

30MW 증기터빈 최종단 회전익 파단 사고 분석(Ⅱ-2)



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

5.3 비정상 운전의 영향

- 저 출력 운전에 의한 최종단 회전익의 Trailing Edge Erosion

① 손상형태

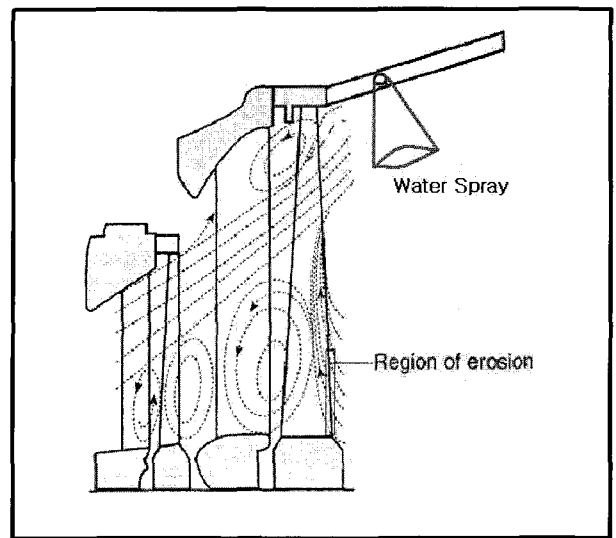
- Trailing Edge Erosion이란 최종단 회전익 Suction Face에서 발견되는 침식 형태의 손상현상임.
- 이 손상은 Discharge Edge에서 발생되고 날개의 밑 부분에 위치하며 때때로 Root Platform의 바로 위에서 시작하여 회전익의 평균직경(M,D)에 이르는 높이까지 진전됨.
- 손상의 시작점은 Trailing Edge로부터 약 7~13mm인 위치에서 시작하여 Discharge Point에서 끝나며 D,P.로 갈수록 손상정도는 심해짐.

② 손상 메카니즘

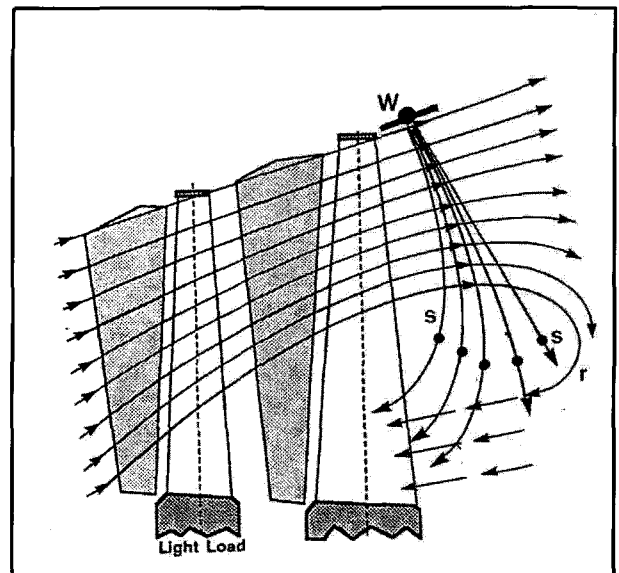
- Trailing Edge에서의 손상 메카니즘은 습분 알갱이(Moisture Particles)가 최종단 회전익 Root 부근으로 Re-enter하기 때문임.
- 이 Re-Entry는 증기의 Field Force가 작고 증기의 Working Fluid Recirculation을 저지하기에 불충분할 때 발생함.
- Recirculation을 허용하는 조건은 증기유량이 상대적으로 적고, 거의 전부가 최종단 환형공간의 외각으로 흐르는 저 출력 혹은 '0' 출력일 때만

존재함. ([그림-19] 참조)

- 이 상황에서는 회전익 내에서 마찰에 의해 열이 생성되고 이 열을 제거 하기 위해 Hood Spray System이 동작하고 Exhaust Hood Structure 에도 상대적으로 다량의 분무수(Atomized Water)가 존재함. ([그림-20])
- 또한 Exhaust Hood의 구조물의 표면에 Film



[그림 19] 저출력에서의 유로 Pattern



[그림 20] 저출력에서의 유로 (Recirculation)

형태로 존재하던 습분도 Recirculation 유로에 혼입됨.

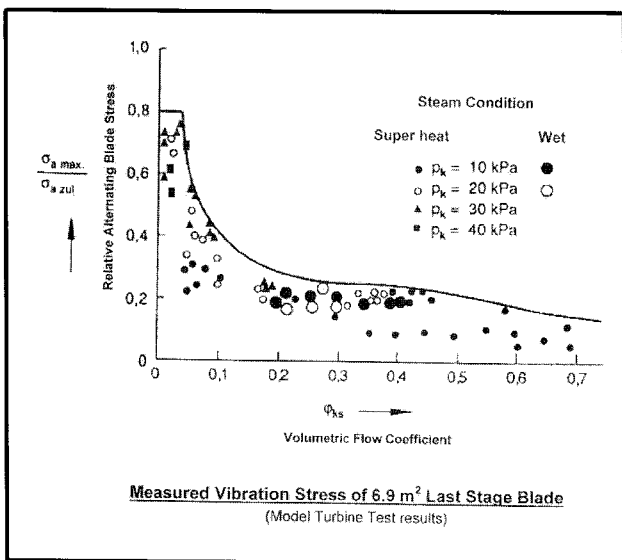
- [그림-20]에서는 마찰열을 제거하기 위해 유입된 Spray Water가 회전의 Root로 Re-enter되면서 회전의 표면에 충격을 주어 침식형의 손상을 야기하는, Exhaust Hood에서의 Recirculation 영향을 도식적으로 보여줌.

- 저 출력 운전 시의 동응력(Dynamic Stress)

설계조건과는 달리 저 출력에서 [그림-19, 20]과 같은 유로로 인하여 설계 값보다 상당히 높은 동응력을 야기한다. 저 출력 운전시 동 응력은 정격 출력에서보다 약 2~4배 정도 높다는 것을 [그림-21]로부터 알 수 있음.

일반적으로 Φ_{ks} 가 0.06~0.07에서 동응력은 최대 값을 나타냄.

Φ_{ks} 가 0.2 부근 일 때 최종단 회전의 Root부에서 Recirculation 현상이 발생 하기 시작함.



[그림 21] 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

$\sigma_{a zul}$; 허용 동응력

$\Phi_{ks} \cong 0.2$; 최종단 회전이 더 이상 출력을 생산

하지 못하고 Ventilation Loss를 극복하도록 구동되지 않음.

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

- 저출력 & 저진공 운전

터빈 배압(복수기압력)을 제한하는 이유는 최종단, L-1, L-2의 회전의 피로 손상 및 과열(Overhating)에 의한 배기후드의 손상을 최소화하기 위함임.

① Aerodynamic Instability에 의한 고주파 피로 (HCF)

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

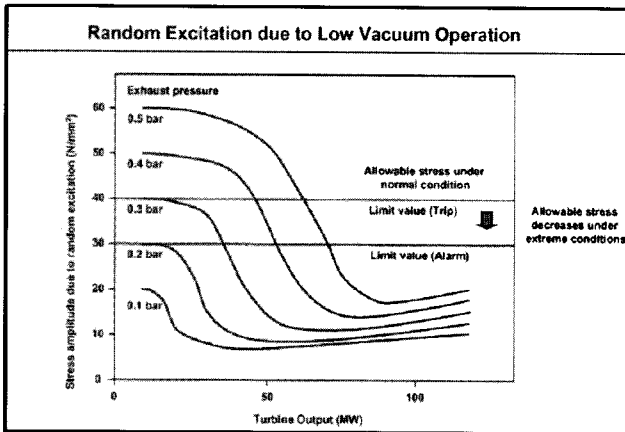
② Windage Effect에 의한 과열(Overheating)

저 진공에 의한 증기 밀도의 증가와 결과적인 Windage Effect는 회전을 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 추정됨.

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

Random Excitation에 의한 동 응력의 크기에 대한 전형적인 추세 그림-22와 같고 날개에 가해진 최대 동응력은 부하가 감소하고 배압이 증가함에 따라 상당히 증가하고 있음을 보여줌. [그림-22]에 의하면, 배기압력 0.3bara에서 40N/mm²이 허용 동응력임을 알 수 있음.



[그림 22] 터빈출력에 대한 배기압력 별 동응력의 크기

○ 저출력 운전의 영향으로 회전익의 Trailing Edge가 침식되어 두께가 얇아질 수 있고, 저출력 운전시 동 응력은 정격 출력에서보다 약 2~4 배 정도 높고, 저출력 저진공 운전이 되면 저진공에 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.

6. 회전익에 가해진 응력과 피로기여도 검토

6.1 최종단 회전익 설계요약

- 최종단 회전익의 설계 고려사항

- 최종단 회전익의 동응력을 예상한다는 것은 증기의 정적 굽힘 응력이나 원심 응력을 예상하는 것보다 훨씬 어렵고, 복잡하고, 미묘함.
- 피로로부터 보호하기 위해 설계는 재료 물성과 제작과정의 다양성

그리고 운전 조건의 다변성을 고려해야만함.

이러한 이유 때문에 확률론적 개념이 회전익의 설계 과정에 도입됨.

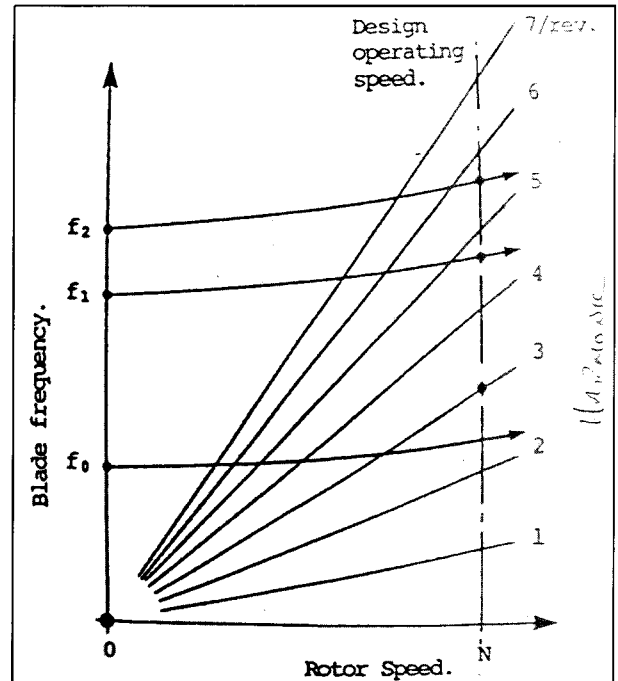
- 설계기준

허용응력을 결정할 때에는 습증기, Water Droplets 및 응력부식과 부식피로 발생 가능성 존재함을 포함하여 모든 환경적 조건을 고려함.

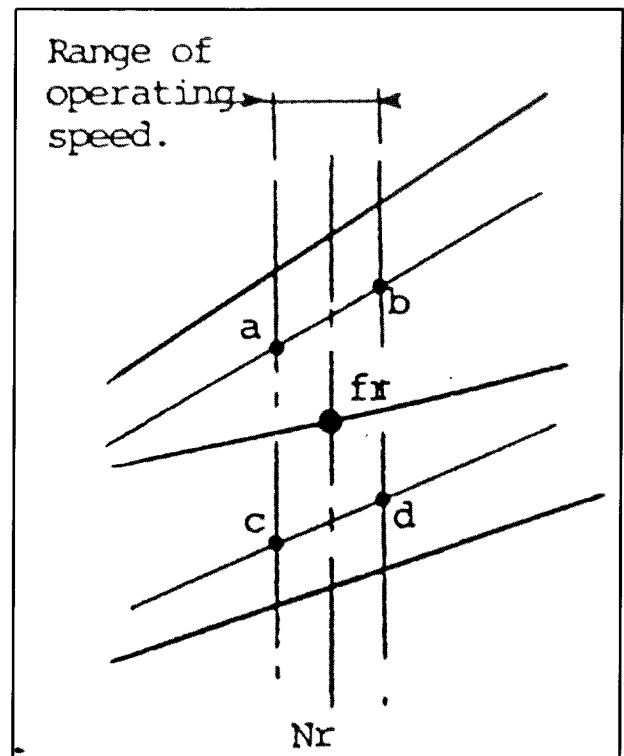
- Blade 공진에 대한 검토

우선 Blade 탈락의 원인은 외부 불순물 유입 및 타격에 의한 가능성은 탈락된 Blade가 Last Stage 이

므로 거의 없다고 보며, 결국 피로에 따른 파손 가능성이 가장 크다고 추정할 수 있다. 모든 Turbine Blade는 수많은 고유주파수를 가지는데 운전 중 이 고유주파수와 가진주파수인 회전주파수 및 그 Harmonic 성분(1X, 2X, 3X ……)이 서로 만나 공진(Resonance)이 발생하지 않도록 설계하는 것이 원칙이다.



[그림 23] Campbell Diagram의 예



[그림 24] Diagram 확대 (안전영역)

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

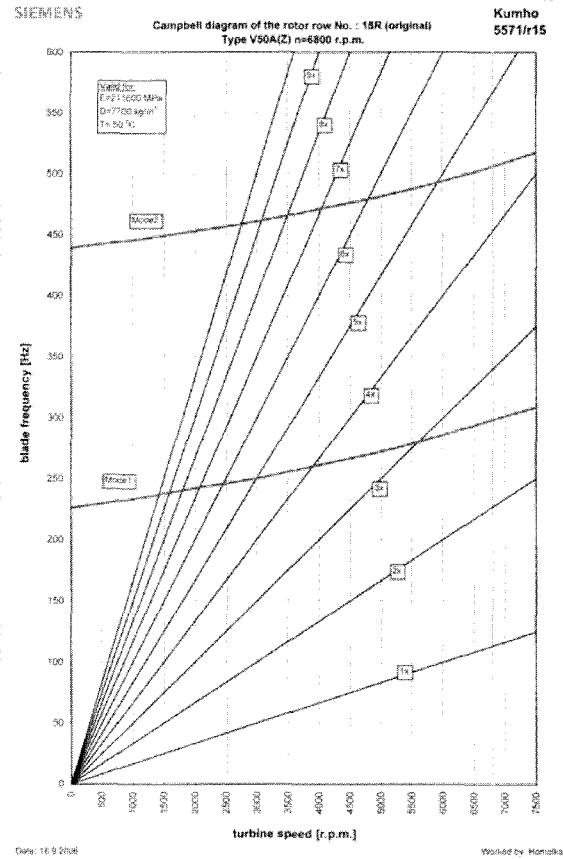
허용오차 구간의 Specification은 일반적으로 계산에 의한 첫 번째 Tangential Mode에 따라 제작사에 의해 선택된다.

[그림 23] Campbell Diagram의 예에서 1차 고유 주파수인 2배수 및 3배수 사이에 2배수 허용오차의 상한주파수와 3배수 허용오차의 하한주파수가 놓이고 Blade가 제작될 작은 수직범위가 있다.

이 Blade는 2배수나 3배수에 의해 가진될 염려가 없는 운전영역에 놓이게 된다. 또한 이 Diagram이 보여주는 것은 터빈이 안전한 상태로 운전되도록 제작사가 부여한 운전속도 범위이다. [그림 24]에서 $\pm\Delta N$ 의 "abcd"로 정해진 속도변화 구간은 운전 중 안전영역에 해당되는 Blade 운전주파수이다.

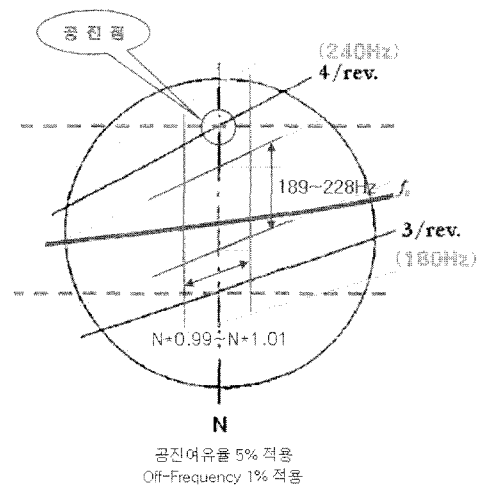
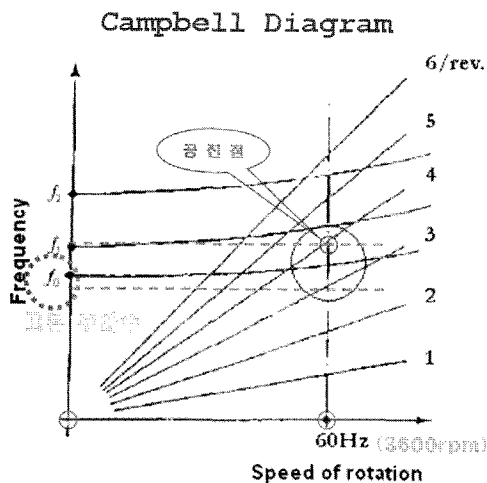
아래에 또 다른 예([그림 25] 참조)가 있는데 이는 가진주파수인 3배와 4배 회전주파수 Line 사이에서 3배 주파수 5% 상한값과 4배 주파수 5% 하한값의 범위가 수직 안전범위이고 Off-Frequency Limit를 $1\% * GE$ 계열 40" Stage L-O의 예)로 할 때 회전수(N)의 좌·우 1% 영역인 $N * 0.99 \sim N * 1.01$ 이 수평 안전범위이며 이들이 만드는 마름모꼴 영역이 안전영역이 되는 것이다.

아래 그림은 Last Blade의 공진 주파수에 대한 이격 Margin이 15%로 이는 공진 주파수로 블레이드가 파손될 가능성이 낮은 안정된 설계값이다.



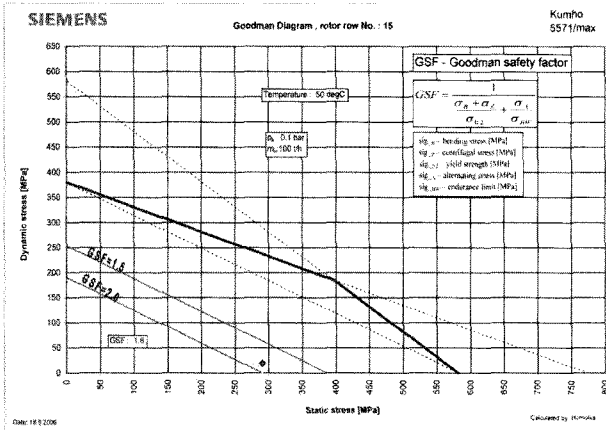
[그림 26] Last Blade Campbell 선도

블레이드 허용응력은 정상출력에서 25Mpa, 1MW 저출력에서 63Mpa이다. 블레이드 안전응력 판단기준인 Goodman Safety Factor기준으로 이 블레이드를

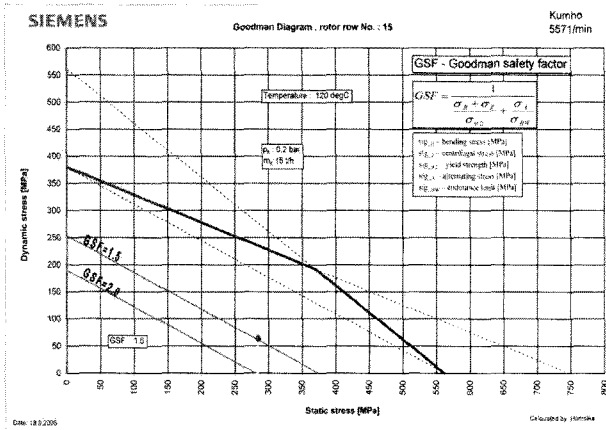


[그림 25] 공진회피영역의 또다른 예

보면 1.5 ~ 2.0값에 분포하므로 전 운전 조건에 안전하게 사용할 수 있다.



[그림 27] 정상 출력 Goodman 선도



[그림 28] 저부하 Goodman 선도

7. 결론

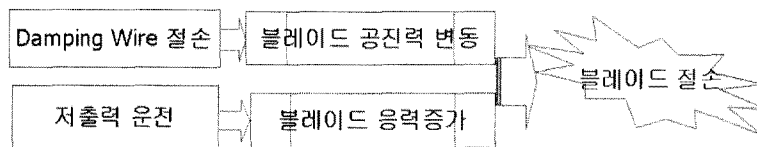
터빈 로타에서 고진동 원인은 최종단 회전익의 파단, 비산으로 강력한 Unbalance가 발생한 것으로 판단되고, 블레이드의 Damping Hole에서 균열이 시작되었다. 균열의 진전 메카니즘은 전형적인 고주파피로 (High Cycle Fatigue)이며 균열이 성장하여 임계크기 (Critical Size)에 도달했을 때 남아 있는 건전부위는 원심력에 의해 더욱 감소되고 일시에 파단 되었다. Damping Wire 절손은 블레이드 공진력에 끼친 영향이 사고 원인을 규명하는 큰 변수이다.

고주파피로(HCF)의 원인인 Vibratory Loading은 Airfoil 균열을 야기하고 결국 1개의 최종단 회전익을 파단, 비산이 되도록 한다. 회전익의 파편과 충돌이 아닌 독립적으로 나머지 3개의 회전익에서도 비파괴 검사결과 균열이 발생되었다. 피로한계를 초과하여 운전 중 Micro_Mechanical Distortion의 누적으로 균열이 시작되고 균열이 성장하기 위해서는 최소한의 시간이 필요하며 경보치와 정지치 사이에서 운전 중 균열이 시작되는데 필요한 시간은 정의내리기 힘들지만 1MW 이하 40시간 운전은 균열의 가능성이 있다고 평가된다. Striation Counting은 균열진전이 짧은 누적시간에 일어났음을 시사하고 있고, 허용할 수 없는 운전형태에 서만 야기되는 극도의 고응력 발생을 입증하고 있다. 어떤 복수기 압력 이상에서의 여기(Excitation)는 날개에서 쉽게 균열이 발생되도록 하는 양의 피로를 유발한다. 허용한계를 초과한 복수기 압력에 대해 여기 (Excitation) 정도에 있어서 두 가지 종류의 비선형 거동을 인지해야만 한다.

- ① 일단 응력이 피로한계를 초과하면 응력진폭이 조금 증가해도 균열의 시작까지의 Cycle 수가 Over_Linear하게 감소된다.
- ② Fluid Flow로 부터의 비선형은 복수기압의 증가에 따라 응력진폭을 격렬하게 증가시킴. 이와 같은 효과를 Transition to Stall Flutter라 한다.

결과적으로 복수기 압력의 제한을 준수하는 것이 대단히 중요하고 금번 사고시 복수기 운전 압력과 온도는 허용 운전 범위 근처에 있으므로 Transition to Stall Flutter의 영향과 Damping Wire가 먼저 절손되어 공진 주파수 마진이 작아져서 이와 같은 최종단 회전익 파단이 발생하였다.

따라서 발전소에서는 운전 지침의 최저 부하 이하로 운전을 피하고, 주기적으로 터빈 회전 부품에 대한 비파괴검사로 건전성을 확인하여 사고를 미연에 방지해야 한다.



[그림 29] 블레이드 손상 개념도