

표면 거칠기가 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향

황성호¹ · 김대연² · 김태호^{3*}

¹국민대학교 기계공학부 박사후연구원

²LG이노텍 Actuator 선행개발팀 사원

³국민대학교 기계공학부 교수

Effects of Surface Roughness on the Performance of a Gas Foil Thrust Bearing

Sung Ho Hwnag¹, Dae Yeon Kim² and Tae Ho Kim^{3*}

¹Post Doctoral Research Assistant, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

²Associate, Actuator Advanced Development Team, LG Innotek

³Professor, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

(Received April 21, 2023; Revised April 30, 2023 ; Accepted April 30, 2023)

Abstract – This study presents an experimental investigation of the effects of surface roughness on gas foil thrust bearing (GFTB) performance. A high-speed motor with the maximum speed of 80 krpm rotates a thrust runner and a pneumatic cylinder applies static loads to the test GFTB. When the motor speed increases and reaches a specific speed at which a hydrodynamic film pressure generated within the gap between the thrust runner and test GFTB is enough to support the applied static load, the thrust runner lifts off from the test GFTB and the friction mechanism changes from the boundary lubrication to the hydrodynamic lubrication. The experiment shows a series of lift-off test and load-carrying capacity test for two thrust runners with different surface roughnesses. For a constant static load of 15 N, thrust runner A with its lower surface roughness exhibits a higher start-up torque but lower lift-off torque than thrust runner B with a higher surface roughness. The load capacity test at a rotor speed of 60 krpm reveals that runner A results in a higher maximum load capacity than runner B. Runner A also shows a lower drag torque, friction coefficient, and bearing temperature than runner B at constant static loads. The results imply that maintaining a consistent surface roughness for a thrust runner may improve its static GFTB performance.



© Korean Tribology Society 2023. 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 – Gas foil thrust bearing(가스 포일 스러스트 베어링), Surface roughness(표면 조도), Load capacity(하중지지력), Friction coefficient(마찰 계수)

1. 서 론

공기 또는 가스를 윤활 유체로 사용하는 가스 포일 스

러스트 베어링(gas foil thrust bearing, GFTB)은 회전 시 발생하는 유체 동압에 의해 회전축에서 부상(lift-off)하여 비접촉 상태로 축 방향 하중을 지지한다. 따라서, 오일 및 구름 베어링에 비해 마찰 손실이 작아 고속 및 소형 회전기에 널리 적용된다[1]. GFTB의 중요한 성능 지표들은 하중지지력, 마찰 계수, 그리고 부상 속도 등이다. Radil 등 [2]은 가스 포일 저널 베어링 (gas foil journal

*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>

bearing, GFJB)의 간극이 하중지지력에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 최적의 간극이 존재함을 밝혔고, 간극이 최적 값보다 2 배인 경우 하중지지력은 약 20% 감소함을 보였다. Dickman[3]은 GFTB 베어링의 마찰 토크가 열 폭주로 인해 탭 포일이 뒤틀려 베어링과 러너 사이의 유막이 파괴되기 전까지 하중 증가에 따라 선형적으로 증가함을 밝혔다. Dykas 등[4]은 고속 및 고하중 조건에서 베어링과 러너 사이에서 발생하는 열에 의해 러너의 변형이 일어날 수 있음을 보였다. 이는 국부적으로 유막 두께를 감소시켜 베어링의 정적 성능을 감소시킬 수 있다고 밝혔다. Jahanmir 등[5]은 스러스트 러너와 베어링 탭 포일 재질에 따른 마찰 특성을 실험적으로 평가하였다. 그 결과, 스러스트 러너에는 하드 코팅(hard coating)인 크롬 코팅, 탭 포일에는 텅스텐과 같은 고체 윤활(solid lubricant) 코팅을 하였을 때 마찰 성능이 가장 우수함을 밝혔다.

본 연구에서는 수 마이크로미터 수준의 매우 작은 공기 유막을 형성하는 스러스트 러너의 표면 조도가 베어링 성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 연구방법 및 내용

Fig. 1은 베어링의 부상 속도 및 하중지지력 평가용 실험 장치의 단면 개략도(아래), 토크 측정 방법(왼쪽 위),

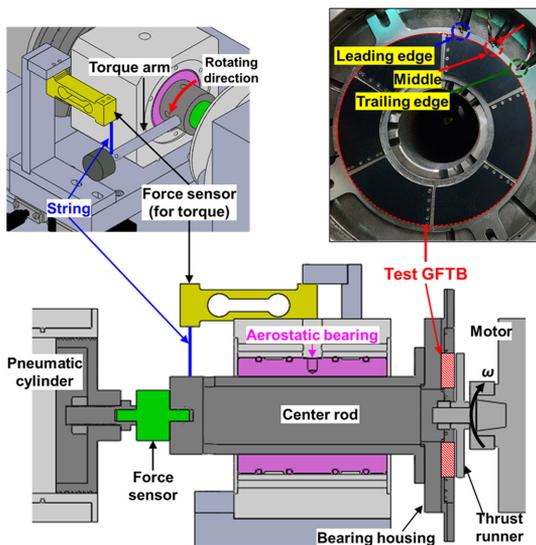


Fig. 1. Schematic views of gas foil thrust bearing test rig and photos of test GFTB and temperature measurement.

베어링 온도센서 설치 위치(오른쪽 위)를 보여준다. 실험 장치에서 내측 공압 실린더(inner pneumatic cylinder), 힘 센서(force sensor), 중앙 로드(center rod), 베어링 하우징(bearing housing)은 회전 및 축방향 움직임이 자유롭다. 시험 베어링(test GFTB)에 하중은 실험 장치 왼쪽의 공압실린더를 통해 가하게 되며, 힘 센서를 통해 측정한다. 중앙 로드는 회전 및 축방향 거동 시의 마찰을 최소화하기 위해 공기 정압 베어링(aerostatic bearing)으로 지지되며, 최대 속도 80 krpm을 갖는 구동 모터(motor)에는 외경 64 mm의 스러스트 러너(thrust runner)가 장착된다. 스러스트 러너 회전에 의해 발생하는 베어링 마찰 토크는 토크암(torque arm)과 스트링(string)을 통해 측정 가능하다. 실험에서 베어링 온도를 근사적으로 측정하기 위해 베어링 백플레이트에 탭 포일 외경 선단(leading edge), 중간(middle), 끝단(trailing edge) 부분에 T-type 열전대를 설치하였다.

본 연구에서는 서로 다른 표면 조도(surface roughness)를 갖는 두 가지의 스러스트 러너를 사용하여 표면 거칠기가 베어링 성능에 미치는 영향에 대해 평가하였다. Fig. 2는 스러스트 러너의 표면 조도 측정 위치 사진을 보여주며, 베어링 접촉 영역에서 원주 방향(①) 및 반경 방향(②)으로 각각 4 mm 길이에 대해 측정하였다. 두 가지

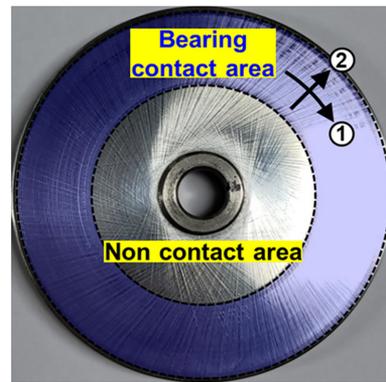


Fig. 2. Photo of surface roughness measurement location for thrust runner.

Table 1. Surface roughness measurement results

Thrust runner	Measurement point	Surface roughness, R_a [μm]
A	1	0.138
	2	0.105
B	1	0.671
	2	0.567

러너의 표면 거칠기 비교를 위해 일반적으로 포일 베어링 표면 조도 상태를 표현할 때 사용하는 중심선 평균 거칠기 값(R_a)을 취득하였다. Table 1은 두 가지 스러스트 러너의 측정된 표면 조도 결과를 보여주며, 스러스트 러너 A는 $0.105 \sim 0.138 \mu\text{m}$, B는 $0.567 \sim 0.671 \mu\text{m}$ 수준으로 A 러너가 보다 매끄러운 표면을 갖는다. 참고로 일반적인 포일 베어링과 러너의 표면 조도 범위는 $0.1 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 수준으로 보고되고 있다[6,8]. 실험동안 동일한 시험 베어링을 사용하였으며, 베어링 탑 포일 표면의 PTFE 고체 윤활 코팅은 충분한 길들이기 과정을 거쳤으므로 시험 중 마모의 영향은 무시하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 부상 속도(lift-off speed) 및 하중지지력(load capacity) 평가를 통해 표면 조도 차이가 베어링 성능에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 3은 정적 하중 15 N 조건에서 수행된 부상 성능 평가 예시로 시간에 따른 측정된 마찰 토크 및 회전 속도 결과를 보여준다. 모터 구동 시 베어링과 스러스트 러너의 접촉 상태인 경계 윤활 영역에서는 마찰 토크는 급격히 증가한다. 이후, 혼합 윤활 영역에 접어들며 다시 감소하고 베어링 부상 지점에서 최솟값을 갖는다. 베어링 부상 이후에는 회전 속도가 증가함에 따라 유체 전단력 증가로 인해 마찰 토크는 선형적으로 증가하고 최대 회전 속도에서는 일정한 값을 갖는다. 모터 감속은 공급되는 전원을 차단하여 자유 감속 형태로 하였으며, 회전 속도 변화에 따른 마찰 토크 변화 추이는 가속 시와 유사하게 나타난다. 하지만, 감속 시의 부상 속도(touch-down speed $\sim 11.2 \text{ krpm}$)

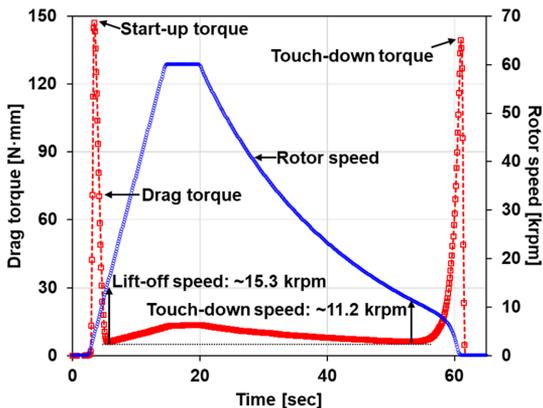


Fig. 3. Example of lift-off speed test procedure: measured drag torque and rotor speed versus time at static load 15 N.

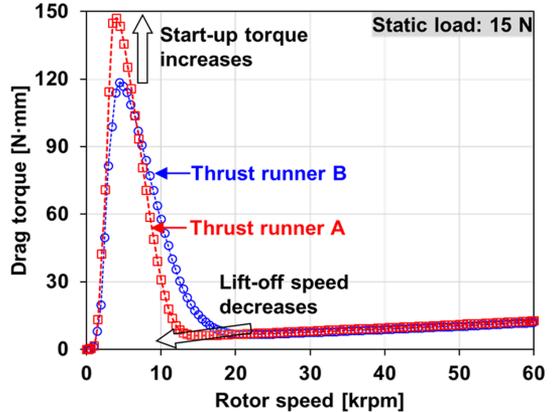


Fig. 4. Measured drag torque versus rotor speed for thrust runner A and B at static load 15 N.

가 가속 시(lift-off speed $\sim 15.3 \text{ krpm}$)보다 낮게 나타나는데 이는, 감속 시 베어링과 러너 사이 유막 내에 러너 회전으로 인한 유체관성력이 존재하여 유체 동압 효과가 가속 시보다 더 낮은 회전 속도까지 발생하기 때문으로 사료된다. 본 연구에서는 두 가지의 스러스트 러너에 대하여 부상 속도가 보다 명확하게 나타나는 가속 시의 결과를 사용하여 비교 분석하였다.

Fig. 4는 정적 하중 15 N에서 두 가지 스러스트 러너 A와 B에 대해 측정된 회전 속도에 따른 마찰 토크 비교 결과를 보여준다. 모터와 베어링 접촉 상태에서 정지 마찰력에 의해 발생하는 시동 토크는 작은 표면 조도(A 러너)에서 더 크다. 이는 작은 표면 조도가 베어링과 러너의 실제 접촉 면적(real contact area)을 넓게 하여 마찰이 증가하기 때문으로 사료된다. 참고로 두 가지 러너에 대한 실험에서 회전각가속도는 5000 rpm/s 로 동일하다. 부상 속도는 러너 A가 약 13 krpm 으로 러너 B의 약 20 krpm 보다 더 낮는데, 이는 편차가 적고 일정한 두께의 유막을 형성하여 유체 동압을 발생하는데 작은 조도의 러너 A가 더 유리하기 때문으로 사료된다. 이는 유막 계수 식 (1)를 통해서도 설명된다[6]. h_{min} 는 최소 유막 두께이며 R_{aT} 와 R_{aR} 는 각각 탑 포일과 스러스트 러너의 표면 조도이다. 일반적으로, 유체 동압 베어링의 경우 유막 계수 3 이상에서 부상이 이루어진다고 알려져 있는데, 표면 조도가 작은 스러스트 러너 A의 경우에서 유막 두께 계수 3을 만족하기 위한 최소 유막 두께가 더 작아 낮은 회전수에서 부상이 가능하다.

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{aT}^2 + R_{aR}^2}} \quad (1)$$

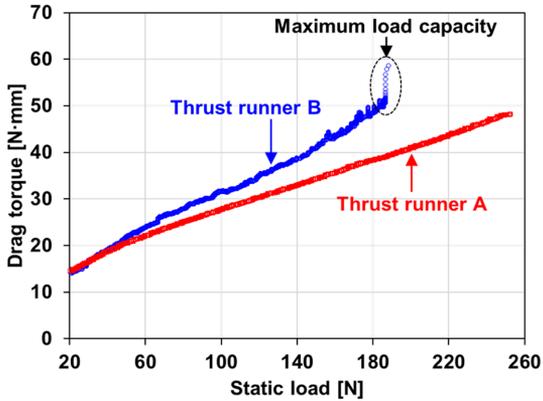


Fig. 5. Measured drag torque versus static load for thrust runner A and B at rotor speed 60 krpm.

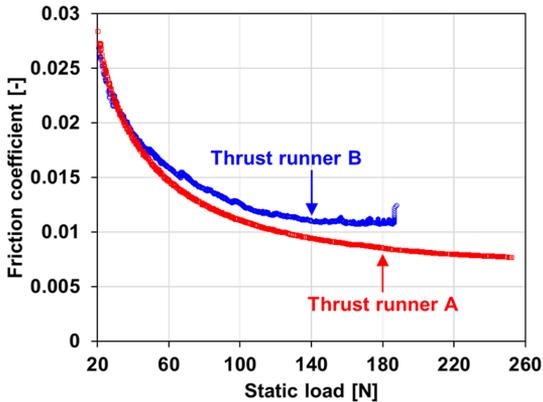


Fig. 6. Friction coefficient versus static load for thrust runner A and B at rotor speed 60 krpm.

Fig. 5와 6은 회전속도 60 krpm에서 스러스트 러너 A와 B에 대한 하중지지력 시험 평가 결과로서, 정적 하중을 최대 250 N까지 증가함에 따른 마찰 토크와 마찰 계수를 각각 보여준다. 마찰 계수는 식 (2)와 같이 계산되며, 여기서 T_q , N, r_{avg} 는 각각 측정된 마찰 토크, 정적 하중, 베어링 평균 반지름이다.

$$\mu = \frac{T_q}{N \cdot r_{avg}} \quad [-] \quad (2)$$

하중이 증가할수록 유막 두께 감소로 인한 전단 마찰력이 증가하여 마찰 토크는 선형적으로 증가하는 반면, 마찰계수는 지수 함수의 형태로 감소한다. 표면 조도가 큰 러너 B는 전 하중 구간에서 러너 A보다 마찰 토크와 마찰 계수가 크며 작은 노이즈를 수반한다.

특히, 러너 B는 하중이 증가하여 약 180 N에 이르렀

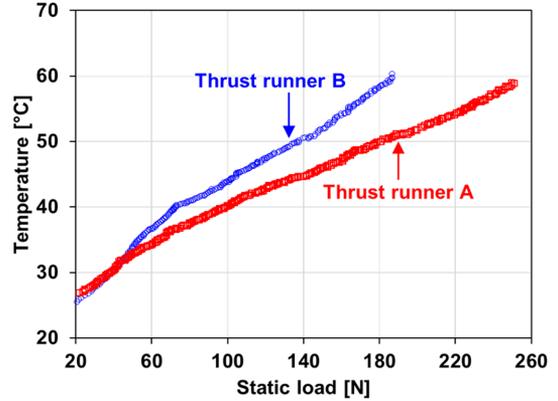


Fig. 7. Measured average bearing temperature versus static load for thrust runner A and B at rotor speed 60 krpm.

을 때 마찰 토크와 마찰 계수의 비정상적인 급격한 상승을 보이는데, 이는 하중이 증가함에 따라 감소하는 최소 유막 두께가 거친 표면을 갖는 러너 B의 조도와 유사한 수준이거나 그보다 작아져서 유막에 국부적인 파열 (rupture)이 발생하였기 때문으로 사료된다[6,7].

Fig. 7은 스러스트 러너 A와 B의 하중에 따른 시험 베어링 온도 측정 결과를 보여준다. 측정 온도는 앞서 기술한 마찰 토크 및 마찰 계수 결과와 일관된 경향을 보이는데, 작은 표면 조도의 러너 A의 경우가 러너 B보다 베어링의 온도가 더 낮다. 이를 통해 러너의 매끄러운 표면이 베어링의 발열을 효과적으로 제어하여 온도를 낮추는데 유리함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 부상 속도 및 하중지지력 평가를 통해 스러스트 러너의 표면 조도 차이가 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

가스 포일 스러스트 베어링은 작은 표면 조도를 갖는 러너 A의 경우에서 더 빨리 부상하였다. 이러한 결과를 통해 작은 표면 조도가 베어링의 마찰 및 마모를 감소하고 베어링의 수명을 증대할 것임을 유추할 수 있다.

하중지지력 평가에서 작은 표면 조도를 갖는 러너 A가 러너 B에 비해 더 높은 최대 하중지지력을 보였다. 또한, 러너 A는 일정한 하중에서 측정된 마찰 토크, 마찰 계수, 베어링 온도도 러너 B에 비해 낮았다. 이러한 결과를 통해 작은 표면 조도가 가스 포일 스러스트 베어링의 최대 하중지지력을 향상하고 발열을 제어하는데 효과적임을 알 수 있다.

Acknowledgements

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “AI/ICT기반 가변형 유체기기 설계, 상태진단을 위한 기반 플랫폼 기술 및 운영관리 시스템 개발” 연구과제(2021202080026D)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Agrawal, G. L., “Foil Air/Gas Bearing Technology - an Overview,” Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, p.78682, 1997.
- [2] Radil, K., Howard, S., Dykas, B., “The Role of Radial Clearance on the Performance of Foil Air Bearings,” *STLE Tribol. Trans.*, Vol.45, pp.485-490, 2002.
- [3] Dickman, J. R., “An Investigation of Gas Foil Thrust Bearing Performance and Its Influencing Factors,” M.S. thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, 2010.
- [4] Dykas, B. D., Prah, J., DellaCorte, C., Bruckner, R., “Thermal Management Phenomena in Foil Gas Thrust Bearings,” Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 42401, pp. 1417-1423, 2006.
- [5] Jahanmir, S., Heshmat, H., Heshmat, C., “Assessment of tribological coatings for foil bearing applications,” *Tribology Transactions*, Vol.52, No.2, pp.231-242, 2009.
- [6] 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.
- [7] Kim, T. H., Lee, T. W., Park, M. S., Park, J. M., Kim, J. S., Jeong, J. H., “Experimental Study on the Load Carrying Performance and Driving Torque of Gas Foil Thrust Bearings,” *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol.31, No.4, pp.141-147, 2015, <http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2015.31.4.141>
- [8] Radil, K. C., DellaCorte, C., “The Effect of Journal Roughness and Foil Coatings on the Performance of Heavily Loaded Foil Air Bearings,” *Tribology transactions*, Vol.45, No.2, pp.199-204, 2002.