

# 터빈-발전기 Rubbing 진동 이론과 사례



한전KPS(주)  
솔루션센터  
선임전문원  
김하용  
Tel : (031)710-4398

## 1. 서문

회전기계 마찰진동(rub)은 회전부(로터)와 정지부(케이싱)가 접촉할 때 발생한다. 터빈과 같은 회전기계에서 rubbing이 발생하면 축을 휘게 하거나 블레이드를 손상시킬 뿐 아니라 심할 경우 로터를 파괴시킬 수도 있다. 그런데 이런 rub에 의한 진동이 어떤 경우에는 진동신호로 명확히 나타나지만 어떤 경우에는 불분명하게 나타나기 때문에 현장의 기술자들이 정확한 진단을 내리기 어렵다. Rub 진동 신호가 불분명하게 나타나면 다른 진동원인, 즉 회전체 불평형(unbalance)이나 열 변형(thermal growth) 또는 공진에 의한 진동으로 오인하여 문제 해결을 어렵게 할 수 있다. 여기서는 회전기계의 일반적인 rub 이론을 간략히 설명하고, 현장 기술자들에게 도움이 될 수 있는 터빈-발전기의 rub 진동특성과 필자가 경험하고 진단한 실제 rub 사례를 소개하고자 한다.

## 2. 회전기계 Rub 이론

### 2.1 회전기계 Rub 발생원인

회전기계에서 발생하는 rub는 기계의 설치가 부적합할 경우 또는 운전이 비정상적일 경우 발생하는데 주요 발생 원인은 다음과 같다.

#### 1) 로터의 과도한 축 진동은 케이싱과 rub를 일으킬 수 있다.

가스터빈에서 서어지가 발생할 경우 과도한 진동이 발생하고, 과도한 진동은 2차적으로 로터와 케이싱간의

rub를 발생시킬 수 있다. 또 운전 중인 터빈 블레이드가 탈락될 경우에도 과도한 unbalance 진동으로 나머지 블레이드와 케이싱 간의 강력한 rub를 발생시켜 2차적인 블레이드 탈락과 함께 로터 전체를 파손시키는 대형사고를 유발할 수 있다.

#### 2) 로터와 고정부품 사이의 불충분한 간극은 rub가 발생하기 쉽다.

터빈-발전기를 설치 또는 정비 후 냉간 시운전 중 가장 빈번히 나타나는 rub는 증기 밀봉부(packing box)의 seal에서 발생하는 rub 일 것이다. 터빈 로터와 케이싱간의 가장 협소한 간극은 일반적으로 증기 밀봉부인데 냉간상태 시운전 중 케이싱의 열 팽창이 비정상적일 경우 간극이 좁은 seal 간극을 더욱 협소하게 만들어 rub가 발생하기 쉬운 조건이 된다. Seal에서 발생하는 rub는 축의 일부분과 부분적으로 접촉하기 때문에 축 표면이 부분적으로 과열되어 열 응력에 의한 축 휨을 발생하고, 장기간 지속될 경우 영구적인 휨으로 진전되어 로터를 손상시킬 수 있다. 터빈의 seal에서 rub는 critical speed를 통과할 때 발생하기 쉬운데 이때는 진동이 높기 때문이기도 하지만 critical에서 축 휨이 최대가 되면서 seal 간극을 더욱 좁게 만들기 때문이다. Critical speed에서 발생하는 rub는 로터 unbalance 진동과 혼동하기 쉽다.

#### 3) 열 응력에 의한 케이싱 뒤틀림은 rub를 발생한다.

고온에서 운전하는 가스터빈의 케이싱은 장기간 열 응력을 받기 때문에 케이싱이 변형되고 변형된 케이싱은 운전 중 로터와 rub를 발생시킬 수 있다.

#### 4) 베어링 또는 축의 정렬상태가 불량하면 rub가 발생한다.

베어링 정렬이 불량할 경우 축의 저널과 비정상적인 마찰로 인하여 rub가 발생한다. 이 경우 베어링 베릿 메탈이 밀리거나 심할 경우 베릿이 녹아내려 대형사고로 발전할 수 있다. 축 정렬이 불량할 경우도 rub가 발생할 수 있다.

위에서 rub의 원인에 대하여 간략히 살펴보았다. 회

전기계에서 심한 rub가 발생하면 축을 휘게 하거나 로터를 파손시킬 수 있으며, 경미한 rub일지라도 seal의 마모 등으로 터빈 효율이 저하하거나, 베어링 사고가 발생할 수 있기 때문에 rub를 조기에 진단하고 교정하는 것은 매우 중요한 사항이다.

## 2.2 회전기계 Rub의 특징

Rub는 회전하는 로터 원주의 부분적인 위치에서 발생하는 부분 rub와 로터 원주의 전체방향에서 발생하는 전주 rub로 구분한다. 보통은 부분 rub가 먼저 발생하고, 부분 rub가 심해지면 전주 rub로 진전된다.

Rub가 발생하는 회전기계는 다음과 같은 진동특성을 나타낸다.

### 1) 로터의 강성이 변화하고(일반적으로 증가), 고유진동수가 변화한다.

로터와 seal이 rub를 일으키게 되면 seal이 마치 베어링처럼 축을 지지하는 효과를 발생시켜 운전하는 로터의 강성을 증가시키고, 증가된 강성은 고유진동수를 증가시킨다. 회전기계는 rub 발생 전에는 비공진 상태로 운전되었는데 rub에 의한 강성변화로 공진상태로 운전될 경우 심각한 진동문제로 발전할 수 있다.

### 2) 비선형적이고, 무질서하며, 과도적인 진동특성을 갖는다.

Rub는 대단히 비선형적이고, 때로는 무질서한 증상을 나타내기 때문에 rub로 인한 로터의 동적 응답은 상당히 다양하다. 부분 rub가 발생할 경우 진동응답은 시스템 변수들과 초기 조건의 조그만 변화에 의해서도 영향을 받는다. Rub의 진동응답은 많은 시스템 변수들이 포함되기 때문에 이들의 조그만 변화에도 비선형적으로 진동은 큰 변화가 발생할 수 있다.

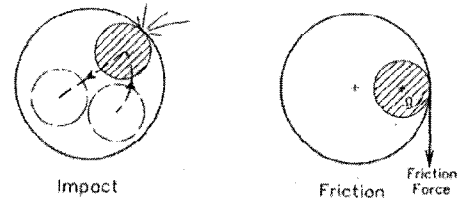
또한 rub는 과도적으로 나타나므로 진동응답을 결정하는 변수들이 계속적인 변화를 일으킬 수 있다. 어떤 경우 rub는 마찰부분이 충분히 닳아 없어져서 rub가 자연 소멸되든가 또는 더욱 심각한 rub로 진전되기도 한다.

### 3) Rub가 발생하면 축에 충격력과 마찰력이 발생한다.

충격력은 부분적인 변형과 튀어 오르는 작용(rebounding motion)을 야기하며, 매우 짧은 과도적 과정에 의한 비선형의 넓은 진동주파수 대역폭을 발생한다.

마찰력은 접촉하는 점선부의 수직력과 표면의 특성에 의해 결정되며, 이 힘은 진동의 반대방향으로 작용한다. 마찰력은 기계효율을 감소시키고, 국부적으로 축을 과

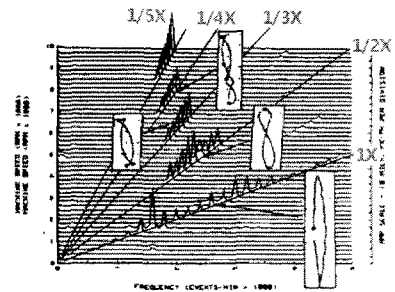
열시켜 휘게 만들며, 비선형적인 마찰력은 조화진동 주파수를 나타내는 특징이 있다.



[그림 1] Rub에 의한 충격력과 마찰력

## 2.3 부분 Rub의 형태와 진동 신호

비교적 경미한 부분 rub일 경우 [그림 2]와 같이 1X 진동과 함께 차동기 진동인 1/2, 1/3, 1/4X 진동을 발생시킨다. 분수배의 차동기 주파수 진동이 발생하는 원인은 위에서 언급한 충격력과 마찰력 때문이다. (주: 차동기 진동이란 1X RPM 진동보다 낮은 주파수 진동을 말하며, 1X 진동은 “1×RPM 주파수 진동”이라는 뜻으로 분당 3600rpm (60Hz)으로 회전하는 기계에서 발생하는 진동의 주파수가 60Hz이면 1X 진동이라고 하며, 30Hz이 진동이면 1/2X 진동이라고 한다)



[그림 2]

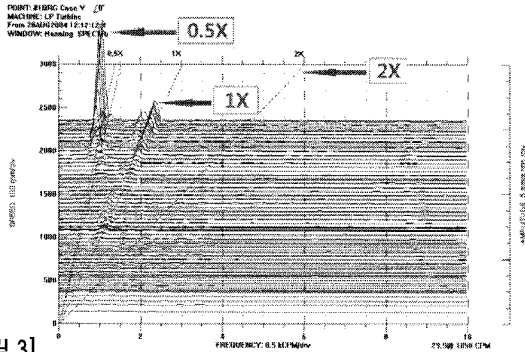
분수 조화주파수를 발생하는 부분 rub의 cascade plot

[그림 2]는 cascade plot과 orbit plot으로 경미한 부분 rub 진동을 진단한 것이다. Cascade plot에는 1X 진동 이외에 1/2, 1/3, 1/4, 1/5X 진동이 나타나고 있다. Orbit은 베어링 내에서 축의 진동궤적을 나타내는데 차동기 주파수에서는 orbit이 정상적인 타원형상이 아닌 8자형의 왜곡된 형상을 나타내게 된다.

그러나 터빈과 같은 대형 회전체 로터에서 부분 rub가 발생하여도 이러한 분수배 주파수가 발생하지 않는 경우가 종종 있다. 그 이유는 blade 끝단과 케이싱 내면에서 부분 rub가 발생한다고 가정할 때 rub로 인한 충격 또는 마찰력이 로터 중량에 비하여 작아 rebounding motion이 일어나지 않기 때문으로 추정된다. 만약 blade 끝단이 아닌 seal에서 부분 rub가 발생하게 되면 분수 주파수는 나타나지 않더라도 seal과 마찰하는 축의 국부적인 온도 증가로 축 휨이 발생하고,

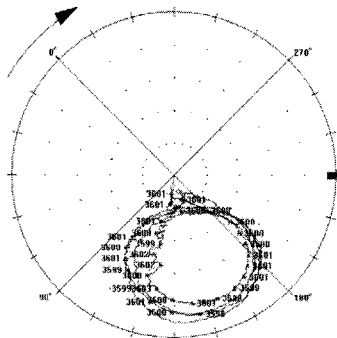
축 휨은 unbalance 성분인 1X 진동을 발생시킬 것이다.

또 다른 부분 rub로서 과도한 충격력이 작용할 경우 여러 개의 분수배 주파수는 나타나지 않고 1/2X 주파수 진동 하나만 크게 발생한다. [그림 3]은 가스터빈에서 서지(surge)로 인한 높은 진동 영향으로 0.5X rub 진동이 발생한 실제 사례이다.



[그림 3] 가스터빈 서지에 의한 고진동으로 0.5X의 격렬한 Rub 발생

또 터빈에서 부분 rub에 의한 축의 국부적인 과열은 열적인 휨 변형을 발생시켜 주기적인 진동변화와 한계 위상각의 360도 변화를 연속적으로 발생시킨다. [그림 4]의 polar plot은 발전기 베어링의 twist 불량으로 발생한 rub의 실제 사례이다. [그림 4]에서 1X 진동과 위상각이 2시간 주기로 증가와 감소를 연속적으로 반복하였으며, 분수배 진동은 나타나지 않았다. (Twist는 베어링이 축에 평행하게 설치되지 않고 비틀리게(twist) 설치된 상태이다)



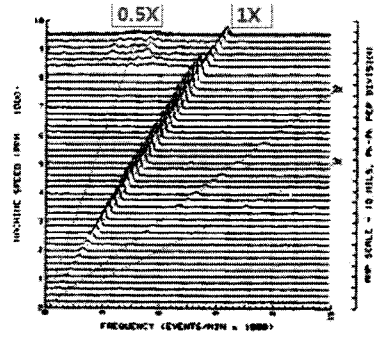
[그림 4] 부분 Rub에 의한 위상각 변화

## 2.4 전주 Rub의 형태와 진동신호

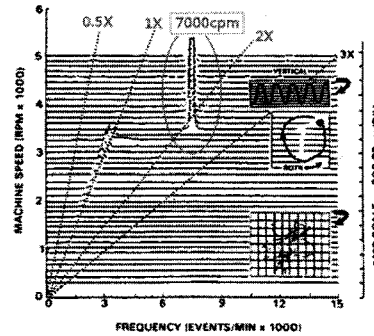
부분 rub가 심해지면 전주 rub로 진전된다. 전주 rub가 비교적 경미하거나 윤회상태에서 rub는 [그림 5]와 같이 주로 1X 진동을 발생하며, 정방향 세차 운동을 한다.

그러나 전주 rub가 매우 심하거나 건마찰 상태에서 진동 주파수는 회전체의 rub로 증가한 고유 주파수가 주성분이며, 대표적인 진동특성으로 역세차 운동을 일으키는 것이다.

[그림 6]은 seal과 축의 심한 충격으로 역세차 운동이 발생한 전주 rub의 cascade plot과 orbit plot이다.



[그림 5] 낮은 진동을 발생하는 전주 rub

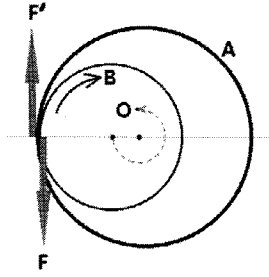


[그림 6] 역세차 운동을 일으킨 충격 seal rub의 Cascade 및 Orbit plot

[그림 6]을 보면 회전체가 2500~3500rpm 이하의 저속에서는 거의 진동이 없다. 이 속도에서 회전체는 orbit에서 보는 바와 같이 seal 주위에서 bouncing을 시작했고, 3,500rpm의 2배 주파수인 약 7,000cpm에서의 응답은 5,000rpm에 이를 때까지도 같은 주파수로 남아 있다. 이 7,000cpm peak는 회전체와 seal 계의 고유 진동수에 해당되는데, rubbing하는 동안 seal에 의해 증가된 강성 때문에 회전체가 seal과 접촉하기 전의 회전체만의 고유 진동수보다 더 높다. 이 7,000cpm 주파수는 역세차운동의 속도이다. 즉 이 역세차 운동은 공진 주파수에서 시작하여 속도가 증가하다가 감소하든지 간에 축 회전속도와 독립하여 같은 주파수 위치에 남는다(cpm은 cycle per minute로 분당 주파수이며, 초당 주파수는 Hz로 나타냄).

역세차 운동이란 축의 회전방향(자전)과 진동의 궤도(공전) 방향이 반대인 경우이며, 정세차는 회전방향과 진동의 궤도방향이 일치하는 것으로 Orbit plot(또는 Lissajous)로 측정할 수 있다. 일반적으로 대부분의 진동은 정세차 운동이며, 역세차는 매우 심한 전주 rub 상태에서 발생한다. (주: 회전체 승속 중 critical speed 부근에서 짧은 시간동안 orbit 방향이 역세차 운동을 하는 경우가 있는데 이 경우는 전주 rub에 의한 영향이 아니고 이등방성 베어링의 수직, 수평 방향의 고유 진동수가 다르기 때문에 나타나는 현상이다)

회전기계에서 역세차 운동이 발생하는 원인은 [그림 7]에서 설명하는 바와 같이 건마찰 베어링이나 전주 rub가 심하게 발생하는 경우이다.



[그림 7] 건마찰 베어링에서 역세차 운동 원리

[그림 7]에서 원 A는 베어링 내면이고, B는 그 안에서 회전하고 있는 수직축의 단면을 나타낸다. 축은 시계 방향으로 회전하고 있고, 베어링 A의 중심평형 위치에서 일시적으로 벗어나 왼쪽에서 베어링 내면과 접촉한다고 하자. 축은 회전하고 있기 때문에 마찰력 F와 F'가 생긴다. 그 중 F는 축에 작용하는 힘이며,  $F' = -F$ 는 베어링 내면에 작용하는 힘이다. 힘 F는 축 B의 중심을 통하고 이것과 크기가 같으며, 방향이 평행한 힘과 짝힘  $F_r$ 로 치환할 수 있다( $r$ 은 축B의 반경). 짝힘은 일정한 속도로 구동되고 있다고 생각하는 축에 제동 작용을 할 뿐이다. 따라서 그 효과는 구동 토크가 얼마만큼 증가할 필요가 있을 뿐 진동으로서 문제는 발생하지 않는다. 그러나 축의 중심을 통하는 힘 F는 축을 아래로, 즉 원 A의 접선방향으로 밀어 내린다. F의 방향은 A안에서 축 B의 위치에 따라 변하므로, 접선으로 보이는 원 O와 같은 orbit plot으로 선화하게 된다. 그 때문에 축은 그 회전방향과는 역방향으로 베어링 간격 안을 구동 선화하게 된다. 축이 베어링 내에서 조금도 접촉하지 않고 회전하면 축은 역선회(역세차) 없이 안전하다. 그러나 일단 어떤 이유로 해서 베어링 내면과 접촉하자마자 축은 맹렬히 선화를 하기 시작한다.

### 3. 터빈-발전기 Rubbing의 특성

#### 3.1 Seal과 축의 Rubbing

터빈에서 주로 발생하는 rub는 labyrinth seal과 축, 베어링 oil deflector와 축의 마찰로써 다음과 같은 특징이 있다.

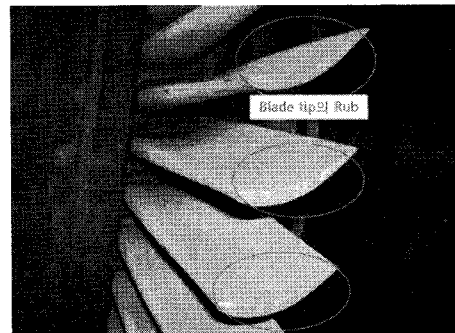
- 1) Seal(labyrinth seal 및 oil deflector)과 축 사이의 간극이 부족할 때 발생한다.
- 2) 냉간 기동 중 critical speed 부근에서 발생하기 쉽다. 탄성 로터는 critical speed에서 축 휨이 가장

크게 발생하기 때문에 간극이 가장 작은 seal 부위에서 rub가 발생한다. 또한 냉간 기동 중 증기터빈의 케이싱 부동 팽창도 seal 간극을 변화시켜 rub를 발생시킨다.

- 3) Seal과 축의 rub는 축을 국부적으로 과열시키기 때문에 축 휨과 함께 unbalance 성분의 1X 진동이 발생하는 것이 대부분이다. 이 경우 효과적인 rub 감시는 축 진동을 분석하는 것이다.
- 4) Seal에서 rub가 심하게 발생할 경우 분수배 주파수가 발생하지만 경미한 rub일 경우 분수배 주파수가 발생하지 않는다. 이 경우에는 1X 진동 진폭과 위상각 변화로 진단할 수 있다.

#### 3.2 Blade tip과 케이싱의 Rubbing

[그림 8]과 같이 Blade tip과 케이싱 간에 발생하는 반경방향(radial) rub는 진동 신호로 감지되지 않는 경우가 대부분이다.



[그림 8] 터빈 Blade tip의 Rub는 대부분 진동신호로 감지되지 않는다.

그 이유는 rub에 의한 마찰력이 로터 중량에 비하여 작기 때문에 분수배 주파수가 잘 나타나지 않고, 또 분수배 주파수가 발생하여도 blade tip에서 축을 통하여 베어링 까지 진동신호가 전달되는 도중에 감쇠되기 때문이다. 또한 blade tip에서 rub는 축을 국부적으로 과열시키지 않아 축이 휘지도 않기 때문에 unbalance 성분의 1X 진동도 발생하지 않는다.

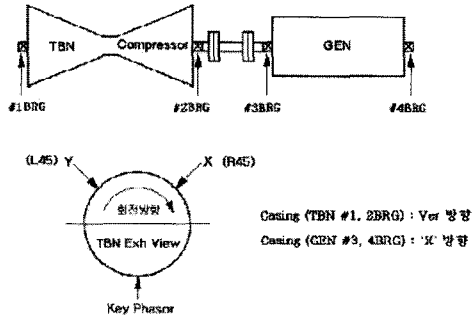
이 경우 효과적인 감시방법은 rub가 발생하는 케이싱에서 직접 진동을 측정하는 것일 것이다.

로터와 케이싱 간의 열팽창 차이로 발생하는 axial(축) 방향 rub 진동 신호도 위와 같은 이유로 감지하기 어렵다. 그런데 axial rub가 심할 경우 블레이드 열 전체를 일시에 파손시키는 큰 사고로 발전할 수 있으므로 axial rub는 진동신호에 의지하기 보다는 축과 케이싱의 팽창량을 감시하여야 대형 사고를 사전에 방지할 수 있을 것이다.

## 4. 터빈-발전기 Rubbing 사례

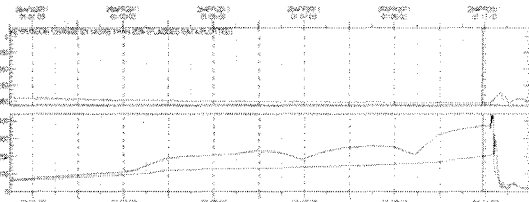
### 4.1 가스터빈의 Seal Rubbing 사례

[그림 9]와 같은 Siemens 180MW, 3600rpm 가스터빈-발전기에서 발생한 seal rubbing 사례이다.



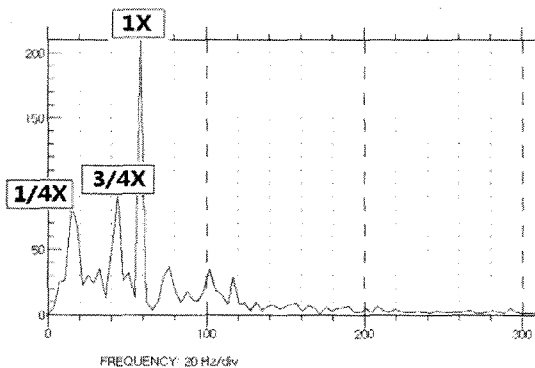
[그림 9] 가스터빈-발전기 개략도

오버홀 공사 후 시운전 과정에서 터빈 및 발전기 베어링 진동이 높게 발생하였다. [그림 10]과 같이 기동 후 3600rpm 무부하 운전 중 터빈 진동은 110 $\mu$ m에서 10분 후 170 $\mu$ m까지 증가하고, 발전기 베어링은 70 $\mu$ m에서 무려 370 $\mu$ m까지 증가하였다.



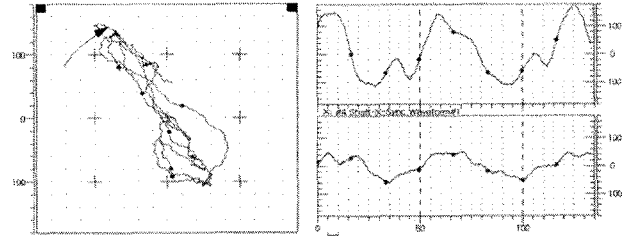
[그림 10] 발전기 진동이 70 $\mu$ m에서 10분 후 370 $\mu$ m까지 증가한 Trend plot

진동원인을 분석하기 위하여 측정한 진동 주파수는 [그림 11]과 같았다.



[그림 11] 발전기 베어링의 부분 Rub에 의한 진동 주파수(FFT)

[그림 11]의 FFT에서 1X 진동이 가장 높게 발생하고, 1/4X 및 3/4X의 분수배 주파수가 발생하고 있었다. 또한 진동 궤도를 나타내는 [그림 12]의 orbit은 8자형의 찌그러진 형태를 나타내었다.



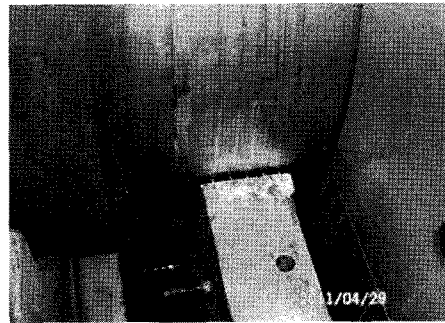
[그림 12] Seal rub에 의한 왜곡된 Orbit

그러므로 진동 원인은 rub로 판단되며, 그 영향으로 축 힘이 발생하면서 운전시간 경과에 따라 진동이 증가하고, 분수배 주파수가 발생하는 것으로 진단하였다.

터빈의 rub 발생 위치는 압축기 입구 air seal 부분으로, 발전기 rub는 베어링의 oil deflector와 발전기 공기냉각 밀봉장치의 air seal로 추정 되었다.

그래서 진동교정은 2가지 방법을 검토하였다. 먼저 터빈 rub는 아주 심각한 정도는 아니므로 weight balancing을 실시하여 축 진동감소 만으로 rub 현상이 개선될 것으로 예상되었고, 발전기 rub는 매우 심각한 상태이므로 베어링 oil deflector와 발전기 air seal을 점검하여 교정하고 추가로 balancing도 실시하기로 하였다. Balancing을 실시하는 이유는 1X 진동을 감소시키면 진동에 의한 rub 발생 조건이 줄어들기 때문이다.

발전기 Oil deflector와 air seal 분해점검 결과 [그림 13]과 같이 심한 rub를 확인할 수 있었고, 접촉 흔적이 있는 부분을 0.1mm씩 가공하여 재조립하였다[그림 14].



[그림 13]

Oil seal과 축의 Rub 흔적이 선명한 줄무늬로 나타나 있다



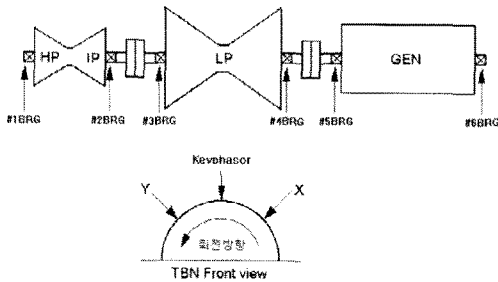
[그림 14] Oil deflector 가공 모습

Balancing 및 seal rub 교정작업 후 터빈 및 발전기 모두 rub 현상이 완전히 소멸되어 터빈 베어링 최대진동은 170 $\mu$ m에서 70 $\mu$ m로, 발전기 베어링 진동은 370 $\mu$ m에서 110 $\mu$ m로 감소하여 정상운전을 할 수 있게 되었다.

## 4.2 증기밀봉 Seal에서 경미한 Rubbing

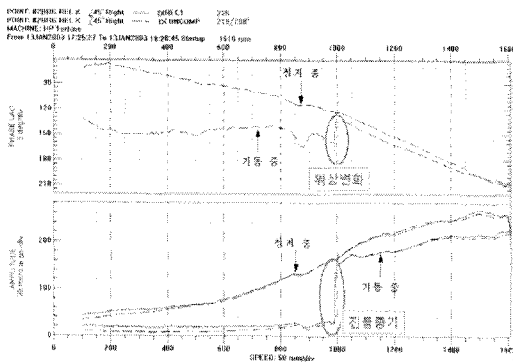
[그림 15]와 같은 GE 180MW, 3600rpm 증기터빈 증기밀봉 장치의 labyrinth seal 과 축의 rubbing 사례이다.

오버홀 공사 중 N2 packing(증기밀봉 시스템)을 교체하였다. N2 packing은 [그림 15]에서 HP 터빈과 IP 터빈 사이에 설치되어 두 터빈간의 증기 누설을 방지하는 역할을 하며, labyrinth seal로 구성되어 있다.



[그림 15] GE 180MW 증기터빈 개략도

오버홀 공사 후 1차 시운전 중 Bode plot 측정결과 [그림 16]과 같은 비정상적인 진동을 감지할 수 있었다.



[그림 16] N2 Packing 교체 후 1차 시운전

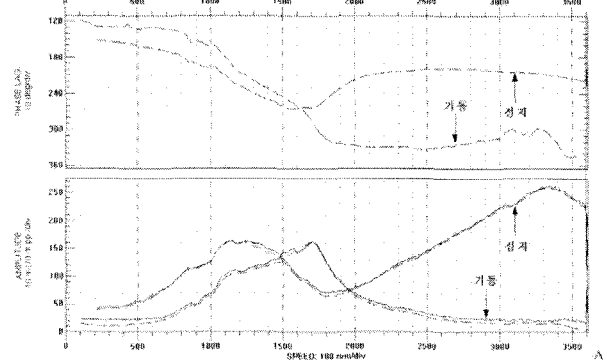
기동 중 증기워밍을 실시하기 위하여 회전수 1000rpm에서 1시간을 유지하는 동안 [그림 16]처럼 진동이 증가하고 위상각이 변화하는 현상이 발생하였다. 증기워밍 종료 후 터빈을 승속하자 1차 critical speed인 1700rpm 도달 직전 진동이 trip 설정치 250 $\mu$ m를 초과하여 정지되었다.

진동원인을 분석하기 위하여 주파수를 분석한 결과 진동은 모두 1X 진동이었으며, 분수배 주파수 진동은 발생하지 않았다. 1차 critical speed에서 진동 증가는 unbalance인 경우가 대부분이지만 [그림 16]을 보

면 1000rpm 증기워밍 중 진동이 이미 증가하기 시작하였으며, 기동과 정지 과정의 진동 및 위상각 차이가 발생하였다. 기동/정지 중 진동과 위상각 차이 발생하는 원인은 로터의 변형이 발생하였기 때문이다. Unbalance는 원심력의 작용으로 진동이 발생하므로 기동/정지 중 진동과 위상각이 거의 일치하게 된다. 그러나 rub 진동은 정지 중 진동이 나타나는 경우가 많다. 그러므로 진동원인은 unbalance보다는 seal과 축의 rub로 인하여 축 힘이 발생하면서 진동이 증가하였기 때문으로 판단할 수 있었다.

그리고 rub가 발생한 위치는 오버홀 공사 중 신품으로 교체하여 간극이 가장 좁을 것으로 예상되는 N2 packing 으로 추정되었다. 또 운전 데이터 분석결과도 HIP 터빈의 상/하부 케이싱 온도 편차가 80도 이상 크게 발생하고 있었다. 따라서 rub 발생은 온도 편차에 의한 뒤틀림과 새로 교체한 N2 packing seal 간극의 협소가 복합적으로 작용한 것으로 최종 판단되었다.

진동교정 작업 검토결과 신품 seal의 마모가 조금 더 진행되고, 케이싱 온도 편차가 줄어들면 rub가 자연 해소될 것으로 예상되었다. 그래서 터빈 정지 후 3시간 동안 터닝 및 증기워밍을 추가로 실시하여 케이싱 온도 편차를 30도 이내로 감소시킨 후 재기동하였다.



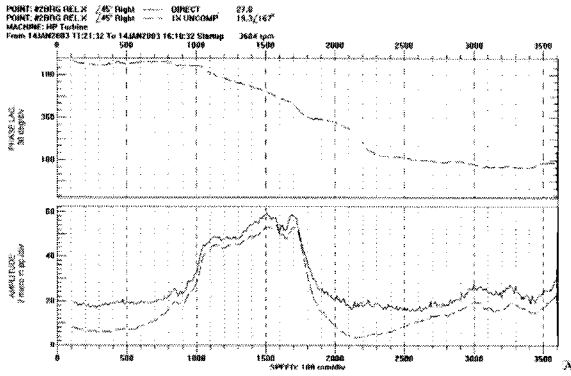
[그림 17] 케이싱 온도 편차 감소 후 재기동

재기동 결과 [그림 17]처럼 1차 critical speed인 1700rpm에서 진동은 250 $\mu$ m에서 150 $\mu$ m로 감소하였다. 그렇지만 3600rpm 도달 후 다시 rub가 발생하면서 진동이 200 $\mu$ m까지 증가하였다. 케이싱 온도편차에 의한 뒤틀림 현상은 줄었지만 seal의 마모가 계속되기 때문으로 추정되었다.

다시 8시간 이상 터닝과 워밍 실시 후 3차 기동 결과 [그림 18]처럼 최대 진동이 60 $\mu$ m 이하로 교정되어 정상화 되었다.

이 사례는 일반적인 rub 이론에서 말하는 분수배 주파수가 나타나지 않았다. 그 이유는 앞에서 언급한 마찰

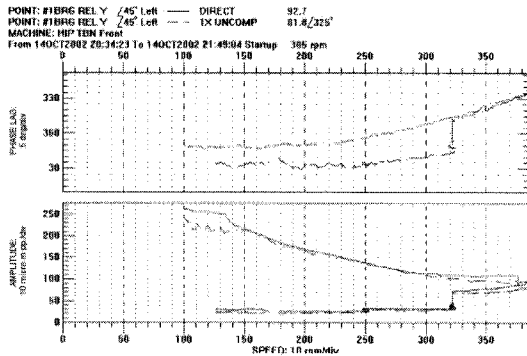
력에 비하여 로터 중량이 크기 때문에 추정된다. 또 rub가 발생하면 위상각이 증가하지만 이 사례에서는 위상각이 감소하였다. 그 이유는 rub에 의한 high spot(축 단면에서 진동이 가장 높은 지점)의 이동 보다는 seal rub에 의한 축 지지 효과로 강성이 증가하면서 위상각이 감소한 것으로 추정된다.



[그림 18] 3차 재기동 결과 진동이 양호함

### 4.3 증기밀봉 Seal에서 심각한 Rubbing

4.2절의 동일 기종의 다른 호기 증기터빈에서 발생한 심각한 rub 사례이다.

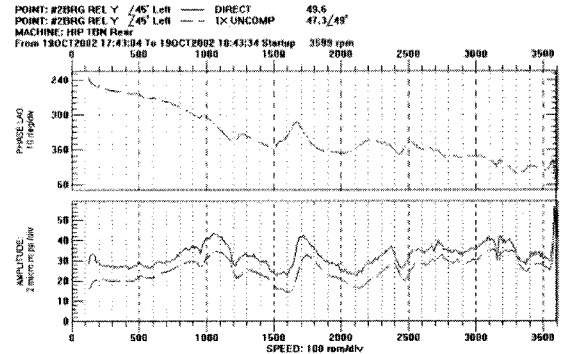


[그림 19] N2 Packing 교체 후 Rubbing

N2 packing 교체 공사 후 1차 시운전 도중 400rpm에서 강력한 rub로 의심되는 진동현상이 발생하였다. [그림 19]의 bode plot을 보면 오버홀 공사 후 320rpm에서 증기워밍 도중 rub로 인하여 축 휨이 발생하면서 진동이 증가한 것으로 추정되었다. Rub를 확인하기 위하여 회전수를 320rpm에서 400rpm으로 승속하자 진동은 더욱 증가하였다. 과도한 rub일 경우 축을 영구적으로 휘게 할 수 있으므로 터빈을 보호하기 위하여 정지하였다. 정지 도중에 더욱 격렬한 rub가 발생하면서 100rpm에서 진동은 250 $\mu$ m를 초과하였다. 진동분석 결과 rub는 새로이 교체한 N2 packing이며, 케이싱 상부의 seal과 축이 rub를 일으키는 것으로 판단되었다.

진동교정 작업 검토결과 심각한 rub이므로 자연스럽게 rub가 해소되기는 어렵다는 결론에 이르렀다. 그래서 rub를 해소하기 위한 가장 효과적이고 간단한 작업으로 케이싱을 이동시켜 rub 발생을 해소하기로 하였다. 작업 방법은 터빈 베어링과 로터는 움직이지 않고, 케이싱만 상부로 이동시키는 것이다. 케이싱만 상부로 이동할 경우 rub가 발생하는 seal의 상부에서 간극은 커지므로 rub는 해소되지만 케이싱 하부의 seal 간극은 줄어들며, 또 다른 문제로 blade 간극변화 및 로터 편심 등이 불량해 질 수 있기 때문에 신중한 검토가 이루어졌다. 운전 및 정비관련 각종 데이터들을 검토한 최종결론은 케이싱을 상부로 0.25mm 이동하는 것이다.

케이싱 이동 후 재기동한 결과 [그림 20]과 같이 rub에 의한 진동이 모두 해소되어 진동이 60 $\mu$ m 이하로 교정되었다.



[그림 20] 케이싱 이동 후 재기동

### 5. Rub 감시 장치의 필요성

Rub가 발생할 수 있는 회전기계는 온-라인으로 감시하는 진동계측 설비를 설치하는 것이 꼭 필요하다. 진동계측 설비는 정상 운전 중에 연속적으로 진동감시를 할 뿐 아니라 rub를 진단할 수 있는 진동주파수 분석(FFT), Cascade, Bode, Orbit plot 등을 취득할 수 있게 한다. 또한 이것은 Rubbing이 일어날 때 Rubbing을 탐지할 가능성을 높일 뿐 아니라 진동 제한치를 설정하여 탐지되지 않는 Rub에 의한 대형사고와 특히 파손 고장이 수 초 안에 일어날 수 있는 사고에 대하여 보호해 줄 것이다.

### 참고문헌

1. 한전KPS(주) 솔루션센터 기술보고서
2. 회전기계 진동 및 정비 핸드북, 이병준 저
3. 회전기계 진동진단, Bently Nevada사