

# Spragging 에 의한 터빈 베어링의 손상 및 방지 대책

하현천 · 양승현  
한국중공업(주) 기술연구원

## Analysis for Prevention of Spragging in the Turbine Bearings

Hyun Cheon Ha and Seong Heon Yang

Research and Development Center, Korea Heavy Industries & Construction Co. (HANJUNG)

**Abstract** – This paper describes an investigation on bearing failure due to spragging that has been continuously occurred in turbine bearings. The spragging is defined as the damage found on the leading edge of unloaded pads in the tilting pad journal bearing. In general, the damage mechanism by spragging is classified into fatigue failure. The principle cause of spragging could be thought as the self-excited vibration by the absence of a stable static equilibrium position of upper pads with no preload. Because of serious consequences of system breakdowns due to bearing failures, determination of the causes of failure and effective method for countermeasures are very important. This paper describes both the causes of spragging and countermeasures for prevention of such failure, which are taken place in the electric power plants.

**Keywords:** Steam Turbine, Tilting Pad Journal Bearing, Spragging, Fatigue Failure

### 1. 서론

증기터빈 베어링으로는 주로 틸팅패드 저어널베어링과 타원형 저어널베어링이 사용되고 있다. 이 중, 상대적으로 증기압(steam pressure)이 크고 불안정요인이 많은 고압 터빈 축에는 틸팅패드 저어널베어링이 사용되고 있다(Fig. 1 참조).

그러나 정기검사(overhaul) 중, 틸팅패드 저어널베어링 상부패드(upper pad)의 leading edge 부에서 babbitt metal 의 손상과 같은 문제점들이 종종 발생하고 있다.

위 현상의 근본 원인으로는 운전 중, 상부패드가 무부하패드(unloaded pad)가 되어 정적평형상태를 유지하지 못함으로써 작은 외란에 의해서도 패드가 쉽게 진동하여 패드와 로터가 상호 충돌하기 때문이다. 이와 같이 틸팅패드 저어널베어링 상부패드의 leading edge 부 손상을 spragging 으로 정의한다[1].

베어링의 운전 중 틸팅패드 저어널베어링에서 spragging 현상이 발생하게 되면 상부패드 자체의 손상은 물론 베어링 전체의 손상으로 확대될 수 있다.

이는 전체 터빈발전기의 안정적인 운전을 저해하는 중요한 요인이 될 수 있기 때문에 spragging 의 근본 원인을 규명하고 방지대책을 수립하는 것은 터빈베어링의 손상을 방지하고 발전설비의 안정적인 운전을 도모함에 있어 매우 중요하다.

본 연구에서는 패드면에 작용하는 전단응력에 의한 피복에서의 모멘트 방향 해석을 통하여 spragging 의 발생 메카니즘을 규명하고, 실제 현장에서 발생한 spragging 사례를 제시하여 그 파손기구(damage mechanism)를 규명하였다. 또한 spragging 을 방지하기 위한 베어링의 설계변수들을 제시하고 기 수행한 연구자들의 연구결과를 고찰하였다. 특히 이들 설계변수 중에서 베어링 예압(preload)의 관점에서는 이론해석을 통하여 spragging 방지를 위한 유효한 예압치를 제시하였다.

### 2. Spragging 현상

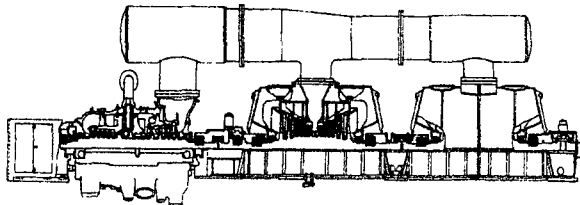
#### 2-1. Spragging 의 발생원인

증기터빈이 정상적으로 운전되는 경우, 저어널베어링의 주 정적하중(static load)은 로터의 자중이다. 예압이 없는 틸팅패드 저어널베어링의 경우, 하부패드(lower pad)는 로터의 자중을 지지하는 부하패드(loaded pad)가 되나 상부패드는 베어링의 케이싱에 고정되는 것이 아니라 한정된 공간 내에서 자유롭게 움직일 수 있도록 설계되어 있기 때문에 운전 중 무부하 패드가 된다.

틸팅패드 저어널베어링의 실험결과에 의하면 베어링의 운전 중 상부패드의 유막형상은 저어널과 거의 평행하게 유지되고, 이로 인해 상부패드에는 유막압력이 거의 형성되지 않음을 알 수 있다[2].

즉, 상부패드는 베어링의 운전 중 무부하패드가 됨으로 인해 정적평형상태를 유지하지 못하게 되고, 피벗을 중심으로 원주방향으로 연속적으로 진동(pad flutter)하게 된다. 이 진동량이 커지게 되면 무부하패드, 즉 상부패드와 회전하는 로터가 상호 충돌하게 되어 패드의 손상을 야기하게 된다.

- Tilting Pad Journal Bearing
- Elliptical Journal Bearing
- Thrust Bearing



High Pressure Turbine Low Pressure Turbine Low Pressure Turbine

Fig. 1 Schematics of a 500 MW steam turbine

### 2-2. Spragging 의 발생 메카니즘

본 연구에서는 패드면에 작용하는 전단응력에 의한 피벗에서의 모멘트 방향해석을 통하여 spragging의 발생 메카니즘을 규명하고자 한다. Fig. 2는 이 해석을 위하여 베어링을 피벗이 점접촉(point contact)된 single-pad 모델로 단순화한 구조와 좌표계를 나타내는 그림이다.

해석을 위한 가정으로서 패드 내의 유막형상은 실험결과에서 알 수 있었던 바와 같이 저어널과 평행하고, 패드면에 작용하는 전단응력은 패드 내면을 따라 일정하게 작용하는 것으로 설정하였다.

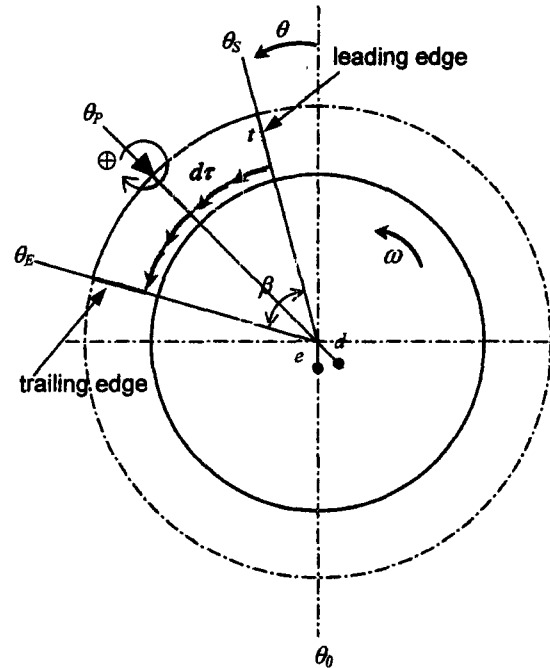


Fig. 2 Coordinate system of a single-pad model

Fig.2에서 보여 주듯이 모멘트의 방향은 시계방향이 양의 방향이다. 피벗에 대한 모멘트의 합은 다음과 같다.

$$\sum M_p = \int_0^e \int_0^{2\pi} dr ((R+t)\cos(\theta_p - \theta) - R) R d\theta dz \quad (1)$$

여기서

$L$  : 베어링 폭

$R$  : 베어링 반경

$t$  : 패드 두께

$dr$  : 미소전단응력

식(1)을 무차원화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\sum \bar{M}_p = \int_0^e \int_0^{2\pi} d\bar{r} \left( \left( 1 + \frac{t}{R} \right) \cos(\theta_p - \theta) - 1 \right) d\theta dz \quad (2)$$

여기서

$d\bar{r}$  :  $d\tau/R$

$\bar{z}$  :  $z/L$

피봇에서의 모멘트 방향을 규명하기 위해서 식(2)의  $d\tau = C(const)$ ,  $t \neq 0$ 인 경우를 가정하여 무차원 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$\sum \bar{M}_p = 2C \left[ \left( 1 + \frac{t}{R} \right) \sin \frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \right] \quad (3)$$

여기서

$$\beta : \theta_E - \theta_S$$

식(3)에 대하여  $\beta$ 를  $\pi/2$ 로 가정하고 식(3)이 zero가 되는 경우, 즉  $\sum \bar{M}_p = 0$ 에 대해서 패드의 두께( $t$ )를 구하면  $t = 0.11R$ 이 된다.

실제로 증기터빈용 틸팅패드 저어널베어링의 경우,  $\beta \leq \pi/2$ ,  $t \geq 0.11R$ 이므로 식(3)은  $\sum \bar{M}_p > 0$ 이 되어 항상 시계방향으로 모멘트가 작용함을 알 수 있다.

이 해석결과로부터 상부패드의 leading edge 부는 회전하는 로터와 상호 접촉하게 되는 형상이 되어 운전 중 spragging 이 발생할 가능성이 커짐을 알 수 있다(Fig. 3 참조). 즉 패드와 저어널 사이의 유막형상은 diverge shape 이 되어 상부패드는 유막압력이 발생되지 않는 무부하패드가 된다.

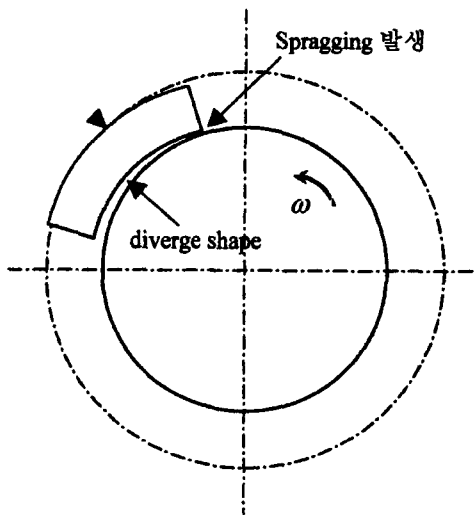


Fig. 3 Coordinate system of a single-pad model

### 3. Spragging 에 의한 베어링 손상

#### 3-1. 손상 사례

Fig. 4 는 실제 spragging 에 의해 손상된 증기터빈용 틸팅패드 저어널베어링의 무부하패드의 leading edge 부 사진을 보여주고 있다. Leading edge 부의 중앙부와 끝단부에는 babbitt metal 이 탈락되어 back metal 이 들어 날 정도로 크게 손상되었고, leading edge 부의 축방향으로도 손상된 흔적이 뚜렷함을 볼 수 있다.

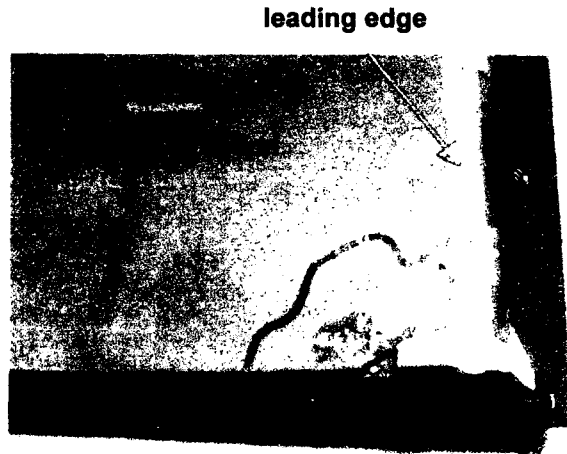


Fig. 4 Spragging of unloaded pad of tilting pad journal bearing

Fig. 5 와 6 은 각각 상부패드의 원주방향 미끄럼을 방지하기 위한 locking pin 과 pin hole 의 손상을 보여주는 사진으로서 locking pin 은 휘거나 절단되었으며, pin hole 은 locking pin 과의 접촉으로 인하여 내면이 크게 마모되어 있음을 알 수 있다.

#### 3-2. 손상 메카니즘

틸팅패드 저어널베어링의 상부패드는 운전 중 무부하패드가 되어 피봇을 중심으로 원주방향으로 흔들거리는 동작을 반복한다. 이 경우 패드는 대부분 로터 회전속도의 0.4 ~ 0.5 배의 진동수로 진동하기 때문에 현상학적으로는 로터 진동에 의한 oil whirl 과 유사한 저차 비동기 자력진동(sub-synchronous self-excited vibration)의 경향을 보인다[3].

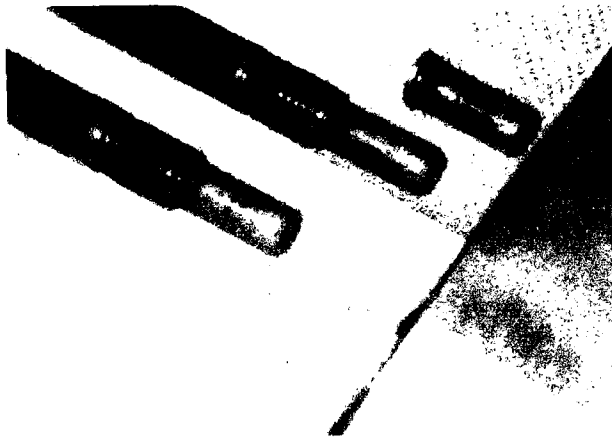


Fig. 5 Damage of locking pin

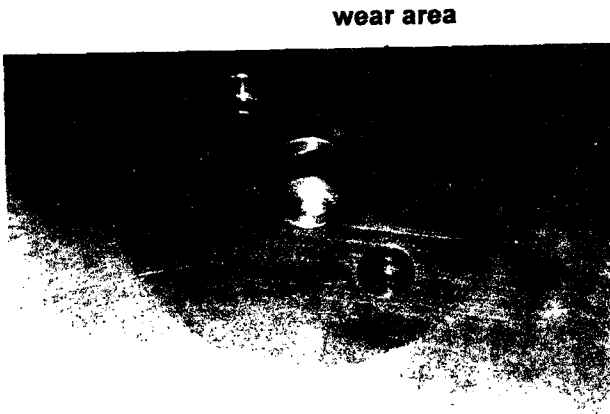


Fig. 6 Wear of pin hole

따라서 spragging 에 의한 패드의 손상은 운전 중 패드의 연속적인 진동에 의해 패드와 로터가 상호 고체 접촉하여 발생하는 피로손상(fatigue failure)으로 분류할 수 있다[4].

부연하면 반복적으로 작용하는 충격력에 의해 babbitt 표면에서 균열이 발생하고 이러한 균열이 성장, 합체됨으로 인하여 babbitt metal 이 탈락되는 것이다.

#### 4. Spragging 의 방지 대책

##### 4-1. Spragging 방지를 위한 설계 변수

틸팅패드 저어널베어링의 설계변수들 중에서 spragging 을 효과적으로 방지할 수 있는 것들로는

베어링 예압(m), spragg relief angle, pivot offset( $\alpha/\beta$ ), 그리고 pad arc( $\beta$ ) 등이 있다.

Adams 와 Payandeh 는 이론해석을 통하여 spragg relief angle 를  $10^\circ$  이상이 되도록 설계하면 무부하패드의 자려진동은 발생하지 않게 됨을 보였다. 그리고 그들은 pad arc 는 작을수록 상부패드는 자려진동에 대해 안정적이나 pivot offset 은 spragging 을 방지하는데 그다지 중요한 설계변수가 아님을 이론해석을 통해서 보였다[3].

Zeidan 과 Paquette 는 위 결과를 응용하여 하부패드의 pad arc 는 그대로 유지하면서 상부패드의 pad arc 는 줄여서 사용할 것을 제시하였다. 그리고 상부패드의 자려진동에 의한 불안정 현상을 줄이고자 leading edge 부에 감쇠(damping)을 주는 장치를 제시하였다. 또한 spragging 을 방지하기 위한 가장 유용한 설계변수로서는 베어링 예압을 제시하였으나 이에 대한 구체적인 연구결과는 언급하지 않았다 [1].

##### 4-2. Spragging 방지를 위한 유효 예압

Spragging 의 발생원인은 앞서 검토한 바와 같이 틸팅패드 저어널베어링의 상부패드가 운전 중, 무부하패드가 되기 때문이다. 따라서 spragging 현상을 방지하기 위한 가장 유용한 방법 중의 하나는 상부패드가 항상 하중을 지지할 수 있게 설계하여 정적평형 상태를 유지토록 하는 것이다.

본 연구에서는 베어링의 운전 중 상부패드가 항상 무부하패드가 될 수 있는 예압의 범위를 제시코자 한다. 이를 위해서는 패드 피봇에서의 베어링 유막두께를 구하여야 한다.

틸팅패드 저어널베어링에서 유막두께는 축중심의 편심, 패드의 예압, 그리고 패드의 자세각 등에 의해서 발생하는 축중심과 패드와의 상대변위로부터 구해진다. 본 해석에서는 패드의 자세각에 의한 영향은 무시하기로 한다. 틸팅패드 저어널베어링의 무차원화된 유막두께는 다음과 같다[5].

$$\bar{h} = h/c_p = 1 - \epsilon_p \cos(\theta_s - \theta) - m \cos(\theta_s - \theta) \quad (4)$$

여기서

$$\epsilon_p = \theta/c_p$$

식(4)에 대하여 피봇점에서의 유막두께를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{h}_p = 1 - \varepsilon_p \cos(\theta_o - \theta_p) - m \quad (5)$$

틸팅패드 저어널베어링이 완전한 유막을 형성하기 위해서는 피벗에서의 최소유막두께가 zero 보다 커야 된다. 이는  $\theta_o = \theta_p$  인 경우로써 식(5)에 적용하고 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{h}_p = 1 - (\varepsilon_p + m) > 0.0 \quad (6)$$

식(6)으로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_p + m < 1.0 \quad (7)$$

또한 운전 중 상부패드가 항상 부하패드가 되기 위해서는 피벗에서의 최대유막두께가 1 보다 작아야 된다. 이는  $\theta_o - \theta_p = 180^\circ$  인 경우로써 식(5)에 적용하고 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{h}_p = 1 - (m - \varepsilon_p) < 1.0 \quad (8)$$

식(8)로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$m > \varepsilon_p \quad (9)$$

식(7)과 (9)의 결과를 동시에 만족하는 예압(m)의 범위는 다음과 같다..

$$0.5 < m < 1.0 \quad (10)$$

식(10)의 결과로부터 베어링 예압의 크기를 0.5 이상이 되도록 설계하면, 상부패드는 항상 하중을 지지하는 부하패드가 되어 운전 중 정적평형상태를 유지할 수 있게 되어 spragging 이 발생하지 않게 될 것으로 사료된다.

이 경우 예압에 따른 전체 베어링의 특성 해석 및 축계 진동해석을 엄밀히 수행하여 회전기계의 안정성에 미치는 영향을 충분히 검토하여야 한다.

## 5. 결 론

증기터빈용 틸팅패드 저어널베어링에서 발생하는 spragging 현상에 대한 발생원인, 현장사고 사례 그리고 방지대책에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 패드 피벗점에서의 모멘트 방향해석 결과, 패드의 leading edge 부는 회전하는 로터와 상호 접촉하게 되는 형상이 되어 운전 중 spragging 이 발생하게 되고, 패드와 저어널 사이의 유막형상

은 diverge shape 이 되어 상부패드는 유막압력이 발생되지 않는 무부하패드가 된다.

2. Spragging 에 의한 패드의 손상은 운전 중 패드의 연속적인 진동에 의해 패드와 로터가 상호 고체 접촉하여 발생하는 피로손상이다.
3. 베어링 예압을 0.5 이상이 되도록 설계하면 베어링의 운전 중 상부패드는 항상 부하패드가 되어 spragging 현상은 발생하지 않을 것으로 평가되었다.

## 참 고 문 헌

1. Zeidan, Foud Y., Paquette, Donald J., "Application of High Speed and High Performance Fluid Film Bearings in Rotating Machinery," Proceedings of 23<sup>rd</sup> Turbomachinery Symposium, 1994.
2. 하현천, 양승현, 변형현, "LOP 형 5 패드 틸팅패드 저어널베어링의 압력 및 온도 특성에 관한 실험적 연구," 한국윤활학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 7 ~ 13, 1998.
3. Adams, M. L., Payandeh, S., "Self-Excited Vibration of Statically Unloaded Pads in Tilting-Pad Journal Bearings," ASME/ASLE Joint Lubrication Conf., October 5-7, 1982.
4. McCloskey, Thomas H., "Troubleshooting Bearing and Lube Oil System Problems," Proceedings of 24<sup>th</sup> Turbomachinery Symposium, 1995.
5. 하현천, 김경용, 김영춘, 김호중, "선단압력을 고려한 대형 틸팅패드 저어널베어링의 THD 성능에 관한 연구," 한국윤활학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 30 ~ 38, 1994.