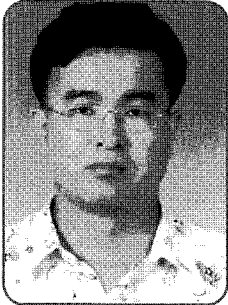


복합화력발전소 증기터빈 동익 손상원인 분석



한전전력연구원
수화력발전연구소
책임전문원/이우광
Tel : (042)865-5429

I. 서론

증기터빈 저압 최종단 동익은 터빈 성능에 상당한 영향을 미치기 때문에 터빈 제작사들은 터빈의 효율을 높이기 위하여 최첨단 기술을 적용하여 저압 최종단 동익을 개발하고 있다. 그 일환으로 최종단 동익의 길이를 크게 하고, integral shroud를 적용하는 경향이 있다. 최종단 동익의 길이 증가는 동익 tip의 원주속도를 상승시키고, 습분에 의한 침식(erosion) 문제를 가중시키며, 특히 shroud에서의 침식은 발전소의 안전운전에 크게 위협을 주고 있다.

본 논문에서는 최근에 발생한 복합화력발전소 증기터빈부의 저압터빈 최종단 동익 integral shroud의 손상에 대한 원인분석과 대책을 기술하였다.

II. 본론

1. 설비개요 및 손상내용

1.1 설비개요

손상이 발생한 설비는 복합화력발전소 증기터빈 최종

단 동익의 integral shroud 부분이며, 2002년부터 상업운전을 시작한 190MW 용량의 가스터빈 4대와 240MW 용량의 증기터빈 2대가 2개의 블록으로 구성되어 있다. 설비의 주요 규격은 Table 1과 같다.

1.2 손상내용

손상이 발생한 부분은 저압터빈은 최종단 동익의 integral shroud의 leading edge측 suction side tip 부분으로 저압터빈의 전방(고압터빈 측)에서 1개, 저압터빈의 후방(발전기 측)에서 2개가 탈락되었으며, 손상부위 및 손상상태는 Fig. 1과 같다.

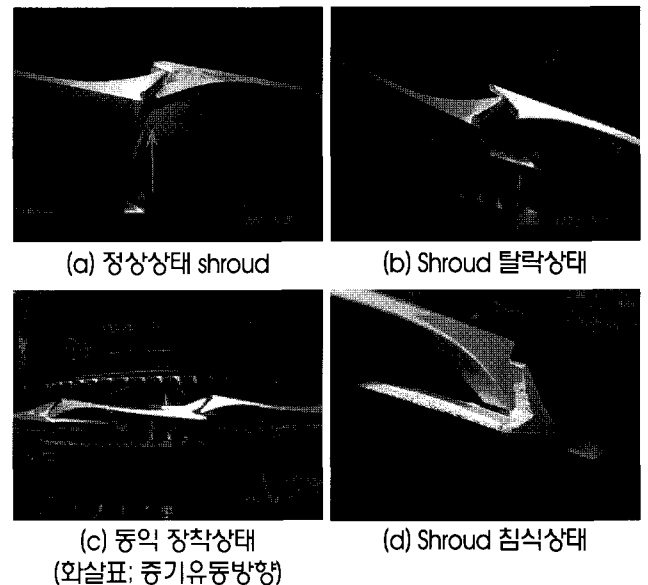


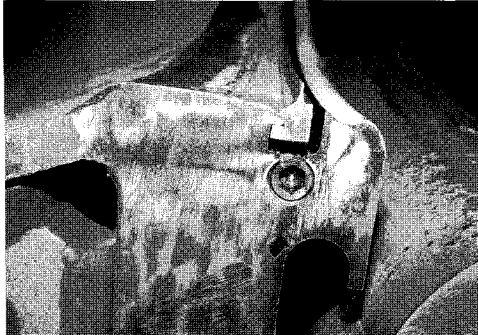
Fig. 1 저압터빈 최종단 동익 shroud 손상부위 및 손상상태

Fig. 1에서 보는 바와 같이 최종단 동익 shroud의 leading edge “V” 부위와 밑면에서 침식이 심하게 발

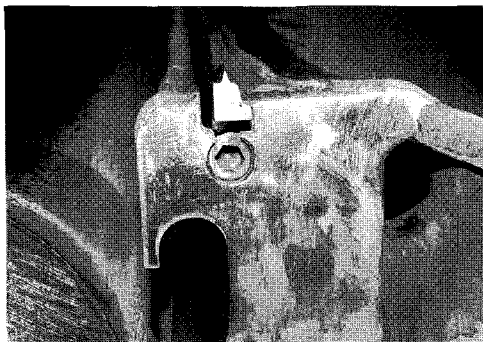
Table 1. 복합화력발전소 증기터빈 및 최종단 동익 주요 규격

증기터빈 주요 규격		저압터빈 최종단 동익 주요 규격	
Rated Output	243 MW	Blade Height	1,016 mm
Turbine Speed	3,600 rpm	Blade Type	Integral Shroud Blade
Condenser Vacuum	710 mmHg	Number of Blades	64 blades/row
Moisture Content	10.2%	Materia	117-4PH (Ni, Cr, Cu steel)
Operating Hours	33,559 hr (As of Oct.18, 2007)		

생하였음을 알 수 있다. Fig. 2는 최종단 동익 위치의 케이싱 침식상태를 보여 주는 그림으로서 그림에서 보는 바와 같이 케이싱 부위도 심하게 침식되었고, 케이싱의 우측 상하부 접합면은 케이싱 tip seal의 모재가 보일 정도로 침식이 진행되었음을 알 수 있다.



(a) 고압터빈측 케이싱 침식



(b) 발전기측 케이싱 침식

Fig.2 저압터빈 최종단 동익 위치의 케이싱 침식상태

2. 제작사 분석 내용 검토

2.1 손상상태 분석

가. 손상된 동익의 육안점검

손상된 동익의 외부 표면에 Brownish-red 현상이 보이며, 타흔(dent)의 흔적이거나 변형은 없었다.

나. 손상면에 대한 점검

손상면에 침식 흔적이 있고, Fig. 3과 같이 침식 면에서 균열이 시작되어 동익의 위쪽 대각선 방향으로 진행되었다.

다. 현미경에 의한 점검

현미경에 의한 점검결과 전형적인 martensite의 조직이고, 손상면의 노치효과와 피로한도에 미치는 표면효과를 점검하였다.

라. Shroud 접촉 표면의 복제물 전자현미경(SEM) 분석

Should 접촉면은 fretting wear의 흔적과

fretting fatigue의 흔적이 없었다.

마. 동익에 부착된 scale 분석

부식물을 분석한 결과 특별한 이상 성분은 없었다.

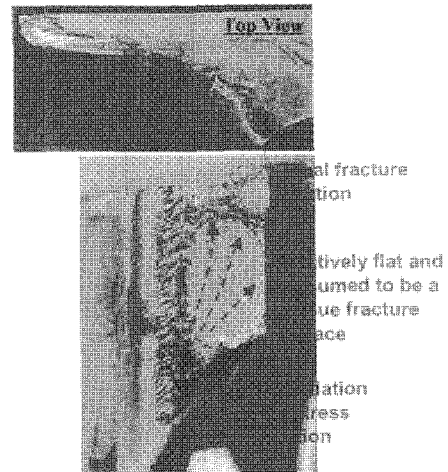


Fig. 3 손상된 동익의 손상 진행도

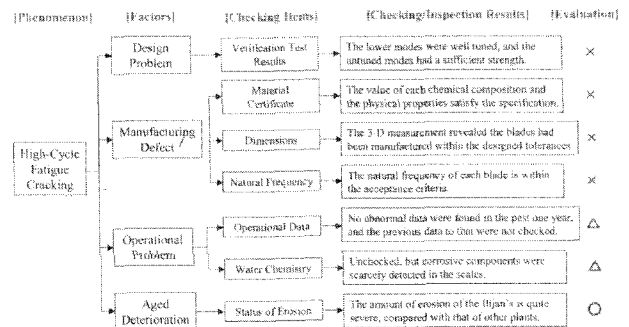


Fig. 4 손상원인 분석 흐름도

2.2 손상원인 분석 내용 검토

제작사가 손상의 근본원인을 도출하기 위하여 Fig. 4와 같은 흐름도(logic tree)를 작성하였으며, 손상발생 요인으로 운전 문제(operational problem)와 경년열화(aged deterioration)를 작성 제시하였다. 운전문제에 대해서는 운전자료(operational data)와 수질(water chemistry)을 점검하였으나 특별히 발견된 문제점이 없었다.

경년열화에 대해서는 침식상태(status of erosion)를 점검하였고, 그 결과 최종단 동익 tip shroud의 침식량은 다른 발전소에 비하여 상당히 크며, 아주 심각한 정도이었다. 제작사는 침식의 정도를 타 발전소와 정량적으로 비교하고, 침식으로 야기된 shroud root부 두께 감소, shroud root 응력집중부 정·동응력 증가, 동익의 4차 고유진동주파수의 8차 하모닉(harmonic)에의 접근 및 표면조도의 증가로부터 동익 손상 메커니즘을 언급하였다.

가. 침식

동익 손상이 발생된 발전소의 침식 상태를 점검한 결과 다른 발전소의 침식량과 비교하여 심각한 정도로 침식량이 많음을 언급한 바 있다. Fig. 5는 운전시간에 따른 침식의 정도를 나타낸 선도로서 제작사의 기술규격이나 기준과는 관련이 없는 참고자료이나 그림에서 보는 바와 같이 본 발전소는 33,000hr의 운전시간에도 불구하고 침식량이 크게 나타났다. Fig. 5에서 A 및 B 발전소는 용량이 150MW이고, 1999. 2월에 상업운전을 시작하였으며, 저압터빈이 single flow로 본 발전소와는 다르다. F 발전소는 용량이 700MW이고, 2002. 4월에 상업운전을 시작하였으며, double flow에 저압터빈이 2대이며, 최근에 본 발전소와 동일하게 shroud 일부가 탈락된 경험이 있다.

나. 동익 손상 메커니즘

손상 메커니즘은 Fig. 6과 같으며, 손상의 원인이 경년열화임을 주장하기 위하여 Fig. 7과 같은 피로한도에 미치는 정적응력과 진동응력 관계 선도를 제시하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 초기 설계값은 정적응력과 진동응력이 매우 낮은 안전한 곳에 위치하나 침식에 의하여 A→D의 과정을 통과하면서 실제 응력은 피로한도(fatigue limit)를 초과하였다.

- A : Shroud root의 형상 변경에 의한 정응력의 증가
- B : 4차 고유진동모드의 주파수 감소로 응답 factor가

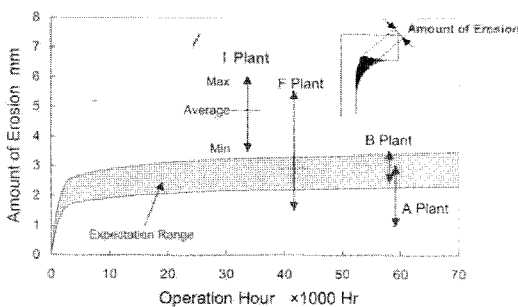


Fig. 5 운전시간-침식 그래프

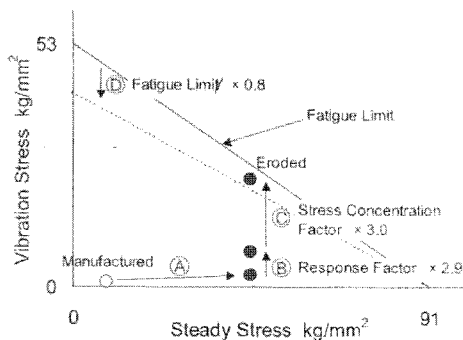


Fig. 7 피로한도에 미치는 정적응력과 진동응력

2.9배 증가

C : 표면거칠기 증가(notch 효과)로 응력집중계수가 3.0으로 증가

D : 표면거칠기 증가로 피로한도 감소

다. 제작사 결론

제작사가 제시한 결론은 다음과 같으며, 상당한 모순을 내포하고 있다.

『As the result of the investigation and analysis, it is presumed that the blades damages might be due to the high cycle fatigue, which was caused by an increase in the static stress and the vibration stress and a decrease in the fatigue limit, both of which were attributed to the development of erosion.』

라. 제작사가 제시한 손상원인에 대한 연구원의 견해

‘다’ 항에서 제작사가 제시한 동익 손상의 근본원인은 고사이클피로(high cycle fatigue)라고 하였으나 이 고사이클피로는 정·동응력의 증가 및 피로한도의 감소 원인은 침식 때문이라고 하였다.(Fig. 7 참조)

결과적으로 고사이클피로는 침식 때문에 야기된 것임을 알 수 있고, 침식이 손상의 근본원인이라고 설명해야만 옳다고 생각한다. 제작사는 의도적으로 침식이 손상의 근본원인임을 은폐하고 있다.

Fig. 7에서 제작사가 제시한 동익손상 메커니즘의 A, B, C 및 D 항 모두 과도한 침식과 직접적으로 연관

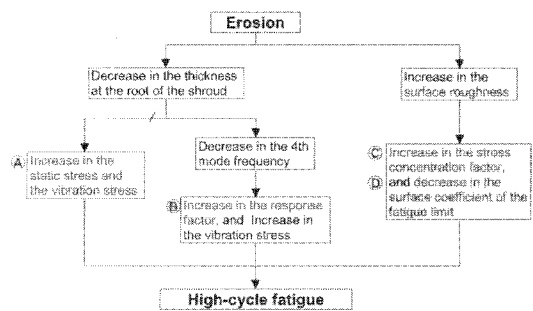


Fig. 6 동익 손상 메커니즘

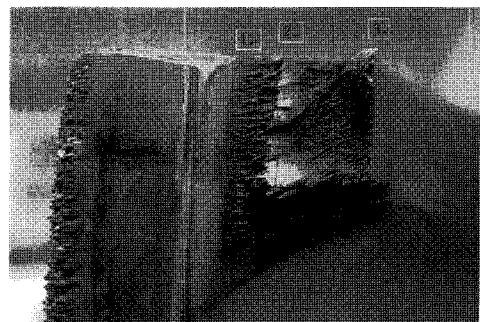


Fig. 8 동익 shroud tip 탈락 파편

되어 있기 때문에 고사이클피로가 손상의 근본원인이 될 수 없다. 즉, 제작사는 심각한 침식손상에 대한 원인을 밝히지 못하였다.

3. 전력연구원 손상원인 분석

3.1 원인분석 자료 검토

최종단 동익 shroud 손상의 원인을 규명하기 위하여 운전기록 및 열평형도 검토, 손상 동익의 육안점검, should의 파단면검사, 조직검사, 설계자료 분석 등을 수행하였다. 손상형태는 동익의 continuous coupled should area에 습분이 충돌(liquid droplet impacts)하여 과도한 침식이 발생되었다.

가. 침식 문제의 배경(EPRI)

- This damage has long been recognized as a limiting factor on the overall design of the turbine.
- As plant economics continue to push for improved efficiencies and ever higher output, liquid droplet impingement will continue to be a key form of turbine damage. The goals of greater mass flows, increased enthalpy extraction, greater blade length and higher blade tip speeds all tend to increase the problem created by wet steam.
- The problem is exacerbated in longer blades because of higher tip speeds.

나. 제작사의 설계 특징(design feature)

- High Efficiency
- High Reliability …………… ?
- High Operation
- Easy Maintenance

위와 같은 설계 특징에서 High Reliability는 금번에 발생된 동익의 손상으로 볼 때 상반된다.

그리고, 40inch 길이의 동익에 대한 제작사의 설계 기준(design basis)은 다음과 같다;

『Efficiency and Reliability of low pressure end blade remarkably affects the turbine plant performance and availability.

The manufacture is continuously developing low pressure end blades using latest technology in order to achieve higher reliability, improved efficiency and operational flexibility.』

이번 손상으로 발전소 성능 및 열효율을 심각하게 감소시켰다.

다. 침식 관리기준

2006년 8월에 최종단 동익의 shroud 부위에서 과도한 침식이 발생하여 제작사에게 통보하여 향후 대책을 요청한 바 있으며, 제작사는 최종단 동익에 대한 침식 관리기준(erosion control criteria of the integrated shroud blades)를 제시하여 특이하게 주의할 필요가 없다고 하였다.

이 관리기준은 신형의 40inch 최종단 동익에 적용하기에는 불가능하였고, 제작사는 continuous coupled shroud area의 침식을 설계 시부터 예상하지 못한 것으로 판단된다. 즉, 제작사는 40inch 최종단 동익의 shroud area에 대한 침식 관리기준이 없다.

3.2 손상원인 분석

가. 운전자료 검토

운전기록 검토결과 문제가 될만한 특이사항은 없었고, 열평형도 검토결과도 비정상적 사항은 없었다.

- Tip speed : 670 m/sec
- % moisture : 9%(design limit : 12%)
- Exhaust loading : 11.43 kg/s/m² (design limit : 20kg/s/m²)

나. 파단면 분석

Fig. 8은 동익 shroud tip의 탈락된 파면에 대한 사진이다. 파단은 최종단 동익의 shroud leading edge측 suction side tip 부분이 탈락되었다. Should tip 탈락은 leading edge 측 shroud 끝 부분에 습증기가 충돌하면서 침식이 발생하고 이에 따른 노치(notch)가 형성되어 최종 파단에 이른 것으로 판단된다.

파면의 특징은 습증기에 의한 침식("1" 영역)과 "3"으로 표기된 부분을 제외한 전 파면영역에서 피로파괴의 경향("2" 영역)이 완연함을 알 수 있고, 파단면의 거시적 형상과 형태로 보아 전형적인 고사이클피로 파면으로 보는 것이 타당하다.

- 1 영역 : 피로균열 이전의 초기 침식
- 2 영역 : 초기 침식으로 형성된 노치 부위에서 피로균열 시작
- 3 영역 : 피로균열이 성장하여 shroud tip의 일부 탈락

다. 유사 발전소 최종단 동익 운전 사례

Fig. 9는 유사 발전소 최종단 동익 침식 사례를 보여 주는 그림으로서 40 inch 최종단 동익의 침식상태와 동익 선단의 shroud 형태를 비교하였다. 유사 발전

소의 40 inch 최종단 동익은 Titanium 재질을 사용하고 있다.

최종단 동익의 길이가 길어짐에 따라 동익 선단의 원주속도(713, 671m/s)가 높아지며, 이에 따라 침식문제가 다른 발전소의 최종단 동익에서도 발생하고 있으나, Fig. 9에서와 같이 shroud의 형태가 침식에 견디도록 설계되어 있기 때문에 장기간 운전에도 불구하고 심각한 문제가 발생되지 않고 있다.

라. 손상의 근본원인

금번 손상이 발생한 본 발전소의 40 inch 최종단 동익은 정상 수준의 습분함유율(9~10%) 임에도 불구하고 shroud의 부적절한 형상 설계로 인해 형성된 골부위에 Fig. 10과 같이 습증기가 충돌하여 심각하게 침식된다는 것이다.

이 침식으로 인해 된 shroud의 “V” 부위에 날카로운 노치가 형성되었다. 이 노치 부위는 제한값 이하의 진동조건 하에서 고사이클피로에 의하여 시작되고, 진전되어 최종적으로 파단되었다.

동익에 대한 품질(quality)은 설계자(designer)의 책임이고, 손상된 동익의 설계수명은 200,000시간(25년)이나, 본 저압터빈 최종단 동익은 28,800시간 만에 파단되어 초기의 계약조건을 만족하지 못하였다. 금번 손상에 대한 근본적인 해결방안은 shroud의 설계를 변경해야 될 것으로 판단된다.

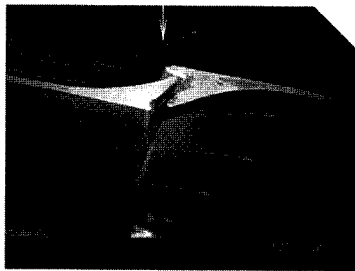


Fig. 10 동익 shroud 부근의 수적(水滴) 예상 궤적

III. 결론

복합화력발전소 증기터빈 최종단 동익 integral shroud 손상의 원인을 규명하기 위하여 운전기록 검토, 열평형도 검토, 손상된 동익의 육안점검, shroud의 파단면검사, 조직검사, 설계자료 분석 등을 수행하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 동익 손상의 원인은 부적절한 shroud 형상 설계로 인해 발생한 것으로 판단된다. 손상 메카니즘은 과도한 침식에 의해 노치가 형성되고, 고사이클피로로 인해 균열이 시작, 성장하여 파단된 것으로 사료된다.

2) 손상의 주원인인 과도한 침식을 방지하기 위해서는 동익 설비개선이 불가피하고, 향후 동일한 설계의 증기터빈에 대한 손상방지 대책도 수립하여야 한다.

3) 동익 손상의 원인이 과도한 침식(제작사 책임)임을 확인하고, 손상 복구경비(약 20억원)중 10억원을 제작사가 부담하게 하여, 회사손실을 절감하였다.

4) 대형사고를 사전에 방지하여 1년간 약 2,400억원(판매수익기준, 발전단가 1kW당 45원)의 손실을 예방하였다.

참고문헌

1. T. H. McCloskey, R. B. Dooley “Turbine Steam Path Damage ; Volume 2 : Damage Mechanisms Electric Power Research Institute and W.P. McNaughton Cornice Engineering. Inc, 1999, pp.27-1~27-28
2. B. R. King, “The steam turbine-generator today Materials flow path design repair and refurbishment - 1993 International Joint Power Generation Conference Kansas city, Missouri, 1993
3. Alexander Leyzerovich, “Large Power Steam Turbines: Design and Operation Volume I , Pennwell Boos 1997

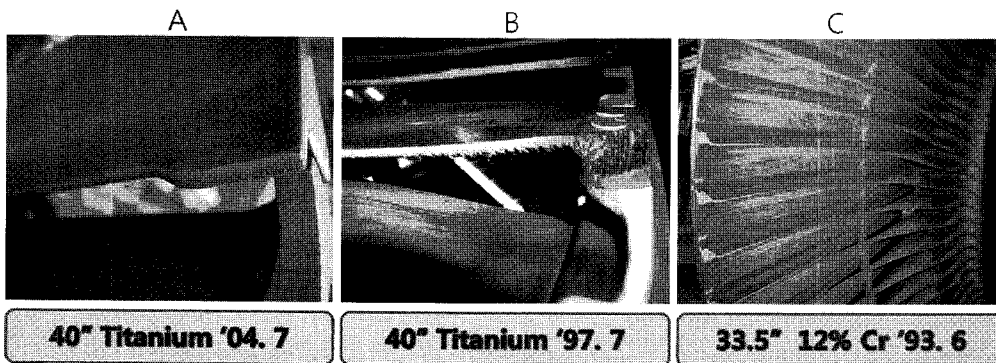


Fig. 9 유사 발전소 최종단 동익 침식 사례