

# 350MW급 화력 발전소 증기터빈의 오일 휩 현상 및 대책

°구재량\*, 김연환\*, 배용채\*, 김계연\*

## Oil Whip Phenomena and Countermeasure on Steam Turbine in 350MW Load Thermal Power Plant

°Jae-Raeyang Koo, Yeon-Whan Kim, Yong-Chae Bae, Kye-Youn Kim,

### Abstract

There are several bearing systems at the large steam-turbines in thermal power plant. The bearing system is one of the most important parts of rotating machinery. The steam turbine vibrations mainly depend on the bearing oil and the shaft alignment condition. This paper describes on the steam turbine abnormal vibration due to the oil whip in terms of the shaft alignment in the thermal power plant.

### 1. 서론

증기 터빈은 발전소에서 가장 중요한 설비 중의 하나로서 본 설비는 회전축이 베어링 시스템들에 의하여 지지되는 구조로 되어 있다.

화력발전소의 증기터빈은 고압터빈, 중압터빈, 저압터빈으로 구성되어 있으며 각 터빈의 회전축은 서로 커플링(coupling)으로 연결된다. 보통 각 터빈의 회전축의 양측을 저널베어링(bearing)으로 지지하고 있다. 따라서, 증기터빈은 회전축의 정렬 상태와 저널베어링의 윤활특성 및 지지상태에 의하여 민감하게 반응한다. 증기터빈에서 회전축의 부적절한 정렬과 윤활유의 물리적 상태에 의하여 진동으로 나타나는 현상 중 대표적인 것으로는 오일 휩(Oil whip) 현상을 들 수 있다.

부등침하와 같은 외부의 영향은 회전축의 정렬에 영향을 미쳐 순간적으로 편심을 증가시킬 수 있으며 그 경우 터빈의 베어링에서 과도한 회전축의 진동을 목격하게 되는 현상이 오일 휩이다. 이 현상은 일종의 터빈 시스템과의 공진 현상으로 알려져 있으며 이 현상이 운전 중 발생할 경우 터빈 축계의 진동 값은 갑자기 큰 폭으로 상승하면서 회전 축계에 중대한 손상을 초래할 수 있기 때문에 자동적으로 발전 시스템을 정지토록 설정하고 있다.

본 논문은 350MW급 화력발전소 증기터빈에서 발생된 오일 휩에 따른 고 진동현상 및 대책에 대하여 기술하고자 한다.

### 2. 증기터빈에서의 오일 휩 현상

일반적으로 저널베어링에서 윤활유는 유막을 형성시켜 회전축을 지지하고 발생하는 고열을 냉각시키기 역할을 한다. 그림 1은 회전체와 저널베어링사이에 형성된 유막을 보여준다. 유막은 저널 표면의 50%이내의 구간에서 형성된다. 일반적으로 회전축은 베어링에 대하여 안정 양태각(attitude Angle)과 편심위치 만큼 수직에서 벗어난 상태 즉, 베어링 면에서 약간 들려진 조건에서의 유압 분포력에 의하여 지지된다. 들어올려지는 양은 회전체의 속도, 회전체의 중량, 윤활유(oil) 압력에 의하여 영향을 받는다. 회전축이 베어링 중심에서 편심되어 회전하기 때문에 부하지 유막을 생성시켜 주는 웨지(wedge)로 윤활유를 끌어들이게 된다. 만일 회전축이 급작스런 외부 충격 등의 외란을 받으면 회전축의 평형상태로부터 순간적으로 편심이 증가된다. 이러한 현상이 발생되면 축의 이동으로 인해 비워진 공간으로 윤활유가 이동하게 되어 회전체를 지지하는 유막 압력이 증가하고 유막과 회전축 사이에 추가적인 힘을 생기게 된다. 이 경우 유막은 베어링 간극 내에서 회전축이 정방향 원운동을 하도

\* 한전 전력연구원

록 한다. 만일 시스템이 충분한 감쇠력이 있다면 회전축은 안정된 정상상태로 돌아가게 될 것이나, 그렇지 않은 경우 축은 오일 휩(whirling)이 나타나게 되고 이 현상과 회전축 계의 고유진동수와 연계될 때 오일 휩으로 발전하면서 터빈은 고진동을 보이게 된다.

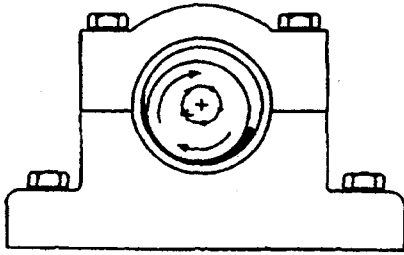


그림 1. 저널베어링과 회전축사이의 유막

## 2.1. 오일 휩(oil whirl)의 발생 메커니즘

저널 베어링과 회전축사이에서 오일 휩을 발생시키는 일반적인 원인은 크게 5가지로 볼 수 있다.

- 베어링에 지지부하가 적게 걸리거나 과도한 예하중을 받을 때
- 과도한 베어링 마모 또는 간극이 너무 클 때
- 윤활유의 특성 변화(주로 전단 점성력)
- 윤활유의 압력 증가
- 부적당한 베어링 설계(실제 회전축의 지지 부하보다 과잉 설계된 경우)

상기의 조건에서 주어지는 외란은 회전축에 초기 처짐을 일으키면서 오일 휩(oil whirl)을 일으키는 원인을 제공하는 것으로 알려져 있다.

그와는 다른 원인인 경우는 외부의 진동 기진 주파수 특성이 저널베어링의 오일 휩(oil whirl) 주파수 유사한 경우 발생되기도 한다. 이러한 외부의 진동 기진력은 배관이나 부착 구조물을 통하여 다른 기기로부터 전달될 수 있다. 만일 이러한 현상이 발생되면 주변기기로부터 이 기계를 격리시키거나 발생시키는 원인을 제거해야 한다.

일반적으로 오일 휩은 회전축의 회전수의 40% ~ 48%의 범위 주파수특성을 나타낸다.

## 2.2. 오일 휩 현상

오일 휩의 주파수 특성이 증기터빈 시스템의 고유진동수(중중 회전체 평형 고유 진동수라 함)

와 일치하여 높은 진동을 유발하는 현상을 오일 휩이라 한다.

그림 2에서 보는 바와 같이 로터(Rotor)의 회전수가 증가되면서 오일 휩 현상이 발생하고 급격하게 진동 값이 증가하는 현상이 발생하여 오일 휩으로 발전하는 것을 볼 수 있다.

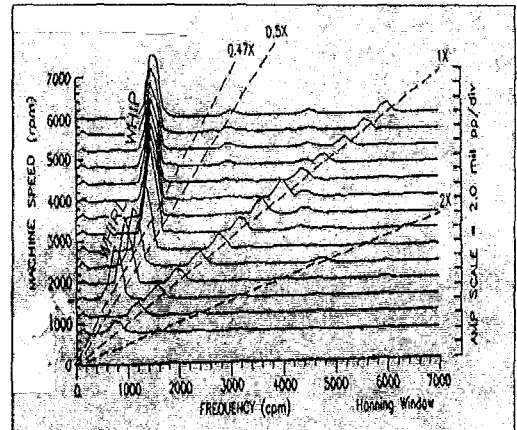


그림 2. 저널베어링에서 수직방향 Cascade

회전축이 오일 휩의 진동 상태가 될 때, 가장 유력한 동력학적 인자는 질량과 강성이 되고 진폭은 베어링 간극에 의해서만 제한을 받게되며 교정치 않으면 터빈시스템은 중대한 손상을 일으킨다.

## 3. 350MW급 증기터빈 이상진동 사례

### 3.1. 현황

본 사례는 고압터빈과 저압터빈으로만 구성된 350MW급 화력발전용 증기터빈으로서 발전 년수가 지나면서 베어링 페데스탈에 1mm 정도의 침하현상이 발생되었으며 페데스탈의 처짐 량을 보정하고자 썸(shim)로 설계치 보다 약간 높게 조정해 이력이 있다. 또한, 이상진동이 발생한 시점의 3개월 정도의 진동센서의 값 전압에 0.5 Voltage 정도의 변화가 발생하여 6/100mm 정도 베어링 간극이 증가되어 베어링의 지지하중이 변화를 유추 할 수 있었다. 따라서, 그런 조건에서 진공도, 베어링의 오일온도와 압력 등에서 부적절한 상태가 발생할 경우 이상진동으로 발전할 가능성이 커지게 된다.

증기터빈에서 발생한 이상진동은 기동하여 계통병입 전인 3600 rpm까지는 양호한 진동을 나타내다가 갑작스럽게 계통병입 후 268  $\mu$ m, p-p로

급상승하는 이상 현상이 나타나 발전 정지되었다. 터빈을 재기동한 후에는 이상 진동이 사라졌으나 급전 정지시 3441rpm에서 동일한 진동 급상승 현상이 다시 발생되었으며 정상운전중이 아니므로 교정 없이 운전을 하였으나 8개월이 지난 후 계획예방정비를 하고 터빈을 3600rpm에서 운전후 정지하는 시험을 실시한 결과 동일한 문제가 재발 하여 3300rpm에서 그림 3과 같이 베어링에서 진동이 급상승하는 현상이 나타나다가 2900rpm에서 소멸되었다. 이 특성을 분석한 결과 진동의 주성분은 주파수는 0.375X였다.

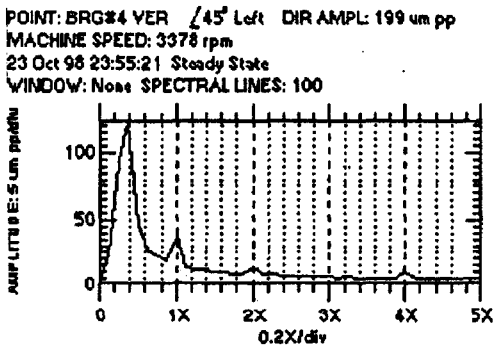


그림 3. 베어링에서의 진동 스펙트럼

### 3.2. 진동 원인 규명

그림 4의 그림 3의 해당 베어링에 대한 보드선도(bode-plot)로서 터빈의 1차 고유진동수가 약 1700rpm으로 나타나 시스템의 고유진동수와 공진 하는 현상인 오일 휩이 진동의 원인으로 평가되었다.

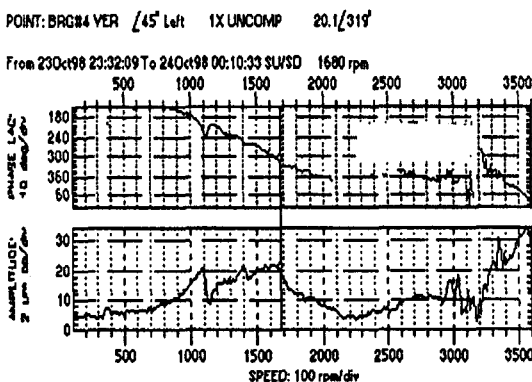


그림 4. 베어링에서의 Bode plot

또한, 발전소의 추가 이력을 검토한 결과 베어

링의 페데스탈의 침하에 의하여 베어링에 분담되는 회전체의 하중이 감소된 상태에서 복수기에 일시적인 고 진공이 발생하여 베어링 페데스탈의 처짐 현상을 일시적으로 가중시켜 회전체의 고유진동수와 베어링 오일 휩 주파수와와의 공진 현상으로 오일 휩으로 발전한 것으로 추정되었다. 따라서, 오일 휩에 의하여 진동이 발생하는 조건에서 진공도를 하향 조정하여 베어링(온도 1℃ 상승)에 걸리는 하중을 증가시켜준 결과 오일 휩이 사라지는 효과를 나타내었다.

### 3.3. 대책수립 및 효과

오일 휩의 임시 대책으로는 운전 변수 조정과 축 정렬 조정이 있는데, 축 정렬 조정은 회전기계를 정지하고 작업을 해야만 하는 단점이 있다. 또한 영구 대책으로는 베어링 type을 바꾸어 주는 것이 있는데 이는 작업 공정 기간이 오래 걸리고 비용이 많이 소요되기 때문에, 실제 현장에서는 이런 작업을 행하는 경우는 거의 없다. 실제 현장에서는 오일 휩 발생 시에는 우선 운전 변수를 조작하여 이상 진동을 저감하며 원인을 근본적으로 없애주기 위해서는 축 정렬을 조정하여 오일 휩 현상의 발생이 없도록 한다.

#### 3.3.1. 오일 휩의 대책

오일 휩을 일시적으로 교정하는 방법은 운전 변수를 조정하는 방안으로서 윤활유 온도를 변화시켜 점도를 바꾸어 주거나, 지지부하를 증가시키기 위해 의도적으로 약간의 불평형이 되도록 하여 일시적으로 축정렬 상태를 일시적으로 변화시키는 방법을 사용할 수 있으며, 또 다른 방법은 베어링 측면에 스크래핑(scraping)을 주던가, 윤활 왜지(wedge)의 교란 목적으로 베어링 표면에 홈을 만들어 주어 오일 압력을 변화시키는 방법 등이 있다. 오일 휩 문제의 영구적인 교정방법은 재 설계된 간극의 베어링으로 교체하거나 내부에 오일 압력 댐을 설치하여 베어링에 예 하중을 걸어주던가, 오일 휩에 덜 민감한 베어링으로 바꾸는 방법이 있다.

#### 3.3.2. 운전 변수의 조정

대상 터빈은 기동, 정지시 마다 반복하여 오일 휩 현상의 발생하여 이에 대한 임시조치로서 표 1과 같이 베어링의 온도를 임시적으로 변화시

켜 오일온도가 상승되면서 오일 휩 현상의 지속 시간이 약 1~2초로 짧아지는 효과를 얻었다, 이는 베어링의 점도를 낮추어 지지특성을 변화시킨 결과 이었으나 근본적인 대책이 될 수 없었다.

표 1. 진공 도에 따른 베어링 메탈 온도 변화

진공도	오일 온도	H <sub>2</sub> 냉각 온도	Bearing Metal Temp					
			#1	#2	#3	#4	#5	#6
718	45.8	35	69	83.4	83.9	86.1	84.3	88.3
733	46	35	66.3	86.1	83	83.1	86	87.8
655	49	32.5	67.5	87.2	84.5	83.8	87.5	89.1

따라서, 오일 휩이 발생하는 베어링에 대한 근본적인 교정 작업을 실시하였다. 대상 터빈의 오일 휩을 방지 위한 근본 대책을 위하여 1차적으로 베어링 패드 입, 출구 모서리에 라운드(round) 가공하고 베어링 입구 직경을 좀더 넓게 확장하여 베어링의 윤활조건을 근본적으로 변경시켰다.

### 3.3.3. 측정렬에 의한 대책

측정렬이란 기계 부품들을 서로 조정하여 가리런히 놓는 것을 의미한다. 회전 기계에서 구동 기계와 증동 기계를 이상적으로 결합하여 기계적 손실을 방지하고, 운전 신뢰성을 높이며 지속적인 이용과 기계 수명을 유지하는 것이 측정렬의 의의이며 목적이며 정확한 측정렬은 동적 운전 조건하에서도 축의 안정성과 베어링의 수명을 연장할 수 있도록 베어링에 작용하는 과도한 축방향, 반경방향의 힘을 감소시키며, 커플링 부분의 마모량을 최소화시켜 주는 효과가 있으며, 커플링의 동력전달 지점과 커플링 끝단 베어링 사이의 축 굽힘을 최소화시키는 역할 및 동력 소비를 줄이는 효과가 있다.

대상 터빈에 나타난 오일 휩의 이상진동 현상에 대한 대책으로써 측정렬을 그림 5에서 그림 6으로 변경하였다. 그림에서는 대상 베어링인 #4번 베어링의 부하를 더 많이 주기 위하여 발전기 부위를 0.3mm 낮추어 터빈의 측정렬을 조정하였다.

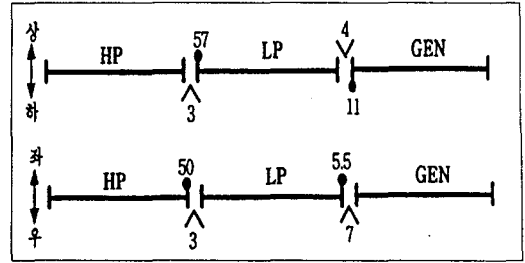


그림 5. 교정전 터빈 측정렬 상태

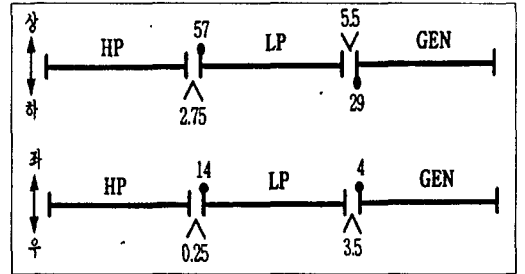


그림 6. 재조정된 터빈 측정렬 상태

### 3.3.4. 진동 저감 효과

그림 7은 오일 휩 현상에 따른 고 진동이 베어링의 윤활유 유동저항을 저감함과 동시에 측정렬을 제조정함으로서 조정 전에 250 $\mu$ m, p-p를 초과하던 진동레벨이 50 $\mu$ m, p-p이내로 저감되는 효과를 나타냈다.

측정렬을 조정전 베어링 페데스탈의 처짐량을 보정하여 베어링의 지지하중 변경으로 진동이 저감되었다.

POINT: BRG#4 YER /45° Left Direct

From 12Oct98 07:02:25 To 23Nov98 09:00:00 Steady State  
Cwzer: 12Oct98 08:20:00 Max 0um pp Min 0um pp Avg 0um pp

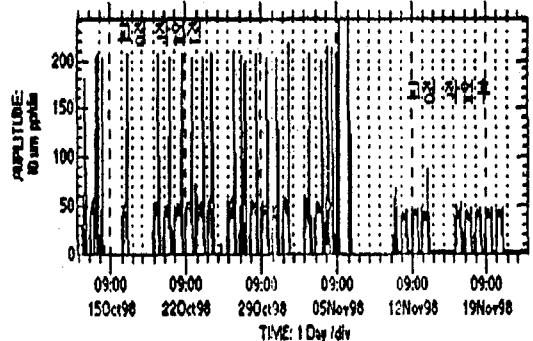


그림 7. 교정 전·후의 베어링의 진동비교

#### **4. 결론**

오일 씬에 의하여 고진동 현상이 발생되었던 350MW급 화력발전소 증기터빈은 베어링의 형상과 회전축의 정렬을 조정해줌으로서 오일 씬의 전 단계인 오일 씬의 회전축에 대한 축정렬 및 베어링의 운전 조건 변경 후 고진동 현상문제는 재발되지 않았으며 안정적인 운전을 할 수 있게 되었다.

#### **참고문헌**

- (1) 한국전력공사, “현장 기술자를 위한 진동 및 정비 핸드북”, 1998.
- (2) 한국전력연구원 정비가획센터, “터빈 이상 진동 해소 기술지원 보고서”, 2001.