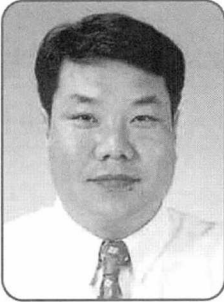


터빈 동익(Blade) 진동(Ⅱ -2)

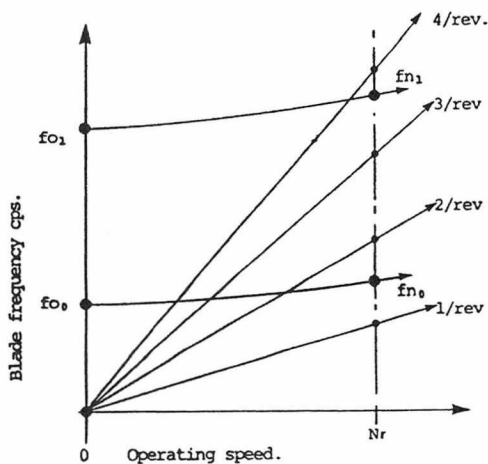


한진KPS(주) 기술연구원
책임전문원 김성봉
Tel : (031)710-4393

5. The Campbell Diagram

Campbell Diagram은 동익은 기본 주파수와 조화 주파수를 회전 속도의 함수로 그래프화 시킨 것의 대표적인 것이다. 이 그래프는 운전 중 동익이 위험 영역을 피해서 안전하게 운전 할 수 있는지 판별하는데도 이용된다.

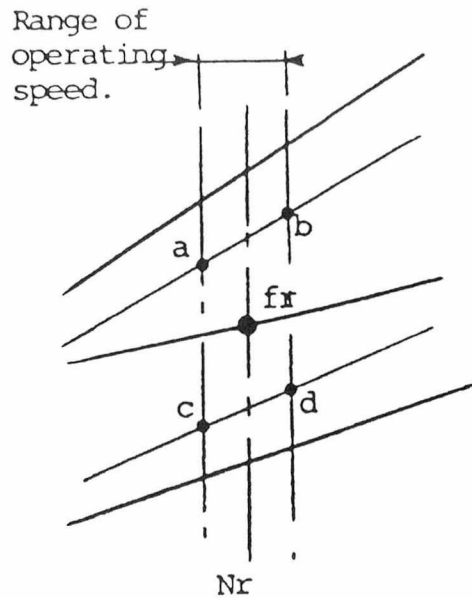
아래 그림은 최종 동익으로 1X-2X 구역에서 기본 주파수가, 3X-4X영역에서 1차 조화 주파수가 발생하는 전형적인 Campbell Diagram을 나타내고 있다. 이 그림에서 2차 조화 주파수와 비틀림(Torsional) 주파수는 5X 이상에서 발생하므로 이 그래프에는 표시되지 않았다. 이 동익의 경우에 F_0 는 정지 주파수이다. 이는 N_0 의 회전수로 운전 할 때 발생한다. 로타 속도가



[그림 6] 1-2구역에 기본 주파수가 있고, 3-4구역에 1차 조화 주파수가 있는 Campbell Diagram

N_r 까지 증가함에 따라 기본 주파수도 F_{n0} 까지 증가한다. 1차 조화 주파수는 F_{o1} 에서 나타나기 시작하여 로타 속도가 증가함에 따라 운전 속도에서 조화 주파수인 F_{n1} 까지 증가한다. 결국 이 그래프는 정상 운전속도에서 1X-2X 영역 사이에 기본 주파수가 있고 3X-4X 영역 사이에 1차 조화 주파수 있다는 것을 말하고 있다.

모든 동익은 수많은 고유주파수를 가지는데 운전 중 이 고유주파수와 가진 주파수인 회전주파수 및 그 Harmonic 성분(1X, 2X, 3X ……)이 서로 만나 공진(Resonance)이 발생하지 않도록 설계하는 것이 원칙이다.



[그림 7] Diagram 확대 (안전영역)

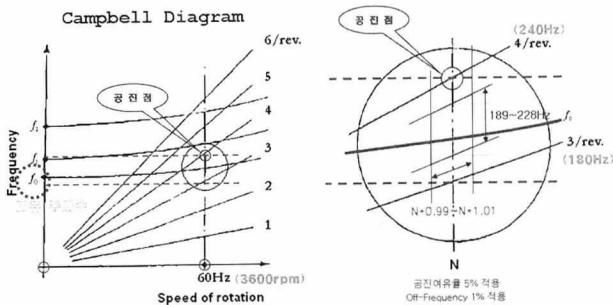
Campbell Diagram은 단순히 Diagram상의 선이 서로 겹치지 않도록 하는 것이 아니라 일정한 공진 영향권이 형성되는데, 주로 제작사들은 동익에 적용할 주파수 허용오차를 찾기 위해 조금은 다른 개념을 채용하며 대부분 주파수 영역을 $\pm\%$ 로 정하거나 \pm cps로 정하며, 다행히도 정해진 허용오차 적용 시 그 크기에서 어떤 편차가 존재하므로 유사한 결과를 가져온다. 어떤 경우든 이들 허용오차는 Campbell Diagram에 나타난다.

허용오차 구간의 Specification은 일반적으로 계산에 의한 1차 조화 주파수 모드에 따라 제작사에 의해 선택된다.

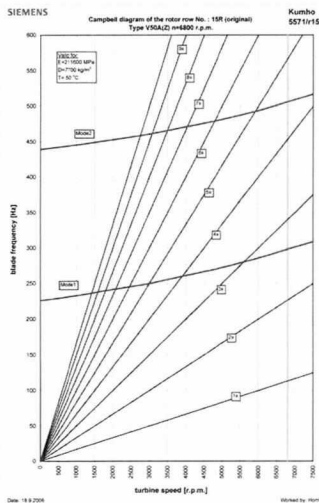
이 동익은 2배수나 3배수에 의해 가진될 염려가 없는 운전영역에 놓이게 된다. 또한 이 Diagram이 보여주는 것은 터빈이 안전한 상태로 운전되도록 제작사가 부여한 운전속도 범위이다. [그림 7]에서 $\pm \Delta N$ 의 “abcd”로 정해진 속도변화 구간은 운전 중 안전영역에 해당되는 동익 운전주파수이다.

아래에 또 다른 예([그림 8] 참조)가 있는데 이는 가진 주파수인 3배와 4배 회전주파수 Line 사이에서 3배 주파수 5% 상한 값과 4배 주파수 5% 하한 값의 범위가 수직 안전범위이고 Off-Frequency 한계를 1%(*GE계열 40”Stage L-O의 예)로 할 때 회전수(N)의 좌·우 1% 영역인 $N \cdot 0.99 \sim N \cdot 1.01$ 이 수평 안전범위이며 이들이 만드는 마름모꼴 영역이 안전영역이 되는 것이다.

아래 그림은 최종 동익의 공진 주파수에 대한 이격 여유가 15%로 이는 공진 주파수로 블레이드가 파손될 가능성이 낮은 안정된 설계 값이다.



[그림 8] 공진회피영역의 또 다른 예

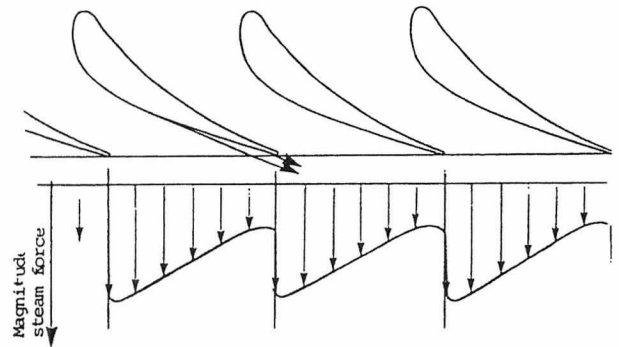


[그림 9] Last Blade Campbell 선도

6. 고정익 분사 효과

터빈 동익 사고 원인 중에 고정익 분사에 따른 결과가 제법 큰 비중을 차지한다. 고정익 분사는 고정익 사이로 비정상 흐름과 와류 흐름이 발생시키는 힘들로 인해 발생하는 문제이다. 동익이 고정익 사이를 통과할 때마다 증기압의 변동을 받게 된다. 아래 그림은 3개의 고정익을 통과하면서 압력/힘의 변동을 나타내는 일반적인 형태이다. 또한 고정익 출구 끝 교란의 영향도 있는데, 이로 인해 발생하는 힘의 크기는 통과하는 증기흐름 형태, 고정익 출구 끝에서 분리되는 경계층의 범위 등으로 결정된다.

길이가 130mm 이하의 동익들은 1,2차 조화 주파수가 위험할 정도로 높지 않다. 하지만 이들 동익들은 종종 고정익 분사로 인해 고유 주파수 변동이 발생하여 사고가 발생하는 경우가 있다.



[그림 10] 고정익 원주 방향으로 압력/힘 구배

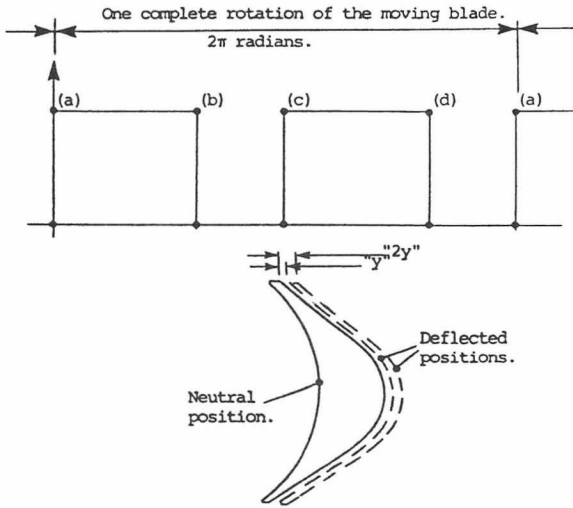
6-1 기본 공진 (Primary Resonance, Partial Admission Effect)

기본 공진은 부분 분사로 인해 동익에 증기가 교대로 유입되면서 발생하는 현상을 말한다.

아래 그림은 동익이 1회전 하면서 받는 압력/힘의 변화를 나타내는 대표적인 그림이다. 이 그림은 증기 분사로 동익에 작용하는 과도 하중을 나타내고 있다. 부분 분사단에서 동익은 1회전 할 때 마다 분사 충격을 최소한 1번은 받게 된다.

증기력이 아주 순간적으로 작용한다고 가정하면 동익 재질에 따른 감쇠 효과는 기대 할 수 없다. [그림 11]의 a와 같이 작용하는 동역학 에너지는 응력에너지를 저장하면서 동익을 휘게 만든다. 증기 분사력에 따른 동역학 에너지와 응력으로 저장되는 에너지가 같아 질 때까지 동익은 휘게 된다. 한 순간적 상태로 보면 동역학 에너

지(증기 분사력)로 인해 동익은 “y”까지 휘게 된다. 다음 고정익에서 또 다시 증기 분사력을 받게 되면 동익은 “y” 만큼 휘게 된다. 동익이 최종 휘게 되었을 때는 ‘2y’까지 휘면서 동익 내부 응력과 증기 분사력이 평형 상태가 된다.



[그림 11] 1회전 할 때 발생하는 압력/힘 변화

만약 동익이 회전을 하면서 [그림 11]과 같이 교반 하중을 받게 되면 동익은 정상 진폭의 두 배로 진동을 하게 된다. 이런 조건하에서 동익입, 출구 양 끝단에서 받는 응력은 정하중의 4배가 된다. 동익이 다음 고정익인 ‘c’ 위치에 도달하면 또 같은 일이 반복 될 것이고 진폭은 더 증가하게 된다. 이 연쇄반응이 일어나면 결국 동익은 파괴가 될 것이다.

하지만 실제 작용하는 순간 증기 분사력은 그리 높지 않게 운전을 하고, 또한 동익 재질 감쇠와 커버밴드 감쇠 등으로 인해 진폭이 감소한다.

저압단에서는 부분분사를 잘 적용하지 않지만 동익 길이가 긴 상태이므로 공진과 만나지 않는지 잘 검토해야 한다.

6-2 실제 증기력 영향

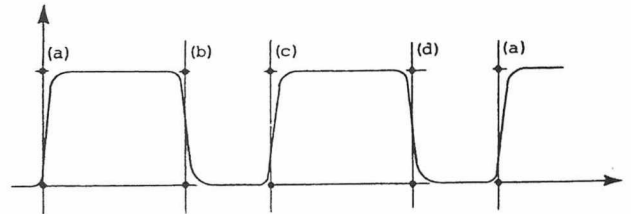
이론적인 증기 분사력 영향은 위 [그림 11]과 같게 작용하지만, 사실 실제 증기력에서는 여러 요인으로 인해 이 그림은 수정된다.

첫째, 증기력이 시간을 이론적으로 미분한 것 같이 그렇게 단순하게 순간적으로 압력을 가하고 사라질 수 없다. 그러므로 [그림 11]의 ‘a, b, c, d’는 다음 [그림 12]에서와 같이 수정되어야 한다.

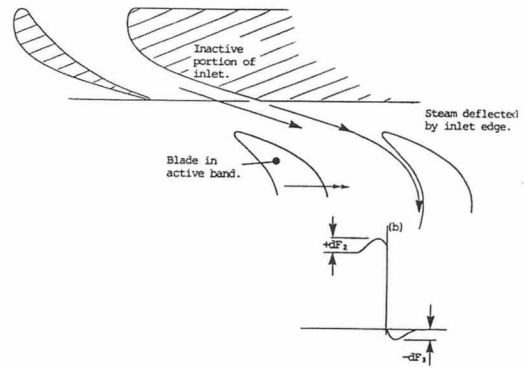
둘째, 증기 분사력을 받다가 고정익이 없는 영역

(Dead Band)으로 이동하면서 벤트리(venturi) 효과로 인하여 압력의 증감이 발생한다.

증기 분사력의 크기는 고정익 출구 압력 변화에 가장 큰 영향을 받는다. 그러므로 동익의 고유 주파수가 고정익 통과 주파수(Nozzle Passing Frequency)와 일치하지 않다면 동익이 받는 응력은 그리 크게 영향을 미치지 않는다.



[그림 12] 실제 증기력을 고려한 동익 압력/힘



[그림 13] 부분 분사에서 Dead Band로 이동 효과

7. 저 출력 운전 영향

전 출력의 5% 미만 저 출력 운전을 장기적으로 하면 최종단 동익의 Trailing Edge 침식이 발생하면서 다음과 같은 손상이 발생한다.

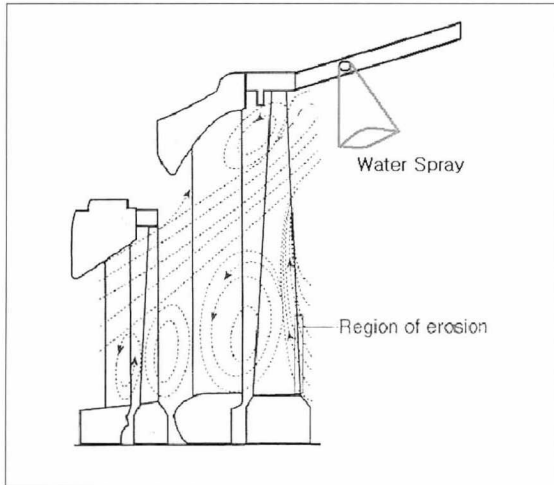
- Trailing Edge 침식이란 최종단 회전익의 Suction Face에서 발견되는 침식 형태의 손상현상임.
- 이 손상은 Discharge Edge에서 발생되고 날개의 밑 부분에 위치하며 때때로 Root Platform의 바로 위에서 시작하여 회전익의 평균직경(M.D)에 이르는 높이까지 진전됨.
- 손상의 시작점은 Trailing Edge로부터 약 7-13 mm인 위치에서 시작하여 Discharge Point로 갈수록 손상정도는 심해짐.

이 터빈 동익의 손상 메카니즘은 다음과 같다.

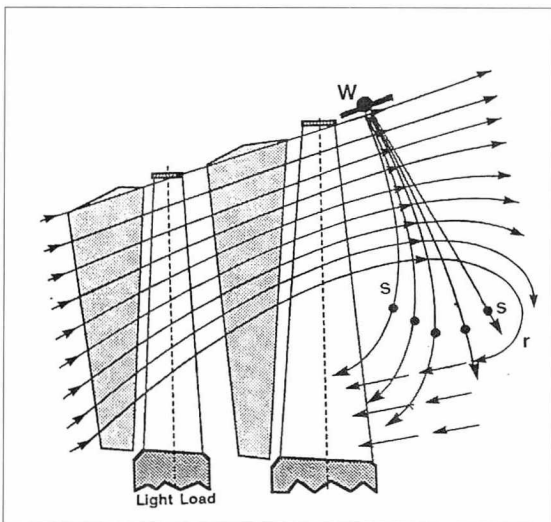
- Trailing Edge에서의 손상 메카니즘은 습분 알갱이(Moisture Particles)가 최종단 동익 Root 부

근으로 재유입하기 때문임.

- 이 재 유입 현상은 증기의 Field Force가 작고 증기의 Working Fluid Recirculation을 저지하기에 불충분할 때만 발생함.
- 재순환을 허용하는 조건은 증기유량이 상대적으로 적고, 거의 전부가 최종단 환형공간의 외각으로 흐르는 저 출력 혹은 '0' 출력일 때만 존재함. ([그림 14] 참조)
- 이 상황에서는 회전의 내에서 마찰에 의해 열이 생성되고 이 열을 제거하기 위해 Hood Spray System이 동작하고 Exhaust Hood Structure 에도 상대적으로 다량의 분무수 (Atomized Water)가 존재함. ([그림 15])
- 또한 Exhaust Hood의 구조물의 표면에 Film 형태로 존재하던 습분도 재순환 유로에 혼입됨.



[그림 14] 저출력에서의 유로 Pattern



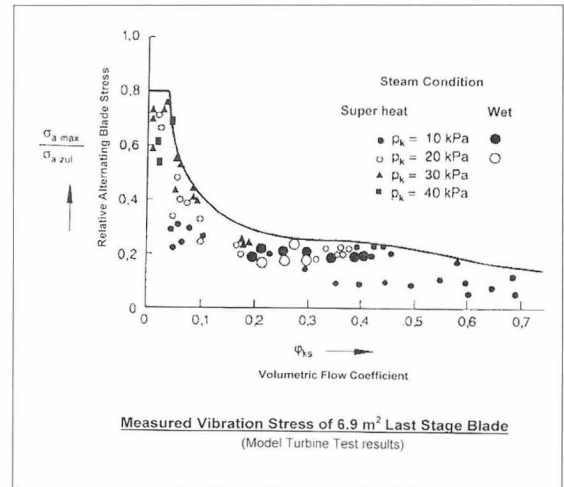
[그림 15] 저출력에서의 유로 (Recirculation)

- [그림 15]에서는 마찰열을 제거하기위해 유입된 Spray Water가 회전의 Root로 재유입 되면서 회전의 표면에 충격을 주어 침식형의 손상을 야기하는, Exhaust Hood에서의 Recirculation 영향을 도식적으로 보여줌.

저 출력 운전 시의 동응력(Dynamic Stress)은 설계조건과는 달리 저 출력에서 [그림 14, 15]와 같은 유로로 인하여 설계 값보다 상당히 높은 동응력을 야기한다. 저 출력 운전시 동 응력은 정격 출력에서보다 약 2~4배 정도 높다는 것을 [그림 16]로부터 알 수 있다.

일반적으로 ϕ_{ks} 가 0.06~0.07에서 동응력은 최대 값을 나타낸다.

ϕ_{ks} 가 0.2 부근 일 때 최종단 회전의 Root부에서 재순환 현상이 발생하기 시작함.



[그림 16] 체적유량계수(ϕ_{ks})와 동(Dynamic)응력 비

회전의 동응력은 체적유량계수($\phi_{ks} = \frac{C_{AX}}{W}$)에 의존함.

C_{AX} ; 축방향 증기속도

W ; Mean Diameter에서의 원주속도

$\sigma_{a \max}$; 최대 동응력

$\sigma_{a \text{ zul}}$; 허용 동응력

$\phi_{ks} \approx 0.2$; 최종단 회전이 더 이상 출력을 생산하지 못하고 Ventilation Loss를 극복하지 못함.

$\phi_{ks} < 0.2$; 불안정한 유동상태에 의한 최종단에서의 Turbulence로 인하여 동응력이 급증함. 다양한 회전의 진동모드를 Random Excitation함. 비정상운전의 정도에 따라 동 응력의 허용값을 초과할 수 있음.

저출력 & 저진공 운전시 터빈 배압(복수기압력)을 제한하는 이유는 최종단, L-1, L-2의 회전익 피로 손상 및 과열(Overhating)에 의한 배기후드의 손상을 최소화하기 위함이다.

7-1 Aerodynamic Instability에 의한 고주파 피로(HCF)

전 출력범위의 다양한 배기압력 조건에서 여러 가지의 회전익의 설계에 대한 날개의 응답을 측정하기 위해 광범위한 시험이 발전소 현장에서 수행되었음. 특별히 저출력에서 권고된 배기압력 보다 더 높은 배기압력으로 지속(Sustained) 운전될 경우 회전익은 고주파(HCF)피로 균열 혹은 파손의 확률을 증가시키는 응답을 야기한다는 것을 이 시험으로부터 알게 됨.

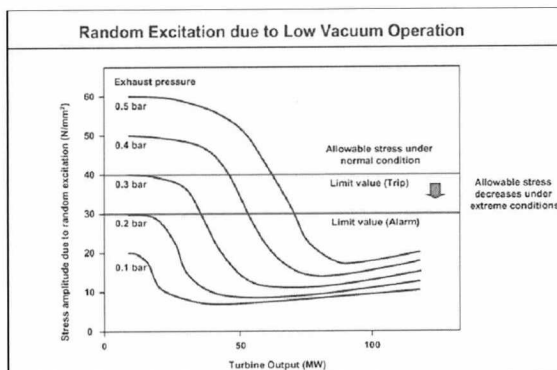
7-2 Windage Effect에 의한 과열(Overheating)

저 진공에 의한 증기 밀도의 증가와 결과적인 Windage Effect는 회전익을 과열하며 다음과 같은 징후를 야기함.

- 날개의 열적 팽창 및 마찰.
- 변경된 진동모드로부터 유도된 피로에 의한 균열.
- 과열은 날개의 고유주파수 특성에 영향을 주고 날개손상의 원인이 됨.
- 본 발전소의 경우 변색은 되지 않았음. Hood Spray의 위치와 과다한 유량 때문인 것으로 추정 됨.

7-3 Random Excitation(저출력 & 저진공 운전)에 의한 동응력

Random Excitation에 의한 동 응력의 크기에 대한 전형적인 추세 [그림 17]과 같고 날개에 가해진 최대



[그림 17] 터빈출력에 대한 배기압력 별 동응력의 크기

동응력은 부하가 감소하고 배압이 증가함에 따라 상당히 증가하고 있음을 보여줌. [그림 17]에 의하면, 배기압력 0.3bara에서 40N/mm²이 허용 동응력임을 알 수 있음.

따라서 저출력 운전의 영향으로 회전익의 Trailing Edge가 침식되어 두께가 얇아질 수 있고, 저 출력 운전시 동 응력은 정격 출력에서보다 약 2~4배 정도 높고, 저출력 저 진공 운전이 되면 저 진공에 의한 증기 밀도의 증가와 결과적인 Windage Effect는 회전익을 과열되고, 날개에 가해진 최대 동응력은 부하가 감소하고 배압이 증가함에 따라 상당히 증가하고, 회전익은 고주파(HCF)피로 균열 혹은 파손의 확률을 증가시킨다.

8. 결론

이상과 같이 동익(Blade)에서 발생하는 진동에 대하여 간략히 개념적으로 살펴보았지만, 실제 현장에서 사고 난 동익의 원인을 파악하는 것은 여러 요인이 복합적으로 강도를 달리하면서 작용하므로 그 결과를 보면서 진단하는 것은 쉬운 일이 아니다.

일단 동익 파손이 발생하면 파손 현장 보존을 한 상태에서 전문가의 의견을 받으면서 파손 시편의 금속학적 분석, 고장 운전 상황의 재구성, 운전 이력 검토, 동익의 공진 설계인자 영향 등을 잘 파악하여 인과관계를 과학적으로 추리하면 파손의 직간접 원인을 알 수 있습니다. 동익 관련 국내의 분석 기술 수준도 많이 향상 되었으므로 정확한 파손 원인조사로 재발 방지 대책을 강구하여 신뢰 있는 설비 운영을 하여야 합니다.

아울러 설비 도입단계에서부터 동익에 관한 여러 설계 인자를 통한 안정성 검토와 설계 허용치를 벗어나지 않은 운전 상태를 유지하는 것이 매우 중요합니다. 현장의 설비 전문가들이 동익(Blade) 건전성에 많은 관심을 가지면서 터보 회전체가 안정적으로 운전하길 기대합니다.

9. 참고 문헌

- 한국동력기계공학회지 제8권 제3호 pp.18~22
2007년 3월 “30MW 증기터빈 최종단 회전익 파단 사고 분석” 한전 KPS 김성봉·김인철·한승우·전채홍
- “Steam turbine for power plant” Herb sirois