

발전용 증기터빈의 Oil Deflector 부 탄화물 퇴적에 의한 간헐적 고진동 현상 규명

양 승 현*, 박 철 현*, 김 재 실**, 하 현 천**

Examination of the Intermittent High Vibration by the Accumulated Carbide at Oil Deflector of a Steam Turbine for Power Plant

Seong Heon Yang*, Chul Hyun Park*, Chaesil Kim** and Hyun Cheon Ha**

Key Words : Rubbing(마찰), Steam Turbine(증기터빈), Oil Deflector(오일 디플렉터), Accumulated Carbide(탄화물 퇴적), High Vibration(고진동), Mass Unbalance(질량 불평형), 축정렬 불량(Misalignment)

ABSTRACT

The intermittent high vibration has been occurred one or two times a day for a 500MW large steam turbine during 5 months. This abnormal vibration was caused by the rubbing between the rotor and the carbide accumulated on the seal tooth of oil deflector. It was found that the accumulated carbide was insulation material installed on the HIP casing from the examination of the chemical composition. Also, this paper presents the mechanism of the intermittent high vibration and the proper method to eliminate this vibration problem. This result would be good practice to find the solution of similar high vibration in the steam turbines for power plant as well as industrial rotating machineries.

1. 서 론

발전용 증기터빈은 국가의 공익 기간산업을 대표하는 대형 회전기계로서 산업 전반과 가정에 항상 전력을 안정적으로 공급해야 하기 때문에 충분한 신뢰성을 확보하고 운전 되어야 한다. 그런데 설치 잘못, 운전 중의 부주의 그리고 예기치 못한 주위 환경 등으로 인하여 발전설비의 핵심 주기기인 터빈-발전기에서 크고 작은 문제가 발생하여 전력을 제대로 공급하지 못하는 사례가 종종 발생하고 있다.

이와 같은 문제점 중에서 가장 빈번한 원인 중의 하나로는 터빈-발전기에서 발생하는 동적 안정성의 결여, 즉 고진동 현상이다. 따라서 터빈-발전기의 진동 저감 설계기술을 개발하고, 운전 중에 발생하는 고진동 현상에 대하여 신속한 원인 분석과 방지 기술을 확보하는 것은 국가의 안정적인 전력공급 및 전반적인 산업 발전을 위해 매우 중요한 기술로 평가된다.

특히 오늘날에는 터빈의 효율 향상과 경량화(제작 절감)를 위해 증기터빈이 점차 고온, 고압화, 고

밀도화로 설계되고 있는 추세이므로 동적 안정성을 확보하고 신뢰성을 향상 시키려는 노력이 배가되고 있는 실정이다.⁽¹⁾

그 이유는 터빈-발전기에서 고진동이 발생하여 동적 안정성이 확보되지 않게 되면 아무리 운전효율이 우수한 터빈이 개발된다 하더라도 주요 설비의 파손으로 인한 운전 정지, 보수 등에 따른 엄청난 경제적 손실이 발생하기 때문에 터빈을 연속적으로 운전할 수 없기 때문이다.

본 논문에서는 대형 화력 발전용 증기터빈의 oil deflector 부 탄화물 퇴적에 의해 야기된 간헐적 고진동 현상에 대한 진단 사례를 소개코자 한다.

본 터빈에서 발생한 고진동 현상은 터빈-발전기에서 흔히 발생될 수 있는 고진동의 대표적인 원인인 로터, 베어링, 버켓 등과 같은 핵심 기계요소의 설계 잘못, 질량 불평형, 축정렬 불량, 설치 잘못 등과 기계적인 결함, 운전 잘못으로 인해 야기되는 고진동⁽²⁾ 또는 터빈의 회전부와 정지부의 급속 접촉으로 인해 야기되는 일반적인 rubbing 등에 의한 고진동 사례 분석으로는 그 발생 메커니즘을 설명할 수 없었다.

본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동 현상은 발전용 증기터빈에서는 그 발생 빈도가 극히 드문 경

* 정회원 두산중공업(주) 기술연구원

** 정회원 창원대학교 기계공학부

우로 평가 되어진다. 따라서 본 진단 사례를 통해서 밝혀진 이상 진동현상에 대한 메커니즘은 향후 발전용 증기터빈 뿐만 아니라 일반 산업용 회전설비의 유사 고진동 현상을 해결하는 자료로서 유익하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 진동 현상

Fig. 1 은 정격출력 500MW 인 증기터빈의 개략도를 보여주고 있다. 터빈의 정격 운전속도는 3,600rpm 이며, 고중압 터빈(HIP Turbine), 저압 터빈(LP Turbine)-A, 저압 터빈-B 로 구성되어 있다. 전체 터빈 로터는 유체윤활 저어널베어링으로 지지되며, 고중압 터빈 로터의 양단 및 저압 터빈-A 의 첫번째 베어링으로는 틸팅패드 저어널베어링이 사용되며 나머지 부분은 발전기 로터를 포함하여 모두 타원형 저어널베어링이 사용되고 있다.

- Tilting Pad Journal Bearing
- Elliptical Journal Bearing
- Thrust Bearing

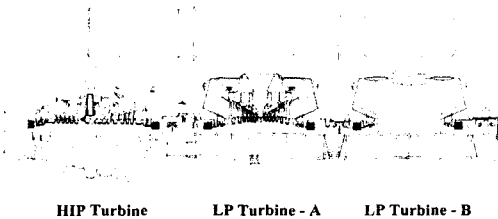


Fig. 1 Schematics of a 500 MW steam turbine

본 터빈의 진동은 각 베어링에 2 개씩 설치되어 있는 비접촉식 변위센서에 의해서 측정되며, 분석은 증기터빈 전용 진동 분석 시스템인 벤트리-네바다의 DM2000 장치를 이용하였다. 본 터빈의 진동 alarm 치 및 trip 치는 각각 peak-peak 로 149 μ m, 229 μ m 이다.

Fig. 2 는 고중압 터빈 로터를 지지하는 양단 베어링(No.1, No.2) 및 저압 터빈-A 의 두번째 베어링(No.4)에서 측정된 8 일간의 진동 및 베어링 메탈의 온도 변화를 보여주고 있다. 정상적인 경우, 각 베어링에서 측정되는 진동치는 50 μ m 정도의 양호한 진동치를 유지함을 알 수 있다. 그러나 진동이 증가하는 비정상적인 경우에는 진동치가 100 μ m 를 상회하는 경향을 보인다.

이 경우, 진동 상승에 소요되는 시간은 약 40 ~ 60 분 정도이고, 진동이 감소하여 정상 진동치로 환원되는데 소요되는 시간은 약 20 ~ 30 분 정도로서 약 60 ~ 90 분 정도의 간헐적 고진동 현상이

1~2 회/일 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 터빈에서는 위와 같은 간헐적 고진동 현상이 5 달 이상 지속되고 있었으며 시간이 증가할수록 진동진폭이 서서히 증가하는 경향을 보이고 있었다.

본 터빈의 간헐적 고진동 현상은 위 베어링을 제외한 나머지 저압 터빈 및 발전기 로터를 지지하는 베어링에서는 발생하지 않았다.

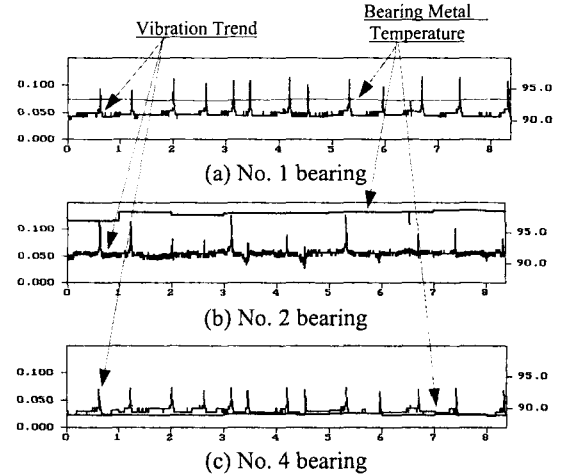


Fig. 2 Variation of vibration trend and bearing metal temperature (8 days)

3. 진동 데이터 분석 및 원인 추정

대형 증기터빈에서 발생할 수 있는 이상진동의 원인은 매우 다양하지만 크게 나누어 설계 잘못, 기계적인 결함, 운전 부주의 그리고 rubbing 과 같은 부차적인 원인 등으로 구분할 수 있다.

본 터빈의 경우는 동일 모델이 이미 상업 운전 중이며 진동적으로 큰 문제 없이 운전되고 있기 때문에 설계적인 측면은 이미 검증된 터빈으로 볼 수 있다.

따라서 본 절에서는 2 절에서 제시한 간헐적 고진동 현상을 설명할 수 있는 근본 원인을 규명하기 위하여 설계 잘못에 의한 원인을 제외한 나머지 원인과 연계될 수 있는 고진동 가능성을 규명하고자 한다.

3.1 기계적인 결함에 의한 원인

증기터빈에서 기계적인 결함에 의한 원인으로 발생할 수 있는 이상진동은 크게 나누어 질량 불평형, 축정렬 불량, 베어링 틸트(tilt) 그리고 지반 침하 등이다.

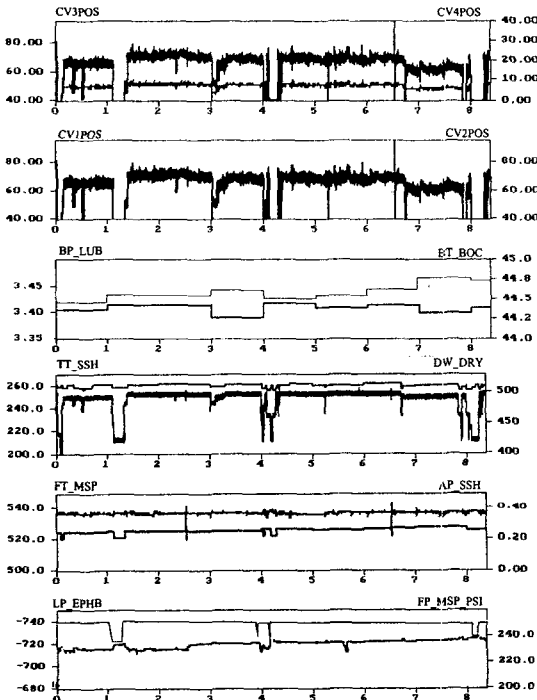
이와 같은 기계적인 원인에 의한 고진동은 일반적으로 회전부의 탈락이나 이동에 의해서 진동진폭이 돌변(step change)하여 일정하게 유지되는 순간

적인 불평형에 의한 고진동을 제외하고는 기계적인 결합의 정도나 성장에 따라 점진적인 진동의 증가 현상을 보인다.

따라서 본 터빈에서 발생한 간헐적인 고진동 현상을 설명하기에는 부적절한 것으로 판단되었다.

3.2 운전 부주의에 의한 원인

발전용 증기터빈은 수많은 기계 요소들이 복합적으로 연계되어 운전되므로 터빈의 동적 안정성을 확보하기 위해서는 각 기계 요소들에 대한 운전 변수들이 정밀 제어되며 운전된다.



control valve position : CV1POS, CV2POS, CV3POS, CV4POS
 lubrication oil supply pressure : BP_LUB
 lubrication oil supply temperature : BT_BOC
 seal steam temperature : TT_SSH
 seal steam pressure : AP_SSH
 power : DW_DRY
 main steam temperature : FT_MSP
 main steam pressure : FP_MSP_PSI
 vacuum : LP_EPHB

Fig. 3 Variation of operating variables (8 days)

운전변수와 관련된 증기터빈의 고진동 사례는 주로 신규터빈의 경우, 시운전 도중에 종종 발생하며 일반적으로 rubbing에 의한 진동으로 나타나는 경우가 많다.

운전변수와 관련된 고진동의 원인을 파악하고자

터빈의 진동에 영향을 미칠 수 있는 주요 운전변수들에 대한 검토를 수행하였다. 검토된 운전변수들은 터빈 출력, 주증기(main steam) 압력 및 온도 control valve position, 베어링 윤활유 공급압력 및 온도, 밀봉증기(seal steam) 온도 및 압력, 그리고 진공도 등이다.

Fig. 3은 Fig. 2의 진동이력 선도와 동일한 시간대에서 측정된 터빈의 주요 운전변수들의 변화를 보여주고 있다. 현장 운전원들과 공동으로 정밀 검토하였으나 운전변수의 제어 잘못이나 운전변수의 영향이 본 터빈의 고진동 현상과 연관될 근거는 발견할 수 없었다.

3.3 Rubbing에 의한 원인

Rubbing은 그 자체가 진동의 원인이 아니고 과도한 질량 불평형, 축정렬 불량, 유체 불안정 진동(oil whirl/whip, steam whirl 등) 그리고 운전 부주의 등에 의해 터빈의 회전부와 정지부가 서로 접촉하면서 발생하는 부차적인 진동현상이다.

터빈-발전기에서 회전부는 로터이며, 정지부는 diaphragm packing, gland packing 그리고 oil deflector 등이다.⁽³⁾ Rubbing이 발생하면 축의 표면에 국부적인 마찰열이 발생하여 축의 원주방향으로 급격한 온도 구배가 발생하게 된다. 이 온도 구배는 로터의 열적 굽힘을 증대 시킴으로써 기하학적 편심을 증가시켜 로터의 자체적 질량 편심과 벡터 합성된다. 따라서 rubbing이 지속적으로 발생하게 되면 결국 로터의 질량 불평형 양을 증가시키는 경우가 되어 과도한 진동 진폭을 야기하고, 이 과도진동은 더욱 더 심한 rubbing을 발생시키기 때문에 결국 터빈을 정지시켜야 하는 극한 상황이 초래되기도 한다.

실제 증기터빈에서는 주로 시운전 중에 rubbing에 의한 고진동 현상이 빈번히 발생하고 있는데, 가장 주된 원인으로서는 로터와 케이싱의 열팽창 차이, 케이싱의 불균형 변형에 의하여 로터와 packing이 급속 접촉하기 때문이다. 이 경우 정상적인 진동치에서 운전정지(trip)되는 진동치까지 성장하는 데 걸리는 시간은 경우에 따라서 다르지만 약 30분 이내인 짧은 시간동안 급격하게 상승한다.

Rubbing이 발생하는 경우는 결국 로터의 질량 불평형 양의 증가 및 편심 위치를 이동시키는 결과가 나타나기 때문에 진동주파수는 회전동기성분(1X)이 크게 성장하며 위상이 변하게 된다.

Fig. 4는 No. 1 베어링에서 측정된 진동신호에 대하여 정상적인 경우와 간헐적 고진동이 발생한 경우에 대한 주파수 분석결과를 보여 주고 있다. 두 경우 모두 1X 진동성분이 지배적임을 알 수 있는데, 고진동이 발생하는 경우는 1X 진동성분이 더욱 크게 성장함을 알 수 있다.

Fig. 5 는 No. 1 베어링에 대한 bode plot 으로서 간헐적 고진동이 성장할 때마다 위상이 변화되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4 와 5 에서 보여준 결과들은 rubbing 이 발생하는 경우에 측정되는 전형적인 진동 현상임을 알 수 있다.

그리고 진동이 증가하고 감소하는데 소요되는 시간이 비교적 짧고(60 ~ 90 분), 정상적인 경우와 진동이 상승하는 경우에 대한 orbit 와 time signal 이 큰 차이가 없는 것을 통해서 비교적 경미한 rubbing 이 반복적으로 발생/소멸하는 것으로 판단되었다.

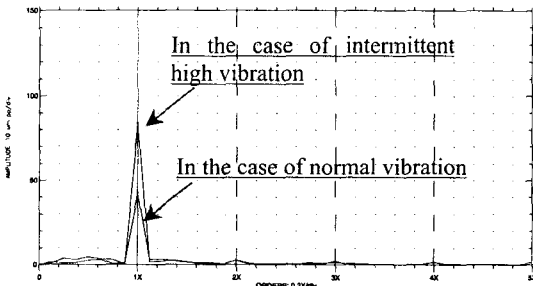


Fig. 4 FFT Analysis of No. 1 Bearing

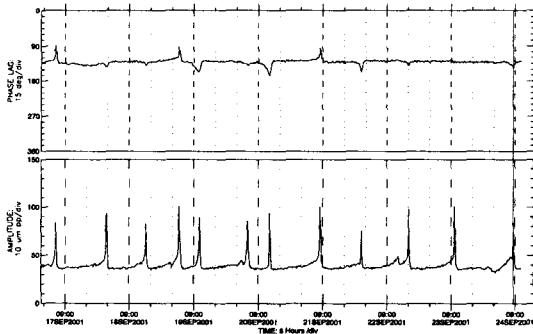


Fig. 5 Bode Plot of No. 1 Bearing

3.4 평가

본 터빈에서 발생하는 간헐적 고진동 현상은 터빈의 설계 잘못, 기계적인 결함 그리고 운전 부주의 등에 의한 원인으로서는 볼 수 없으며 경미한 rubbing 이 반복적으로 발생/소멸하는 것으로 평가되어진다.

앞서 설명한 바와 같이 증기터빈에서 회전부와 고정부에서 rubbing 이 발생할 수 있는 부분으로는 회전부인 로터와 고정부인 diaphragm packing, gland packing 그리고 oil deflector 등이다. 선행호기에서 발생한 rubbing 현상을 검토해 볼 때, diaphragm

packing 이나 gland packing 부에 발생하는 rubbing 은 터빈의 시운전 시에 주로 발생하며, 로터의 열적응률이 크게 성장하여 진동이 급격하게 상승하는 경향을 보이므로 본 터빈에서 발생하는 간헐적 고진동 현상을 설명하기에는 적절하지 못하는 것으로 평가된다.

증기터빈에서 상대적으로 경미한 rubbing 이 발생할 가능성이 가장 큰 곳으로는 Fig. 6 에서 볼 수 있는 바와 같이 seal tooth 가 가장 작게 설치되어 있는 oil deflector 부이다. 참고로 oil deflector 는 베어링에서 비산 되는 윤활유가 터빈 내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 베어링과 터빈 케이싱 사이에 설치해 둔 sealing 장치이다.

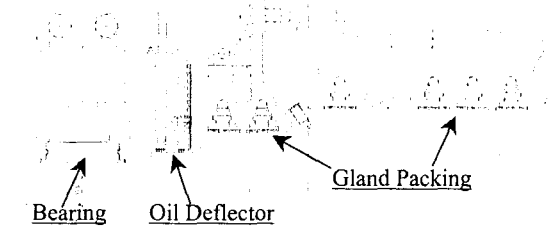


Fig. 6 Bearing, oil deflector and gland packing of HIP Turbine

그러나 oil deflector 의 설계나 조립 잘못 등으로 터빈의 운전 중 고속으로 회전하는 로터와 rubbing 이 발생하게 되면 로터의 재질에 비하여 상대적으로 경도가 훨씬 낮은 seal tooth 가 금방 마모되기 때문에 일시적인 고진동 현상은 발생할 수 있겠지만, 본 터빈에서 발생하는 경우와 같은 고진동 현상이 주기적으로 발생할 수는 없을 것으로 판단되었다.

따라서 본 터빈의 고진동 현상은 로터와 oil deflector 부 seal tooth 와의 간극 사이에 어떤 탄화물이 일정량 이상의 두께로 퇴적되면 회전하는 로터와 퇴적물과의 rubbing 이 발생하여 국부적인 로터 열변형을 야기 시키고, 이로 인해 진동이 순간적으로 증가하게 되고, 퇴적물이 로터와의 연속적인 접촉에 의하여 탈락하면 진동은 정상치로 돌아오는 과정을 반복한 것으로 예상되었다.⁽³⁻⁴⁾

탈락된 탄화물이 다시 퇴적되어 일정한 두께로 성장하기 까지 걸리는 시간이 약 10 ~ 12 시간 정도 소요됨에 의해 본 터빈에서 발생하는 고진동 현상이 평균 2 회/일 정도 반복적으로 발생되었던

것으로 평가되어졌다.

탄화물로는 고중압 터빈 케이싱에 설치되어 있는 보온재의 가루, 대기 상 먼지 등이 윤활유와 혼합되어 고온의 환경 하에서 카본화 된 것으로 추정하였다.

4. Oil deflector 부 점검

본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동 현상에 대한 원인을 추정, 평가하고 이를 확인하기 위하여 운전 중인 터빈을 정지시키고 oil deflector 를 분해, 점검하였다.

Fig. 7 은 oil deflector 부 seal tooth 내에 탄화물이 퇴적되어 있는 사진을 보여주고 있다. 탄화물은 딱딱하게 고형화 되어 있었으며 seal tooth 표면 및 tooth 와 tooth 사이에 다량 퇴적되어 있었다.

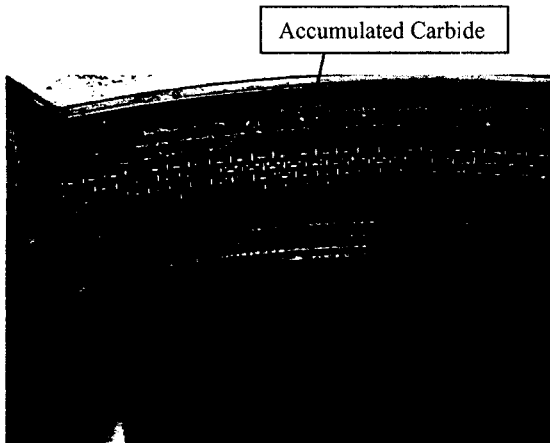


Fig. 7 Photograph of accumulated carbide on seal tooth at a oil deflector

Table 1 은 탄화물의 생성 원인을 규명하기 위하여 탄화물을 수거하여 화학분석을 수행한 결과를 보여 주고 있다. 전체 성분 중 SiO₂ 및 Al₂O₃ 가 전체 성분 중 약 80 % 정도임을 알 수 있는데 이는 탄화물의 성분이 보온재 가루임을 증명하는 것이다.

Table 1 Chemical composition of accumulated carbide

ID	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	ZnO	MnO
Comp. (%)	57.0	18.9	12.3	6.5	1.4	2.4	1.5	0.5

Oil deflector 를 분해, 점검하여 탄화물의 퇴적 상태와 탄화물에 대한 화학성분을 분석함을 통해서,

본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동은 3 절에서 평가한 메커니즘이 타당함을 입증 하였다.

5. 대책 수립 및 결과

본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동 현상의 근본 원인은 고중압 터빈 케이싱에 설치되어 있는 보온재의 가루가 oil deflector 부 seal tooth 내에 유입되어 탄화물이 되기 때문으로 규명되었다.

현장 조사 결과, 고중압 터빈의 케이싱에 설치되어 있는 보온재는 Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 매우 엉성하게 설치되어 있었다. 즉, 보온재 커브가 찢어져 내부 재료가 들어 나 있음을 볼 수 있고, 마감처리가 제대로 되어 있지 않았다.

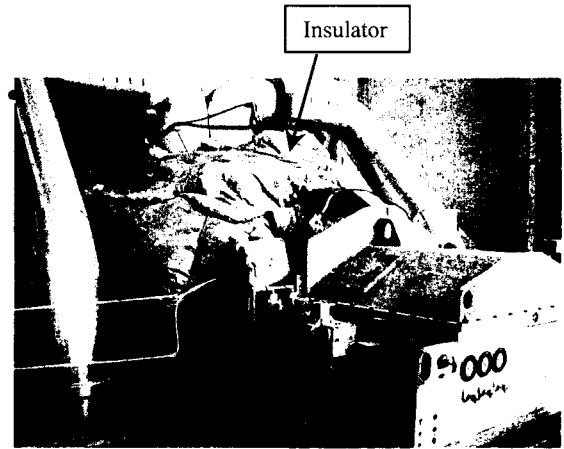


Fig. 8 Photograph of insulator installed on HIP casing

실제로 현장에서 보온재 가루가 약간의 충격에도 쉽게 탈락됨을 확인할 수 있었으며, 터빈의 운전 중 케이싱이 진동하기 때문에 연속적으로 탈락되어 배압이 작용하는 oil deflector 내부로 쉽게 유입될 수 있는 것으로 평가되었다.

따라서 고진동 현상을 근본적으로 방지하기 위해서는 보온재 가루의 oil deflector 내 유입을 최소화하는 것이 유일한 해결책임을 알 수 있다.

이를 위해서 기존 보온재를 전량 제거하고 새 보온재를 터빈 케이싱에 설치한 후 보온재 커브가 손상되지 않도록 고정 시키고, 보온재 가루가 케이싱의 진동에 의해 탈락됨을 방지하기 위하여 마감처리를 철저히 수행하였다. Fig. 9 는 수정한 보온재의 설치 상태를 보여주고 있다.

위의 과정을 수행하고 터빈을 재기동한 결과, 문제가 발생했던 베어링(No.1, No.2, No.4)에서의 간헐적 고진동 현상은 완전 제거 되어졌으며 약 7 개월

이 지난 현재까지 전 베어링에서 측정되는 진동은 $70\mu\text{m}$ (overall value, peak-peak) 이하로 정상 운전되고 있다.

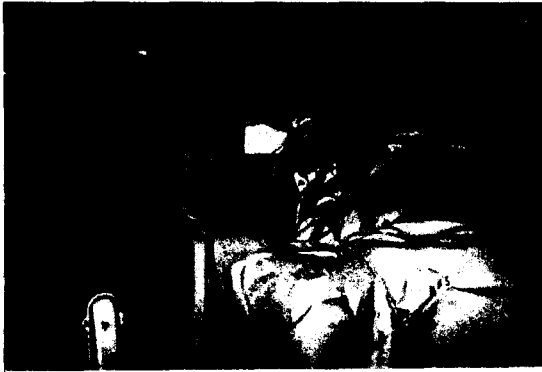


Fig. 8 Photograph of modified new insulator

6. 결 론

본 논문은 대형 화력 발전용 증기터빈에서 발생한 간헐적 고진동에 관한 사례를 소개하고 진동 메커니즘을 규명하였다. 본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동 현상의 근본 원인은 고중압 터빈 케이싱에 설치된 보온재의 가루가 oil deflector 부 seal tooth 로 유입되어 고온의 환경하에서 탄화되어 퇴적되기 때문인 것으로 규명되었다.

즉, 탄화물의 퇴적 두께가 일정량 이상으로 성장하면 회전하는 로터와 탄화물과의 rubbing 이 발생하여 로터의 국부적인 열변형이 야기되어 진동이 순간적으로 증가하게 되고, 퇴적물이 로터와의 연속적인 접촉에 의하여 탈락하면 진동은 정상적으로 돌아오는 과정을 반복하는 것으로 밝혀졌다.

보온재 가루의 oil deflector 내 유입은 기 설치되어 있는 보온재의 마감처리가 제대로 되어 있지 않기 때문에 평가되어졌다. 기존 보온재를 전량 제거하고 새 보온재를 설치한 후 마감처리를 개선함으로써 본 터빈에서 발생한 간헐적 고진동 현상을 방지할 수 있었다.

본 사례 연구를 통해서 규명된 이상 진동현상에 대한 메커니즘은 향후 발전용 증기터빈 뿐만 아니라 일반 산업용 회전설비의 유사 고진동 현상을 해결하는 자료로서 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

(1) 나운학, 신훈, 1999, “증기터빈의 설계기술 동향”,

- 한국동력기계공학회지 제 3 권, 제 1 호, pp. 9~14
 (2) 하현천, 최성필, 1999, “증기터빈의 Rubbing 진동”, 한국동력기계공학회지 제 3 권, 제 1 호, pp. 5~8
 (3) 이안성 외 9 명, 1995, “발전설비 회전체계 진동 진단 시스템 개발”, 한국기계연구원
 (4) 양보석, 1998, “기계건강진단 사례집”, 효성출판사