

## 300MW급 증기터빈의 베어링 윤활유 온도조정에 의한 오일휩 제거방법에 관한 연구

황달연\*, 김화영\*\*, 문승재\*\*\*, 이재현\*\*\*\*

### A Study of Bearing Oil Whip Treatment in 300MW Steam Turbine with Oil Temperature Change

Dal-Y. Hwang\*, Hwa-Y. Kim\*\*, Seung-J. Moon\*\*\*, Jae-H. Lee\*\*\*\*

Key Words : Oil Whip, Shaft Vibration, Steam Turbine, Shaft Alinement, Lubricant Oil Temperature

#### Abstract

The phenomena of oil whip in steam turbine takes place for the un-balancing force between rotor shaft and bearing oil film. The several parameters that affect onset of oil whip have been well known. However, the major parameter of oil whip is shaft mis-alinement. A oil whip causes the high vibration and the shutdown of rotor system.

We mostly stop the steam turbine to adjust a shaft re-alinement concerning oil whip. In this case, It needs many costs for maintenance and long shutdown times. In this study, we study and observe the oil whip of the 300MW steam turbine in many years and we conduct the field test for another steam turbine for reducing vibration from oil whip.

The results of this study are that a oil whip takes place with a particular rotating speed or a particular turbine output and the oil temperature change is a very effective method for on-line oil whip treatment.

#### 1. 서론

산업현장에서부터 일반생활에 까지 광범위하게 사용되고 있는 대부분의 기계류에는 동력 및 에너지의 효율적인 전달을 위해 회전체가 사용되고 있고, 회전체의 마찰손실 및 지지 등을 위해 다양한 형태의 베어링을 사용된다. 베어링은 기계의 회전체 운동을 필요한 범위로 제한함으로써 회전기계가 유효한 운동과 안전한 작동이 되도록 하는 역할을 한다. 그러나 이러한 구속으로 인해 회전체 운동에는 원치 않는 진동과 소음이 함께 발생되며, 이러한 진동 발생요인의 한 가지 형태인 저널베어링의 오일휩(Oil Whip)은 회전기계의 성능과 수명에 심각한 지장을 초래하기도 한다.

오일휩을 제거하기 위한 방법은 발생 원인에 따라 다양하며, 진동 분석을 통해 회전체 평형 조정, 축정렬 조정, 베어링 설치높이 조정, 베어링 간극 조정, 베어링 형상 변경 등의 다양한 방법을 통해 원인별 최적의 방법을 선택할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 방법들은 회전 기계를 정지하고 충분한 정비 시간이 필요하므로 가동중단에 따른 경제적 손실과 많은 인력이 필요하게 된다. 따라서 이와 같은 손실 발생을 최소화 하기 위해서 기

를 정지시키지 않고, 오일휩을 제거하는 좀더 경제적인 방법으로 회전속도 변경, 부하 변경, 베어링 윤활유 압력 또는 온도 변경 등 회전체의 운전조건을 변경시켜 진동을 저감시키는 방법이 있다. 본 연구에서는 300MW 증기터빈에서 오일휩에 의해서 발생하는 진동을 효과적으로 제거하는 방법으로 운전조건을 변경시키는 방법 중 베어링 윤활유 온도를 조정하여 증기터빈의 진동을 저감시킨 사례를 분석하고, 유사한 크기의 다른 증기터빈의 진동 저감에 적용하여 오일휩 현상을 관찰 하였다.

#### 2. 증기터빈 오일휩 원인

저널베어링을 가진 증기터빈의 회전체를 가속시키면 베어링 내면과 축의 저널 사이에 공급된 윤활유의 유막은 저널 표면속도보다 50%이하의 평균속도를 갖게 된다. 베어링 내부에서 회전하는 축의 하중은 유막의 반력과 힘의 평형을 유지하면서 일정한 편심 위치에서 안정된다. 그러나 이 베어링 시스템에 외란이 작용되면 축의 편심 위치가 변화되고 축이 이동된 공간으로 윤활유가 유입되면서 유막의 압력과 함께 변동된다. 이러한 경우에 시스템의 감쇠력이 약하다면 축은 안정된 편심위치에 고정되지 못하고 오일휩(Oil Whirl)에 의한 진동이 발생한다. 오일휩의 주요발생원인은 베어링 부하가 적은 경우, 베어링의 간극이 큰 경우, 윤활유의 점성이나 압력의 변화 및 베어링의 부적절한 설계의 경우 등이다. 그림 1은 증기터빈의 저널베어링에서 오일

\* 한국남동발전(주), hgday@kosep.co.kr  
\*\* 한양대학교 기계공학부, hykim@hanyang.ac.kr  
\*\*\* 한양대학교 기계공학부, smoon@hanyang.ac.kr  
\*\*\*\* 한양대학교 기계공학부, jhlee@hanyang.ac.kr

힘이 발생된 경우로서 주파수 스펙트럼을 보여준다.

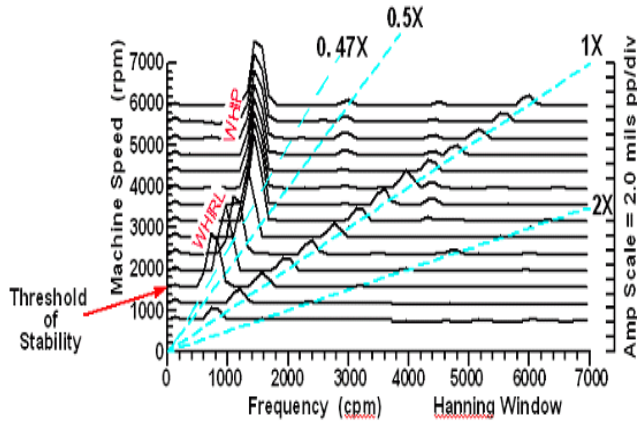


Fig 1. The Frequency of Oil Whirl and Oil Whip

오일휩(Oil Whip)은 증기터빈 축의 고유진동수와 일치하여 진동이 증폭되는 현상으로, 오일휩은 축 회전수에 따라 주파수가 변화되지만 오일휩은 축 회전수가 증가되더라도 일정한 주파수를 유지하게 된다. 오일휩의 발생여부는 대부분 축이나 베어링의 진동을 측정하여 판단할 수 있으며, 오일휩에 의한 진동의 가장 큰 특징은 진동주파수가 축의 회전수의 절반 이하인 점이다. 본 연구 사례의 대상인 증기터빈의 오일휩 주파수는 정격회전수 3600rpm의 37.5%인 1350rpm로서 오일휩의 발생 징후는 베어링 온도나 배출된 윤활유 온도측정으로도 추정가능하며, 그동안의 경험적인 현상 분석 결과 오일휩은 베어링 부하가 적은 경우에 발생되기 쉬우므로 베어링 온도는 상대적으로 낮게 나타난다.

### 3. 오일휩 발생사례와 저감 사례

#### 3.1 연구 대상 증기터빈 구조

연구 대상은 현재 상업운전 중인 화력발전소의 대형 증기터빈으로서 정격 회전수는 3600rpm이고, 고압(HP) 터빈에 167kg/cm<sup>2</sup> 압력에 540℃ 온도의 증기가 유입되고, 중압(IP) 터빈에는 약 36kg/cm<sup>2</sup> 압력의 540℃ 온도의 증기가 유입되어 발전기로부터 328MW의 정격출력을 발생시키며, 전력 부하 변화에 따라 출력이 변화된다. 터빈의 구성은 고압(HP) 및 중압(IP)단, 저압(LP)단 2개로 구성되어 발전기(GEN)와 여자기(Exciter)에 일렬로 연결되어 있다. 그림 2는 대상 증기터빈 회전체 모델의 개략도를 나타내고 있으며, 회전방향은 시계방향이다.

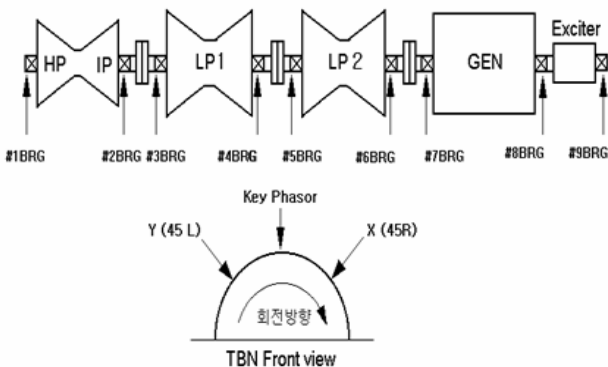


Fig 2. The Turbine-Generator Shaft Coupling

그림 2에서 볼 수 있듯이 고압터빈에서부터 여자기에 이르기까지 저널베어링은 총 9개가 설치되어 있고, 고압단에서부터 #1 베어링에서 순차적으로 명칭이 붙여져 있다. 윤활유 공급 방식은 가압윤활 방식으로 공급 윤활유의 압력을 일정하게 유지하고 있으며, 고압단에는 타원형 저널베어링이 장착되어 있고, 저압단에는 원통형 저널베어링이 설치되어 있다. 또 각 베어링에는 증기터빈 회전축의 진동을 감시하기 위해서 벤틀리네바다 DM2000 모델의 진동측정 장치가 부착되어 실시간으로 축의 진동을 관찰할 수 있다. 이 터빈의 진동은 정상적으로 운전될 때 진폭이 40 μm Peak to Peak(이하 μm p-p로 표기) 이하를 유지하고, 진동관리 상의 경보용 진동진폭은 125 μm p-p, 비상정지용 진동진폭은 250 μm p-p로 설정되어 있다.

#### 3.2 고진동 발생사례 조사

사례1. 2005년 1월 31일, 출력 190MW로 운전하던 중 #1과 #2 베어링 진동이 최대 147 μm p-p까지 순간적으로 증가되었다.

사례2. 2005년 2월 6일, 출력을 190MW에서 감소시키던 중 125MW에서 진동이 175 μm p-p까지 상승되어 터빈이 비상정지되었다.

사례3. 2005년 2월 11일, 터빈을 기동하던 중 회전속도 3600rpm, 발전기 무부하 상태에서 #2 베어링 진동이 142 μm p-p까지 상승하다가 안정되었다.

사례4. 2005년 2월 22일, 터빈을 기동하여 발전기 출력을 증가시키던 중 #2 베어링의 진동 106 μm p-p까지 상승하였다.

사례5. 2005년 2월 27일, 터빈을 기동하던 중 회전속도 3600rpm, 발전기 무부하 상태에서 #2 베어링 진동이 179 μm p-p까지 상승하였다.

사례6. 2005년 6월 2일, 터빈을 정지시키기 위하여 발전기 출력을 낮추는 중 100MW이하의 낮은 부하에서 #3베어링의 0.375X(터빈 회전수의 37.5%) 진동성분이 160 μm p-p까지 증가하였다.

사례7. 2005년 12월 18일, 2005년 6월부터 터빈을 정지시키기 위하여 발전기 출력을 100MW이하로 감소시킬 때마다 나타나는 #3베어링의 0.375X 진동을 낮추기 위하여 윤활유 온도변경 등 시험을 하였다.

그림 3은 사례 1이 발생했을 때 #2 베어링의 진동 크기를 나타내고 있다.

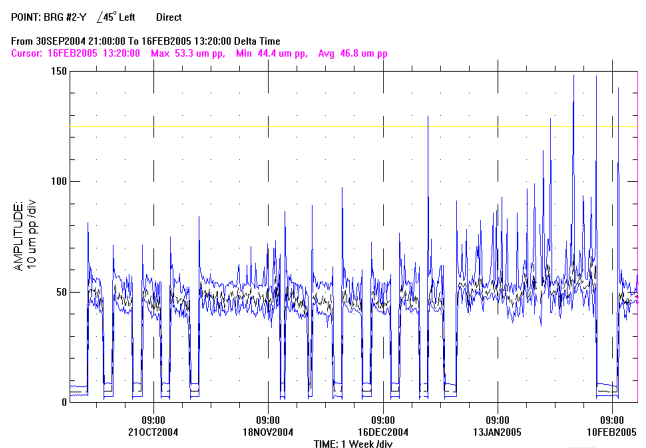


Fig 3. The Trend of Vibration of #2 Bearing

그림 4는 사례 7이 발생했을 때 #3 Brg.의 진동 크기를 나타내고 있다.

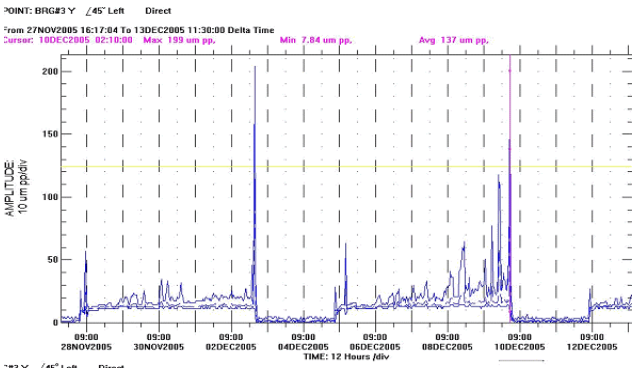


Fig 4. The Trend of Vibration of #3 Bearing

### 3.3 고진동 사례분석

터빈 축의 진동이 급격하게 증가된 사례를 조사한 결과, 사례 1 과 사례5의 #1 및 #2 베어링의 고진동은 터빈 회전체에 고정체의 일부가 직접 접촉되어 마찰에 의해 발생 하였다. 그러나 사례6과 사례7에서의 #3 베어링 진동은 오일씰에 기인한 것으로 진동주파수가 회전체 정격회전수의 37.5%로 나타났다.

위의 사례에서 #1 또는 #2 베어링의 진동을 감소시키기 위하여 회전체에 접촉된 고정체를 제거하고, 베어링을 타원형으로 가공하여 오일씰 발생 가능성을 줄였다. #3 베어링의 오일씰에 대한 조치로는 베어링 주변 온도변경, 발전기 출력변경, 터빈 유입증기 온도변경 및 베어링 윤활유 온도 조정 등으로 베어링 부하에 변화를 유도하였다. 이러한 사례 연구 결과 터빈을 정지시키지 않은 상태에서 오일씰 제거하는 가장 효과적인 방법은 베어링 주변온도 변경과 윤활유 온도 변경이었으며, 특히 윤활유 온도는 가장 손쉽게 또 정량적으로 조작할 수 있었다. 윤활유 온도를 증가시킬 때보다 감소시킬 때 터빈의 진동은 크게 감소되었다. 그림 5는 베어링 윤활유 온도를 변화시켜 베어링의 진동을 저감시킨 것을 나타내고 있다.

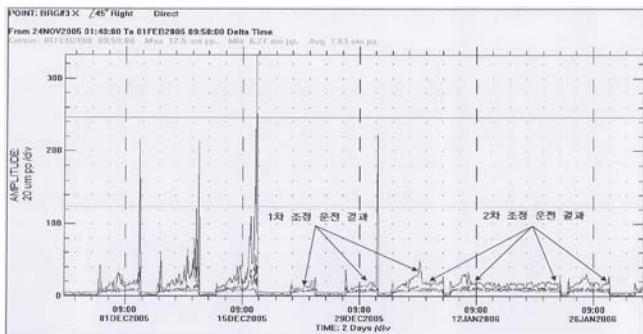


Fig 5. The Result of Vibration of #3 Bearing after the Oil Temperature Change

### 3.4 유사 증기터빈에 적용

2007년 11월에 정격출력 200MW인 다른 증기터빈에서 오일씰에 의한 고진동이 발생하여 기존 300MW 증기터빈 사례 분석 및 결과를 토대로 윤활유 공급온도를 변화시키면서 진동 저감시킬 수 있는 시험을 수행하였다. 그림 6은 200MW 터빈에서 발생

한 고압(HP) 터빈의 진동을 나타내고 있다.

POINT: BRG #2-Y /45° Left Direct

From 13NOV2007 10:20:00 To 27NOV2007 09:40:00 Delta Time

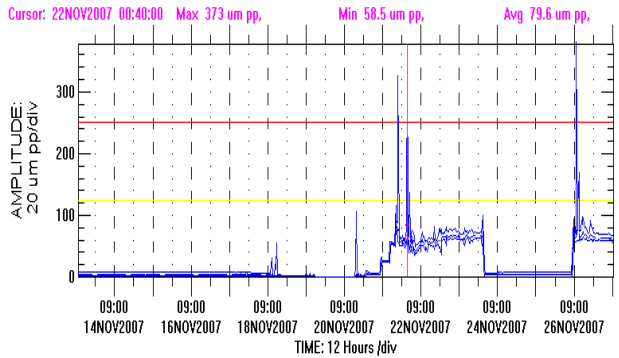


Fig 6. The Trend of Vibration of 200MW Turbine

진동 주파수 측정결과 이전 사례에 나타났던 0.375X 진동 성분이 크게 나타났다. 증기터빈 베어링에 공급되는 윤활유의 정상온도는 40°C이며, 실제 모델에 적용한 윤활유 온도는 37°C에서 42°C까지 1°C 단위로 증가시켰다 다시 37°C까지 감소시켜 0.375X 진동폭이 가장 적은 온도를 추적하였다. 그림 7-14는 윤활유 온도 변환에 따른 #2 베어링의 0.375X 성분의 진동크기 변화를 나타내고 있으며, 윤활유 온도가 38°C일 때 오일씰에 의한 진동이 가장 적어진 것으로 나타났다.

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 89.6 um pp

MACHINE SPEED: 3598 rpm

10 DEC 2007 10:37:35 Delta Time

WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

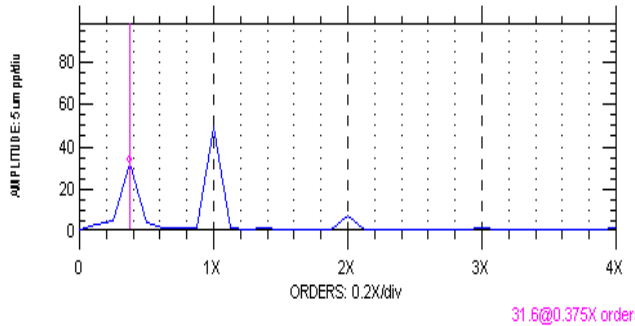


Fig 7. The Vibration Spectrum of 40°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 88.4 um pp

MACHINE SPEED: 3600 rpm

10 DEC 2007 10:46:33 Delta Time

WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

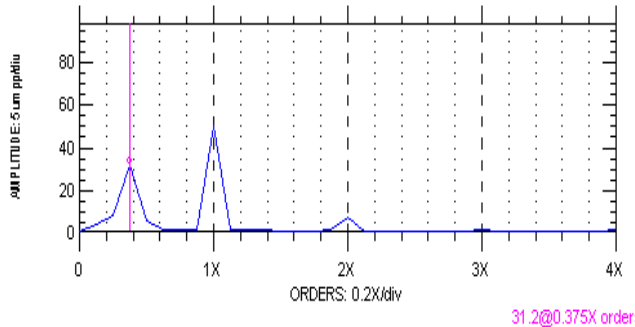


Fig 8. The Vibration Spectrum of 41°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 85.3 um pp  
 MACHINE SPEED: 3600 rpm  
 10 DEC 2007 10:47:39 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

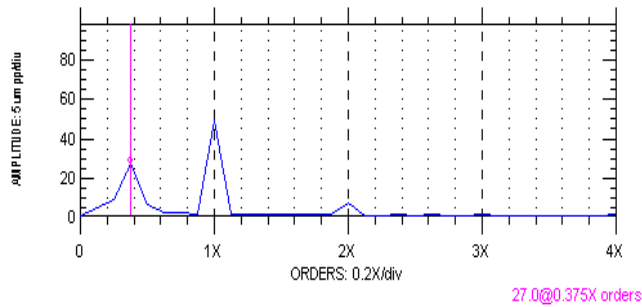


Fig 9. The Vibration Spectrum of 42°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 80.3 um pp  
 MACHINE SPEED: 3600 rpm  
 10 DEC 2007 10:52:17 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

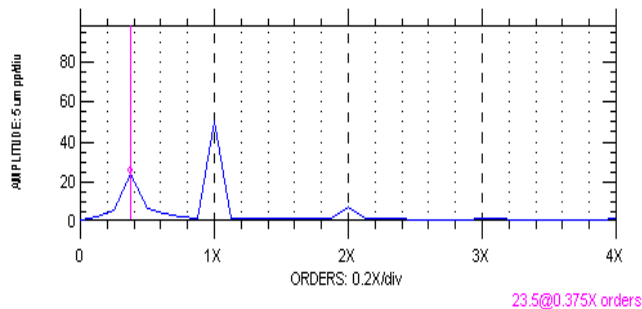


Fig 10. The Vibration Spectrum of 41°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 127 um pp  
 MACHINE SPEED: 3600 rpm  
 10 DEC 2007 10:53:36 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

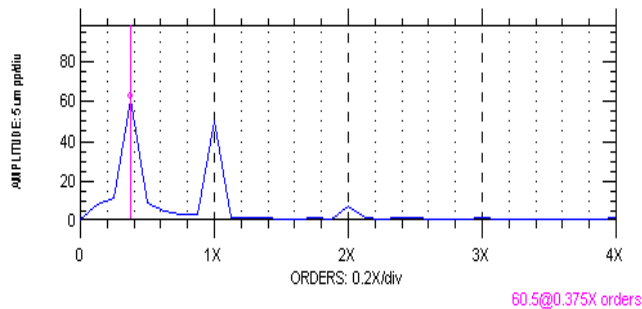


Fig 11. The Vibration Spectrum of 40°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 73.7 um pp  
 MACHINE SPEED: 3597 rpm  
 10 DEC 2007 11:13:07 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

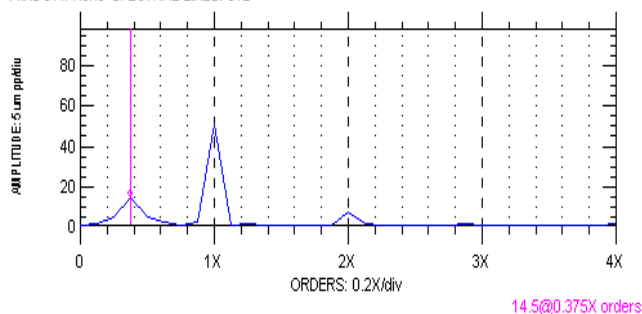


Fig 12. The Vibration Spectrum of 39°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 62.8 um pp  
 MACHINE SPEED: 3600 rpm  
 10 DEC 2007 17:29:01 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512



Fig 13. The Vibration Spectrum of 38°C

POINT: BRG #2-Y /45° Left Waveform Pk to Pk: 76.8 um pp  
 MACHINE SPEED: 3596 rpm  
 10 DEC 2007 17:36:02 Delta Time  
 WINDOW: None SPECTRAL LINES: 512

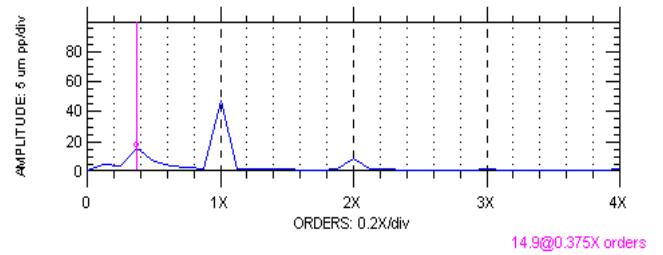


Fig 14. The Vibration Spectrum of 37°C

#### 4. 결론

지금까지 증기터빈 회전체 및 저널베어링에서 발생하는 오일 휩 현상에 대해 실제 상업 운전중인 모델을 통해 사례연구 및 현장 시험을 통해 오일휩을 저감시킬 수 있는 방법에 대해 알아보았으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가압윤활 시스템을 가진 저널 베어링에서 발생하는 오일휩은 회전체 밸런싱, 축정렬, 베어링 부하조절 및 베어링 설계변경 등으로 근본적인 발생원인을 제거할 수 있으나, 가동중인 기계를 정지시키지 않은 상태에서도 운전조건의 변경에 의해 오일휩을 크게 완화시킬 수 있다. 그 운전조건의 변경방법으로 베어링에 공급되는 윤활유 온도를 바꾸는 것은 가장 간단하면서도 효과적인 방법이며, 윤활유 온도조정과 함께 베어링 주변온도를 변경시키는 방법도 효과적이다. 그러나 이러한 방법이 모든 기계의 오일휩을 제거할 수 있는 것은 아니다. 오일휩의 발생 가능성을 근본적으로 낮추는 것은 기계를 정지시키고 그 원인을 제거하는 적절한 작업이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] A. El-Shafei, Some Experiments on Oil Whirl and Oil Whip, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Transactions of the ASME (Vol.129 January 2007), PP.144~153
- [2] 구재량, Oil Whip에 의한 터빈의 이상진동, 대한기계학회 2001년 추계학술대회논문집 A, PP. 539~543
- [3] 이병준, 현장기술자를 위한 회전기계 진동 및 정비 핸드북 (1998)
- [4] www.bently.co.kr
- [5] www.vibration119.co.kr