

# 상부패드의 형상변경을 통한 증기터빈용 Anti-spragging 틸팅패드 저널베어링 개발(Ⅱ-1)



두산중공업(주)  
증기터빈 기본설계팀  
팀장 나운학  
Tel : (055)278-8150

## ABSTRACT

The tilting pad journal bearing has been widely used to support high pressure/high rotating turbine rotors owing to their inherent dynamic stability characteristics. However, fatigue damages in the upper unloaded pads and the break of locking pins etc. by pad spragging were continuously taken place in the actual steam turbines. The purpose of this paper is to develop a new bearing model that can prevent bearing damage problems effectively by pad spragging in a tilting pad journal bearing. A new bearing model which has a wedged groove is suggested from the studies of spragging mechanism performed by previously research works. The spragging characteristics of the upper unloaded pad are studied experimentally in order to verify the reliability of a new bearing model. It can be known that the phenomenon of pad spragging nearly does not occur in the new bearing model under the various experimental conditions. And it is observed that any kinds of bearing failures by pad spragging does not detect in the application of actual steam turbines.

**Key Words** : Spragging(스프레깅), Tilting Pad Journal Bearing(틸팅패드 저널베어링), Shape Modification(형상변경), Fatigue Damage(피로파손), Film Pressure(유막압력), Film Thickness(유막두께)

## 1. 서론

발전용 증기터빈은 국가의 공익 기간산업을 대표하는 대형 회전기계로서 산업 전반과 가정에 항상 전력을 안정적으로 공급해야 하기 때문에 충분한 신뢰성을 확보하고 운전 되어야 한다. 이러한 관점에서 특히 대형 증기터빈에 대한 최근의 연구추세는 보다 신뢰성이 우수하고, 고효율의 터빈 시스템을 개발하는데 그 목표를 두고 있다. 이러한 연구목표를 달성하기 위해 반드시 필요한 핵심 요소기술 중의 하나로는 운전조건에 가장 적합하고 신뢰성 있는 베어링을 선정하여 설계할 수 있는 기술을 개발하는 것이다.

왜냐하면 베어링은 터빈 시스템의 효율 및 동적 안정성에 지대한 영향을 미치는 핵심 기계요소로서 실제 터빈 시스템에서 발생하는 사고의 대부분, 특히 고진동 등의 문제들이 이들 베어링과 직/간접적으로 관련되어 있기 때문이다.

이에 대해 출력 250 MW 이상의 대형 증기터빈용 저널베어링은 그 사용 초기에는 단순히 축의 하중을 지지하기 위한 목적으로 원형 저널베어링을 설계하여 적용해 왔으나 점차 터빈이 대형화/고속화 되면서 로터축계-베어링 시스템의 동적 안정성을 확보하기 위하여 다양한 형태의 저널베어링(틸팅패드 저널베어링 및 타원형 저널베어링 등)을 개발하여 설계에 적용하고 있다.

이 중에서도 틸팅패드 저널베어링은 우수한 동적 안정성 특성 때문에 대형 증기터빈의 불안정 요인이 많은 고/중압 로터를 지지하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 틸팅패드 저널베어링은 고정형 패드로 설계된 타원형 저널베어링과 달리 구조적으로 유동 상태가 복잡하고, 운전 중 온도 상승과 난류의 영향이 크며 또한 이론해석에 필요한 경계조건을 명확하게 규명하기가 어려워 해석결과의 신뢰성이 타 베어링에 비해 크게 낮은 실정이다.

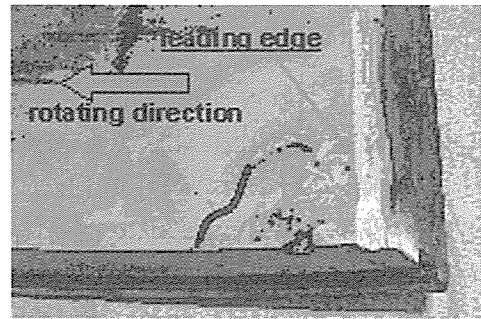
이러한 문제점들을 극복하기 위해 많은 연구자들은 난류, 온도 상승에 따른 유막의 점도 변화 등을 고려한 3차원 열/유체 유허해석의 수행 그리고 보다 정확한 해석 결과를 얻기 위한 선단압력의 적용 등 다양한 연구를 수행해 오고 있다.<sup>(1~8)</sup> 이와 같은 연구를 통해 개발된 많은 설계 지침과 해석 프로그램들은 킬팅패드 저널베어링에 대한 해석 결과의 정확도를 높여 동 베어링 자체는 물론 이를 적용하고 있는 고속 회전기계의 운전 신뢰성을 증대시키는데 크게 기여해 오고 있다.

이와 같은 연구 성과에도 불구하고 대형 증기터빈용 킬팅패드 저널베어링에서는 패드 spragging 현상(아래 정의 참조)에 의한 babbitt metal의 탈락 등과 같은 베어링 파손이 지난 수십 년 동안 지속적으로 발생되고 있다. 그러나 아직까지도 이 문제를 해결할 구체적인 운전 및 설계 개선 방안이 도출되지 않아 베어링 자체의 파손은 물론 동 베어링을 적용하고 있는 터빈 시스템의 안정성이 크게 위협받고 있는 실정이다.

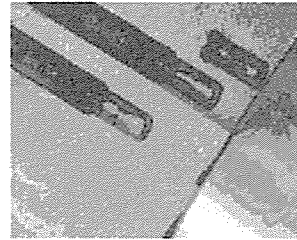
[그림 1]은 실제 화력 발전용 증기터빈을 장기간 운전 후 분해하였을 때 발견되는 킬팅패드 저널베어링의 파손형태를 보여 주고 있다. 파손은 상부 무부하패드(upper unloaded pad)의 babbitt metal의 탈락 현상이며, 패드의 선단 양쪽 가장자리에서 집중적으로 발생한다.

위 현상의 근본 원인으로서는 터빈의 운전 중, 상부 패드가 정적 평형상태를 유지하지 못하고 진동함으로써 패드와 로터가 상호 충돌하기 때문인데, 이 경우 상부패드의 진동현상을 패드spragging이라 정의한다. 베어링의 운전 중 킬팅패드 저널베어링에서 패드 spragging이 발생하게 되면 [그림 1]에서 볼 수 있듯이 상부패드의 babbitt metal의 손상은 물론 패드의 원주방향 미끄럼을 방지하기 위한 locking pin의 절단 그리고 locking pin이 삽입되는 pin hole의 마모 등과 같은 베어링 전체의 손상으로도 확대될 수 있으며, 나아가서는 터빈 시스템의 전체적인 안정성을 크게 저하시키는 요인이 될 수 있다. 왜냐하면 패드 spragging으로 인해 탈락된 babbitt metal들은 베어링의 좁은 틈새로 유입되어 패드는 물론 고속으로 회전하는 저널 표면도 크게 손상 시킬 수 있기 때문이다.

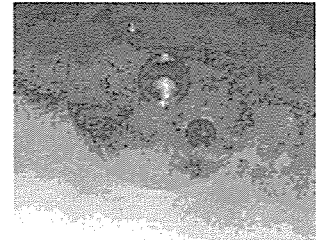
이와 같은 중요성 때문에 많은 선행 연구자들은 패



(a) Fatigue damage of unloaded pad



(b) Break of locking pin



(c) Wear of pinhole

[그림 1] Failure examples by pad spragging

드 spragging의 근본 원인을 규명하고 방지대책을 제시하기 위하여 다양한 연구결과들을 제시해 오고 있다.<sup>(9~15)</sup> 그러나 지금까지 여러 연구자들에 의해 제시된 많은 방안들은 그 적용에 있어 별도의 장치가 필요해 시스템이 복잡해지거나, 베어링의 특성 변화가 수반되어 부가적인 설계 변경이 요구되거나, 베어링의 운전효율을 향상시키고자 하는 최근의 연구추세에 다소 상반되거나 또는 그 적용에 대해 효과가 크지 않을 가능성이 많으므로 실제 운전 또는 설계에 반영하기 위해서는 세심한 주의 또는 한계가 있다.

본 연구에서는 패드 spragging 현상을 거의 완벽하게 방지할 수 있는 매우 간단하면서도 효과적인 방안으로서 기존에 제시된 방안과는 차별되는 형상변경 베어링 모델을 제시코자 한다. 이를 위해서 패드 spragging에 대한 전반적인 특성을 측정/분석할 수 있는 베어링 실험장치를 자체 개발하였다. 이를 통해서 1차적으로 연구단계에서 형상변경 모델에 대한 기술적 타당성을 실험적으로 증명하고자 한다.

연구를 통해 개발된 새로운 형상의 베어링 모델을 실제 증기터빈(화력500MW, 800MW)에 적용하여 1년간 연속 운전 후 분해/점검하여, 기존 베어링에서 발생된 문제점들이 해결되었음을 실증 검증함으로써 본 연구에서 개발한 “Anti-spragging 킬팅패드 저널베어링”의 운전 신뢰성을 확보코자 한다.

## 2. 실험장치

[그림 2]는 본 연구의 목적인 “Anti-spragging 틸팅패드 저널베어링”을 개발하기 위해 자체 설계/제작한 실험장치의 전체를 보여주는 사진이고, [그림 3]은 실험결과를 취득하기 위한 각종 센서 및 계측장비를 파악할 수 있는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 본 실험장치는 실험용 베어링, 축과 저널, 하중인가장치, 동력전달장치, 윤활유공급장치, 신호처리장치, 그리고 유압 가진장치 등으로 구성되어 있다.



[그림 2] Photograph of test apparatus

[그림 4]는 실험용 베어링의 기본구조를 보여주고 있다. 실험용 베어링은 실제 500MW급 화력 발전용 터빈에 사용되고 있는 6-pad LOP(load on pad)형 틸팅패드 저널베어링을 약 80% 정도로 축소 모델링 한 것으로서 그 명세는 [표 1]과 같다.

베어링 케이싱에 와전류형 비접촉식 변위센서 2개를 서로 90도의 각도로 즉, 수평 및 수직방향으로 설치하여 운전 중에 저널과 베어링의 상대진동을 측정함으로써 상부패드의 spragging 현상이 로터축계-베어링계의 진동에 미치는 영향을 측정할 수 있도록 하였다.

그리고 다양한 실험조건에 대하여 상부패드 각각의 개별적인 spragging 특성을 보다 엄밀하고 정확하게 취득하기 위하여 3개의 상부패드(No. 1,2,6) 선단부(leading edge)에 3개의 가속도 센서를 각각 설치하였다. 이를 통하여 검출되는 전기적 신호를 주파수 분석하여 상부패드 자체의 절대적인 spragging 특성을 측정할 수 있도록 하였다.

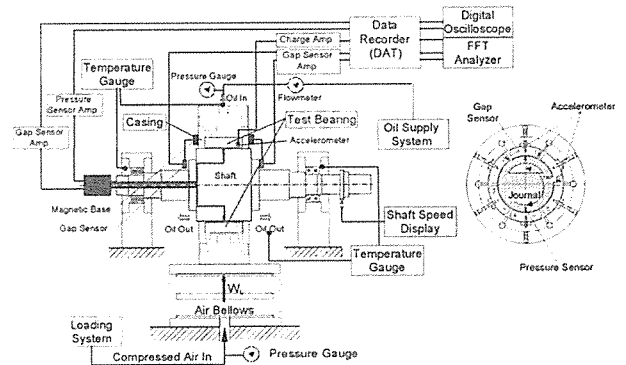
[그림 5]는 상부패드의 선단부에 가속도 센서를 설치한 사진을 보여주고 있다. 가속도 센서에 의한 패

드의 자유로운 틸팅이 방해되지 않도록 하기 위하여 패드의 표면 위로 센서가 돌출되지 않도록 주의하여 설치하였다.

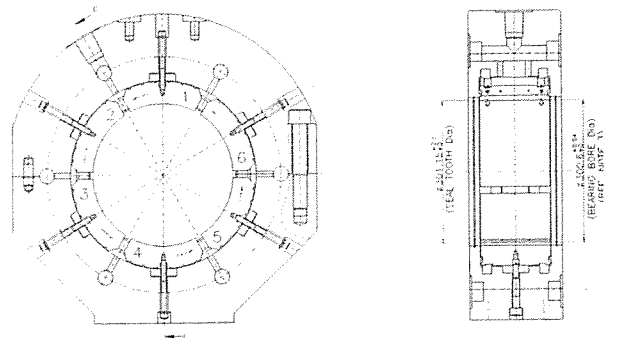
원주방향으로의 유막압력 및 유막두께를 측정하기 위하여 저널면의 중앙에 원주방향으로 압력센서 및 변위센서를 각각 1개씩 설치하였다. 압력센서와 변위센서 사이에는 180°의 위상차가 발생한다.

[표 1] Physical parameters of a test bearing

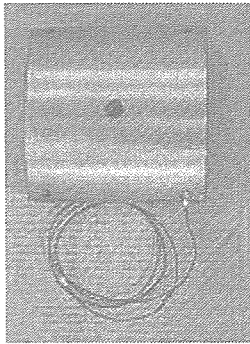
Diameter (D)	300.91 mm
Length (L)	149.80 mm
Radial clearance (CR)	0.45 mm
No. of pads	6
Pad arc (?)	54 °
Preload ratio (m)	0
Pivot position	Center
Upper pads	No. 1, 2, 6
Lower pads	No. 3, 4, 5
Width & Thickness of each pad	150.00 mm, 51.00 mm



[그림 3] Schematic diagram of test apparatus



[그림 4] Test bearing



[그림 5]  
Photograph of accelerometer installed in upper pad

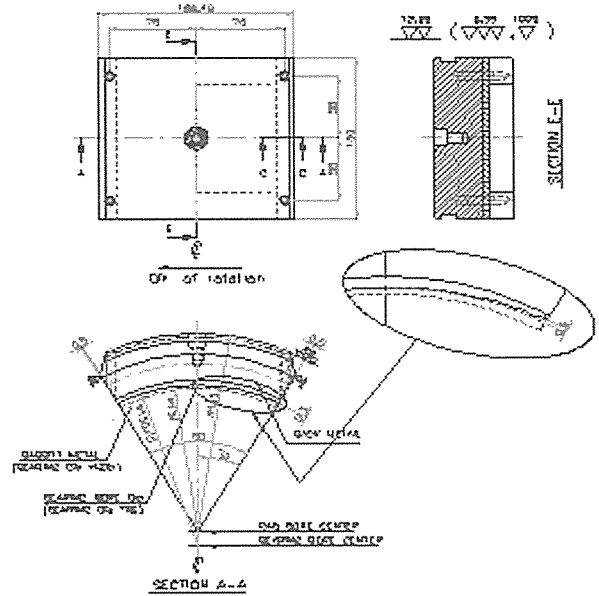
### 3. 실험용 틸팅패드 모델

[그림 6] (a) 및 [그림 6] (b)는 실제로 패드 spragging이 발생하는 기존모델(conventional model)과 패드 spragging을 방지하기 위해 본 연구에서 제시하는 형상변경 모델(shape modified model)을 각각 보여주고 있다. 기존 모델 대비 형상변경 모델은 [그림 6] (b)에서 볼 수 있듯이 패드 내면의 선단부에서부터 중앙부까지 쐐기 형상(wedge shape)의 홈을 가지도록 별도 가공한 형태이다. 쐐기 형상은 일정폭에 대하여 선단부에서 홈 깊이를 0.3mm로 하여 패드의 중앙부로 갈수록 서서히 얕아지다가 정확히 중앙부에 도달해서는 원래의 내면과 같아지는 형상으로 가공하였다.

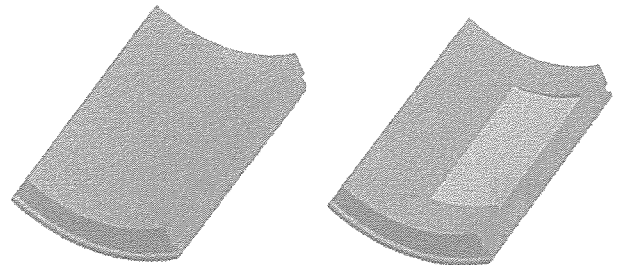
[그림 7]은 기존 모델과 형상변경 모델에 대한 3차원 형상을 각각 보여주고 있다. 형상변경 모델에 대해서는 쐐기형상의 홈을 가지적으로 뚜렷하게 표현하

기 위하여 실제보다 과장하여 나타내었다.

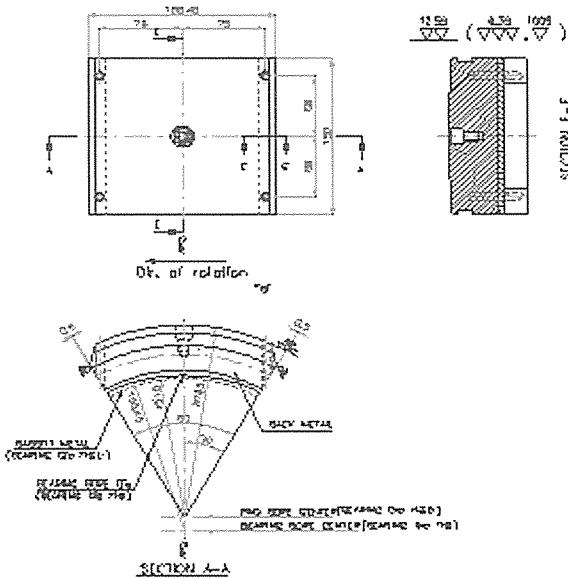
본 연구에서는 Fig.6 및 Fig.7에 제시된 2가지 틸팅패드 모델에 대하여 동일한 실험조건을 적용하여 패드 spragging 현상을 측정/분석코자 한다. 이를 통해서 기존 모델 대비 형상변경 모델이 가지는 anti-spragging 특성을 실험적으로 증명함으로써 1차적으로 연구단계에서의 검증을 완료하고, 실제 현장에 적용하기 위한 기술적 타당성을 제시코자 한다.



[그림 6] (b) Modified model



[그림 7] 3-Dim. Conventional & Modified model



[그림 6] (a) Conventional model

### 4. 실험 방법

본 연구에서는 상부패드에 대하여 기존 모델과 형상변경 모델과의 spragging 특성 차이를 실험적으로 비교/구명하기 위하여 [그림 5]에 제시한 바와 같이 상부패드의 선단부에 설치한 가속도 센서에서 검출되는 전기적 신호를 FFT analyzer를 이용하여 주파수 분석하였다.

이를 통해서 2가지 틸팅패드 모델에 대한 각각의

spragging 주파수, spragging 진폭 그리고 초기 spragging 발생속도(incipient pad spragging velocity) 등을 다양한 실험조건에 대하여 측정/분석할 수 있게 하였다. 이 경우, 가속도 센서로부터 얻어진 신호는 FFT analyzer의 적분기능을 이용하여 진동속도 성분으로 변환하였다. 그 이유는 관심 주파수 대역이 비교적 200Hz 미만의 저주파 영역이므로 가속도 성분으로 표시하면 고주파 성분이 상대적으로 크게 나타나 분석이 어렵게 되며, 변위성분으로 표시하면 2회의 적분과정에 의한 오차가 발생하여 저주파 성분이 과도하게 나타나기 때문이다.

Spragging 발생 시, 각 패드에 작용하는 유막압력(film pressure)의 변화 그리고 각 패드들의 유막두께(film thickness) 및 피벗(pivot)에 대한 교번 현상 등을 실시간으로 분석하기 위하여 저널면에 180도의 위상차로 설치되어 있는 압력센서와 변위센서로부터 검출되는 전기적 신호를 디지털 오실로스코프를 이용하여

여 파형을 분석하였다.

그리고 상부패드의 spragging 현상이 로터-베어링계의 진동 특성에 미치는 영향을 측정하기 위하여 베어링 케이싱에 수평 및 수직방향으로 설치되어 있는 변위센서로부터 검출되는 신호를 FFT analyzer를 이용하여 주파수 분석하였다.

본 연구에서는 기존 모델 및 형상변경 모델에 대한 상부패드의 spragging 특성을 실험적으로 엄밀하게 비교/평가하기 위해 축의 회전속도(N), 공급유량(Qs), 부하하중(WL) 등의 변화에 따른 [표 2]에 제시된 실험조건을 설정하고 연구를 수행하였다.

[표 2] Test conditions of the bearing

Shaft speed (N)	900 ~ 4,600rpm
Bearing load (WL)	0, 5, 10, 15 kN
Supply oil flow rate (Qs)	50 ~ 170 l/min
Supply oil temperature (TS)	40 ± 0.5 °C

## 大阪가스빌딩의 미러사이클 가스엔진 도입사례

\* 본 자료는 일본 열병합발전센터 자료에서 발췌·번역한 것임

### 1. 머리말

大阪가스주식회사 本社빌딩인 「大阪가스빌딩」은 1933년에 오사카 비즈니스 중심지인 御堂筋에 건설되었으며, 유형문화재로 선정된 역사적인 건조물이다.

大阪가스그룹은 장기경영비전 중에서도 환경부하의 저감에 주력하여 본사빌딩에도 새로운 에너지절약과 탄산가스 배출량 삭감을 실현하고자 2001년에 고효율 열병합발전설비를 도입하였다. 熱源 改修시 열병합발전 이외에 에너지손실 및 운반동력의 삭감을 목적으로 水蓄熱槽의 폐지, 냉각수·냉온수펌프의 인버터화, 그 외에도 고효율 흡수식(COP1.3)의 도입이라는 에너지절약수법도 채택하였다.

다음 2에서 그 시스템 개요에 관하여 설명하고 3에

서는 도입후의 운전실적을 검증한다. 그 다음 4에서 열병합발전 도입후의 계측평가에 관한 운용·관리의 최적화를 위한 대책 例를 제시할것이다.

### 2. 시스템개요

#### 2-1 건물·설비개요

당 빌딩의 건물·설비개요를 다음의 [표 2-1]에 표시하였다.

#### 2-2 열병합발전 설비개요

2001년 10월의 열원개수시에 가스엔진 열병합발전(280kW×2대)을 채택하였다. 열병합발전설비의 개요