베어링의 성능 차이를 비교 분석하였다. Fig. 2는 각 형상에 대해 반경중앙 위치에서 원주방향으로 각도에 따른 높이 변화를 보여준다.

2-2. 수치해석 방법

상용 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX 18.0을 사용하여 에어 포일 스러스트 베어링의 유동해석을 진행하였다. 스러스트 베어링을 통해 흐르는 공기유동은 베어링 유동해석에 많이 사용되는 근사식인 Reynolds 식을 사용하지 않고, 완전 3차원 압축성 유동에 대한 지배방정식 (1), (2), (3)을 사용하였다. 지배방정식의 해는 유한체적법(Finite Volume Method)으로 이산화된 방정식을 수치해석하여 구해진다[14]. 공기는 이상유체로 가정한다.

(i) 연속 방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

(ii) 운동량 방정식:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

여기서, $\tau = \mu \left[\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \tau \right]$

(iii) 에너지 방정식:

$$\frac{dq}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} e \rho dV + \int_{cs} \rho \left(gz + \frac{u^2}{2} + e + \frac{p}{\rho} \right) (u \cdot \hat{n}) dA \quad (3)$$

에어 포일 스러스트 베어링 유동의 난류유동을 해석하기 위해 시간평균된 RANS(Reynolds Averaged Navier

Stokes) 식을 사용하였다. 난류응력은 난류점성계수를 사용하여 묘사하며, 난류점성계수를 구하는 방법에 따라 다양한 난류 모델이 존재한다. 현재의 연구에서는 난류운동에너지와 난류소산항에 대한 두 개의 식으로부터 구해지는 $k-\omega$ SST(Shear stress transport) 모델을 사용한다[15].

$k-\omega$ SST(Shear stress transport) 모델은 $k-\omega$ 기반으로 벽면 근처에서는 $k-\omega$ 를 적용하고 벽면 외의 영역에서는 $k-\varepsilon$ 를 사용하여 역압력 구배 상태에서 유동박리를 잘 묘사하는 모델이다[16].

$k-\omega$ 모델과 $k-\varepsilon$ 모델에서 난류 점성계수 μ_t 는 각각 식 (4)와 식 (5)로부터 구해진다[14].

$$k-\omega\text{모델: } \mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{4}$$

$$k-\varepsilon\text{모델: } \mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

2-3. 수치해석 조건

현재의 스러스트 베어링 유로는 Fig. 3과 같이 공기압축기의 회전 임펠러의 출구에 위치한 회전부와 정지부 사이의 틈새를 통해 스러스트 베어링으로 공급된 공기는 스러스트 베어링을 통과한 후, 저널베어링 등을 지나 임펠러 입구로 회전된다. 그러므로 경계조건 값을 알 수 있는 임펠러 출구부터 압력측정값이 존재하는 스러스트 베어링 출구 후방 위치까지의 유로를 수치계산 영역으로 설정하였다.

입구경계조건으로 전압력(Total pressure)과 전온도(Total temperature), 유동각을 주었으며, 출구 경계조건으로 측

정 정압을 기술하였다. 베어링 러너(Runner)의 회전면에는 회전속도를 부여하였다.

베어링 내부의 유막과 회전하는 러너표면, 베어링 고체부가 만나는 면에 열유속 보존조건을 설정하여 고체-유체 사이의 열전달 현상을 묘사하였다. 스러스트 베어링은 6개의 패드를 가지고 있지만, 2개가 한 쌍으로 똑같은 형상이 반복되므로 2개의 패드만 포함하는 1/3 베어링 모델로 해석을 진행하였으며, 형상이 반복되는 양쪽면에 주기조건을 주었다.

해석을 위한 격자로 유막영역에는 육면체 격자, 그 이외의 유로와 고체 영역에는 사면체 격자를 사용하였다. 특히, 가장 중요한 러너와 포일의 간극이 가장 작은 영역은 축방향으로 등 간격의 15개 육면체 격자로 구성하였다(Fig. 4).

계산에 적절한 격자 개수를 찾기 위해 Fig. 5와 같이 격자 테스트를 진행하였으며, 그 결과 유막부는 430만개, 유동장 전체는 약 3000만개의 격자를 사용하여 해석을 진행하였다. 스러스트 베어링 모델 해석에 사용한 경계조건은 Table 2에 나타내었다.

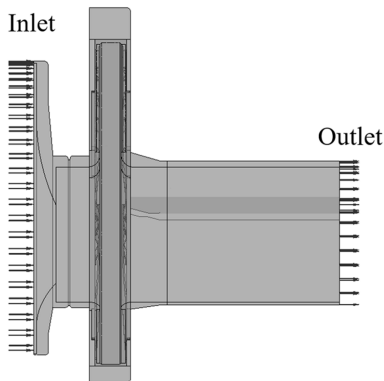


Fig. 3. Calculation domain for CFD.

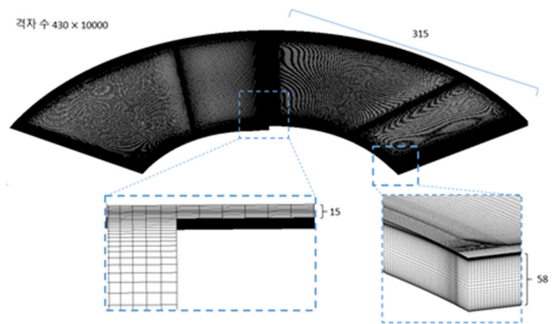


Fig. 4. Grids in the gap region of AFTB.

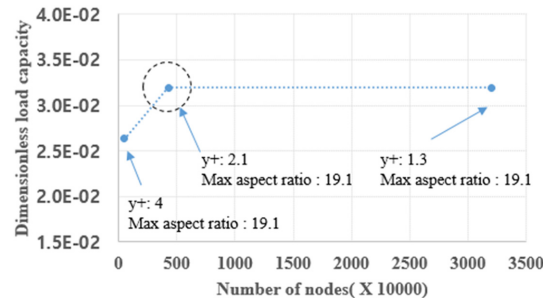


Fig. 5. Comparisons of load capacity with the number of grids.

Table 2. Boundary conditions of CFD

Solver	ANSYS CFX (18.0)	
Turbulence model	k- ω SST	
Inlet condition (1)	Total Pressure	$p_{t1}/p_a = 1.64$
	Total Temperature	$T_{t1}/T_a = 3.8$
	Flow angle	Normal to the surface
	Turbulence Intensity	5%
Outlet condition (2)	Static Pressure	
Wall condition	Stationary wall or Rotating wall No slip wall	
Periodic surface	Rotational periodicity	
Solid- Fluid Interface	Conservative heat transfer	

3. 결과 및 고찰

3-1. 베어링 내부 유동 특성

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 곡선형 탐포일(Type 1) 베어링과 직선형 탐포일(Type 2) 베어링의 러너표면에서 무차원 압력분포를 보여준다. 압력분포 형태는 탐포일의 형상과 상관없이 유사하지만 압력의 크기는 곡선형 탐포일이 더 크다.

각 반경위치에서의 최대압력은 탐포일 형상과 관계없이 경사 끝부분인 B부근에서 나타난다. 따라서 탐포일이 경사진 램프영역에서는 역압력구배가 나타나고, 최소

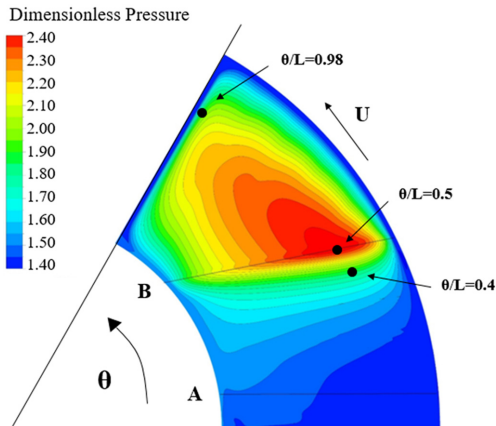


Fig. 6. Pressure distribution on the runner surface for Type 1 bearing.

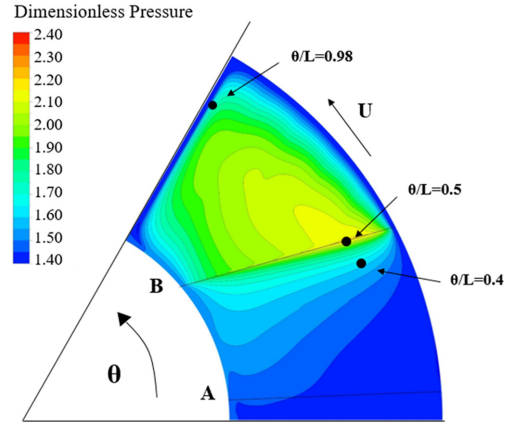


Fig. 7. Pressure distribution on the runner surface for Type 2 bearing.

유막두께로 간극을 유지하는 플랫폼영역에서는 순압력구배가 작용한다.

베어링 내부의 회전방향 속도와 압력은 관성력을 무시한 2차원 Reynolds 식으로부터 식(6)과 같은 무차원 원주방향 속도에 대한 해를 구할 수 있다[17]. 이는 움직이는 벽면의 전단응력과 압력구배에 의한 완전발달된 Couette-Poiseuille 유동의 해와 같다.

$$u^* = \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \frac{y^{*2}}{2} + \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right) y^* \tag{6}$$

여기서, $y^* = \frac{y}{h_0}, x^* = \frac{x}{L}, u^* = \frac{u}{U}, v^* = \frac{v}{Uh_0}$,

$$p^* = \frac{p}{\rho U^2} Re \frac{h_0}{L}$$

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 곡선형 탐포일과 직선형 탐포일에 대해 최대압력이 나타나는 반경인 3/4지점에서 베어링 유막 높이에 따른 회전방향 속도 크기를 보여준다. 탐포일면(z/h=0)에서 속도는 0이며, 러너면(z/h=1)에서 속도는 회전속도와 같으며 무차원 속도로는 1이다.

Fig. 8과 Fig. 9로부터 탐포일 형상과 상관없이 역압력구배가 나타나는 $\theta L = 0.4$ 에서는 압력구배의 영향으로 압력구배가 0인 경우에 비해 낮은 속도분포를 가지며, 포일면(z/h=0)에서 러너면(z/h)으로 갈수록 속도구배가 점점 커진다. 역압력구배의 영향으로 $\theta L = 0.4$ 에서 곡선형 탐포일(Type 1)의 경우 포일면에서 속도구배가 0인 유동 박리점이 나타나며, 직선형 탐포일(Type 2)의 경우 포일면 부근에서 유동박리로 인한 역류영역이 나타남을 알 수 있다.

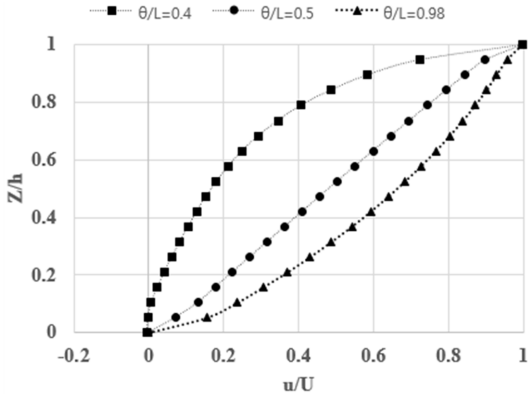


Fig. 8. Velocity profile at different circumferential positions along $r/r_o = 3/4$ for type 1 bearing.

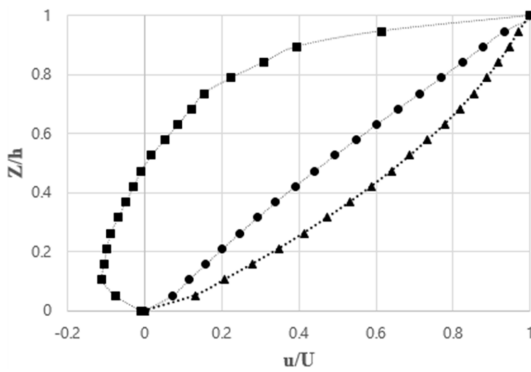


Fig. 9. Velocity profile at different circumferential positions along $r/r_o = 3/4$ for type 2 bearing.

전단응력은 속도구배의 크기에 비례하므로 러너면에서 가장 크고, 이로 인해 러너면에서 마찰손실과 마찰열이 포일면 보다 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

순압력구배 영역인 $\theta/L = 0.98$ 에서 속도분포는 압력구배가 0인 경우보다 높은 속도 분포를 가지며 포일면($z/h = 0$)에서 러너면($z/h = 1$)으로 갈수록 속도구배가 점점 작아진다. 그러므로 전단응력은 러너면 보다 포일면에서 크게 나타난다.

3-2. 베어링 성능

탐포일 경사면의 형상은 유막에서 생성되는 압력크기와 속도분포에 영향을 미치고, 이에 따라 베어링 성능의 차이가 나타난다. Fig. 10은 곡선형 탐포일(Type 1)과 직선형 탐포일(Type 2)에 대한 하중지지능력(load capacity)과 마찰토크(friction drag torque)를 보여준다.

무차원 베어링 하중지지능력과 마찰토크는 CFD 계산

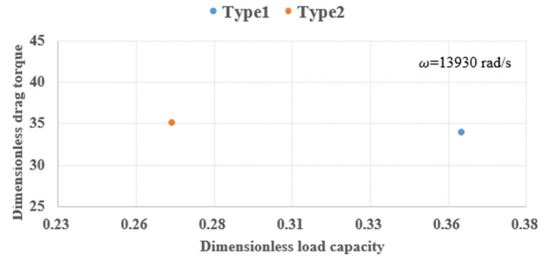


Fig. 10. Bearing viscous friction drag torque versus load capacity for Type1 AFTB, for Type2 AFTB, for design point.

결과로부터 아래의 계산식을 사용하여 구한다[9].

$$\bar{W} = N_f \int_0^\beta \int_{r_o}^{r_i} \frac{L}{r} r dr d\theta \quad (7)$$

$$\bar{T}_r = N_f \int_0^\beta \int_{r_o}^{r_i} \left[\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\mu \omega r^2}{h} \right] r dr d\theta \quad (8)$$

여기서, $\bar{W} = \frac{W}{p_a r_o^3}$, $\bar{T}_r = \frac{T}{p_a c r_o^2}$ 이다.

곡선형 탐포일(Type 1)과 직선형 탐포일(Type 2)베어링의 무차원 하중지지능력은 각각 0.36과 0.27이다. 이 미 예상하였듯이 더 큰 압력을 생성하는 곡선형 탐포일이 직선형 탐포일에 비해 하중지지능력이 30% 정도 더 크다.

무차원 마찰토크는 곡선형 탐포일과 직선형 탐포일 베어링이 각각 34와 35로 곡선형 탐포일이 약간 작지만 큰 차이를 보이지 않는다.

3-3. 질량유량 분석 및 온도분포에 미치는 영향

에어 포일 스템트 베어링에서 공기는 인쪽반경(Fig. 11에서 ①, ②, ③)으로 들어오고, 바깥반경(Fig. 11에서 ⑧, ⑨, ⑩)으로 나간다. 또한, 러너의 회전방향으로 순환하는 유동이 Fig. 11의 ④의 면으로 들어와 ⑦의 면으로 유출되어 다음 패드로 들어간다. 여기서, ④의 면으로 유입되는 공기유량은 이전 패드의 범프포일 공간을 통해 들어오는 공기를 포함하기 때문에 ⑦로 나가는 유량보다 많은 유량이 들어온다. 따라서 ①, ②, ③ 및 ④의 면으로 유입되는 공기의 질량유량은 ⑦, ⑧, ⑨ 및 ⑩의 면으로 나가는 질량유량과 같아 질량보존식을 만족시킨다.

CFD 계산결과에 따르면 플랫폼영역(③)으로 들어오는 공기는 거의 없으며, ④의 면으로 약 60%의 공기가 유입되고, 나머지는 랜드영역(②)과 램프영역(③)으로 유입된

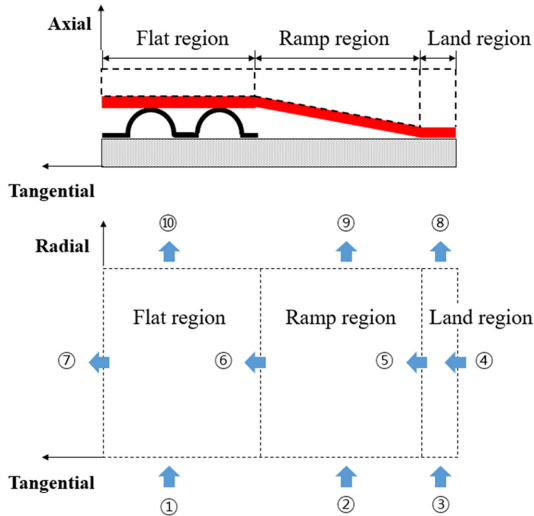


Fig. 11. Flow paths through the AFTB.

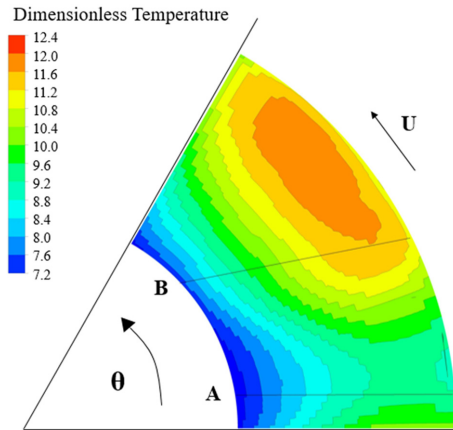


Fig. 12. Temperature distribution on runner surface for Type 1 bearing.

다. 대부분의 공기는 랜드영역(②)과 램프영역(③)으로 유출되고, 플랫폼영역(⑩)으로 유출되는 공기는 거의 없다.

⑦의 면을 통해 다음 페드로 순환되는 유량은 곡선형 탐포일(Type 1)의 경우 총 유입유량의 약 7.3%, 직선형 탐포일(Type 2)의 경우 약 5.5%로 포일 형태에 따라 순환유량의 차이를 보인다. 이는 탐포일 경사면 끝부분에서 형성되는 역압력구배의 크기와 관련이 있다. Fig. 9에서 $\theta L = 0.4$ 위치의 속도분포에서 보듯이, 직선형 탐포일은 포일면 부근의 역류로 인해 곡선형 탐포일에 비해 베어링 바깥쪽으로 유출되는 누설유량(leakage rate)이 커진다. 이로 인해 베어링 최소간극을 통과하는 순환유량이

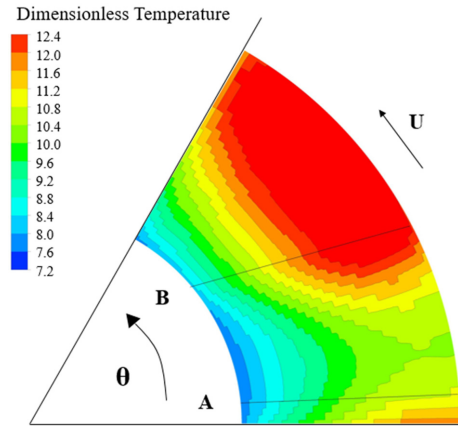


Fig. 13. Temperature distribution on runner surface for Type 2 bearing.

적고, 이에 따라 플랫폼영역에서의 온도가 높아지는 경향이 있다[18]. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 곡선형 탐포일과 직선형 탐포일에 대해 러너면에서 온도분포를 보여준다. 순환유량이 적은 직선형 탐포일(Type 2) 베어링에서 온도가 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

터보압축기에 사용되는 6패드 에어 포일 스텔스트 베어링에 대해 3차원 CFD 유체-고체 복합 열전달 해석을 진행하였다. 탐포일의 경사면이 곡선인 베어링과 직선인 베어링의 내부 압력분포와 속도분포를 통해 유동특성을 분석하였고, 베어링으로 유입되고, 유출되는 유량 분석과 이를 통해 온도분포 특성을 살펴보았다.

해석을 통해 제시된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 최대압력은 탐포일 경사면 끝부분에서 형성되며, 곡선형 탐포일 형상은 직선형 탐포일 형상에 비해 베어링 내부 압력은 약 9% 정도, 하중지지능력은 약 30%정도 높게 나타난다.
- 2) 곡선형 탐포일 형상은 직선형 탐포일 형상에 비해 탐포일 경사면 끝부분에서 역압력구배로 인한 역류가 적다.
- 3) 곡선형 탐포일 형상은 직선형 탐포일 형상에 비해 순환유동이 약 30% 정도 많으며, 이로 인해 베어링 내부 최대온도는 약 3.3% 정도 낮다.

Acknowledgements

이 논문은 한화파워시스템이 지원하는 서울대학교 가스터빈 및 파워시스템 공동연구센터의 에너지시스템 핵

심기술개발 과제와, 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (2021202080026C, 1,500HP급 터보 공기압축기 가변속 개보수 효율향상 기술개발 및 실증).

References

- [1] Heshmat, H., Walowit, J. A., Pinkus, O., "Analysis of Gas Lubricated Compliant Thrust Bearings," *Journal of Lubrication Technology*, 105, pp.054001-1-054001-7, 1983.
- [2] Jordanoff, I., "Maximum Load Capacity Profiles for Gas Thrust Bearings Working Under High compressibility Number Conditions," *ASME J. Tribol.*, 120(3), pp.571-576, 1998.
- [3] Heshmat, C. A., David, S. X., Heshmat, H., "Analysis of Gas Lubricated Foil Thrust Bearings Using Coupled Finite Element and Finite Difference Methods," *Journal of Tribology*, Vol.122, No.1, pp.199-204, 2000.
- [4] Kim, T. Y., Park, D. J., Lee, Y. B., "A study of the Load Capacity of Air Foil Thrust Bearings," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.25, No.5, pp.292-297, 2009.
- [5] Dykas, B., Prah, J., DellaCorte, C., Bruckner R., "Thermal Management Phenomena in Foil Gas Thrust Bearings," Proceedings of the ASME Turbo Expo, Barcelona, Spain, pp.1-7, 2006, <https://doi.org/10.1115/gt2006-91268>
- [6] Kang, J. H., Kim, K. W., "A Study on the Performances of Hydrodynamic Air Lubricated Thrust Bearings of Several Types," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.18, No.5, pp.361-370, 2002.
- [7] Bruckner, R. J., "Performance of Simple Gas Foil Thrust Bearings in Air," NASA/TM-2012-217262, 2012.
- [8] Andres, L. S., Ryu, K., Diemer, P., "Prediction of Gas Thrust Foil Bearing Performance for Oil-Free Automotive Turbochargers," *J. Eng. Gas Turbines Power.*, 2015, <https://doi.org/10.1115/1.4028389>
- [9] Kim, T. H., Lee, T. W., "Design Optimization of Gas Foil Thrust Bearings for Maximum Load Capacity," Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, Montréal, Canada, pp.1-9, 2015.
- [10] Ravikumar, R. N., Rathnanraj, K. J., ArunKumar, V., "Comparative Experimental Analysis of Load Carrying Capability of Air Foil Thrust Bearing for Different Configuration of Foil Assembly," *Procedia Technology*, 25, pp. 1096-1105, 2016.
- [11] Park, D. J., Kim, C. H., Jang, G. H., Lee, Y. B., "Theoretical Considerations of Static and Dynamic Characteristics of Air Foil Thrust Bearing with Tilt and Slip Flow," *Tribology International*, 41, pp.282-295, 2008.
- [12] Lee, D. H., Kim, D. J., "Design and Performance Prediction of Hybrid Air Foil Thrust Bearings," *J. Eng. Gas Turbines Power.*, 2011, <https://doi.org/10.1115/1.4002249>
- [13] Suh, J. H., Hwang, C. H., "Performance of Tilting Pad Journal Bearing with Different Thermal Boundary Conditions", *Tribol. Lubr.*, Vol.37, No.1, pp.14-24, 2021.
- [14] ANSYS CFX User Guide, Release 18.0, Ansys, Inc., Southpointe, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, 2017.
- [15] Shin, H. J., Park, G. W., "2 FSI Analysis of an Air Foil Thrust Bearing of Air Compressor for a Hydrogen Electric Car", *Trans. Korean Soc. Noise. Vib Eng.*, Vol.29, No.6, pp.762-769, 2019.
- [16] Bardina, J. E., Huang, P. G., Coakley, T. J., "Turbulence Modeling Validation, Testing and Development", NASA Technical Memorandum 110446, 1997.
- [17] Cupillard, S., Cervantes, M. J., Glavatskih, S., "Pressure Buildup Mechanism in a Textured Inlet of a Hydrodynamic Contact", *J. Tribol.*, Vol.130, No.2, pp.021701, 2008.
- [18] Gad, M. A., Kaneko, S., "Tailoring of the Bearing Stiffness to Enhance the Performance of Gas-lubricated Bump-type Foil Thrust Bearing", Proc. Inst. Mech. Eng. J: *J. Eng. Tribol.*, 2016, <https://doi.org/10.1177/1350650115606482>