

# 냉각 유량이 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향

황성호<sup>1</sup> · 김대연<sup>2</sup> · 김태호<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 기계공학부 박사후연구원

<sup>2</sup>LG이노텍 Actuator 선행개발팀 사원

<sup>3</sup>국민대학교 기계공학부 교수

## Effects of Cooling Flow Rate on Gas Foil Thrust Bearing Performance

Sung Ho Hwnag<sup>1</sup>, Dae Yeon Kim<sup>2</sup> and Tae Ho Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Post Doctoral Research Assistant, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

<sup>2</sup>Associate, Actuator Advanced Development Team, LG Innotek

<sup>3</sup>Professor, School of Mechanical Engineering, Kookmin University

(Received April 18, 2023 ; Revised April 28, 2023 ; Accepted April 28, 2023)

**Abstract** – This paper describes an experimental investigation of the effect of cooling flow rate on gas foil thrust bearing (GFTB) performance. In a newly developed GFTB test rig, a non-contact type pneumatic cylinder provides static loads to the test GFTB and a high-speed motor rotates a thrust runner up to the maximum speed of 80 krpm. Force sensor, torque arm connected to another force sensor, and thermocouples measures the applied static load, drag torque, and bearing temperature, respectively, for cooling flow rates of 0, 25, and 50 LPM at static loads of 50, 100, and 150 N. The test GFTB with the outer radius of 31.5 mm has six top foils supported on bump foil structures. During the series of tests, the transient responses of the bearing drag torque and bearing temperature are recorded until the bearing temperature converges with time for each cooling flow rate and static load. The test data show that the converged temperature decreases with increasing cooling flow rate and increases with increasing static load. The drag torque and friction coefficient decrease with increasing cooling flow rate, which may be attributed to the decrease in viscosity and lubricant (air) temperature. These test results suggest that an increase in cooling flow rate improves 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** – Cooling flow rate(냉각 유량), Drag torque(마찰 토크), Friction coefficient(마찰 계수), Gas foil thrust bearing(가스 포일 스러스트 베어링)

### 1. 서 론

가스 포일 베어링(Gas Foil Bearing, GFB)은 윤활 유

체로 점도가 낮은 가스 또는 공기를 사용하여 구름 및 오일 베어링에 비해 마찰 손실이 작아 고속회전기에 널리 적용되고있다[1]. 이러한 GFB 중 지배적인 마찰 손실은 반경 방향 하중을 지지하는 가스 포일 저널 베어링(Gas Foil Journal Bearing, GFJB) 보다 넓은 마찰 면적을 갖는 축방향 하중을 지지하는 가스 포일 스러스트 베어링(Gas Foil Thrust Bearing, GFTB)에서 발생하게 된

\*Corresponding author: Tae Ho Kim

Tel: ++2-2-910-4723, Fax: +82-2-910-4839

E-mail: thk@kookmin.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-9574-2730>

다. 이에 GFTB의 마찰 성능에 관한 다양한 연구들이 수행되어왔다.

Bakducchi 등[2]은 베어링 부상 이후 시점인 완전 유체 윤활 영역에서 마찰 토크는 하중 및 회전 속도 증가에 따라 선형적으로 증가함을 실험적으로 보였다. Kim 등[3]은 베어링 백플레이트에 열전대 설치 및 하중지지력 실험을 통해 하중 변화에 따른 온도 및 마찰 토크 변화를 관찰함으로써 하중이 증가함에 따라 온도 및 마찰 토크는 증가함을 보였다. LaTray와 Kim[4] 또한 베어링 하우징에 열전대를 설치하여 온도 변화를 관찰하였고, 하중 및 회전속도가 증가함에 따라 GFTB의 온도는 지속적으로 증가함을 보였다. Dykas[5,6]는 하중과 회전 속도가 증가함에 따라 GFTB의 마찰 토크가 선형적으로 증가함을 실험적으로 밝혔으며, 또한, 냉각 유량 주입 실험을 통해 동일 하중 및 회전 속도에서 냉각 유량 증가에 따라 마찰 토크는 감소함을 보였다. Lee 등[7]은 가스 포일 베어링이 적용된 마이크로 가스 터빈 시스템에 대해 냉각 유량 공급 방법이 베어링 온도 특성에 미치는 영향에 대해 해석적 및 실험적 연구를 수행하였다. 이를 통해, 효과적인 온도 제어를 위한 시스템 내에서의 설계 매개 변수들을 소개하였고, 전체 시스템 효율을 고려한 최적 냉각 유량에 대한 필요성을 제시하였다. Baek 등[8]은 GFTB의 탑 포일 형상 변화가 온도 특성에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 통해 경사면이 곡선 형상을 가질 경우 베어링 발열이 감소함을 보였다.

본 연구에서는 GFB 중 지배적인 마찰 손실 및 발열이 발생하는 GFTB에 대해 냉각 유량 공급이 베어링 성능 향상 즉, 마찰 및 온도 감소 효과에 미치는 영향에 대해 실험적 연구를 통해 파악하고자 한다.

## 2. 가스 포일 스러스트 베어링

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 일반적인 가스 포일 스러스트 베어링의 개략도를 보여준다. 베어링은 6개의 패드를 가지며, 반경 방향에 따라 경사 각도가 일정하다. 베어링의 외측 반경은 31.5 mm이며, 베어링의 총 면적은 2,041 mm<sup>2</sup>이다. 범프 포일 및 경사 높이의 설계 치수는 동일하게 500 μm이다.

## 3. 실험 장치 및 방법

Fig. 2는 가스 포일 스러스트 베어링 실험 장치의 단면 개략도와 마찰 토크 측정 방법 그리고 베어링의 온도 측정 위치 사진을 보여준다. 실험 장치는 크게 좌측부터

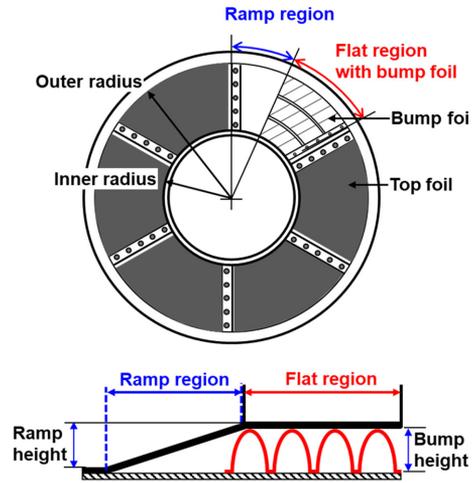


Fig. 1. Schematic view of a conventional gas foil thrust bearing.

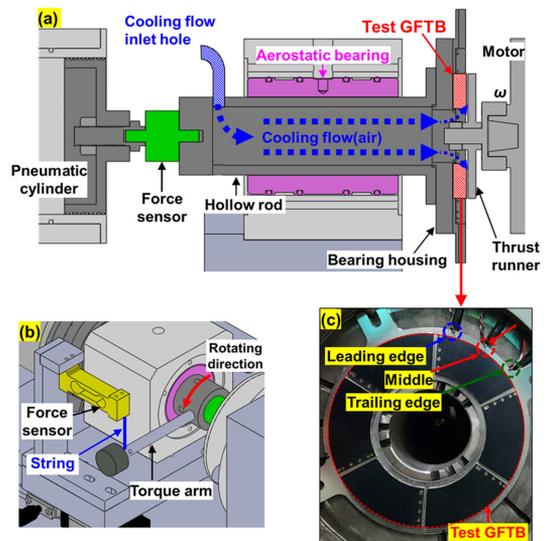


Fig. 2. (a) Schematic view of test rig for gas foil thrust bearing, (b) torque measurement method and (c) photo of temperature measurement location.

하중부(loadng section), 평가부(test section) 그리고 구동부(driving section)로 구성되어 있다. 하중부의 공압실린더(pneumatic cylinder)에 압축공기를 주입하여 베어링에 하중을 가할 수 있으며, 가해지는 하중은 힘 센서(force sensor)를 통해 실시간으로 측정 가능하다. 평가부의 중공 로드(hollow rod)는 가해지는 하중에 따른 축방향 이동 및 회전 시 발생하는 기계적 마찰을 최소화하기

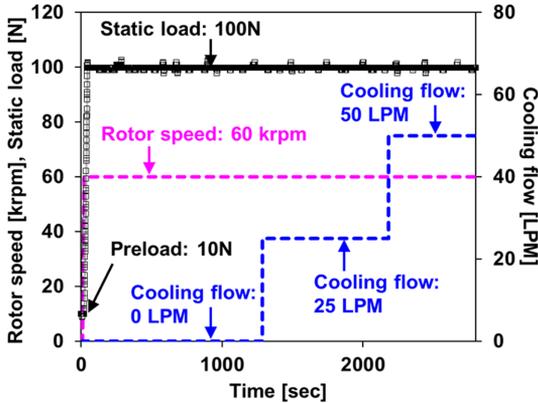


Fig. 3. Example of test procedure at static load 100 N: measured rotor speed, static load and cooling flow versus time during test.

위해 공압베어링(aerostatic bearing)으로 지지된다. 또한, 증공 로드에는 냉각 유량을 공급할 수 있는 구멍이 존재하며, 이를 통해 냉각 유량이 베어링 성능에 미치는 영향에 대한 평가가 가능하다. 실험 베어링은 로드 우측의 베어링 하우징에 장착된다. 구동부 모터에는 외경 64 mm의 스톱러스트 러너(thrust runner)가 부착되어 있고, 최대 회전 속도는 80 krpm 이다. 실험 시 하중 부가 및 스톱러스트 러너 회전에 의해 발생하는 베어링의 마찰 토크는 Fig. 2의 (b)와 같이 스트링(string)으로 연결된 토크 암(torque arm)과 하중 센서를 통해 측정 가능하다. 또한, 본 연구에서는 Fig. 2의 (c)와 같이 베어링 외측 선단, 중간 그리고 후단에 T-type 온도 센서를 장착하여 냉각 유량 공급에 따른 베어링의 온도 변화를 관찰하였다.

Fig. 3은 실험 과정에 대한 예시로서 정적 하중 100 N

Table 1. Rotor speed, static load and cooling flow conditions for test

Rotor speed [krpm]	Static load [N]	Cooling flow [LPM]
60 krpm	100	0
		25
		50
	150	0
		25
		50

조건에서 시간에 따른 측정된 회전 속도, 정적 하중 그리고 냉각 유량 결과를 보여준다. 실험은 모터 구동 전 예하중 10 N을 부가한 상태에서 회전 속도를 60 krpm 까지 증가시킨 후 목표 하중까지 점진적으로 증가시키는 순서로 진행되었다. 냉각 유량은 베어링의 온도가 포화되어 수렴되는 시점에 공급하였다. Table 1은 본 연구에서 수행한 실험 경우들을 보여준다. 모든 실험에서 회전 속도는 60 krpm이며, 정적 하중 50, 100 그리고 150 N 각각의 하중에서 냉각 유량 0, 25 그리고 50 LPM에 대해 실험을 수행하였다.

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 정적 하중 100 N 조건에서 측정된 시간에 따른 베어링 온도 결과를 보여준다. 이 때의 온도 결과는 탑 포일의 선단, 중간 그리고 후단에서 측정된 온도의 평균 결과이다. 냉각 유량이 없는 상태에서 베어링 온도는 시간이 증가함에 따라 점진적으로 증가하다 수렴하여 온도 변화가 미미해진다. 본 연구에서 온도 변화량이 1분당 0.1°C 이하일 때 온도 수렴 지점으로 판단하였다. 온도 수렴 이후, 냉각 유량을 공급함에 따라 베어링 온도는 감소하다 다시 수렴하고, 냉각 유량이 증가할수록 수렴되는 온도는 낮아진다. 공급되는 냉각 유량의 온도는 실험 동안 약 18°C로 유지되었다. Fig. 5는 정적 하중 50, 100 그리고 150 N 에서 냉각 유량에 따라 수렴된 온도 결과를 비교하여 보여준다. 모든 유량에서 정적 하중이 증가함에 따라 수렴된 온도는 높게 나타나며, 모든 하중에서 냉각 유량이 증가함에 따라 베어링 온도는 감소

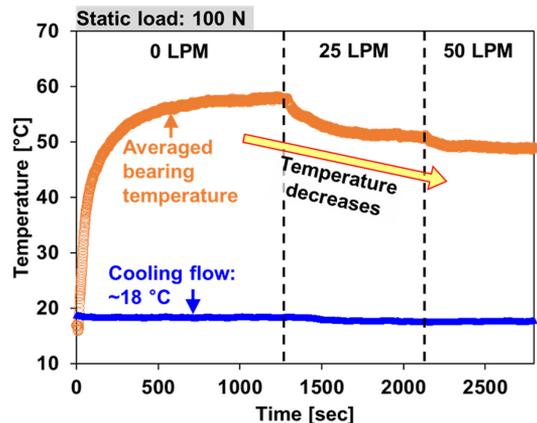


Fig. 4. Measured average bearing temperature and cooling flow temperature versus time for cooling flow 0, 25 and 50 LPM at static load 100 N

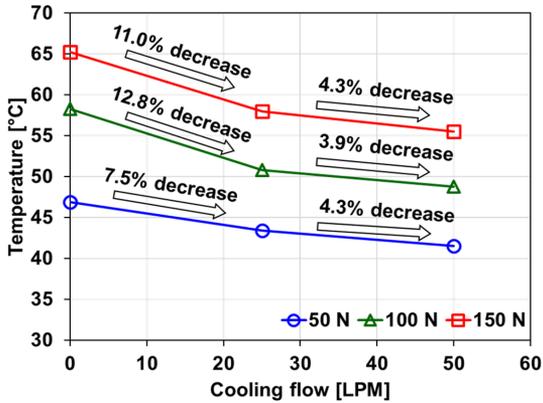


Fig. 5. Converged bearing temperature versus cooling flow for static load 50, 100 and 150 N

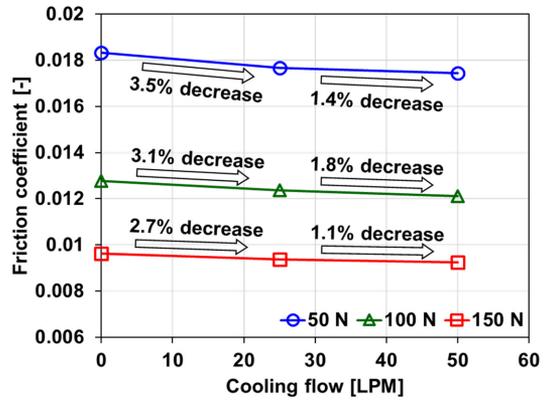


Fig. 7. Calculated friction coefficient versus cooling flow for static load 50, 100 and 150 N

하여 특정한 값으로 수렴한다.

Fig. 6은 정적 하중 100 N 조건에서 측정된 시간에 따른 마찰 토크 결과와 계산된 마찰 계수 결과를 보여준다. 마찰 계수는 식(1)과 같이 계산하였으며, 여기서  $T_q$ , N,

$r_{avg}$ 는 각각 측정된 마찰 토크, 정적 하중, 베어링 평균 반지름이다.

$$\mu = \frac{T_q}{N \cdot r_{avg}} \quad [-] \quad (1)$$

냉각 유량이 없는 경우 마찰 토크 및 계수 모두 시간이 증가함에 따라 점진적으로 증가하다 수렴하는 경향성을 갖는다. 수렴 이후, 냉각 유량이 공급됨에 따라 마찰 토크 및 계수는 온도 변화와 동일하게 점진적으로 감소하다 다시 수렴한다. 이는 공급되는 냉각 유량이 베어링과 스러스트 러너 사이의 공기 유막 온도를 감소시켜 공기 점도가 감소했기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 정적 하중 50, 100 그리고 150 N 에서 냉각 유량에 따라 온도 수렴 지점에서의 마찰 계수 비교 결과를 보여준다. 정적 하중이 증가함에 따라 마찰 계수는 감소함을 보인다. 이는 완전 유체 윤활 영역(hydrodynamic lubricant)에서 하중이 증가할수록 마찰 계수가 감소하는 Stribeck curve 의 결과와 동일하다. 냉각 유량 공급량 증가에 따른 마찰계수 감소율은 높은 유량 조건에서 감소함을 보인다. 이는 특정 냉각 유량 이상에서는 베어링의 마찰 계수 및 온도 감소 효과가 미미할 것으로 판단되며, 최적의 냉각 유량 조건이 존재할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 냉각 유량이 가스 포일 스러스트 베어링의 성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 다양한 정적 하중 조건에서 냉각 유량 공급에 따른 베어링의 온도, 마찰 토크 그리고 마찰 계수에 대해

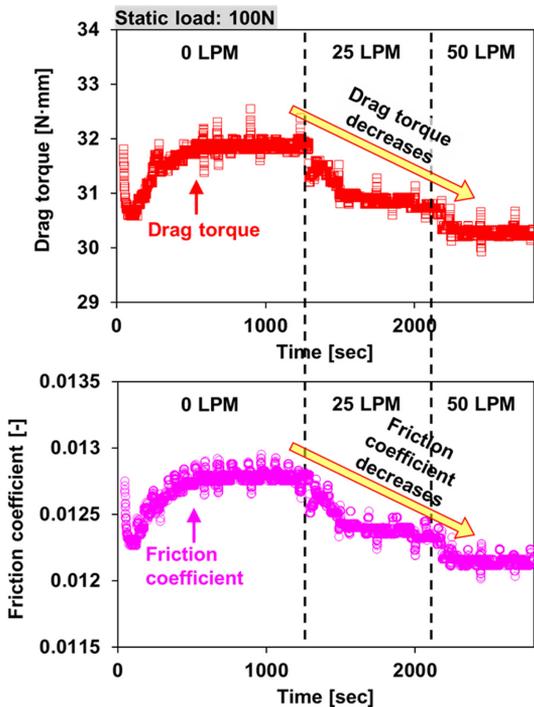


Fig. 6. Measured drag torque and calculated friction coefficient versus time for cooling flow 0, 25 and 50 LPM at static load 100 N

평가 및 고찰하였다. 그 결과, 냉각 유량 공급에 따라 베어링의 온도가 효과적으로 감소함을 보였고, 이에 따라 공기의 점도가 감소하여 베어링의 마찰 토크 및 계수 또한 감소함을 보였다. 이러한 결과는 냉각 유량 공급이 베어링 마찰 손실을 감소시켜 회전기 효율 향상에 도움이 될 것으로 판단된다. 또한, 고 유량 조건에서 온도 및 마찰 계수 감소율이 미미한 것으로 보아 베어링 효율을 향상시킬 수 있는 최적의 냉각 유량 조건이 존재할 것으로 사료된다.

### Acknowledgements

본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 “AI/ICT기반 가변형 유체기기 설계, 상태진단을 위한 기반 플랫폼 기술 및 운영관리 시스템 개발” 연구과제(2021-202080026D)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] Balducci, F., Arghir, M., Gauthier, R., Renard, E., “Experimental Analysis of The Start-Up Torque of A Mildly Loaded Foil Thrust Bearing,” *ASME J. Tribol.*, 135(3), p.31702-1, 2013.
- [3] 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, <https://doi.org/10.9725/kstle.2015.31.4.141>
- [4] LaTray, N., Kim, D., “Design of Novel Gas Foil Thrust Bearings and Test Validation in a High-Speed Test Rig,” *ASME J. Tribol.*, 142(7), p. 071803, 2020.
- [5] Dykas, B. D., and Tellier, D. W., A Foil Thrust Bearing Test Rig for Evaluation of High Temperature Performance and Durability,” Army Research Laboratory, Adelphi, MD, Report No. ARL-MR-0692, 2008.
- [6] Dykas, B. D., “Factors Influencing the Performance of Foil Gas Thrust Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications,” Doctoral dissertation, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, 2006.
- [7] Lee, D., Lim, H., Choi, B., Kim, B., Park, J., Bang, J., “Thermal Behavior of Radial Foil Bearings Supporting an Oil-Free Gas Turbine: Design of the Cooling Flow Passage and Modeling of the Thermal System,” *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 139(6), p.061902, 2017.
- [8] Baek, G. W., Joo, W. G., Mun, H. W., Hwang, S. H., Jeong, S. Y., Park, J. K., “The Effects of Inclined Foil Shape on Flow Characteristics in Air Foil Thrust Bearing Using CFD”, *Tribol. Lubr.* Vol.37, No.4, pp.117-124, 2021, <https://doi.org/10.9725/kts.2021.37.4.117>