

DOI <https://doi.org/10.9725/kstle.2017.33.4.134>

표면이 마모된 틸팅 패드 저널베어링의 열윤활 해석 및 온도 측정

이동현[†] · 선경호 · 김병욱 · 강동혁

한국기계연구원 시스템다이나믹스 연구실

Thermohydrodynamic Analysis and Pad Temperature Measurement of Tilting Pad Journal Bearing with Worn Pad

Donghyun Lee[†], Kyungho Sun, Byungock Kim and Donghyuk Kang

Dept. of System Dynamics, Korea Institute of Machinery and Material
(Received June 13, 2017; Revised July 28, 2017; Accepted July 31, 2017)

Abstract – With the increase in adoption of tilting pad journal bearings (TPJBs), various failure mechanisms related to TPJBs have been reported, of which pad wear is a frequently reported one. Pad wear causes change in geometry of the bearing, which can sometimes result in the failure of the entire system. The objective of this research is to investigate the influence of pad wear on the pad temperature, which is one of the widely used condition monitoring methods for TPJBs. For the theoretical investigation, thermohydrodynamic (THD) analysis was conducted by solving the generalized Reynolds equation and the 3D energy equation. The results of the analysis show that the temperature of the loaded pad increases while that of the unloaded pad decreases, when there is wear on the loaded pads. In addition, the minimum film thickness decreases with an increase in the wear depth. A validation test was conducted with a test rig, which mimics the axial turbine when a test rotor is supported by two TPJBs. The test bearing consists of five pads with a diameter of 60 mm, and a resistance temperature detector (RTD) is installed in the pad for temperature monitoring. The test was performed by replacing the two loaded pads with the worn pad. The test result for the TPJB with wear depth of 30 μm show that the temperatures of the loaded pads are 8 $^{\circ}\text{C}$ higher and that of the unloaded pad is 2.5 $^{\circ}\text{C}$ lower than that of the normal TPJB. In addition, the predicted pad temperature shows good agreement with the measured pad temperatures.

Keywords – tilting pad bearing, wear, thermohydrodynamic analysis

1. 서 론

압축기, 발전기와 같은 산업용 회전 기계들은 효율 향상에 대한 요구와 함께 고속화, 대형화되고 있으며, 이에 따라 하중 지지능력과 고속 안정성이 우수한 틸팅패드 저널 베어링의 적용이 증가하고 있다. 틸팅패드 저널 베어링은 Fig. 1과 같이 원주 방향으로 위치한 여러 패드가 피벗을 중심으로 회전할 수 있는 베어링으로, 회전체의 불 안정성을 유발하는 강성의 연성함이

매우 작은 장점을 가지고 있다. 그러나, 다른 형태의 베어링에 비해 상대적으로 구조가 복잡하며, 윤활유 소모량이 많은 단점 또한 가지고 있다.

틸팅패드 저널 베어링의 성공적인 적용을 위해서는 설계 단계에서 베어링의 성능을 정확하게 예측하는 것이 필요하며, 이러한 요구에 따라 틸팅패드 저널 베어링의 성능 예측을 위한 연구들이 수행 되어 왔다. 특히, 틸팅패드 저널 베어링의 고속 회전기계 적용이 증가함에 따라 윤활유의 점성 마찰에 의한 온도 상승을 고려한 해석 모델이 필요하게 되었으며, 이를 위해 틸팅패드 베어링의 열윤활 해석 모델 개발을 위한 연구들이 많이 수행 되었다. 초기의 틸팅패드 베어링에 대한 열

[†]Corresponding author : donghyun2@kimm.re.kr
Tel: +82-42-868-7662, Fax: +82-42-868-7098

윤활 해석은 계산의 단순화를 위해 1차원 에너지 방정식을 적용하거나[1], 윤활막의 반경 방향 온도 분포를 특정한 형태의 함수로 가정하는 방법이 사용되었다[2]. 이후, 보다 정확한 베어링의 온도 예측을 위해 3차원 에너지 방정식을 적용한 해석 모델들이 연구되었다[3-6]. 베어링의 열윤활 해석에 대한 이론 모델 개발과 함께 실험을 통해 베어링의 온도를 측정하여 여러 운전 조건에서 틸팅패드 베어링의 온도 특성을 파악하기 위한 연구들도 함께 수행되었다[7-10]. 이러한 실험적 연구들은 주로 패드에 여러 개의 온도 센서를 삽입하여 패드의 온도 분포를 측정하는 방법으로 수행되었으며, 여러 연구들에서 이론 해석 모델을 통한 온도 예측 결과가 측정 결과와 좋은 상관성을 가짐이 보고되었다. 이러한 연구들은 틸팅패드 저널 베어링의 설계에 필요한 많은 정보를 제공하였으며, 베어링의 설계를 위한 성능 해석 도구로서 현재에도 많이 활용되고 있다. 틸팅패드 저널 베어링에 대한 국내 연구로는 Suh 등이 패드의 열변형에 의한 예압변화에 대한 해석을 수행하였으며[11], Kim은 로커백 피벗 형태의 틸팅패드 베어링에 대한 동특성 해석 모델에 대한 연구를 수행하였으며[12], Lee등은 유한요소법을 이용하여 계산된 피벗 강성을 Hertzian 접촉 모델과 비교하였다[13].

산업 현장에서 틸팅패드 저널 베어링의 적용이 증가함에 따라 틸팅패드 저널 베어링과 관련된 여러 형태의 고장 발생 또한 보고가 되고 있다[14]. 틸팅패드 저널 베어링의 고장과 관련하여 가장 많이 보고되는 현상 중 한 가지는 패드 표면의 마모이다. 패드 마모는 회전축이 정렬 불량 상태로 조립되거나, 저속으로 운전될 때 발생하는 회전축과 패드 사이의 접촉이 주요 원인이다. 이러한 베어링의 표면 마모는 틸팅패드 베어링뿐만 아니라, 다른 형태의 베어링에서도 많이 발생하는 현상으로 베어링 표면의 마모가 윤활 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구 또한 여러 차례 수행되었다[15-18]. 그러나, 이러한 연구들은 주로 진원형의 동압, 정압 베어링에 관한 연구들이며, 틸팅패드 베어링의 패드 마모가 베어링 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 충분하지 않았다.

패드의 마모는 베어링의 형상을 변화시켜 하중지지 능력을 감소시킬 수 있으며, 경우에 따라서는 시스템 고장으로 연결될 수 있다. 따라서, 패드 마모 발생시 이를 초기에 진단하는 것이 무엇보다 중요하다. 틸팅패드 저널베어링의 고장 진단은 주로 패드에 온도 센서를 삽입하여 패드 온도를 측정하는 방법으로 이루어

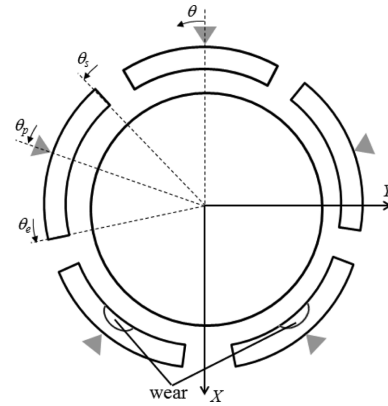


Fig. 1. Tilting pad bearing.

진다. 따라서, 패드의 마모가 패드의 온도 변화에 미치는 영향을 이해하는 것이 패드 마모의 조기 진단을 위해 필요하다. 본 연구에서는 마모된 패드를 가지는 틸팅패드 저널 베어링에 대해 열윤활 해석을 통해 패드 마모가 베어링의 온도 특성에 미치는 영향을 예측하였으며, 예측된 결과를 실험을 통해 검증하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 열윤활 해석 지배 방정식

본 연구의 대상은 Fig. 1과 같이 5개의 패드로 구성된 틸팅패드 저널베어링이며, 윤활막에서 발생하는 압력을 계산하기 위해 식 (1)과 같은 Generalized Reynolds방정식을 지배 방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[G \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[G \frac{\partial p}{\partial z} \right] = U \frac{\partial}{\partial x} \left(h - \frac{I_2}{J_2} \right) \quad (1)$$

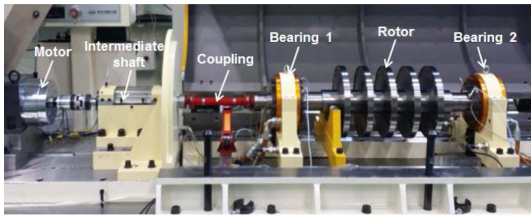
식 (1)에서 p 는 압력, h 는 유막 두께를 나타내며 다른 변수들은 다음 식과 같이 정의 된다.

$$G = \int_{-J_1}^{J_1} \frac{y}{\mu} \left(y - \frac{I_2}{J_2} \right) dy, \quad I_2 = \int_{-J_1}^{J_1} \frac{y}{\mu} dy, \quad J_2 = \int_{-J_1}^{J_1} \frac{1}{\mu} dy \quad (2)$$

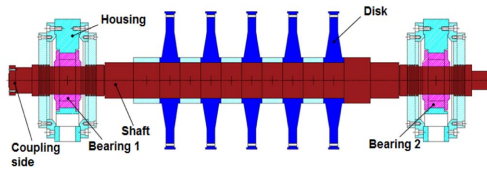
상기의 식들에서 x , y , z 는 각각 베어링의 원주 방향, 윤활유의 두께 방향, 베어링의 축 방향을 나타낸다. 틸팅패드 베어링의 유막 두께 h 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$h = C + e \cos(\theta - \theta_p) - d \cos(\theta - \theta_s) - R \gamma \sin(\theta - \theta_p) + d_w \quad (3)$$

여기서, C 는 베어링의 간극, e 는 편심량, d 는 패드의 예압량, γ 는 패드의 틸팅각, θ_s 는 자세각, θ_p 는 패드 피벗의 위치, d_w 는 패드의 마모량을 나타낸다.



(a) Figure of the turbine simulator



(b) Rotor and bearing system

Fig. 2. Turbine simulator.

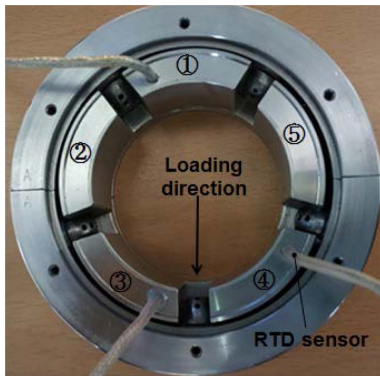


Fig. 3. Tilting pad bearing for the simulator.

윤활막의 온도 T 는 다음과 같이 주어지는 3차원 에너지 방정식을 통해 계산하였다.

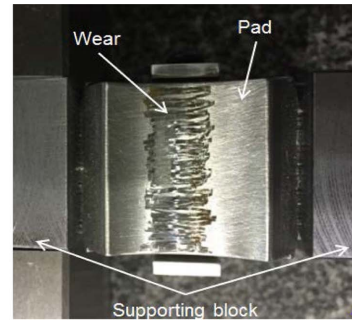
$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서 c_p 는 윤활유의 열용량, k_r 은 윤활유의 열 전도 계수를 나타낸다.

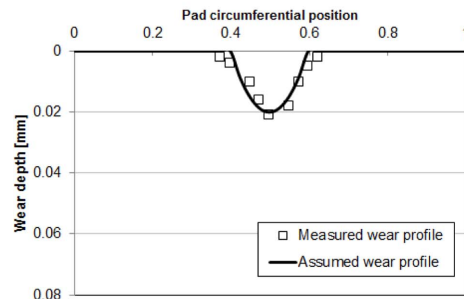
패드의 온도 T_p 는 하기의 식으로 주어지는 3차원 열전도 방정식을 통해 계산된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_p r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k_p \frac{\partial T_p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

상기의 식들을 계산할 때 사용된 수치해석 방법과 경계 조건들은 참고문헌[19]에 기술되어 있다.



(a) Photo of worn pad



(b) Measured and assumed wear profiles (maximum wear depth: 20 μ m)

Fig. 4. Pad wear.

2-2. 실험장치 및 실험용 베어링

Fig. 2는 실험 장치를 나타낸다. 실험 장치는 2개의 틸팅패드 저널 베어링으로 지지된 축류 터빈을 모사하여 제작되었으며, 회전 기계 구동 중 발생할 수 있는 여러 형태의 고장 현상 연구를 목적으로 제작 되었다. 시험용 베어링은 Fig. 3과 같이 5개의 패드로 구성되며, 구동 중 패드의 온도 계측을 위해 베어링의 상부에 위치한 Pad 1과 하부에 위치한 Pad 3, 4에 RTD 형식의 온도 센서를 삽입 하였다. 실험 장치와 베어링에 관한 다른 정보들은 참고문헌 [19]에 기술 되어 있다.

패드의 마모가 패드 온도에 미치는 영향을 실험 하기 위하여 Fig. 4(a)와 같이 Grinder를 사용하여 패드 표면 Babbitt 일부를 제거하는 방식으로 마모된 패드를 제작하였다. 마모 깊이는 축 방향으로는 일정하며, 패드 전체 길이 중 20% 정도가 마모 되도록 제작을 하였다. Fig. 4(b)는 패드의 원주방향을 따라 측정된 마모 깊이를 나타낸다. 그림을 통해 볼 수 있듯이 마모 깊이는 피벗 위치에서 가장 크다고 가정을 하여 마모된 패드를 제작 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 해석 결과

본 연구의 해석 대상 베어링은 Fig. 2의 실험 장치에 사용된 베어링이며, 베어링에 작용하는 하중은 시험용 로터의 Coupling 쪽에 위치한 Bearing 1에 작용하는 하중인 546 N이다. 열윤활 해석은 Fig. 1의 5개의 패드 중 하중을 지지하는 패드인 Pad 3과 Pad 4에 마모가 발생하는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 또한 패드의 마모 형상은 다음 식과 같다고 가정하였다.

$$d_w = R_{wear} \cos(\theta - \theta_p) - (R_{wear} - d_{max}) \quad (6)$$

여기서 d_{max} 는 최대 마모 깊이, R_{wear} 는 패드 마모형상의 곡률 반경을 나타낸다. Fig. 4에는 측정된 마모 형상과 상기 식을 통해 가정한 패드의 마모 형상이 함께 나타나있다.

Fig. 5는 열윤활 해석을 통해 예측된 각 패드의 압력 발생과 패드 표면 온도를 나타낸다. 패드의 마모가 없을 때는 Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 모든 패드에서 압력이 발생 하였으며, 하중이 작용

하는 Pad 3, 4의 온도가 하중이 작용하지 않는 Pad 1의 온도 보다 높게 예측 되었다. 또한, 각 패드의 최대 온도는 선단에서 90% 위치에서 나타났다. 그러나,

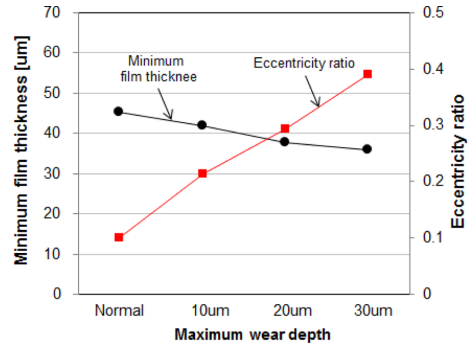


Fig. 6. Predicted minimum film thickness and eccentricity ratio.

패드 마모 깊이가 10 μm일 경우에는 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 마모의 영향으로 Pad 3, 4에서 압력이 부분적으로 낮아지는 현상이 예측되었다. 마모가 있는 Pad 3, 4의 최대 온도는 마모가 없는 경우(Fig. 5(a))와 비교 시 3 °C 정도 높게 나타났다. 그러나, 하중 작용 방향의 반대쪽에 위치한 Pad 1의 최대 온도는 마모가 없는 경우보다 1.5 °C 정도 낮게 예측 되었다. 마모된 패드의 온도 증가 현상은 패드의 마모 깊이가 증가함에 따라 보다 뚜렷하게 나타났다. 패드의 마모 깊이가 30 μm일 경우 Pad 3, 4의 최대 온도는 마모가 없는

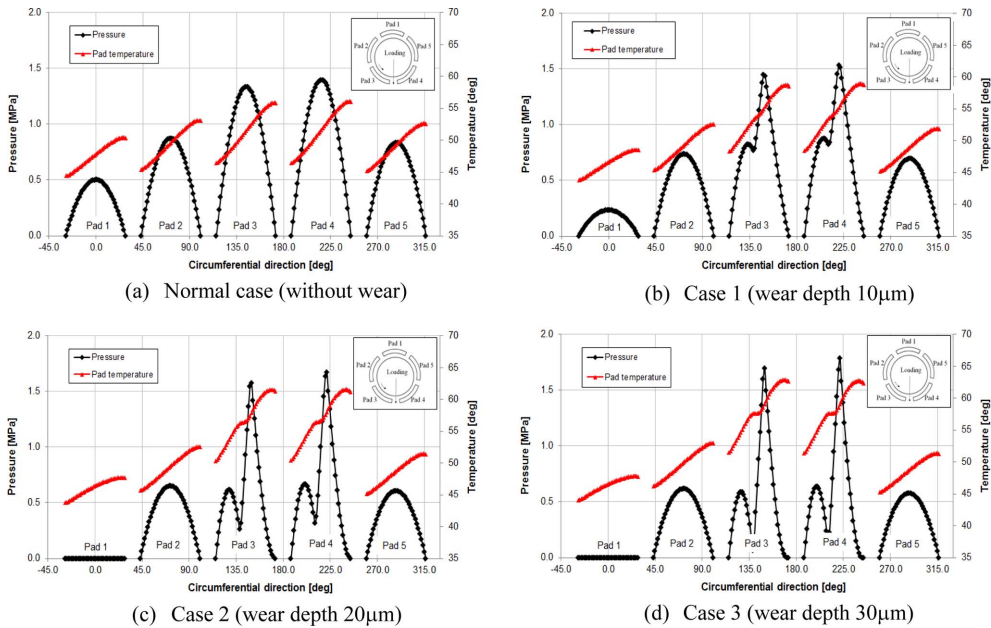


Fig. 5. Predicted pressure and pad surface temperatures for various wear depth.

온도는 마모가 없는 경우에 비해 3°C 낮게 예측되었다. 이러한 현상은 패드 마모에 의한 회전축의 편심을 변화가 원인인 것으로 판단된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 마모 깊이가 증가함에 따라 회전축의 편심이 증가하고 이에 따라 하중이 작용하는 패드에서는 유막 두께가 감소하여 점성 마찰에 의한 열 발생이 증가하게 된다. 이에 반해 하중 작용 방향의 반대쪽에 위치한 패드에서는 상대적으로 점성 마찰에 의한 열 발생이 적어져 패드에 마모가 있는 경우 정상 상태에 비해 온도가 낮아지게 된다. 또한, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 패드의 마모 깊이가 증가함에 따라 최소 유막 두께 또한 작아지는 것으로 예측 되었다. 따라서, 패드의 마모는 회전축의 편심을 증가나 상, 하부 패드 사이의 온도 차를 증가시키는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 현장에서 회전 기계를 운용할 때 회전축의 편심을 변화나 상, 하부 패드의 온도차이 추적을 통해 패드 마모의 진단이 가능할 것으로 생각된다.

3-2. 실험 결과

마모된 베어링에 대한 실험은 시험용 로터를 지지하는 2개의 베어링 중에서 Coupling 측에 위치한 Bearing 1의 Pad 3, 4를 Fig. 4(a)의 마모된 패드로 교체하는 방식으로 수행 하였다. 이때, 자유단에 위치한 Bearing 2는 마모가 없는 정상 베어링이 장착된 상태로 시험을 하였다. 베어링에 공급되는 윤활유 온도는 항온 장치를 통해 37°C로 유지되며, 각각의 베어링에 공급되는 윤활유 유량은 10 LPM이다. 시험 중 DAQ 장비를 통해 패드의 온도를 실시간으로 기록하게 된다. 시험용 로터는 정지 상태에서 정격 속도 (10,200 rpm)까지 1분 동안 선형적으로 증가시킨 후, 정격 회전 속도를 유지하는 방식으로 구동하였다.

Fig. 7은 실험을 통해 측정된 각 패드의 온도 변화를 나타낸다. 패드의 온도는 로터 구동 시작 후 점차 증가하다가 120 s 이후에는 온도 변화가 없는 정상 상태에 도달하였다. 패드의 마모가 없는 경우에는 Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 Pad 3, 4의 정상 상태 온도가

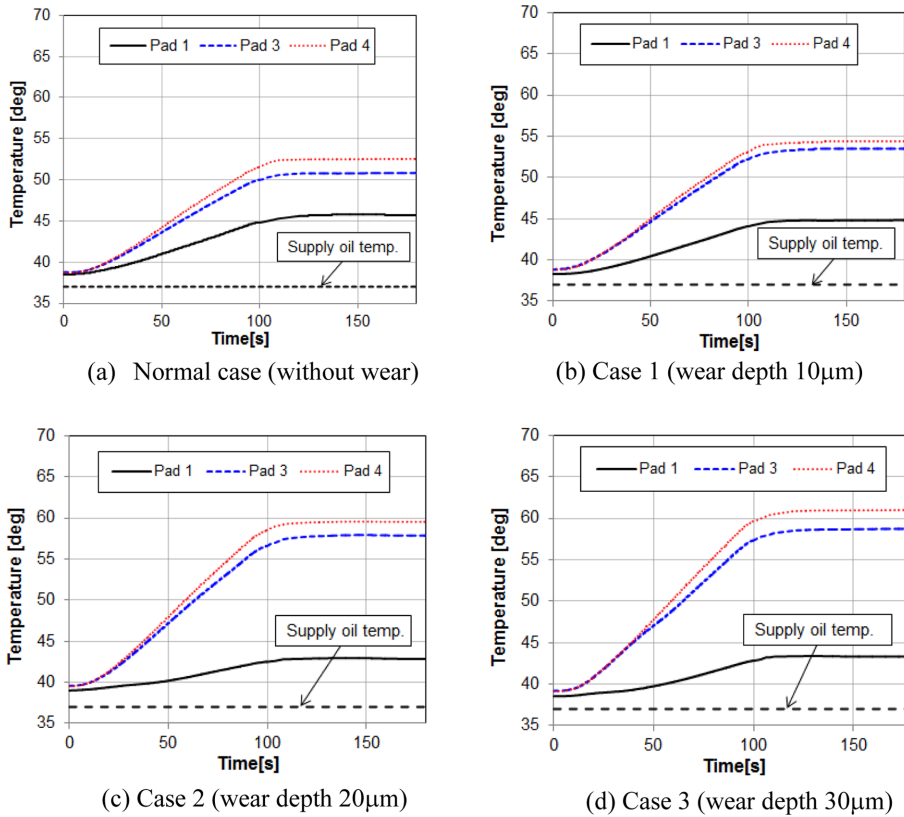


Fig. 7. Test results.

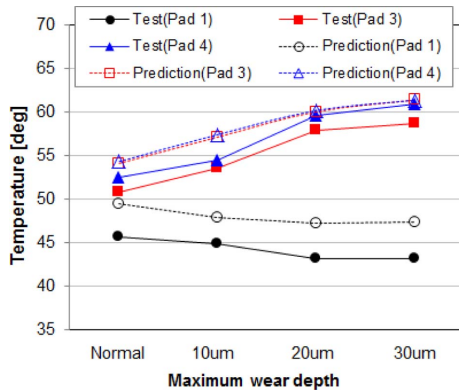


Fig. 8. Predicted and measured pad temperatures.

각각 50.8°C와 52.5°C로 나타났다. 패드의 마모 깊이가 10 μm 인 경우에는 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 Pad 3, 4의 정상 상태 온도가 마모가 없는 경우에 비해 각각 4°C와 2°C 높게 나타났다. 패드의 온도 상승은 마모 깊이가 증가할수록 보다 뚜렷하게 나타났는데, Fig. 7(d)에서 볼 수 있듯이 마모 깊이가 30 μm 인 경우에는 Pad 3, 4의 정상 상태 온도가 패드 마모가 없는 경우에 비해 8°C 높게 나타났다. 그러나, 베어링 상부에 위치한 Pad 1의 경우 마모가 증가할수록 온도가 낮아지는 경향을 보였으며, 마모 깊이가 30 μm 인 경우 마모가 없는 경우에 비해 2.5°C 정도 낮게 측정되었다.

Fig. 8은 실험을 통해 계측된 각 패드의 정상상태 온도와 열윤회 해석을 통해 예측한 패드의 온도를 나타낸다. 그림을 통해 볼 수 있듯이 해석을 통해 예측된 패드 온도는 계측 결과 보다 3~5°C 높게 나타났다. 이러한 차이는 패드의 대류 열전달 계수 가정이나, 회전축의 온도에 대한 가정에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나, 마모 깊이에 따른 Pad 3, 4의 온도 상승이나, Pad 1의 온도 감소 경향은 예측 결과와 실험 결과가 유사하게 나타났다. 마모 깊이가 30 μm 인 경우 Pad 3의 온도 상승은 마모가 없는 경우에 비해 7°C 높게 예측이 되었다. 또한, 실험을 통한 계측된 온도는 마모가 없는 경우에 비해 8°C가 높게 나타났다. Pad 1의 온도 감소 또한 예측 값과 측정 값이 각각 2°C와 2.5°C로 유사하게 나타났다.

본 연구에서 패드의 마모 형상은 마모 길이는 일정하고 마모 깊이만 변경시켜 베어링 특성 변화를 관찰하였다. 그러나, 실제 산업 현장에서 사용되는 틸팅패드 베어링은 마모 진행에 따라 마모 깊이 뿐만 아니라

마모 길이도 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 실제 산업 현장에서 장시간 운전 중인 틸팅패드 베어링에 대해서 마모 형상에 대한 관찰 뿐만 아니라 마모 영역 증가에 따른 베어링 특성 변화에 대한 연구도 향후 연구를 통해 수행할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 패드 표면이 마모된 틸팅패드 저널 베어링의 온도 특성을 분석하기 위해 열윤회 해석 모델을 통해 마모 깊이에 따른 패드 온도를 예측하였고 예측된 결과를 실험을 통해 검증 하였다.

열윤회 해석 결과 하중을 지지하는 하부 패드에 마모가 발생함에 따라 마모된 하부 패드의 온도는 마모가 없는 경우에 비해 증가하였으며, 상부 패드의 온도는 감소하였다. 또한, 마모 깊이가 증가할수록 회전축의 편심율은 증가하고 최소 유막 두께는 감소하는 결과가 예측 되었다. 이러한 패드 표면 마모에 대한 각 패드의 온도 변화 경향은 실험에서도 유사하게 나타났다. 패드의 마모 깊이가 30 μm 인 경우 마모된 패드의 온도는 마모가 없는 경우에 비해 8°C 높게 나타났으며, 상부 패드는 마모가 없는 경우에 비해 2.5°C 낮게 나타났다. 상기의 결과들을 통해 상부와 하부 패드의 온도 차이나, 회전축의 편심을 모니터링 함으로써 패드의 마모 진단이 가능할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

본 연구는 한국 연구 재단 (NRF-2017M2A8A4047757)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Ettles, C. M. McC, "The analysis and performance of pivoted pad journal bearings considering thermal and elastic effects", *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 102, No. 2, pp. 182-191, 1980.
- [2] Knight, J. D., Barrett, L. E., "Analysis of tilting pad journal bearings with heat transfer effects", *Journal of Tribology*, Vol. 110, No. 1, pp. 128-133, 1988.
- [3] Brugier, D., Pascal, M. T., "Influence of elastic deformations of Turbo-Generator tilting pad bearings on the static behavior and on the dynamic coefficients in different designs", *Journal of Tribology*, Vol. 111, No. 2, pp. 364-371, 1989.
- [4] Taniguchi, S., Makino, T., Takeshita, K., Ichimura,

- T., "A thermohydrodynamic analysis of large tilting-pad journal bearing in laminar and turbulent flow regimes with mixing", *Journal of Tribology*, Vol. 112, No. 3, pp. 542-548, 1990.
- [5] Suh, J., Palazzolo, A., "Three-dimensional dynamic model of TEHD Tilting-pad journal Bearing—Part I: Theoretical modeling", *Journal of Tribology*, Vol. 137, No. 4, pp. 014703, 2015.
- [6] Su, J., Palazzolo, A., "Three-dimensional dynamic model of TEHD Tilting-Pad Journal Bearing—Part II: Parametric studies", *Journal of Tribology*, Vol. 137, No. 4, pp. 014704, 2015.
- [7] Fillon, M., Bligoud, J., Frene, J., "Experimental study of Tilting-Pad Journal Bearings—Comparison with theoretical thermoelastohydrodynamic results", *Journal of Tribology*, Vol. 114, No. 3, pp. 579-587, 1992.
- [9] Bang, K., Kim, J., Cho, Y., "Comparison of power loss and pad temperature for leading edge groove tilting pad journal bearings and conventional tilting pad journal bearings", *Tribology International*, Vol. 43, pp. 1287-1293, 2010.
- [10] Wygant, K. D., Flack, R. D., Barrett, L. E., "Measured performance of Tilting-Pad journal bearings over a range of Preloads—Part I: Static operating conditions", *Tribology Transactions*, Vol. 47, No. 4, pp. 576-584, 2004.
- [11] Shu, J., Hwang, C., "Thermal deformation induced preload change in the tilting pad journal bearing," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-8, 2016.
- [12] Kim, T., Choi, T., Kim, C., "Rotordynamic performance predictions of tilting pad journal bearing with rocker-back pivots and comparison with published test results", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 31, No. 6, pp. 294-301, 2015.
- [13] Lee, T., Kim, T., "Finite element analysis of pivot stiffness for tilting pad bearings and comparison to hertzian contact model calculations," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 30, No. 4, pp. 205-211, 2014.
- [14] Whalen, J. K., Allen, J., Hess, T., Craighton, J., "Babbitted Bearing Health Assessment", Proceedings of the Forty First Turbomachinery Symposium, 2012.
- [15] Dufrane, K. F., Kannel, J. W., McCloskey, T. H., "Wear of steam turbine journal bearings at low operating speeds", *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, No. 2, pp. 182-191, 1983.
- [16] Kumar, A., Mishra, S. S., "Steady state analysis of noncircular worn journal bearings in nonlaminar lubrication regimes", *Tribology International*, Vol. 29, No. 6, pp. 493-498, 1996.
- [17] Scharer, J. K., Hecht, R. F., Hibbs, R. I., "The Effects of wear on the rotordynamic coefficients of a hydrostatic journal bearing", *Journal of Tribology*, Vol. 113, No. 1, pp. 210-213, 1991.
- [18] Fillon, M., Bouyer, J., "Thermohydrodynamic analysis of a worn plain journal bearing", *Tribology International*, Vol. 37, No. 4, pp. 129-136, 2004.
- [19] Lee, D., Sun, K., "Thermohydrodynamic analysis and pad temperature measurement of a tilting pad journal bearing for a turbine simulator", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 3, pp. 112-118, 2017.