

복합화력발전소 증기터빈 동익 손상 원인분석 Root Cause Analysis on the Steam Turbine Blade Damage of the Combined Cycle Power Plant

강명수 · 김계연 · 윤완노 · 이우광
M. S. Kang, K. Y. Kim, W. N. Yun and W. K. Lee

(접수일 : 2008년 7월 17일, 수정일 : 2008년 8월 25일, 채택확정 : 2008년 8월 29일)

Key Words : Combined Cycle Power Plant(복합화력발전소), Steam Turbine(증기터빈), Last Stage Blade(최종단 동익), Crack(균열), Integral Shroud(일체형 슈라우드), Root Cause Analysis(원인분석)

Abstract : The last stage blade of the low pressure steam turbine remarkably affects turbine plant performance and availability. Turbine manufacturers are continuously developing the low pressure last stage blades using the latest technology in order to achieve higher reliability and improved efficiency. They tend to lengthen the last stage blade and apply shrouds at the blades to enhance turbine efficiency. The long blades increase the blade tip circumferential speed and water droplet erosion at shroud is anticipated. Parts of integral shrouds of the last stage 40 inch blades were cracked and liberated recently in a combined cycle power plant. In order to analyze the root cause of the last stage blades shroud cracks, we investigated operational history, heat balance diagram, damaged blades shape, fractured surface of damaged blades, microstructure examination and design data, etc. Root causes were analyzed as the improper material and design of the blade. Notches induced by erosion and blade shroud were failed eventually by high cycle fatigue. This paper describes the root cause analysis and countermeasures for the steam turbine last stage blade shroud cracks of the combined cycle power plant.

1. 서 론

저압 증기터빈 최종단 동익은 터빈 성능에 상당한 영향을 미치기 때문에 터빈 제작사들은 터빈의 효율을 높이기 위하여 최첨단 기술을 적용하여 저압 최종단 동익을 개발하고 있다.^{1~4)} 그 일환으로 최종단 동익의 길이를 크게 하고, 일체형 슈라우드(integral shroud)를 적용하는 경향이 있다. 최종단 동익의 길이 증가는 동익 tip의 원주속도를 상승시키고, 습분에 의한 침식(erosion) 문제를 가중시키며, 특히 슈라우드(shroud)에서의 침식은 발전소의 안전운전에 크게 위협을 주고 있다.

본 논문에서는 최근에 발생한 복합화력발전소 증기터빈부의 저압터빈 최종단 동익의 일체형 슈라우드 손상에 대한 원인분석과 대책을 기술하였다.

2. 설비개요 및 손상특성

2.1 설비개요

손상이 발생한 설비는 복합화력발전소 저압 증기터빈 최종단 동익의 일체형 슈라우드 부분이며, 2002년부터 상업운전을 시작한 190 MW 용량의 가스터빈 4대와 240 MW 용량의 증기터빈 2대가 2개의 블록으로 구성되어 있다. 설비의 주요 규격은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Specification of the steam turbine

Rated output	243 MW
Turbine speed	3,600 rpm
Condenser vacuum	710 mmHg
Moisture content	10.2%
Operating hours	33,559 Hr(As of Oct.18, '07)

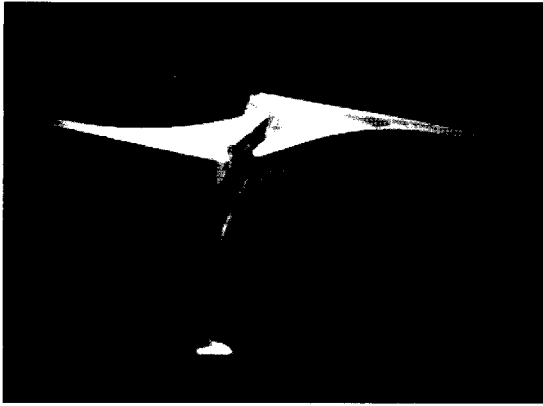
Table 2 Specification of the last stage blade of the low pressure steam turbine

Blade height	1,016 mm
Blade type	Integral shroud blade
Number of blades	64 blades/row
Material	17-4 PH (Ni, Cr, Cu steel)

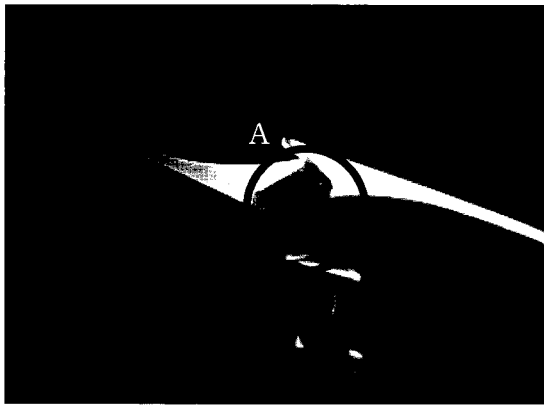
강명수(책임저자) : 한전 전력연구원 수화력발전연구소
E-mail : mskang@kepco.co.kr, Tel : 042-865-5422
김계연, 윤완노, 이우광 : 한전 전력연구원 수화력발전연구소

2.2 손상특성

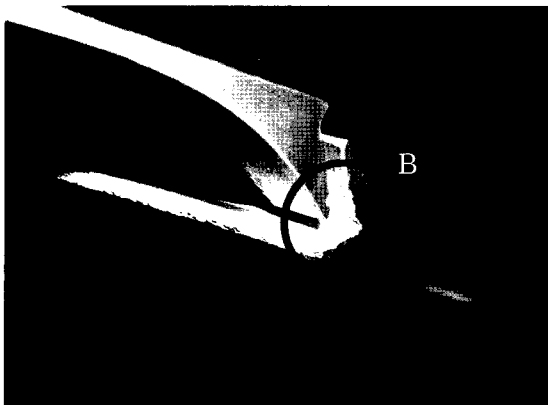
손상이 발생된 부분은 저압 증기터빈 최종단 동익 일체형 슈라우드의 leading edge측 suction side tip 부분으로 저압터빈의 전방(고압터빈 측)에서 1개, 저압터빈의 후방(발전기 측)에서 2개가 탈락되었으며, 탈락부위는 Fig. 1 (b)의 "A" 부분과 같으며, 손상상태는 Fig. 1 (c)의 "B" 부분과 같다.



(a) Normal state of shroud



(b) Damaged shroud



(c) Erosion state of shroud

Fig. 1 Damaged part and state of the last stage blades shroud

Fig. 1 (c)에서 보는 바와 같이 최종단 동익 슈라우드의 leading edge "V" 부위와 밀면에서 침식이 심하게 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 2는 최종단 동익 위치의 케이싱 침식상태를 보여 주는데, 그림에서 보는 바와 같이 케이싱 부위도 심하게 침식되었고, 케이싱의 우측 상하부 접합면은 케이싱 tip seal의 모재가 보일정도로 침식이 진행되었음을 알 수 있다.

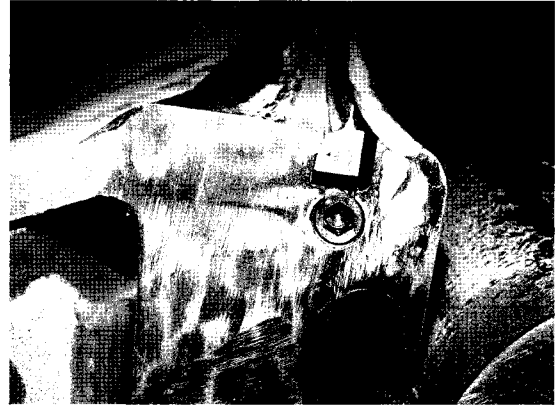
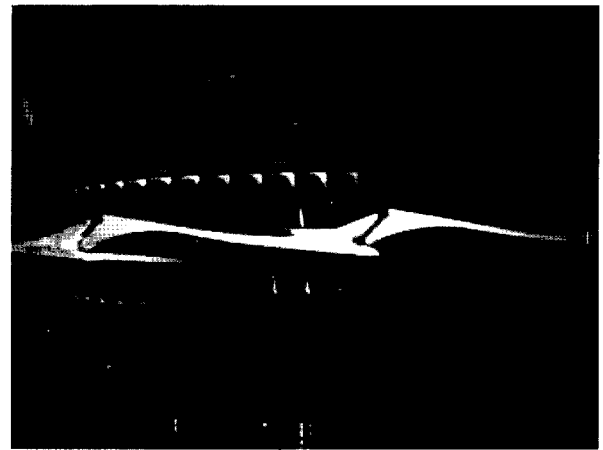


Fig. 2 Casing erosion state in the last stage blades position



(direction of the steam flow)

Fig. 3 The last stage blades of the integral shroud type

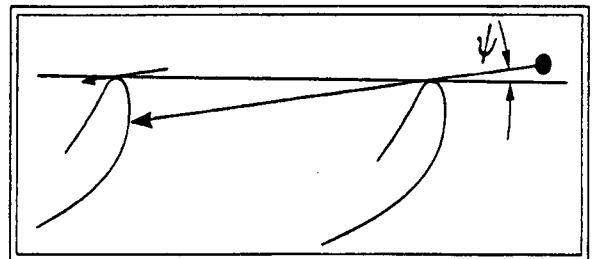


Fig. 4 The shadow angle ' ψ ' of water droplets entering the moving blade row

2.3 일체형 슈라우드의 특징 및 역할

일체형 슈라우드는 동익의 원주방향 열팽창과 untwist 현상에 의한 구속을 자유롭게 하면서 증기의 흐름을 효율적으로 유지해 주는 역할을 한다. 일체형 슈라우드 형식의 최종단 동익은 Fig. 3과 같으며, 구조적으로 일체형 슈라우드의 interlocking되는 부위는 강성 증가, 진동 억제, 감쇠(damping)의 효과를 제공하기 때문에 어떤 가진력이 발생될 때 동익의 동력학적인 응답을 크게 감소시키게 된다.

이러한 가진력은 정상적인 부하 운전중 증기 흐름의 불균일성(non-uniformity)과 저부하 또는 배압이 너무 높은 상태에서 운전될 때(복수기 진공이 나쁠 때) 발생되고, 증기 흐름이 불안정(unsteady)할 때 발생된다. 이 경우 최종단으로 유입되는 입사각이 Fig. 4와 같이 설계치를 벗어나게 되어 동익의 buffeting이나 stall flutter가 발생할 수 있다.

일체형 슈라우드 형식의 interlocking은 이러한 조건에서 발생하는 여러가지 진동모드를 억제할 뿐만 아니라 여러가지 운전조건으로 인해 동익에서 발생하는 동력학적인 힘을 크게 감소시킨다. 또한, 동익에 진동이 발생될 때 interlocking되는 하중면(load face)에 감쇠 효과를 제공한다. 만일 interlocking 부위의 손상으로 이러한 역할을 수행할 수 없는 경우에는 가진력 발생 시 최종단 동익의 손상이 발생할 수 있고, 동익 손상은 설비의 대형 파급손상을 불러올 수 있다.

3. 제작사 분석 내용 검토

3.1 손상상태 분석

1) 손상된 동익의 육안점검

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

2) 손상면에 대한 점검

손상면에 침식 흔적이 있고, Fig. 5와 같이 침식면에서 균열이 시작되어 동익의 위쪽 대각선 방향으로 진행되었다.

3) 현미경에 의한 점검

현미경에 의한 점검결과 전형적인 마르텐사이트(martensite)의 조직이고, 손상면의 노치(notch)효과와 피로한도(fatigue limit)에 미치는 표면효과를 점검하였다.

4) 슈라우드 접촉 표면의 복제물 전자현미경 분석 전자현미경(SEM) 분석결과 슈라우드 접촉면은

fretting wear의 흔적이거나 fretting fatigue의 흔적이 없었다.

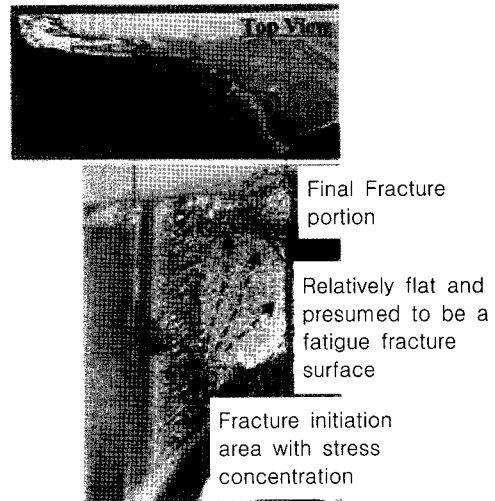


Fig. 5 External observation of the damaged portion

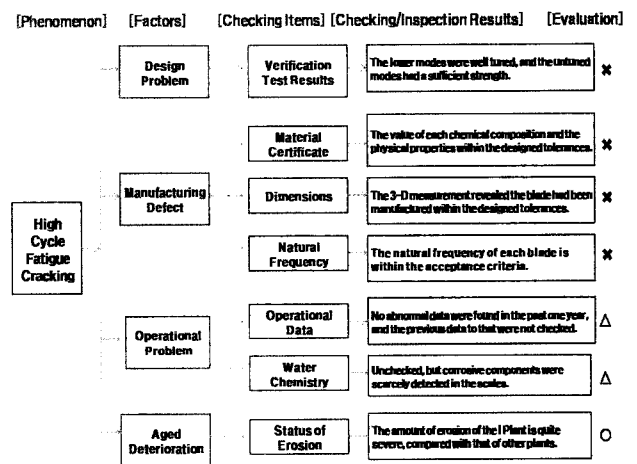


Fig. 6 Logic tree of the root causes analysis

5) 동익에 부착된 scale 분석

부식물을 분석한 결과 특별한 이상 성분은 없었다.

3.2 손상원인 분석

제작사가 손상의 근본원인을 도출하기 위하여 Fig. 6과 같은 흐름도(logic tree)를 작성하였으며, 손상발생 요인으로 운전 문제(operational problem)와 경년 열화(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 슈라우드의 침식량은 다른 발전소에 비하여 상당히 크며, 아주

심각한 정도이었다. 제작사는 침식의 정도를 타 발전소와 정량적으로 비교하고, 침식으로 야기된 슈라우드 루트(root)부 두께 감소, 슈라우드 루트 응력집중부의 정·동응력 증가, 동익의 4차 고유진동주파수의 8차 하모닉(harmonic)에의 접근 및 표면조도의 증가로부터 동익 손상 메커니즘을 언급하였다.

1) 침식

동익 손상이 발생된 발전소의 침식 상태를 점검한 결과 Fig. 7과 같이 다른 발전소의 침식량과 비교하여 심각한 정도로 침식량이 많음을 언급한 바 있다. Fig. 7은 운전시간에 따른 침식의 정도를 나타낸 선도로서 제작사의 기술규격이나 기준과는 관련이 없는 참고자료이나 Fig. 7에서 보는 바와 같이 본 발전소(I Plant)는 33,000 시간의 운전에도 불구하고 침식량이 크게 나타났다. Fig. 7에서 A 및 B 발전소는 용량이 150 MW이고, 1999. 2월에 상업운전을 시작하였으며, 저압터빈이 single flow로 본 발전소와는 다르다. F 발전소는 용량이 700 MW이고, 2002. 4월에 상업운전을 시작하였으며, double flow에 저압터빈이 2대이며, 최근에 본 발전소와 동일하게 슈라우드 일부가 탈락된 경험이 있다.

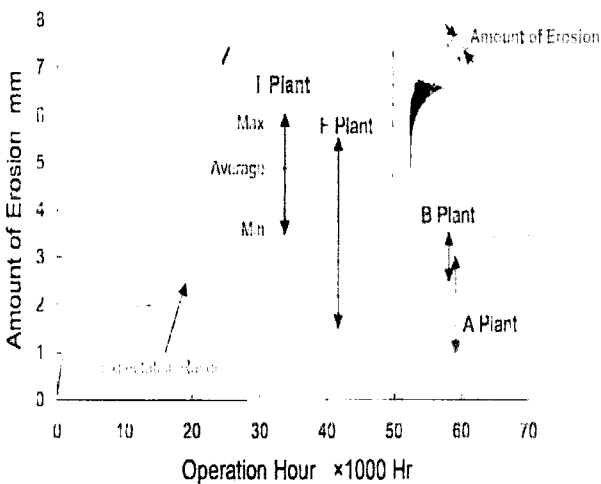


Fig. 7 Diagram of the amount of erosion to operating hour

2) 동익 손상 메커니즘

손상 메커니즘은 Fig. 8과 같으며, 손상의 원인이 경년열화임을 주장하기 위하여 Fig. 9와 같은 피로한도에 미치는 정적응력과 진동응력 관계 선도를 제시하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 초기 설계값은 정적응력과 진동응력이 매우 낮은 안전한 곳에 위치

하나 침식에 의하여 A→D의 과정을 통과하면서 실제 응력은 피로한도를 초과하였다.

- A : 슈라우드 루트 형상변경에 의한 정응력 증가
- B : 4차 고유진동모드의 주파수감소로 응답 factor 2.9배 증가
- C : 표면거칠기 증가(notch 효과)로 응력집중계수 3배 증가
- D : 표면거칠기 증가로 피로한도 감소

3) 제작사 결론

제작사가 제시한 결론은 다음과 같으며, 상당한 모순을 내포하고 있다.

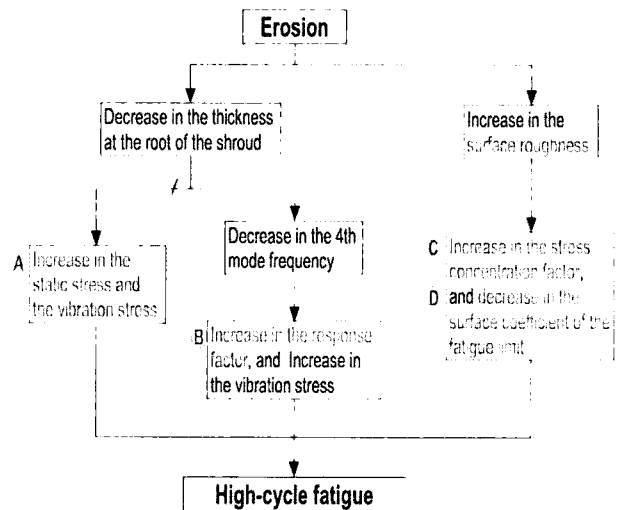


Fig. 8 Failure mechanism of the last stage blade

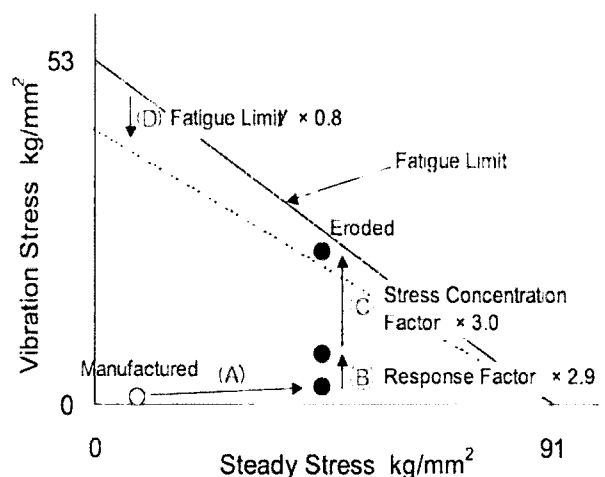


Fig. 9 Steady stress and vibration stress contributing to the fatigue limit

『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.』

4) 제작사가 제시한 손상원인에 대한 연구팀의 견해

‘3) 항에서 제작사가 제시한 동익 손상의 근본원인은 고사이클피로(high cycle fatigue)라고 하였다. 그러나 고사이클피로는 정·동응력의 증가 및 피로한도의 감소에 의한 것이고, 이 원인은 침식 때문이라고 하였다.(Fig. 9 참조) 결과적으로 고사이클피로는 침식 때문에 야기된 것이고, 침식이 손상의 근본원인을 알 수 있다. 제작사는 의도적으로 손상의 근본원인이 침식이 아닌 고사이클피로에 의한 것이라고 설명하고 있다.

Fig. 9에서 제작사가 제시한 동익손상 메카니즘의 A, B, C 및 D 항 모두 과도한 침식과 직접적으로 연관되어 있기 때문에 고사이클피로가 손상의 근본원인이 될 수 없다. 즉, 제작사는 심각한 침식손상에 대한 원인을 제시하지 못하였다.

4. 손상 원인분석 결과

4.1 원인분석 자료 검토

최종단 동익 슈라우드 손상의 원인을 규명하기 위하여 운전기록 및 열평형도 검토, 손상 동익의 육안 점검, 슈라우드의 파단면검사, 조직검사, 설계자료 분석 등을 수행하였다. 손상형태는 동익의 일체형 슈라우드 부위(continuous coupled should area)에 습분이 충돌(liquid droplet impacts)하여 과도한 침식이 발생되었다.

1) 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 tent to increase the problem created by wet steam.

- The problem is exacerbated in longer blades because of higher tip speeds.

2) 제작사의 설계 특징(design feature)

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

위와 같은 설계 특징에서 ‘High Reliability’는 금번에 발생한 동익의 손상으로 볼 때 상반된다.

그리고, 40 inch 길이의 동익에 대한 제작사의 설계기준(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.』

상기와 같은 설계기준에도 불구하고 이번 손상으로 발전소 성능 및 열효율을 심각하게 감소시켰다.

3) 침식 관리기준

2006년 최종단 동익의 슈라우드 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 40 inch 최종단 동익에 적용하기에는 불가능하였고, 제작사는 일체형 슈라우드 부위의 침식을 설계 시부터 예상하지 못한 것으로 판단된다. 즉, 제작사는 40 inch 최종단 동익의 슈라우드 부위에 대한 침식 관리기준이 없다.

4.2 손상 원인분석

1) 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 : 20 kg/s/m²)

2) 파단면 분석

Fig. 10은 동익 슈라우드 tip의 탈락된 파면에 대한 사진이다. 파단은 최종단 동익의 슈라우드 leading edge측 suction side tip 부분이 탈락되었다. 슈라우드 tip 탈락은 leading edge 측 슈라우드 골 부분에 습증기가 충돌하면서 침식이 발생하고 이에 따른 노치가 형성되어 최종 파단에 이른 것으로 판단된다.

파면의 특징은 습증기에 의한 침식("1" 영역)과 "3"으로 표기된 부분을 제외한 전 파단면 영역에서 피로파괴의 경향("2" 영역)이 완전함을 알 수 있고, 파단면의 거시적 형상과 형태로 보아 전형적인 고사이클피로 파면으로 볼 수 있다.

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

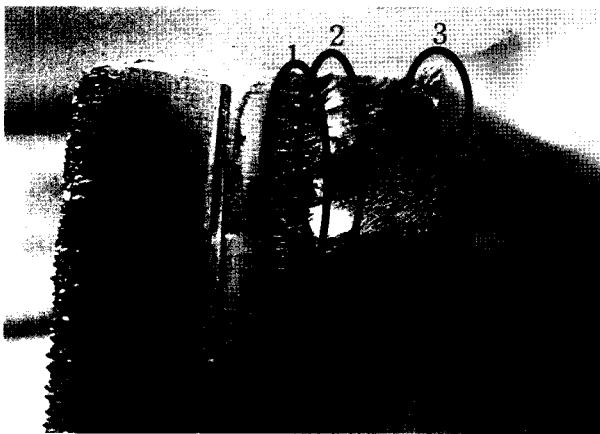


Fig. 10 Fracture surface of the blade shroud tip

3) 유사 발전소 최종단 동익 운전 사례

Fig. 11은 유사 발전소 최종단 동익 침식 사례를 보여 주는 그림으로서 40 inch 최종단 동익의 침식상태와 동익 선단의 슈라우드 형태를 비교하였다. 유사 발전소의 40 inch 최종단 동익은 티타늄(titanium) 재질을 사용하고 있다.

최종단 동익의 길이가 길어짐에 따라 동익 선단의 원주속도(713 m/s)가 높아지며, 이에 따라 침식문제가 다른 발전소의 최종단 동익에서도 발생하고 있으나, Fig. 11에서와 같이 슈라우드의 형태가 침식에 견디도록 설계되어 있기 때문에 장기간 운전에도 불구하고 심각한 문제가 발생되지 않고 있다.

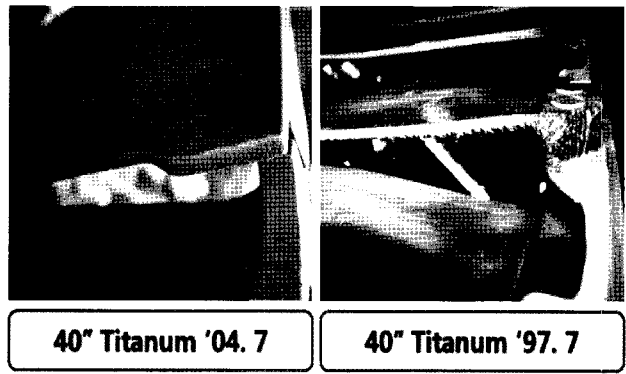


Fig. 11 Erosion examples of the last stage blade in domestic power plant

4) 손상의 근본원인

금번 손상이 발생한 본 발전소의 40 inch 최종단 동익은 정상 수준의 습분함유율(9~10 %) 임에도 불구하고 슈라우드의 부적절한 형상 설계로 인해 형성된 골 부위에 Fig. 12와 같이 습증기가 충돌하여 심각하게 침식된다는 것이다.

이 침식으로 인해 슈라우드의 "V" 부위에 날카로운 노치가 형성되었다. 이 노치 부위는 제한값 이하의 진동조건 하에서 고사이클피로에 의하여 시작되고, 진전되어 최종적으로 판단되었다.

동익에 대한 품질(quality)은 설계자(designer)의 책임이고, 손상된 동익의 설계수명은 200,000 시간(25년)이나, 본 저압터빈 최종단 동익은 28,800 시간만에 파단되어 초기의 계약조건을 만족하지 못하였다. 금번 손상에 대한 근본적인 해결방안은 슈라우드의 설계를 Fig. 11과 같은 형태로 변경해야 될 것으로 판단된다.

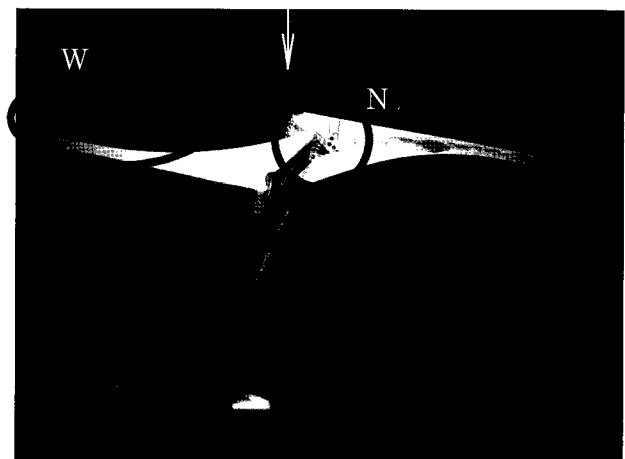


Fig. 12 Water droplets path around blade shroud

5. 결 론

복합화력발전소 증기터빈 최종단 동익 일체형 슈라우드의 손상원인을 규명하기 위하여 운전기록 검토, 열평형도 검토, 손상된 동익의 육안점검, 슈라우드의 파단면검사, 조직검사, 설계자료 분석 등을 수행하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 동익 손상의 원인은 부적절한 슈라우드 형상 설계로 인해 발생된 것이며, 손상 메카니즘은 과도한 침식에 의해 노치가 형성되고, 고사이클피로로 인해 균열이 시작, 성장하여 파단된 것이다.

2) 손상의 주원인은 일체형 슈라우드의 취약부위에 습득침식에 의한 것이다. 이러한 습분에 의한 침식은 필연적으로 발생하는 것이므로 이 부위를 Fig. 11과 같은 형태로 설계를 변경하여야 한다.

3) 동익 손상의 원인이 설계 결함(과도한 침식)임을 확인하고, 막대한 손상 복구비를 해외제작사가 부담하게 하여, 국고손실을 절감하였다.

참고 문헌

1. T. H. McCloskey, R. B. Dooley, 1999, "Turbine Steam Path Damage; Damage Mechanisms", Vol. 2, Electric Power Research Institute and W.P. McNaughton Cornice Engineering Inc., pp. 27-1 ~ 27-28.
2. B. R. King, 1993, "The Steam Turbine Generator Today - Materials, Flow Path Design, Repair and Refurbishment", International Joint Power Generation Conference, Kansas City, Missouri.
3. Alexander Leyzerovich, 1997, "Large Power Steam Turbines: Design and Operation", Vol. 1, Pennwell Boos.
4. 강명수의 3인, 2007, "축류 압축기 블레이드 손상 시 터빈부품에 미치는 영향", 한국동력기계공학회, 제11권 제3호.