

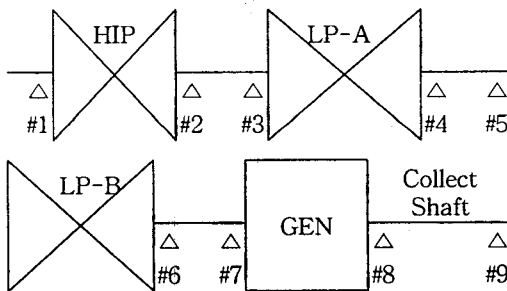
터빈 베어링에서의 Dry Oil Whip에 의한 고진동

이 병 준

(한국전력공사 정비기획실)

1. 상황 개요

보령화력 발전소 6호기의 터빈 발전기(베어링 배열도 참조)는 95년 10월 건설후 첫 번째 overhaul 작업을 시행하였다. 주요 작업은 저압 터빈(#A)의 #3 베어링 교체와 터빈 발전기의 축정렬이었는데, 터빈을 기동한 결과 약 40시간 운전후('95. 11. 8) 저압 터빈(#A) #3, 4번 베어링 진동 진폭(peak to peak)이 각각 $98\mu\text{m} \rightarrow 138\mu\text{m}$, $45\mu\text{m} \rightarrow 86\mu\text{m}$ 로 약 $40\mu\text{m}$ 정도 상승하여, 현장에서 베어링 유압 조정 및 운전 모드(부분분사 및 전주분사 방식) 변경으로 일시적으로 안정되었으나 같은 현상이 계속 발생하였다.



* 각 베어링에 dual X, Y probe가 설치되어 있고, 베어링 메탈 및 배유 온도 감시 설비 있음.

2. 터빈 제원

- 터빈 출력 : 500 MW
- 터빈 형식 : 초 임계압 증동 4류 재열 재생복수 터빈
- 진공도 : 722 mmHg

- 주증기 압력, 온도, 유량 : 246 kg/cm², 538°C, 1,720 T/H
- 추기단수 : 8단
- 터빈단수 : HP-7, IP-5, LP-6 × 2

3. 진동 특성

3.1 진동 현황

구분	#1	#2	#3	#4
'95.9.13 490MW	13<209 27	29<136 47	84<73 115	31<172 56
'95.11.7 500MW	32<181 41	43<356 62	51<47 102	12<302 33
'95.12.12 500MW	33<186 43	22<23 52	41<60 138	11<21 81
'96.1.4 500MW	61<189 76	26<4 44	39<60 85	3<- 25
'96.1.4 500MW	38<166 49	21<335 56	37<59 149	5<- 103
#5	#6	#7	#8	비고
28<336 35	22<117 23	38<349 47	34<7 42	O/H 前
22<211 29	35<46 44	23<283 35	20<334 28	O/H 後
24<268 36	27<45 51	28<304 39	26<345 33	IN<위상 OUT
28<239 35	35<64 43	19<274 31	18<344 25	14:40
26<237 40	35<64 67	19<275 35	17<344 27	21:08

- 저압터빈(#A) #3, 4번 베어링외의 다른 베어링의 진동은 양호함.
- #3번 베어링의 진동은 시간의 경과와 더불어 $102\mu\text{m} \rightarrow 138\mu\text{m} \rightarrow 149\mu\text{m}$ 로, #4번

베어링의 진동은 $33 \mu\text{m} \rightarrow 81 \mu\text{m} \rightarrow 103 \mu\text{m}$ 로 급격히 악화됨.

- 동일 운전조건에서 #3번 베어링의 진동이 순간적으로 $85 \mu\text{m} \leftrightarrow 149 \mu\text{m}$ 로, #4번 베어링의 진동은 $25 \mu\text{m} \leftrightarrow 103 \mu\text{m}$ 로 변동됨.

- Subsynchronous 성분 (0.38 X, 0.77 X)이 아주 우세함.

- #3, 4번 베어링 외의 다른 베어링 진동주파수 주성분은 synchronous 성분(1 X rpm)임.

② 1 X 성분의 orbit 형태

3.2 베어링 금속 및 배유온도 현황

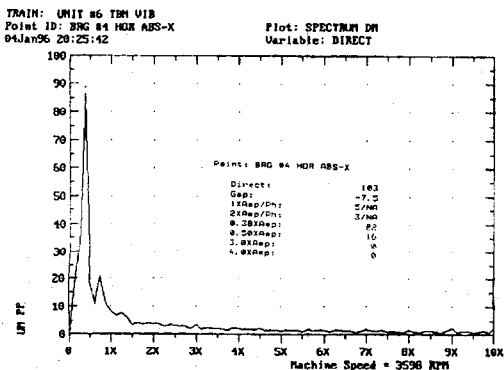
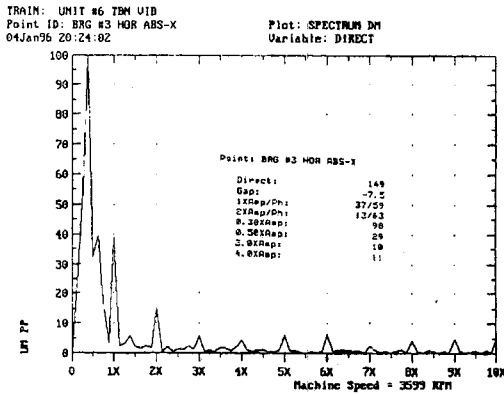
구분	#1	#2	#3	#4
'95.12.29	90.3	103.6	94.7	90.3
490MW	65.7	75.2	81.4	61.9
'96.1.4	90	105.3	94.7	89.4
480MW	65	73.8	80	61
			90	
			75	

#5	#6	#7	#8	비고
84.1	82.5	83	87.2	금속온도(°C)
63.8	59.5	57.5	57.7	배유온도(°C)
85.3	82.5	82.8	86.4	O/H 이후
62.5	58.3	57.2	56.6	
				O/H 이전

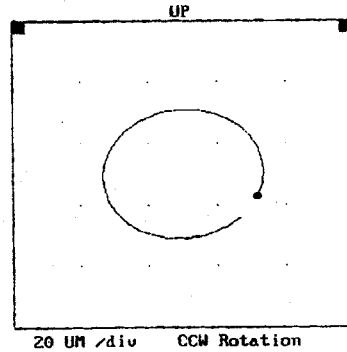
- #3번 베어링의 금속 및 배유온도가 overhaul 후에 5°C 상승함.

3.3 #3, 4번 베어링의 진동 특징

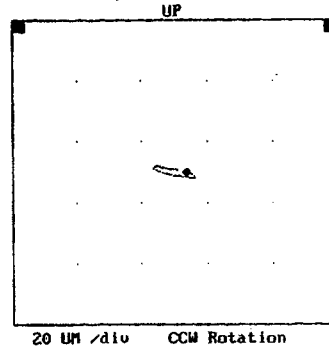
① 진동 주파수 성분



TRAIN: UNIT #6 TBN UID
Point ID: BRG #3 VER ABS-Y 45 deg Left
Point ID: BRG #3 HOR ABS-X 45 deg Right
04Jan96 19:58:50 Plot: ORBIT & TIMEBASE

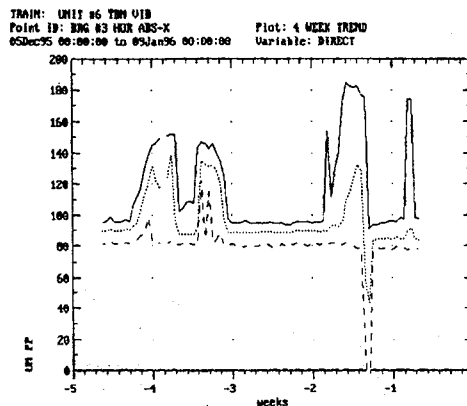


TRAIN: UNIT #6 TBN UID
Point ID: BRG #4 VER ABS-Y 45 deg Left
Point ID: BRG #4 HOR ABS-X 45 deg Right
04Jan96 20:01:06 Plot: ORBIT & TIMEBASE

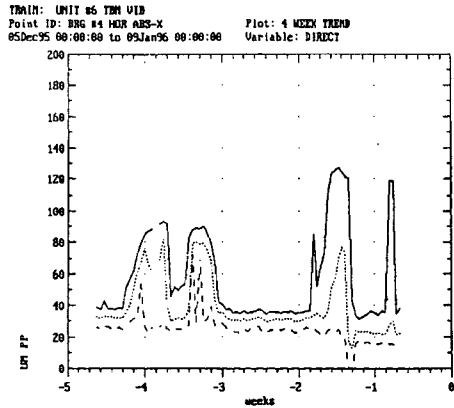


- Orbit의 모양은 전형적인 원형임.

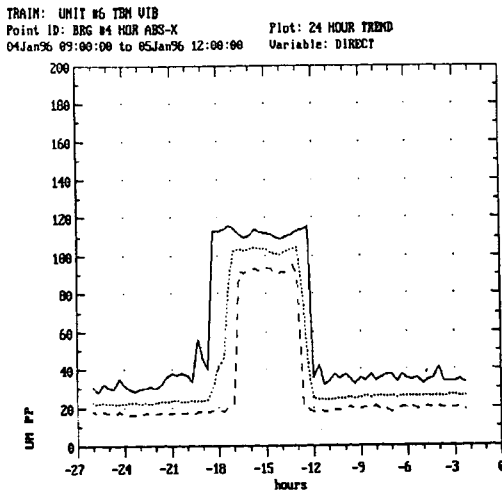
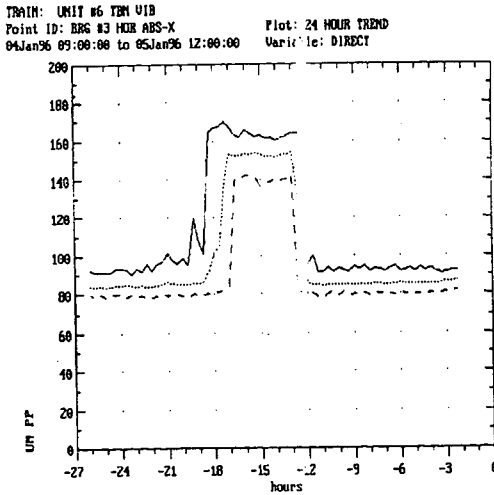
③ 진동 trend



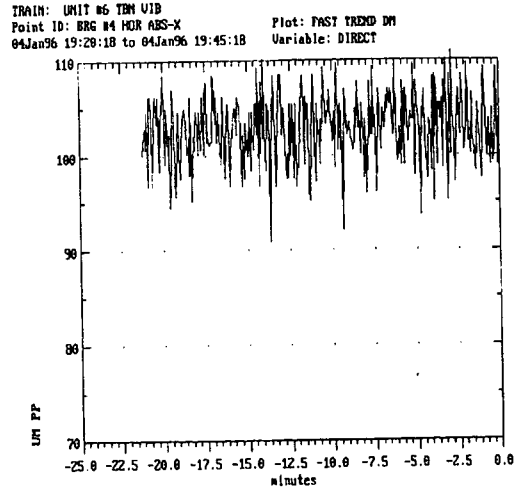
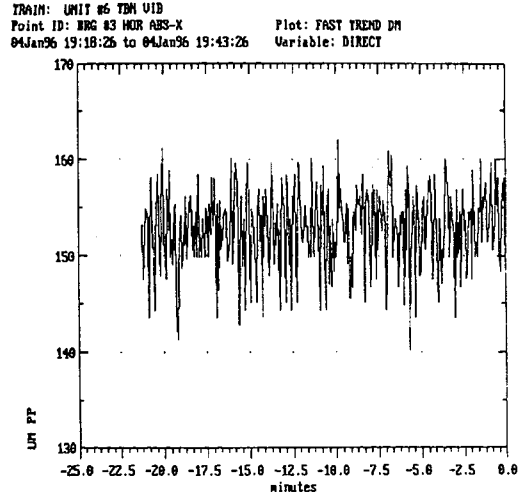
소특집 : 진동신호를 이용한 대형설비 및 구조물의 진단사례



- 4주 trend('95.12.5~'96.1.9) : 운전조건
의 큰 변화없이 #3번 베어링은 최대값으로
100 μm 에서 150~180 μm 로, #4번 베어링은
최대값으로 40 μm 에서 90~120 μm 로 증감
변동함.



- 24시간 trend('96.1.4. 09:00~'96.1.6.
12:00) : 운전조건의 큰 변화없이 #3번 베
어링은 최대값으로 100 μm 에서 160 μm 로,
#4 베어링은 최대값으로 40 μm 에서 110 μm
로 증감 변동함.



- Fast trend('96. 1. 4. 19:18:26~'96. 1. 4.
19:43:26) : 운전 조건
의 큰 변화없이 #3
번 베어링은 최대
진동변동폭 15~20 μm 로,
#4번 베어링은 최대
진동변동폭 10~15 μm
로 hunting함.

4. 진단 결과

저압터빈(#A)의 불안정 진동의 원인은
베어링 온도 상승 및 우월 진동주파수 성분
이 0.38x으로 보아 #3번 베어링으로의 윤활
유 공급 부족으로 인한 유체 불안정(dry oil

whip)에 기인한 것으로 판단되었다.

5. 조치 결과

5.1 임시 조치 및 결과

① 운전변수 조정

터빈 운전상태 하에서 베어링 메탈의 고온과 oil whip에 의한 고진동을 저감시키기 위해서는 윤활유의 압력 또는 온도 조정, 주증기 또는 재열 증기의 온도 조정 및 복수기의 진공도 조정에 의한 운전중의 rotor alignment 상태를 변화시켜 베어링 부하를 설계치에 가깝도록 유지시키는 것이다. 따라서 다음과 같이 운전변수를 조정하였더니 유체 불안정 현상이 소멸되었다.

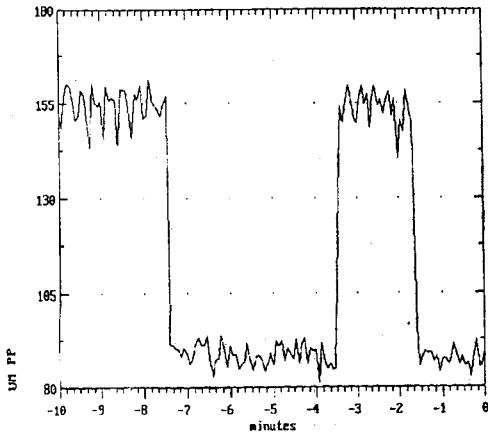
- 재열 증기온도 하향조정 : 538℃ → 520℃
- 터빈 hood 온도 상승조정 : 34℃ → 40℃

② 임시 조치후 진동 현황

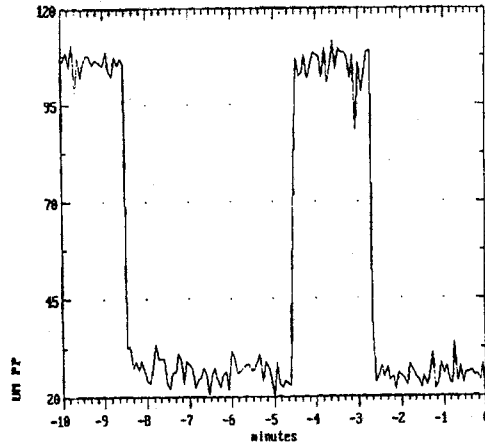
구분	#1	#2	#3	#4
'96.1.4 500MW	38<166 49	21<335 56	37<59 155	5<- 100
'96.1.5 500MW	44<176 52	24<338 39	35<56 83	5<- 22

#5	#6	#7	#8	비고
26<237 40	35<64 67	19<275 35	17<344 27	21:08
36<250 42	25<67 31	25<285 38	22<346 28	

TRAIN: UNIT #6 TBM VIB
Point ID: BRG #3 HOR ABS-X
04Jan96 23:03:06 to 04Jan96 23:13:06
Plot: FAST TREND DM
Variable: DIRECT



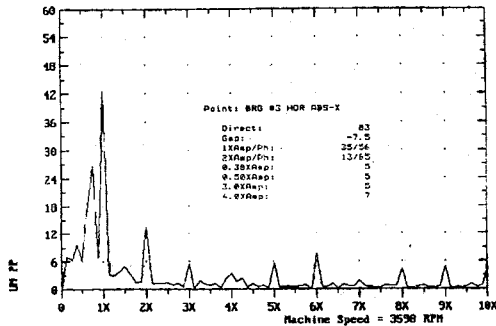
TRAIN: UNIT #6 TBM VIB
Point ID: BRG #3 HOR ABS-X
04Jan96 23:04:10 to 04Jan96 23:14:10
Plot: FAST TREND DM
Variable: DIRECT



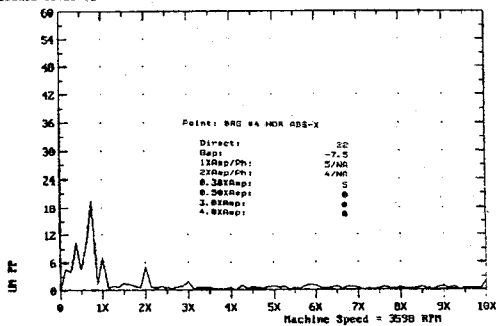
- 조치후 #3번 베어링 진동은 155 µm ↔ 83 µm로, #4번 베어링의 진동은 100 ↔ 22 µm로 step증감 반복되다가 oil whip 현상이 소멸되고 저압터빈의 진동이 낮은 값에서 안정화됨.

③ 진동 주파수 성분 및 진동 변동폭

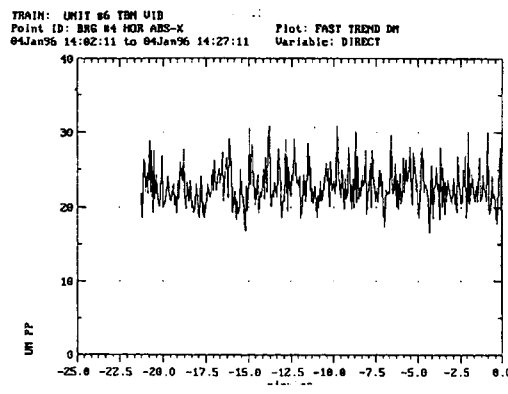
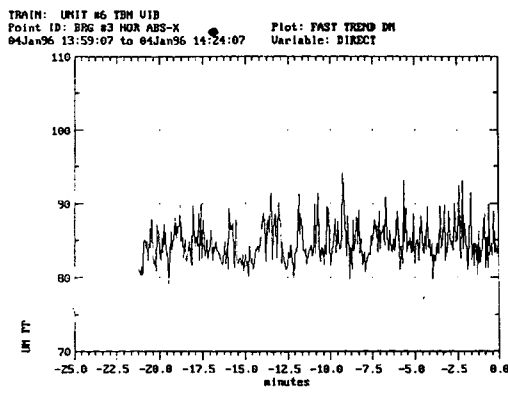
TRAIN: UNIT #6 TBM VIB
Point ID: BRG #3 HOR ABS-X
05Jan96 09:58:33
Plot: SPECTRUM DM
Variable: DIRECT



TRAIN: UNIT #6 TBM VIB
Point ID: BRG #4 HOR ABS-X
05Jan96 09:59:01
Plot: SPECTRUM DM
Variable: DIRECT



소특집 : 진동신호를 이용한 대형설비 및 구조물의 진단사례



- 0.38X 진동 주파수 성분은 소멸되고, 진동 변동폭도 10 μm미만으로 다소 안정화됨.

5.2 근본조치

임시 조치로 운전해 오다가 구정 연휴기간 (96.2.16~96.2.21)을 이용하여 #3번 tilting pad journal 베어링을 정밀 점검하여 근본 조치함.

① 점검결과

- Tilting pad 베어링의 모서리부에서 접촉 흔적이 있었음.

- 베어링 전 pad(6ea)의 contact이 약 40%로 불량함(80%이상이면 양호)
- Tilting pad 선단부 rounding처리는 4.5R로 미흡(설계치는 9.5R임)
- 하부 좌측 tilting pad 고정핀 hole이 편마모되고 고정핀이 절단됨.

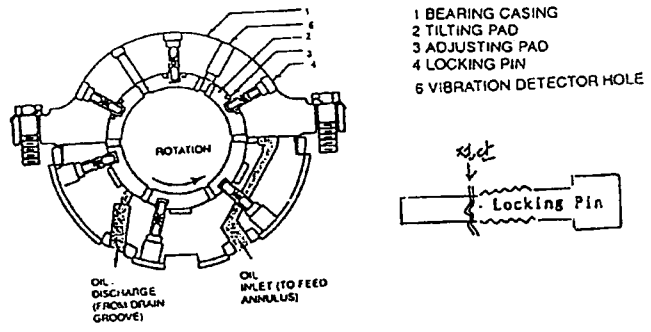
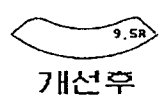
② 점검 결과로 본 진동의 원인 검토

Tilting pad journal 베어링은 self-align 되는 가장 안정성이 좋은 베어링 형식으로 유체 불안정 진동이 발생되지 않는 장점이 있다. 그러나 tilting pad journal 베어링인 #3번 베어링의 유체 불안정 진동 원인은 pad 선단부 rounding처리가 4.5R로 미흡하게 되어 베어링 pad로의 윤활유 공급 및 배유 부족으로, 즉 #3번 베어링으로 윤활유가 적게 공급되어 베어링 온도가 overhaul 전보다 5℃ 높아지고, 이 윤활유 공급부족 및 베어링 contact 불량으로 인해 oil whip현상이 발생되었다.

또한 tilting pad 형식인 #3번 베어링이 원활히 self-align(tilting)되지 못하여 최소 유막 두께부가 형성되는 하부 좌측 tilting pad의 고정핀 hole이 고정핀에 의해 편마모되고, 또한 고정핀도 절단된 것으로 판단되었다.

③ 정비 내용

- 전 베어링 pad의 contact를 80%이상으로 수정함.



- 모든 pad 선단부(즉 pad로의 윤활유 입출구부)를 rounding 개선 조치하고(4.5R→9.5R) locking pin hole이 손상된 하부 좌측 pad 및 locking pin을 교체함.

④ 정비후 시운전 현황

- 진동현황
임시조치시 조정된 운전 변수들을 모두 정상으로 하고 기동한 결과 진동 상태가 다음과 같이 감소되었다.

구분	#1	#2	#3	#4
'95.12.29 490MW	44	59	157	106
'96.2.26 501MW	59	54	90	36
#5	#6	#7	#8	비고
41	60	41	35	단위 ; μm
33	26	41	29	

- #3번 베어링의 진동은 $157 \mu\text{m} \rightarrow 90 \mu\text{m}$ 로, #4번 베어링의 진동은 $106 \rightarrow 36 \mu\text{m}$ 로 개선됨.

● 베어링 온도 현황

구분	#1	#2	#3	#4
'95.12.29 490MW	90.3	103.6	94.7	90.3
'96.2.26 501MW	65.7	75.2	81.4	61.9
#5	#6	#7	#8	비고
84.1	82.5	83	87.2	금속온도
63.8	59.5	57.5	57.7	배유온도
85.0	81.4	81.4	85.3	금속온도
62.7	58.3	56.7	56.3	배유온도

- #3번 베어링의 금속온도는 거의 변화없으나 베어링의 배유온도는 $81.4^{\circ}\text{C} \rightarrow 75.7^{\circ}\text{C}$ 로 낮아짐.