

경사형과 계단형 리세스를 갖는 가압형 가스 포일 스러스트 베어링의 하중지지 성능 예측

김남규¹ · 권용범¹ · 박찬솔¹ · 김태호^{2*}

¹국민대학교 대학원 기계시스템공학과 석사과정생

²국민대학교 기계공학부 교수

Predictions of Load Support Performance of a Pressurized Gas Foil Thrust Bearing with Sloped and Stepped Recesses

Nam Kyu Kim¹, YongBum Kwon¹, Chan Sol Park¹ and Tea Ho Kim^{2*}

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

²Professor, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

(Received September 24, 2024; Revised October 23, 2024; Accepted October 24, 2024)

Abstract: Gas foil thrust bearings (GFTBs) support axial loads in oil-free, high speed rotating machinery using gas as a lubricant. However, under low-speed and high-load conditions, such a bearing experiences friction, leading to wear and a reduced lifespan. Therefore, a pressurized GFTB (PGFTB) that combines hydrostatic and hydrodynamic lubrication by supplying pressurized gas through the supply hole of the top foil has been developed, and various studies have been conducted. In this study, we develop mathematical models of PGFTBs with sloped and stepped recesses and predict its load support performance. The PGFTB maintains a minimum film thickness of approximately 20 μm at rest (0 rpm), regardless of the type of recess, indicating a sufficient hydrostatic pressure to lift the runner at a low rotor speed. Furthermore, the minimum film thickness increases slightly as the numbers of feed holes in the in- and outward radial directions relative to the centerline of the PGFTB pad increase. These findings highlight the importance of supply hole placement in enhancing load support performance. As the rotor speed increases, the minimum film thickness increases rapidly, regardless of the number of supply holes, and without pressurization, sufficient hydrodynamic pressure is generated to lift the runner upon exceeding a certain rotor speed. When comparing the sloped and stepped recesses, the PGFTB with the sloped groove exhibits a superior overall load support performance.



© Korean Tribology Society 2024. 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: Pressurized gas foil thrust bearing(가압형 가스 포일 스러스트 베어링), Load support performance(하중지지성능), Minimum film thickness(최소 유막두께), Recess type(리세스 타입), Supply hole(급기공)

Nomenclature

A_c : Dimensionless node area surrounding the supply hole point (-)
(급기공 지점을 둘러싼 무차원 노드 영역)

*Corresponding author: Tae Ho Kim
Tel: +82-2-910-4723, Fax.: +82-2-910-4839
E-mail: thk@kookmin.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-9574-2730>

- A_o : Area of supply hole (m^2) (급기공 면적)
 c : Bearing clearance (m) (베어링 간극)
 C_d : Discharge coefficient of orifice (-)
 (오리피스 유출 계수)
 e : Thrust runner eccentricity (m)
 (스텔러스트 러너 편심량)
 h : Film thickness (m) (유막 두께)
 h_R : Ramp height (m) (경사/계단 높이)
 k : Ratio of specific heat (-) (열용량 비)
 K_{ff} : Bump stiffness per unit area (N/m^3)
 (단위 면적당 범프 강성)
 N_{orif} : Number of supply holes (-) (급기공 수)
 N_{pad} : Number of pads (-) (패드 수)
 P : pressure (Pa) (유막 압력)
 P_a : Ambient pressure (Pa) (대기압)
 \bar{P} : = P/P_a . Dimensionless pressure (-)
 (무차원 압력)
 P_s : Supply pressure (Pa) (공급 압력)
 \bar{P}_s : = P_s/P_a . Dimensionless supply pressure (-)
 (무차원 공급 압력)
 Q_s : Dimensionless supply pressure (Pa)
 (무차원 질량 유량)
 r : Radial coordinate (m) (반경 좌표)
 r_i : Top foil inner radius (m) (탑포일 내부 반경)
 r_o : Top foil outer radius (m) (탑포일 외부 반경)
 r_{orif} : Radial coordinate of supply hole (m)
 (급기공의 반경 방향 위치)
 r_s : Radius of supply hole (m) (급기공 반경)
 W : Axial load (N) (축 하중)
 Γ_s : Dimensionless supply coefficient (-)
 (무차원 급기 계수)
 A : Dimensionless bearing speed number (-)
 (무차원 베어링 속도 수)
 ω : Angular velocity (rad/s) (각속도)
 δ : Bump foil deflection (m) (범프 포일 변형량)
 θ : Angular coordinate (rad) (각도 좌표)
 θ_c : Whirl frequency (rad) (탑포일 각도)
 θ_r : Whirl frequency (rad) (리세스 각도)
 θ_w : Whirl frequency (rad) (용접부 각도)
 θ_{orif} : Angular coordinate of supply hole (rad)
 (급기공의 각도 방향 좌표)

1. 서 론

가스 포일 베어링(Gas Foil Bearing, GFB)은 탑 포일(Top foil)과 범프 포일(Bump foil)로 구성된 유연한 탄

성 지지체와 회전축 사이 간극에 유체 동압을 형성하여 하중을 지지하기 때문에 구조가 단순하고 마찰이 적다. 하지만, 유체 동압이 충분히 형성되지 못하는 저속 및 고하중 조건에서는 탄성 지지체와 러너 사이에 접촉이 발생하여 마찰로 인한 마모가 증가하며 이로 인해 내구 수명이 감소한다.

최근 무급유 소형 터보기계의 출력이 증가함에 따라 축방향 힘을 지지하는 스텔러스트 베어링의 하중지지능력이 더욱 중요해지고 있다. 이에 가스 포일 스텔러스트 베어링(Gas Foil Thrust Bearing, GFTB)의 하중지지 특성 규명을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. Heshmat [1] 등은 가스 포일 스텔러스트 베어링의 하중지지능력을 예측하기 위하여 범프 구조 강성을 계산하였고, 탑포일과 러너 사이에 발생하는 동적 압력을 계산하기 위해 레이놀즈 방정식을 사용하였다. 해석 결과는 범프의 강성이 증가함에 따라 하중지지 성능이 향상됨을 보였다. Kim [2] 등은 가스 포일 스텔러스트 베어링의 형상 치수에 따른 하중지지력과 마찰토크 성능 변화를 예측하였다. 해석 결과는 최대 하중 지지력을 갖기 위한 최적의 탑 포일 선단(leading edge) 경사 높이가 존재함을 보였으며, 실험 결과는 이를 검증하였다. Hwang [3] 등은 볼록한 곡선(convex curve)의 탑 포일 경사부를 갖는 가스 포일 스텔러스트 베어링의 수학적 모델을 개발하였다. 수치 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하여 모델을 검증하였다. 또한, 베어링의 탑 포일이 볼록한 곡선의 경사부를 가질 때가 직선의 경사부를 가질 때보다 높은 하중을 지지할 수 있음을 예측하였다. Hwang [4]은 주변 압력(ambient pressure)을 증가하며 가스 포일 스텔러스트 베어링의 하중지지능력을 측정하였다. 주변 압력이 증가할수록 베어링의 하중지지능력이 현저히 증가하며, 마찰토크와 베어링의 표면 온도는 감소함을 밝혔다. Hwang [5] 등은 스텔러스트 러너의 표면 조도에 따른 가스 포일 스텔러스트 베어링의 정적 성능 평가를 통해 러너의 표면 조도가 낮을수록 하중지지능력이 현저히 향상되며 부상속도, 마찰토크, 베어링 표면 온도가 낮아짐을 밝혔다. Cho [6] 등은 주변 온도(ambient temperature)를 증가하며 가스 포일 스텔러스트 베어링의 하중지지능력을 고찰하여 분석하였다. 온도가 증가함에 따라 저속에서의 마찰토크와 부상속도는 높아지며 최대하중지지능력은 감소함을 밝혔다. 실험결과는 수학적 모델 예측 결과와 잘 일치한다. Lee와 Kim [7]은 탑포일 선단이 계단형(Rayleigh step)이며 한 개의 급기공을 갖는 가압형 가스 포일 스텔러스트 베어링의 정동특성을 해석적으로 연구하였다. 급기공 유무와 급기공의 원주 방향 위치 변화에 따른 해석 결과는

급기공이 없는 유체 동압 조건에서 가장 낮은 하중지지 능력을, 급기공이 리세스(recess)가 끝나고 평평한 구간(land)시작부에 위치한 조건에서 가장 높은 하중지지 능력을 예측하였다. Ebewele [8]등은 경사진 탐포일 선단에 한 개의 급기공을 갖는 가압형 가스 포일 스투스트 베어링의 하중지지 능력을 실험적으로 규명하였다. 실험결과와 해석 결과와 잘 일치함을 보였다.

본 논문에서는 아직까지 연구가 미흡한 탐 포일 리세스 형태 변화와 가압형 가스 포일 스투스트 베어링의 급기공 개수 증가에 따른 성능 예측을 수행하였다.

2. 가스 포일 스투스트 베어링 소개

Fig. 1(a)는 6개의 패드(pad)를 갖는 일반적인 형태의 가스 포일 스투스트 베어링의 평면도를 보여주며, Fig. 1(b)는 한 개 패드의 단면(A-A)를 보여준다. 한 개의 패드는 탐 포일과 이를 지지하는 범프 포일로 구성되며 탐 포일은 경사진 구간 (inclined or recess area)과 평평한 구간(flat or land area)을 갖는다.

3. 해석 모델

Fig. 2는 (a)경사형 및 (b)계단형 리세스를 갖고 탐포일에 급기공이 있는 가압형 가스 포일 스투스트 베어링

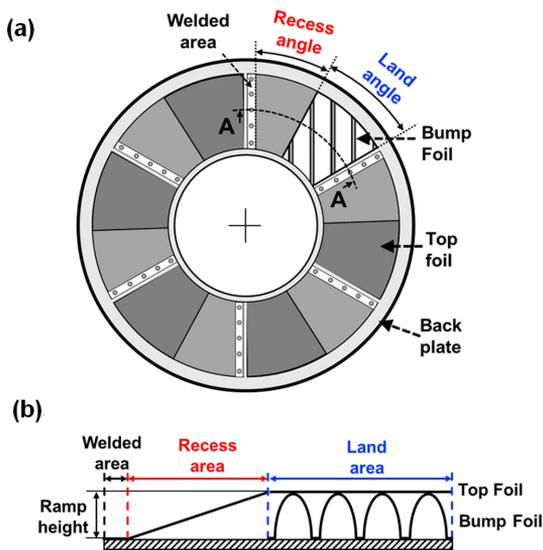


Fig. 1. Schematic view of typical gas foil thrust bearing. (a) top view, (b) cross-section view(A-A).

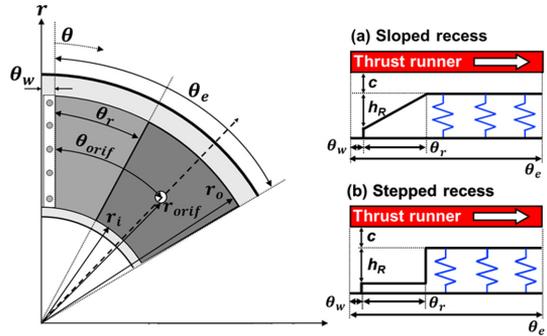


Fig. 2. Schematic views of a single pad of PGFTB with (a) sloped recess and (b) stepped recess.

(Pressurized gas foil thrust bearing, PGFTB)의 단일 패드에 대한 개략도를 보여준다. θ_e , θ_r , θ_w , θ_{orif} 은 각각 탐포일 각도, 리세스 각도, 용접부 각도, 급기공(orifice) 각도이다. r_i , r_o , r_{orif} 는 각각 패드의 내경 반지름, 외경 반지름, 급기공 위치의 반지름이다. c , h_R 는 각각 윤활 간극 (clearance)과 경사/계단의 높이를 나타낸다.

$$\frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \bar{P} \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{r}} \right) + \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{P} \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right) = A \frac{\partial (\bar{P} \bar{h})}{\partial \theta} - \frac{Q_S}{A_c}$$

where, $\bar{h} = \frac{h}{c}$, $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$, $\bar{r} = \frac{r}{r_o}$, $A = \frac{6\mu\omega}{P_a} \left(\frac{r_o}{c} \right)^2$, $A_c = \bar{r} \Delta \theta \Delta \bar{r}$ (1)

식 (1)은 유막의 압력 분포를 계산하기 위해 사용한 등온, 등점성 이상기체를 위한 무차원화된 레이놀즈 방정식을 보여준다[2]. h , P , P_a , r , r_o , μ , ω , θ 각각 유막 두께, 유막 압력, 주변압력, 반경 좌표, 외경 반지름, 가스 점도, 회전속도, 각도 좌표를 나타내며 A 는 베어링 속도 무차원 수이다. Q_S 는 급기공 위치에서만 존재하는 가압된 가스의 무차원 유량이며, A_c 는 급기공 지점을 둘러싼 무차원 노드 면적이다[7].

식 (2)는 유막 두께 수식을 보여준다. e 는 스투스트 러너의 편심량, δ 는 범프 포일의 탄성 변형량, 그리고 $g(\theta)$ 는 경사 혹은 계단형 리세스로 인한 윤활 간극 증가량을 나타낸다.

$$h = c - e + \delta + g(\theta) \tag{2}$$

경사형 리세스를 갖는 경우의 윤활 간극 증가량은 식 (3)과 같다. h_R 은 경사부 시작 각도인 θ_w 에서 h_R 을 가지며 경사부가 끝나는 각도인 θ_e 에서 0까지 선형적으로 감소한다[3].

$$g(\theta) = \begin{cases} h_R(\theta) & (0 < \theta \leq \theta_r) \text{ for sloped recess} \\ 0 & (\theta_r < \theta \leq \theta_e) \text{ for lan region} \end{cases} \quad (3)$$

계단형 리세스를 갖는 경우의 윤활 간극 증가량은 식 (4)와 같다. 리세스 전체 영역에서 h_R 은, 이후 랜드(land) 구간에서는 0이다.

$$g(\theta) = \begin{cases} h_R & (0 < \theta \leq \theta_r) \text{ for stepped recess} \\ 0 & (\theta_r < \theta \leq \theta_e) \text{ for land region} \end{cases} \quad (4)$$

급기공이 위치한 절점에서의 무차원 유량은 식 (5)를 이용하여 계산이 가능하다. 유속이 음속에 도달하면 초킹(choking)이 발생하여 식 (6)을 이용한다. k , \bar{P}_s , Γ_s , C_d , A_0 , r_s 는 각각 열용량 비, 무차원 공급 압력, 무차원 급기 계수, 오리피스 계수, 오리피스 면적, 오리피스 반경을 나타낸다.

$$Q_s = \begin{cases} \Gamma_s \bar{P}_s \bar{h} \left(\frac{2k}{k-1} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \left(\frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}^{\frac{1}{2}} & \dots \frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \Gamma_s \bar{P}_s \bar{h} \left(\frac{2k}{k+1} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} & \dots \frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{P}_s = \frac{P_s}{P_a}, \Gamma_s = \frac{12\mu C_d A_0 \sqrt{RT}}{P_a h^3}, A_0 = 2\pi r_s h \quad (7)$$

급기공에서의 가압 가스 유량 증가를 제외하면 수치 해석 방법은 참고문헌 [3]과 동일하다.

4. 해석 결과

Table 1은 본 연구의 해석 모델 검증에 위해 사용한 참고문헌 [7]의 계단형 리세스를 갖는 PGFTB의 형상 치수와 작동 조건을 보여준다. 베어링 외경 반지름과 내경 반지름은 각각 55 mm와 27.5 mm이다. 용접부를 제외한 패드의 각도는 55°, 리세스 각도는 23.5°, 리세스 깊이는 35 μ m이다. 한 쌍의 PGFTB가 스텐드 러너를 양쪽에서 지지하며 윤활 간극은 편측 35 μ m이다. 축 하중은 100 N이며 급기공 압력은 4 barG이다.

Fig. 3은 하중 방향에 위치한 단일 패드에서의 원주 각도에 따른 패드 중앙선(centerline) 압력 분포 해석결과를 참고문헌[7]의 결과와 비교하여 보여준다. 해석 결과

Table 1. Geometry and operating conditions of PGFTB

Parameter	Value
Number of pads (N_{pad})	6
Top foil outer radius (r_o)	0.055 m
Top foil inner radius (r_i)	0.0275 m
clearance (c)	0.000035 m
Pad angle (θ_c)	55°
Recess angle (θ_r)	23.5°
Recess height (h_R)	0.000035 m
Bump stiffness per unit area (K_{β})	15.3 GN/m ³
Supply Pressure (P_s)	4 barG
Axial load (W)	100 N

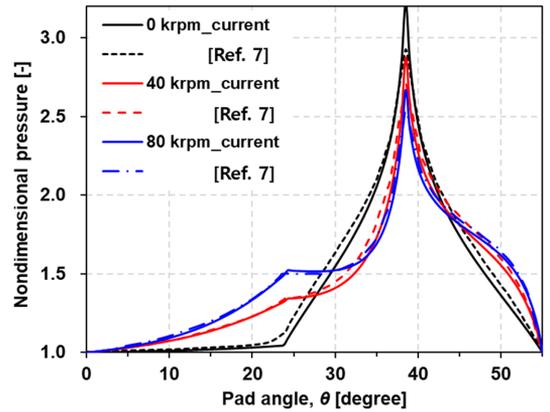


Fig. 3. Predicted pressure versus pad angle for increasing speeds. Comparison to predictions in ref. [7].

는 급기공 위치($\theta_{orif} = 38.5^\circ$)에서 최대 압력 피크가 발생하며, 회전속도가 정지상태에서 80 krpm으로 증가함에 따라 유체 동압이 추가적으로 발생하면서 압력 구간이 넓어짐을 보여준다. 전반적으로 참고문헌과 해석 결과는 잘 일치하며, 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

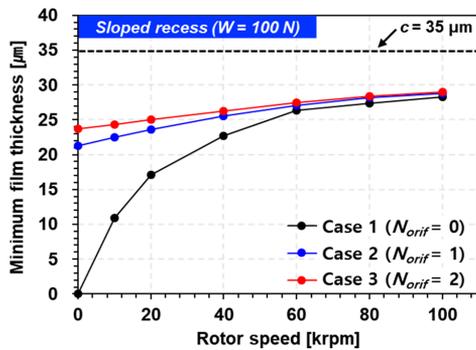
Table 2은 추가적인 해석 케이스를 요약하여 보여준다. 리세스 형상, 급기공의 개수, 급기공의 위치 변화에 따라 총 6가지 경우에 대하여 회전속도를 증가시키며 최소 유막 두께를 비교하였다. Case 1, 4을 제외한 급기공이 존재하는 모든 경우에 대해 공급압력은 4 barG로 동일하다.

4.1. 경사형 리세스 및 급기공의 영향 (Cases 1-3)

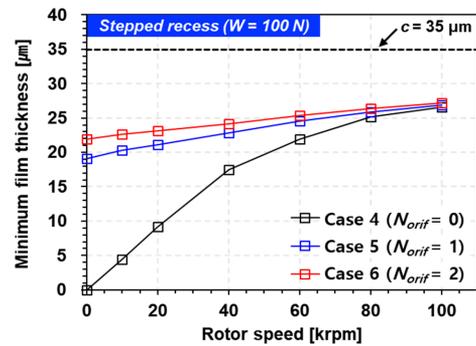
Fig. 4는 경사형 리세스를 갖는 PGFTB의 급기공 개수 증가에 따른 최소 유막 두께를 회전속도를 변화하며

Table 2. Predicted cases with different recess type, number of supply holes, and hole locations

Case No.	Recess type	Number of supply holes, N_{orif} [-]	Radial coordinate of supply hole, r_{orif} [mm]	Angular coordinate of supply hole, θ_{orif} [deg]
1	sloped	0	n/a	n/a
2		1	41.2	38.5
3		2	36.7	38.5
4	stepped	0	n/a	n/a
5		1	41.2	38.5
6		2	36.7	38.5

**Fig. 4. Minimum film thickness versus rotor speed for increasing number of holes. Static load of 100 N. Sloped recess.**

비교하여 보여준다. 급기공 유무에 관계없이 최소유막두께는 회전속도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다. 급기공 없이 순수한 유체동압으로 구동하는 Case 1 ($N_{orif} = 0$)의 경우 정지 상태에서는 유막두께가 존재하지 않다가 10 krpm 이상의 속도에서 10 μm 이상의 최소유막두께를 갖는다. 반면, 급기공이 존재하는 경우 (Case 2, Case 3)에는 정지상태에서도 20 μm 이상의 최소유막두께를 확보할 수 있다. 유막두께는 급기공이 없는 경우에 가장 작고 급기공이 2개일 경우에 가장 크다. 예를 들어, 회전속도 10 krpm에서 급기공이 없는 경우의 유막두께는 약 10.9 μm 이며 급기공이 하나와 두개일 때는 각각 약 22.5 μm 와 24.4 μm 로 각각 106.4%와 123.9% 증가한다. 급기공이 하나일 때보다 두개일 경우의 유막두께 증가가 현저히 크지 않은 이유는 두 개의 급기공들이 각각 내경 및 외경 끝단과 가깝게 위치하여 압력 누수가 발생하기 때문으로 사료된다. 유체동압이 충분히 발생하는 60 krpm 이상의 높은 회전속도에서는 급기공의 유무에 따른 최소유막두께의 차이가 매우 작다.

**Fig. 5. Minimum film thickness versus rotor speed for increasing number of holes. Static load of 100 N. Stepped recess.**

4.2. 계단형 리세스 및 급기공의 영향 (Cases 4-6)

Fig. 5는 계단형 리세스를 갖는 PGFTB의 급기공 개수 증가에 따른 최소 유막 두께를 보여준다. 급기공 유무에 관계없이 최소유막두께는 회전속도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다. 급기공 없이 순수한 유체동압으로 구동하는 Case 4 ($N_{orif} = 0$)의 경우 정지 상태에서는 유막두께가 존재하지 않는 반면, 급기공이 존재하는 경우 (Case 5, Case 6)에는 정지상태에서도 19.1 μm 이상의 최소유막두께를 갖는다. 회전속도 10 krpm에서 급기공이 없는 경우의 유막두께는 약 4.4 μm 이며 급기공이 하나와 두개일 때는 각각 약 20.3 μm 와 22.7 μm 로 각각 363.5%와 417.4% 증가한다. 급기공의 유무에 따른 최소유막두께의 차이는 100 krpm 이상에서 매우 작다. Fig. 4와 Fig. 5의 해석 결과 비교는 급기공 유무에 관계없이 경사형 리세스를 갖는 PGFTB의 하중지지능력이 더 우수함을 보여준다. 또한, 급기공이 하중지지능력에 미치는 영향은 계단형 리세스를 갖는 PGFTB의 경우에 더욱 뚜렷하다.

5. 결 론

본 논문에서는 경사형과 계단형 리세스를 갖는 가압형 가스 포일 스러스트 베어링의 하중지지 성능을 예측하고 비교하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 해석에 사용된 PGFTB의 형상 치수 및 운전조건에서는 경사형 리세스의 경우가 계단형 리세스보다 하중지지능력 향상에 유리하다.

(2) 하중 지지를 위해 필요한 유체동압이 충분히 형성되지 않는 저속 회전 구간에서는 급기공을 통한 가압을 이용하여 유막두께를 효과적으로 증가시킬 수 있다.

(3) 급기공 개수가 증가할수록 하중지지 성능이 증가하지만, 급기공의 위치가 패드 중심에서 먼 경우에는 개수 증가에 따른 하중지지능력 향상 효과는 크지 않다.

Acknowledgements

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “AI/ICT 기반 가변형 유체기기 설계, 상태진단을 위한 기반 플랫폼 기술 및 운영관리 시스템 개발” 연구과제(2021 202080026D)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

[1] Heshmat, H., Walowit, J. A., Pinkus, O., “Analysis

of gas lubricated compliant thrust bearings”, *J. Tribol.*, Vol.105, No.4, pp. 638-646, 1983.

[2] Kim, T. H., Park, M., Lee, T. W., “Design Optimization of Gas Foil Thrust Bearings for Maximum Load Capacity,” *J. Tribol.*, Vol.139, No.3, p.031705, 2017.

[3] Hawng, S., Mehdi, S. M., Kim, T. H., “Static Performance Measurements and Model Predictions of Gas Foil Thrust Bearing with Curved Incline Geometry,” *Lubricants*, Vol.11, p.480, 2023.

[4] Hawng, S., “Effects of External Pressurization on the Static Performance of a Gas Foil Thrust Bearing with Curved Inclined Surfaces,” Doctoral Thesis, Division of Mechanics and Design, Kookmin University, Seoul, 2022.

[5] Hawng, S., Kim, D. Y., Kim, T. H., “Effects of Surface Roughness on the Performance of a Gas Foil Thrust Bearing”, *Tribol. Lubr.*, Vol.39, No.2, pp.81-85, 2023, <https://doi.org/10.9725/kts.2023.39.2.81>

[6] Cho, H., Kim, Y., Kwon, Y., Kim, T. H., “Effects of Increasing Ambient Temperatures on the Static Load Performance and Surface Coating of a Gas Foil Thrust Bearing”, *Tribol. Lubr.*, Vol.40, No.3, pp.103-110, 2024, <https://doi.org/10.9725/kts.2024.40.3.103>

[7] Lee, D., Kim, D., “Design and performance prediction of hybrid air foil thrust bearings”, *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol.133, No.4, pp.042501, 2011.

[8] Ebewe, E., Kim, D., Ki, J., “Analytical Study on Hybrid Thrust Foil Bearing, Structural Characterization and Measurement of Static Performance”, *Tribol. Int.*, Vol.200, pp.110079, 2024.

[9] Shapiro, A. H. Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, The Ronald Press Company, New York, 1954.