한국소음진동공학회논문집 제 12 권 제 11 호, pp. 897~903, 2002.

발전용 증기터빈의 Oil Deflector부 탄화물 퇴적에 의한 주기적 고진동 현상 규명

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

양 승 헌† · 박 철 현* · 김 재 실** · 하 현 천**

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

(2002년 8월 13일 접수 : 2002년 10월 11일 심사완료)

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

ABSTRACT

The periodic high vibration has been occurred one or two times a day for a 500 MW 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 periodic 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 중의하나로는 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 향상을 위하여 증기터빈이 점차 고온/고압화, 고밀도화로 설계되고 있는 추세이므로 동적 안정성을 확보하고 신뢰성을 향상시키려는 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 작업 등으로 인해 터빈의 연속적인 운전을 할 수 없으므로 엄청난 경제적 손실이 발생하기 때문이다.

일반적으로 터빈-발전기에서 흔히 발생될 수 있는 고진동의 대표적인 원인으로는 로터, 베어링, 버켓 등과 같은 핵심 기계요소의 설계 잘못에 의한 고진동,

† 책임저자, 정회원, 두산중공업(주) 기술연구원
E-mail : shyang@doosanheavy.com
Tel : (055) 278-3716, Fax : (055) 278-8569
* 정회원, 두산중공업(주) 기술연구원
** 정회원, 창원대학교 메카트로닉스 공학부

질량 불평형, 축정렬 불량, 설치 잘못 등과 기계적인 결함에 의한 고진동, 운전 잘못으로 인해 야기되는 고진동[2] 또는 터빈의 회전부와 정지부의 금속 접촉, 즉 rubbing 등에 의한 고진동이 있다.[3] 그러나 대형 화력 발전용 증기터빈에서 기존의 일반적인 원인 분석으로는 그 발생 메커니즘이 설명되지 않은 그 발생 빈도가 극히 드문 경우의 고진동 현상이 발생되었다.

본 논문에서는 증기터빈에서 발생한 이상 주기적 고진동 현상이 터빈의 oil deflector 부 탄화물 퇴적에 의해 야기됨을 밝힌 진단 사례를 제시코자 한다. 이 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. 진동현상

Fig. 1은 정격출력 500 MW인 증기터빈의 개략도를 보여주고 있다. 터빈의 정격 운전속도는 3,600 rpm이며, 고·중압 터빈(HIP turbine), 저압 터빈(LP turbine)-A, 저압 터빈-B로 구성되어 있다. 전체 터빈 로터는 유체윤활 저어널베어링으로 지지되며, 고중압 터빈 로터의 양단 및 저압 터빈-A의 첫번째 베어링으로는 틸팅패드 저어널베어링이 사용되며 나머지 부분은 발전기 로터를 포함하여 모두 타원형 저어널베어링이 사용되고 있다.

본 터빈의 진동은 각 베어링에 2개씩 설치되어 있는 비접촉식 변위센서에 의해서 측정되며, 분석은 증기터빈 전용 진동 분석 시스템을 이용하였다. 본 터빈의 진동 alarm치 및 trip치는 각각 peak-peak으로 149 μm, 229 μm이다.

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

이 경우, 진동 상승에 소요되는 시간은 약 40~60분 정도이고, 진동이 감소하여 정상 진동치로 환원되는데 소요되는 시간은 약 20~30분 정도로서 약 60~90분 정도의 주기적 고진동 현상이 1~2회/일 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 터빈에서는 위와 같은 주기적 고진동 현상이 5달 이상 지속되고 있었으며 시간이 증가할수록 진동진폭이 서서히 증가하는 경향을 보이고 있었다.

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

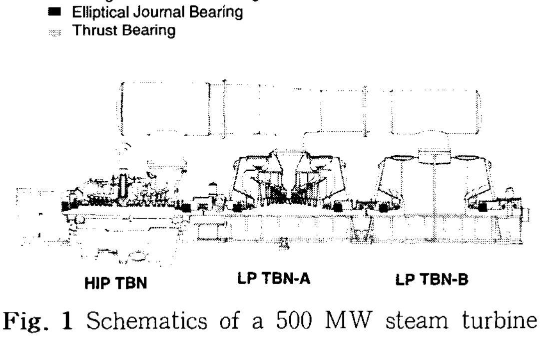


Fig. 1 Schematics of a 500 MW steam turbine

3. 진동 데이터 분석 및 원인 추정

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

본 터빈의 경우는 동일 모델이 이미 상업 운전 중이

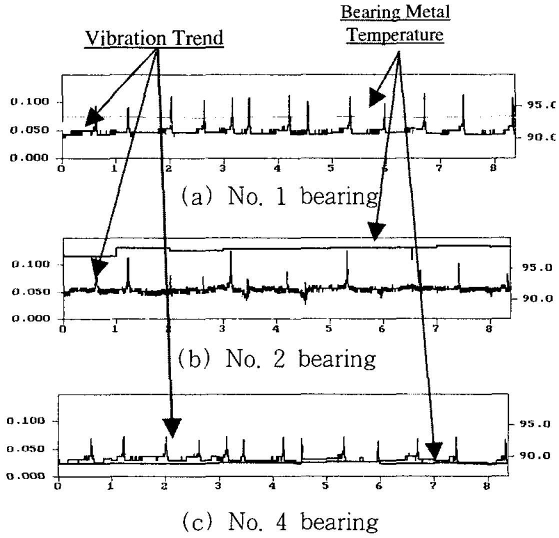


Fig. 2 Variation of vibration trend and bearing metal temperature(8 days)

며 진동적으로 큰 문제 없이 운전되고 있기 때문에 설계적인 측면은 이미 검증된 터빈으로 볼 수 있다.

따라서 본 절에서는 2절에서 제시한 주기적 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 기계적 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 순간적인 불평형에 의한 고진동을 제외하고는 기계적인 결함의 정도나 성장에 따라 점진적인 진동의 증가 현상을 보인다. 따라서 본 터빈에서 발생한 주기적인 고진동 현상을 설명하기에는 부적절한 것으로 판단되었다.

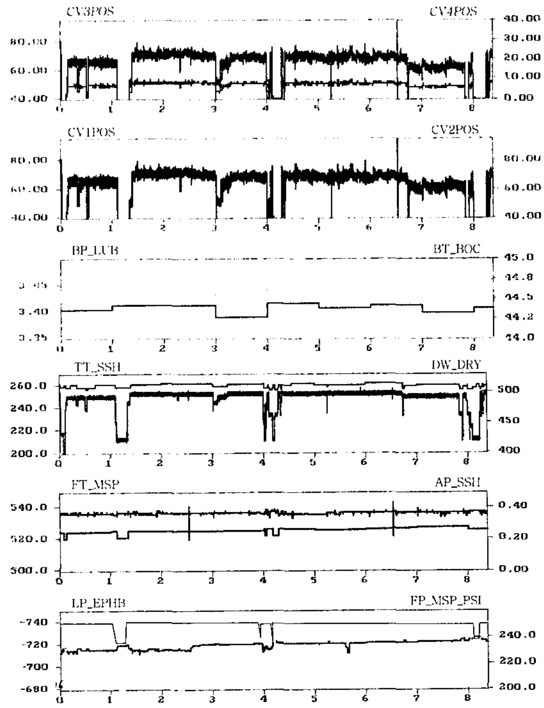
3.2 운전 부주의에 의한 원인

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

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 측정한 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.



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)

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.[4] 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 과대한 진동 진폭을 야기하고, 이 과대진동은 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 원인으로는 로터와 케이싱의 열팽창 차이, 케이싱의 불균형 변형에 의하여 로터와 packing이 금속 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 주기적 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. 5는 No. 1 베어링에 대한 bode plot으로서 주기적 고진동이 성장할 때마다 위상이 변화되고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4와 5에서 보여준 결과들은 rubbing이 발생하는 경우에 측정되는 전형적인 진동 현상임을 알 수 있다.

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

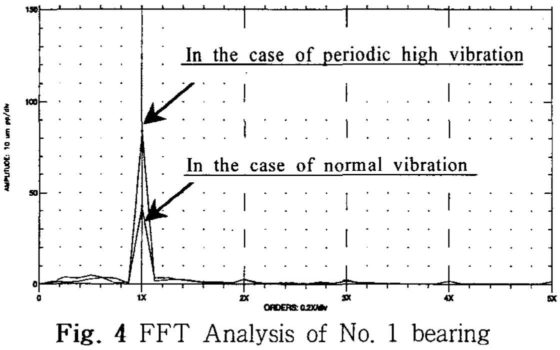


Fig. 4 FFT Analysis of No. 1 bearing

3.4 평가

본 터빈에서 발생하는 주기적 고진동 현상은 터빈의 설계 잘못, 기계적인 결함 그리고 운전 부주의 등에 의한 원인으로는 볼 수 없으며 경미한 rubbing이 반복적으로 발생/소멸하는 것으로 평가되어진다.

앞서 설명한 바와 같이 증기터빈에서 회전부와 고정부에서 rubbing이 발생할 수 있는 부분으로는 회전부인 로터와 고정부인 diaphragm packing, gland packing 그리고 oil deflector 등이다. 동일 제품의 선행호기에서 발생한 rubbing 현상을 검토해 볼 때, 터빈 diaphragm packing이나 gland packing 부에 발생하는 rubbing은 터빈의 시운전 시에 주로 발생하며, 로터의 열적굽힘이 크게 성장하여 진동이 급격하게 상승하는 경향을 보이므로 본 터빈에서 발생하는 주기적 고진동 현상을 설명하기에는 적절하지 않다.

증기터빈에서 상대적으로 경미한 rubbing이 발생할 가능성이 가장 유력한 곳으로는 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 seal tooth가 가장 작게 설치되어 있는 oil deflector부이다.

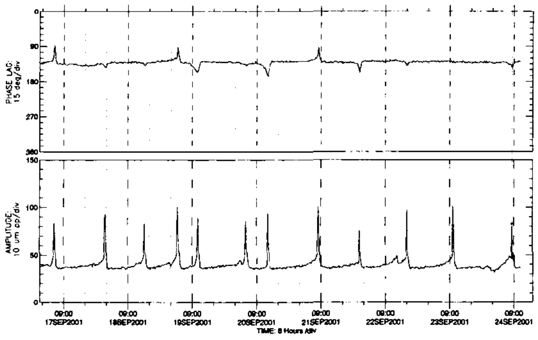


Fig. 5 Bode plot of No. 1 bearing

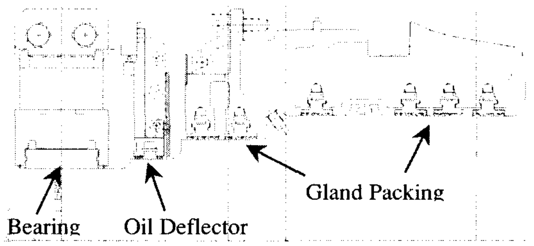


Fig. 6 Bearing, oil deflector and gland packing of HIP turbine

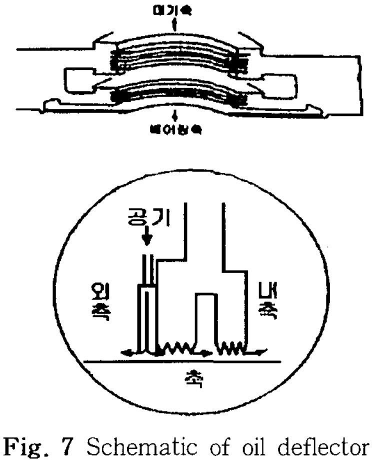


Fig. 7 Schematic of oil deflector

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

Oil deflector는 베어링에서 비산 되는 윤활유가 터빈 내부로 유입되는 것을 방지하기 위하여 베어링과 터빈 케이싱 사이에 설치해 둔 sealing 장치이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 oil deflector는 오일 탱크 내의 부압의 영향으로 외부 공기가 oil deflector의 내측으로 흡입되는 구조로 되어 있다. 따라서 외부 공기 내에 이물질이 다량 내포되어 있다면 쉽게 oil deflector 내의 tooth에 유입, 퇴적될 수 있다.

따라서 본 터빈의 고진동 현상은 로터와 oil deflector 부 seal tooth와의 간극 사이에 어떤 매개물이 일정량 이상의 두께로 퇴적되면 회전하는 로터와 퇴적물과의 rubbing이 발생하여 국부적인 로터 열변형을 야기 시켜 진동이 순간적으로 증가하게 되며 매개물이 로터와의 연속적인 접촉에 의하여 탈락하면 진동은 정상치로 돌아오는 과정을 반복한 것으로 예상되었다.[4, 5]

탈락된 매개물이 다시 퇴적되어 일정한 두께로 성장하기까지 걸리는 시간이 약 10~12 시간 정도 소요됨에 의해 본 터빈에서 발생하는 고진동 현상이 평균 2회/일 정도 반복적이면서 주기적으로 발생되었던 것으로 평가되어졌다.

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

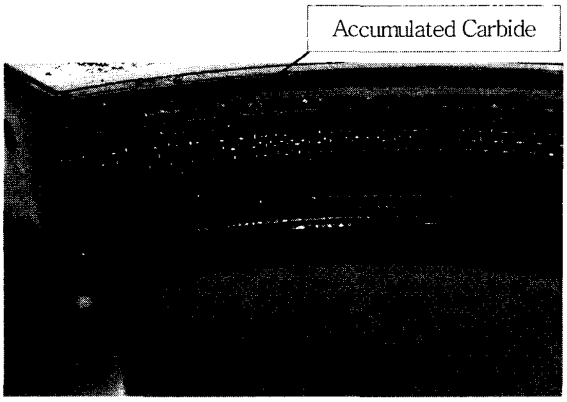


Fig. 8 Photograph of accumulated carbide on seal tooth at a oil deflector

Table 1 Chemical compositions of accumulated material

ID	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O	CaO	MgO	Na_2O	ZnO	MnO
Comp. (%)	57.0	18.9	12.3	6.5	1.4	2.4	1.5	0.5

4. Oil Deflector부 점검

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

Fig. 8은 oil deflector 부 seal tooth 내에 탄화물이 퇴적되어 있는 사진을 보여주고 있다. 탄화물은 딱딱하게 고형화 되어 있었으며 seal tooth 표면 및 tooth와 tooth 사이에 다량 퇴적되어 있었다.

Table 1은 탄화물의 생성 원인을 규명하기 위하여 탄화물을 수거하여 화학분석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 전체 성분 중 SiO_2 및 Al_2O_3가 전체 성분 중 약 80 % 정도임을 알 수 있는데 이는 탄화물의 성분이 보온재 가루임을 증명하는 것이다.

Oil deflector를 분해, 점검하여 탄화물의 퇴적 상태와 탄화물에 대한 화학성분을 분석함을 통해서, 본 터빈에서 발생한 주기적 고진동은 3절에서 평가한 메커니즘이 타당함을 입증하였다.

5. 대책수립 및 결과

본 터빈에서 발생한 주기적 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. 9에서 볼 수 있듯이 매우 엉성하게 설치되어 있었다. 즉, 보온재 커브가 찢어져 내부 재료가 들어 나 있음을 볼 수 있고, 마감처리가 제대로 되어 있지 않았다.

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. 10은 수정한 보온재의 설치 상태를 보여주고 있다.

위의 과정을 수행하고 터빈을 재기동한 결과, 문제가 발생했던 베어링(No. 1, No. 2, No. 4)에서의 주기적 고진동 현상은 완전 제거되어졌으며 약 7개월이 지난 현재까지 전 베어링에서 측정되는 진동은 70 μm(overall value, peak-peak) 이하로 정상 운전되고 있다.

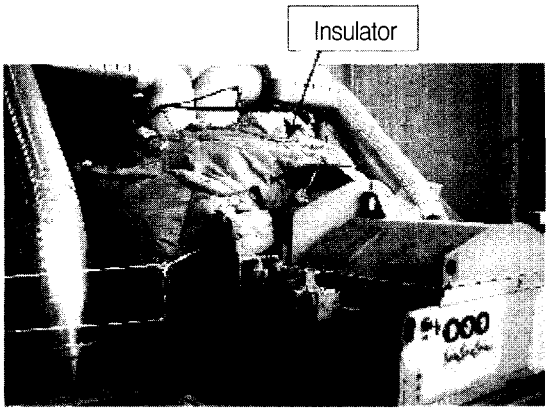


Fig. 9 Photograph of insulator installed on HIP casing

Fig. 10 Photograph of modified new insulator

6. 결 론

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

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

보온재 가루의 oil deflector 내 유입은 기 설치되어 있는 보온재의 마감처리가 제대로 수행되지 않았기 때문으로 평가되어졌다. 기존 보온재를 전량 제거하고 새 보온재를 설치한 후 마감처리를 개선함으로써 본 터빈에서 발생한 주기적 고진동 현상을 방지할 수 있었다.

본 사례 연구를 통해서 규명된 이상진동 현상에 대한 메커니즘은 향후 발전용 증기터빈뿐만 아니라 일반 산업용 회전설비의 유사 고진동 현상을 해결하는 자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 두산중공업(주) 기술연구원과 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

(1) 나운학, 신훈, 1999, "증기터빈의 설계기술 동향," 한국동력기계공학회지, 제 3 권, 제 1 호, pp. 9~14.

(2) 이안성, 홍성욱, 김호종, 이현, 1995, "스팀터빈 발전기 진동진단 시스템 개발," 한국소음진동공학회지 (현 논문집), 제 5 권, 제 4 호, pp. 543~554.

(3) 하현천, 최성필, 1999, "증기터빈의 Rubbing 진동," 한국동력기계공학회지, 제 3 권, 제 1 호, pp. 5~8.

(4) 이안성 외 9명, 1995, "발전설비 회전체계 진동진단 시스템 개발," 한국기계연구원.

(5) 양보석, 1998, "기계건강진단 사례집," 효성출판사.