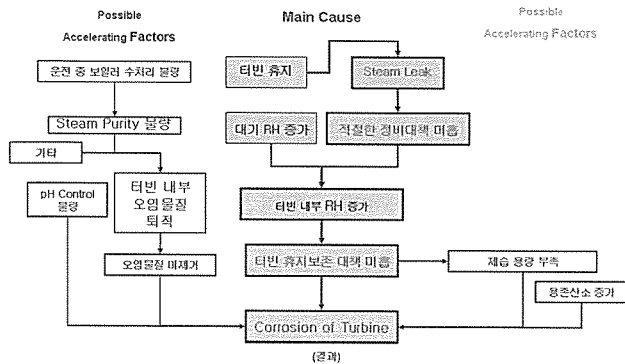


13. 증기터빈 내부 부식발생 원인분석



[그림 16] RCA of Turbine Corrosion

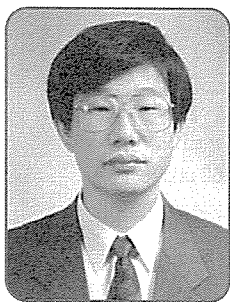
14. 맺음말

- 공기 중 상대습도가 40%이상이면 부식이 활성화되고, 60%(임계습도) 이상일 때 부식율이 급

격하게 상승하기 때문에 터빈 정지는 곧 대기부식(Corrosion) 환경에 노출을 의미한다.

- 휴지 중 터빈 표면의 RH를 어떻게 낮출 것인가를 고민해야한다.
 - ① 밸브누설시 우선적으로 터빈 내부 유입 증기 차단 Blind 설치해야한다.
 - ② 휴지기간별 적절한 보존대책을 수립하고 실행해야한다.
 - ③ 단순하지만 간과하기 쉽고, 간과하면 터빈내부 부식이 발생하고, 부식정도가 심하면 부품 Recondition이 쉽지 않을 뿐만 아니라 교체시 비용이 증대되고, 터빈수명에 치명적일 수 있음을 명심해야한다.
- 철저한 보일러 수질관리로 오염물질 발생 최소화해야 한다.
- 공사기간 중 부착된 오염물질 제거해야 한다.

증기 터빈 블레이드의 손상 및 진동 특성 해석(Ⅱ-1)



한국전력공사 전력연구원
수화력발전연구소
기계정비지원그룹
책임연구원 배용재
Tel : (042) 865-5425

1. 개요

발전소에서 운전되고 있는 증기 터빈 블레이드는 발전소 핵심 설비 중 손상이 많이 발생하는 부품으로서, 발전소 운전 신뢰성 증진 및 유지 정비 비용 절감

측면에서 반드시 고려해야할 사항이다. 국내외 증기 터빈 블레이드 손상 사고를 분석하여 보면 터빈 블레이드 중에서 저압단 블레이드의 손상 사고가 총 손상의 약 70% 이상의 비율로 많이 발생되고 있으며 특히 진동에 의한 손상 모드가 중요한 요인으로 작용되고 있다. 현재 터빈 블레이드의 진동 손상 사고가 발생되면 주파수 응답시험을 통하여 블레이드의 고유진동수를 측정하는 수준으로 사고 분석을 수행하거나 외국 제작사의 기술에 의존하는 경우가 많다. 그러나 이러한 터빈 블레이드 진동 손상에 대하여 국내 기술로서 신뢰성 있는 원인 규명 및 고장 진단을 수행하기 위해서는 체계적인 블레이드 분석 및 해석 기술이 필요하다. 이러한 기술을 통하여 발전소의 핵심 부품 중 하나인 터빈 블레이드의 운전 및 유지 관리를 최

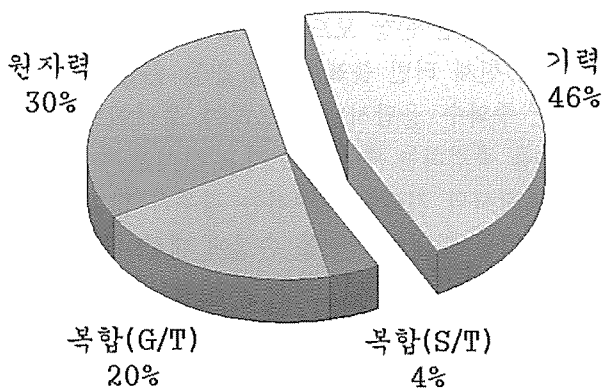
적화 할 수 있다.

터빈 블레이드의 진동 해석 및 시험 기술은 터빈 블레이드를 설계, 제작하고 이를 검증 하는 경우, 터빈 블레이드의 손상 원인을 규명하고 대책을 수립하는 경우, 터빈 효율 또는 부하 능력을 증가시키기 위하여 설계를 변경하는 경우 등 여러 가지 경우에 활용되는 기술이다. 특히 발전 설비를 운용하고 있는 전력 회사의 경우 진동에 의한 손상 현상과 정확한 원인 규명 및 대책 수립을 위한 필수 기술이라 할 수 있다. 따라서 본 고에서 터빈 블레이드 해석에 대한 전체적인 개요를 소개하고자 한다. 이를 위하여 먼저 증기 터빈 블레이드의 구조와 각 구성품의 진동에 대한 영향을 기술하고 진동 해석과 시험 방법에 대하여 기술하였다. 터빈 블레이드 해석의 경우, 블레이드에 작용하는 가진 원인과 이들의 진동에 대한 영향, 정응력 해석 및 동응력 해석 방법 그리고 공진 여부를 판단하는 자료로 많이 사용되고 있는 Campbell diagram과 Interference diagram, 그리고 수명 예측을 위한 피로 해석에 대하여 간략하게 기술하였다.

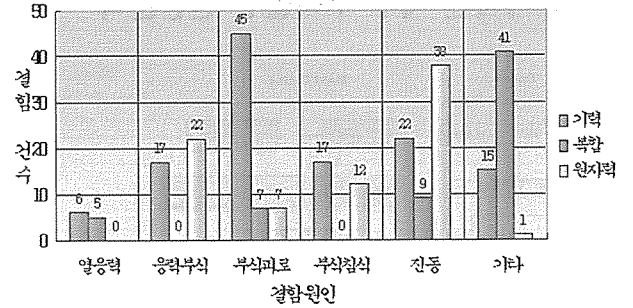
2. 터빈 블레이드 고장 현황

2.1 국내 현황

국내에서의 터빈 블레이드 손상 사고는 쉽게 찾아볼 수 있으며 주로 응력 부식을 비롯하여 피로, 열응력, 진동 사례를 들 수 있다. [그림 1]은 국내에서 운전되고 있는 터빈 블레이드 266건에 대한 고장 현황 ('73-'97)을 보이는 것으로써 기력 및 원자력 발전소에서의 블레이드 고장이 76%를 점유하고 있는 것을 알 수 있다. [그림 2]는 이들을 고장 원인별로 분석한 결과로써 부식 피로 및 진동이 터빈 블레이드 고장의



[그림 1] 발전원별 터빈 블레이드 고장

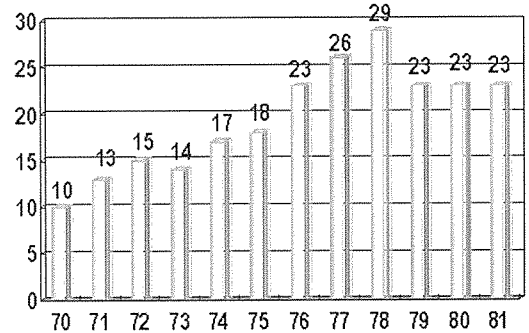


[그림 2] 터빈 블레이드 고장 원인별 분류

주요 원인임을 알 수 있다. 이러한 증기 터빈 블레이드의 손상은 대부분 저압 터빈의 최종 두 단(L-0,1)에서 일어나므로 이들에 대한 특별한 고려가 요구된다.

2.2 국외 현황

외국의 경우, 체계적으로 조사된 터빈 블레이드 손상 현황 분석 자료로 [그림 3]과 같이 미국에서 운전되고 있는 300MW급 이상의 증기 터빈에 대하여 1970 -1981년 사이에 발생된 블레이드 손상 사례를 분석한 EPRI 자료를 들 수 있다. EPRI 자료에 의하면, 미국의 저압 터빈에서 발생된 고장 사례가 345건이었으며 고압 및 중압 터빈은 1,2단에서 저압 터빈은 끝단에서 주로 손상이 발생되었다.



□ 터빈 블레이드 손상(60 utilities)

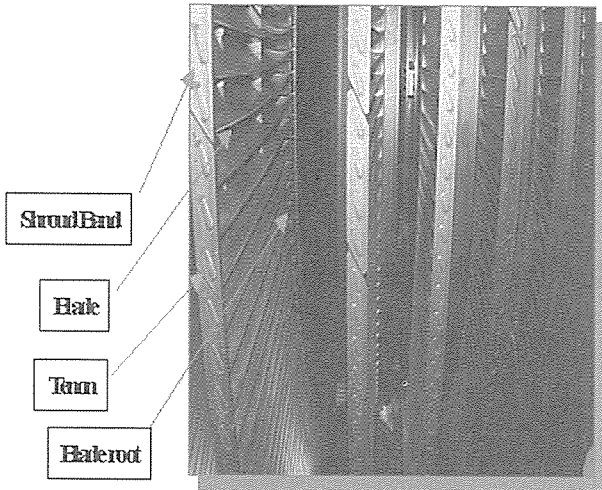
[그림 3] 미국 터빈 블레이드 손상 (EPRI)

3. 터빈 블레이드의 재질 및 구조 특성

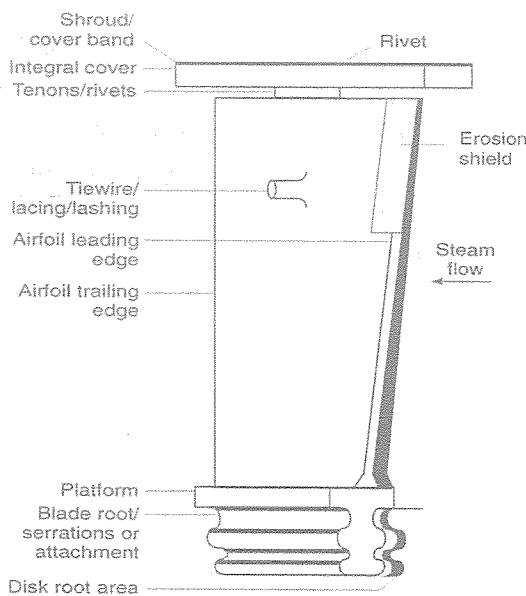
3.1 블레이드 구성

터빈 블레이드의 진동 특성을 예측하기 위하여 먼저 블레이드의 구조 및 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이는 블레이드 해석을 위하여 가장 먼저 수행되는 모델링 작업을 용이하게 하며 진동 특성을 튜

닝하기 위한 기본이 되기 때문이다. 증기 터빈은 [그림 4, 5]에서 보는 바와 같이 로터와 연결되어 있는 디스크(disk), 디스크와 블레이드를 고정하는 루트(root), 플랫폼(platform), 증기력을 이용하여 회전력을 발생시키는 에어포일(airfoil), 블레이드의 접선 방향 움직임을 구속하는 테논(tenon), 타이와이어(tiewire)와 카버(cover)로 구성되어 있다.



[그림 4] 표준화력 저압터빈



[그림 5] 터빈 블레이드 구조

3.2 블레이드 재질

블레이드에 사용되는 재질은 일반적으로 높은 항복응력, endurance limit, ductility, damping 등의 이유로 403 stainless steel을 주로 사용하고 있다. 이 403

stainless steel은 특히 증동 터빈의 90%이상의 블레이드 재질을 차지하고 있으며 damping과 부식 저항을 최대로 하기 위하여 브리넬 경도가 207~248인 재질을 사용하고 있다. 한편 사용 온도가 비교적 높은 700~900F(371~482C)에서는 422 stainless steel을 사용하기도 한다. 또한 900~1150F(482~621C)에서는 nickel-based super alloy인 A-286 을, 900~1200F(482~649C)에서는 cobalt based super alloy인 Haynes stellite alloy #31을 사용한다. 특히 titanium의 경우 고강도, 저밀도, 그리고 양호한 erosion 저항 특성으로 인하여 고속 또는 저압단의 긴 블레이드에 사용되기도 한다. 따라서 블레이드 해석을 위해서는 블레이드에 사용되는 재질의 기계적 특성을 정확히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하며 특히 초기 균열 또는 손상의 관점에서는 필수적이라고 할 수 있다.

3.3 에어포일(Airfoil) 및 Aspect Ratio

블레이드는 축에 고정된 비틀림 날개로서 노즐로부터 나온 증기의 속도에너지를 직접 회전력으로 변환되는 부분이다. 블레이드의 형상은 노즐과 같이 터빈 효율에 영향을 미치며 운전의 안전성 또는 내구성에 크게 관계된다. 블레이드의 airfoil은 크게 3가지 형태 즉, constant area airfoil, tapered airfoil, tapered twisted airfoil로 분류될 수 있다. Constant area airfoil은 주로 증동 블레이드로써 터빈의 고압 영역인 short blade에 사용된다. Tapered airfoil은 원심 응력 감소가 필요한 긴 블레이드 영역에서 사용되며 tapered twisted airfoil은 기본적으로 반동 블레이드에 사용된다. 블레이드의 길이가 짧을 때는 단면 형상이 루트 부분에서 끝부분까지 균일한 두께의 날개를 사용하며 저압 터빈 최종 단과 같이 긴 블레이드는 원심력 등에 견딜 수 있도록 두께 및 폭을 끝으로 갈수록 작게 하여 사용한다. 긴 블레이드에서는 루트 부분과 끝부분의 원주 속도에 차이가 발생하므로 증기 유입각과 날개 입구각이 전체 길이에 걸쳐 일정하도록 비틀림 각도를 결정한다. Guide blade와 Rotor blade는 일반적으로 동일한 형상으로 제작되어지나 블레이드들의 최저차 고유진동수를 터빈 속도의 6차 조화성분 위에 두기 위하여 aspect ratio를 5이하로 규제하고 있다. 여기서 aspect ratio는 블레이드 길이에 대한 profile chord length의 비이다. 특히 진동 손상으로 인하여 보다 위협하게 되는

천이 영역에서는 이 비율이 더 줄어들어야 한다.

3.4 슈라우드(Shroud)

블레이드 내부의 증기 손실을 최소화하고 진동 응력을 줄이기 위하여 사용되는 shroud는 주로 4~5개 또는 그 이상의 블레이드를 grouping 하는데 사용된다. Shroud의 재질은 일반적으로 블레이드 재질과 동일한 재질을 사용하며 리벳(rivet)작업을 통하여 연결시킨다. 그러나 고속의 터빈이나 블레이드 사이의 간격이 큰 경우 높은 응력을 받을 수 있으므로 integral shroud나 lacing wire를 포함한 형식을 채택하기도 한다. 이때 lacing wire는 블레이드의 진동 응력을 감소시키기 위하여 damping을 증가시키는 역할을 한다. Shroud는 블레이드의 강도를 더하여줄 뿐 아니라 smooth한 sealing surface를 제공함으로써 설계자로 하여금 radial flow를 제한할 수 있게 하며 열 성능을 최대화할 수 있게 한다. 그러나 저압 터빈의 최종 몇 단은 원심력의 증가로 인하여 shroud를 채택할 수 없는 경우가 있다. 따라서 lacing bar를 채택하는 경우가 많으며 터빈 운전 시 각 블레이드를 coupling함으로써 공진 발생의 기회를 감소시킨다. 참고로 coupled system에 대한 공진은 가진 주파수와 시스템의 고유 주파수가 일치하여야 할 뿐 아니라 모드가 일치하여야 한다. 일반적으로 공진의 조건하에서 lacing bar로 연결된 블레이드에 작용하는 alternating bending stress가 free standing blade에 작용하는 응력에 비해 작다.

3.5 블레이드 루트(Root)

루트는 블레이드를 디스크와 고정시키는 부분이며 플랫폼은 루트와 에어포일을 이어주는 부분이다. 일반적으로 트레일링 에지와 리딩 에지 부분은 대칭이 아니며 에어포일과는 부드럽게 곡면 처리가 되어 있으므로 이 부분은 3차원 측정을 통해 측정하여야 한다. 특히 블레이드 해석 시 테논 부와 마찬가지로 경계 조건에 따라 해석 결과의 차이가 발생하는 부분이며 해석의 신뢰성을 높이기 위하여 contact 부에 대한 비선형 해석을 하기도 한다.

3.6 블레이드 조립

블레이드의 조립 상태는 운전 중 블레이드에 작용된 prestress를 결정하여 강성을 변화시키므로 블레이드

고유 특성을 규명하는데 큰 오류를 범할 수 있다. 특히 블레이드/shroud와 로터의 재질이 상이함에 따른 열팽창 계수의 차이로 로터 운전중 shroud 간격을 변화시킬 수 있다. 즉, 블레이드는 주로 martensite 계열의 재질로 이루어진 반면에 로터는 ferite 계열의 재질로 이루어져 터빈 운전중 접선 방향에 비해 원주 방향의 변형이 크게되어 shroud 간격을 변형시키는 경우가 있다. 또한 shroud의 형상에 따른 조립 간극의 문제로 shroud의 조립이 비틀어져 강성의 변화를 가져와 설계와는 다른 진동 특성을 가질 수 있다. 이러한 현상은 특히 torsion-mounted type의 경우 일부 블레이드의 교체 시 특히 주의를 요한다.

4. 터빈 블레이드 가진

4.1 가진 원인

터빈 블레이드에 작용되는 가진력은 블레이드 내에 흐르는 유동장에 따라 매우 다양하나 진동 해석 시 기본적으로 고려해야 하는 중요한 가진 주파수는 운전 주파수 / 운전 주파수의 배수, 노즐 통과 주파수, 부분 분사 가진 주파수 등을 들 수 있다. 터빈 로터의 회전에 의한 가진력은 터빈이 1회전할 때마다 블레이드에 작용하는 비 균일 증기 압력으로 기인된다. 이러한 가진 형태는 저압 터빈 최종단에서의 낮은 압력으로 인하여 자주 발생된다. 따라서 일반적으로 터빈 제작사에서는 블레이드 고유 주파수를 터빈 운전 부파수의 4~6배 이상으로 설계한다. 노즐 통과 가지는 블레이드가 노즐을 통과할 때마다 발생하는 가진력으로 인한 주파수로서 노즐 vane의 trailing edge에서 발생된다. 부분 분사에 의한 가지는 노즐 통과에 의한 가진과 유사하나 블레이드가 노즐을 통과할 때 가진되는 것이 아니고 활성화된 노즐 그룹을 지날 때 가진되는 것이 다르다. 이러한 가지는 노즐 통과 주파수에 비하여 저주파수에서 가진되며 노즐 그룹의 간격과 수에 의하여 결정된다. 이 밖에 터빈의 구조에 따라 증기 유동장을 변화시킬 수 있는 다양한 블레이드 가진 주파수가 존재할 수 있으나 진동 진단시 위에서 기술한 3가지 가진 주파수를 고려하는 것이 일반적이다.

4.2 Non-uniform flow

비 균일 압력, 속도, 그리고 유량의 각에 의한 가진

력이 터빈 블레이드에 주기적인 flow fluctuation으로 나타나게 된다. 이 가진 주파수는 터빈의 회전 주파수와 관계가 있으며 고정 부에서의 열 굴곡, 고정익 간의 균일하지 못한 간격, 추기, 증기의 부분 분사 등에 기인될 수 있다. 블레이드에 작용하는 최대 가진력을 정량화하는 것은 매우 중요하며 이러한 unsteady load를 기술하기 위하여 제작사들은 'Stimulus ratio'를 사용한다.

4.3 Nozzle Wake Excitation

Nozzle wake는 블레이드가 정익을 지나가면서 발생하는 가진력으로서 특히 증동 터빈의 경우 nozzle을 통과하는 속도가 비교적 크기 때문에 심각한 진동을 유발시킬 수 있으므로 주의를 하여야 한다.

4.4 Non Synchronous

터빈 블레이드에 자려 진동을 유발 시키는 메카니즘으로는 stall flutter, un stall flutter, 그리고 unsteady condensate shock 등을 들 수 있다.

최근 un stalled flutter가 증기 터빈과 가스 터빈 블레이드의 손상 사고의 원인중 하나로 나타나고 있다. 이 문제는 특히 free standing blade에서 발생되며 이 문제가 발생되면 블레이드 사이에 있는 유체가 마치 스프링(mechanical link)이 존재하는 것 같은 작용을 하게 된다. 이는 인근 블레이드의 고유 진동수가 일치할 때 발생되며 블레이드 사이의 유체는 진동을 감소시키기 보다는 증가 시키는 쪽으로 작용하게 되는 것이다. 즉, 블레이드 내의 유체가 negative aerodynamic damper로서 작용되는 것이다. 이에 대한 해결책으로는 블레이드를 mix tune하는 것으로서 인근 블레이드들의 고유 진동수를 서로 다르게 하는 방법이다.

Kraftwerk Union에서 발표한 논문에 의하면 수정 Strouhal-number가 un stalled flutter problem의 sensitivity에 영향을 미친다고 한다. 즉, 수정 Strouhal-number는 blade의 주파수가 작을수록, blade의 밀도가 작을수록 크게 되어 un stalled flutter 현상이 발생되기 쉬워진다.

Stall flutter는 저압 터빈의 최종단에서 운전 부하가 낮거나 높은 back pressure 조건에서 발생된다. 이러한 조건에서는 블레이드에 입사되는 유체의 각이 큰

(large negative angle) 음의 값을 가지게 된다. Stall flutter는 심각한 동응력을 발생시켜 블레이드의 손상을 가져온다.

4.5 Electrical-Mechanical

저압 터빈 블레이드는 때때로 시스템의 변화나 부품의 손상으로 인하여 전기-기계적 가진력을 받게 된다. 이러한 경우, 터빈 발전기의 비틀림 고유 진동수가 발전기의 에어 갭 토오크(air gap torque)를 변화시키는 fault frequency와 일치할 경우 공진이 발생되게 된다. 현재까지 일반적으로 전기적인 문제와 관련된 저압 터빈의 블레이드 손상 원인은 발전기 삼상 불평형으로 인한 불평형력이다.

5. 저압 터빈 블레이드 피로

5.1 저압 터빈 블레이드 피로 손상

터빈 블레이드의 피로 현상은 터빈 블레이드를 손상시키는 주요 원인 중 하나이다. 이는 저주기 피로와 고주기 피로로 구분될 수 있으며 저주기 피로의 경우 터빈의 기동 정지와 같이 일정한 시간을 가지고 발생하는 피로 현상으로 비교적 큰 소성 변형을 유발시키는 하중에 의하여 발생된다. 반면, 고주기 피로의 경우 로터 회전이나 블레이드 사이에 작용하는 힘에 의하여 발생하는 피로 현상으로서 국부 소성 변형을 유발하는 하중에 의해 특징지어지며 대부분 탄성 영역 내의 하중이다.

피로에 의하여 발생된 터빈 블레이드의 손상 파면은 일반적인 특징은 초기 결함에서 시작하여 점진적인 균열의 성장과 과도한 하중으로 인한 파손의 순서를 따른다는 것이다.

고주기 피로 파손의 경우 [그림 6]에서 보는 바와 같이 육안으로 판정할 수 있을 만큼의 '비치 마크'를 가진 비교적 부드럽고 평평한 파단면을 보인다. 이러한 비치 마크는 천이영역을 보여주는 것으로써 작용되는 부하의 크기나 환경을 유추할 수 있게 한다. 즉, 비치 마크, 찰흔(striation), 피로 발생 원 등은 피로의 발생 지점을 규명하는데 도움이 된다. 크랙 팁의 산화나 부식은 금속을 변색시켜 비치 마크를 또렷하게 보여준다. 미시적으로 볼 때, 고주기 피로 균열은 일반적으로 직선, 입내 파손의 형태이며 주로 찰흔을

보이며 찰흔은 매우 간격이 일정하다. 블레이드가 고주기 피로에 의해 영향을 받기 시작하면, 블레이드의 잔존 수명은 매우 감소된다.

저주기 피로(LCF)는 파손 표면을 볼 때 기계적 변형 측면에서 다르다. 즉 응력이 충분히 커서 균열부의 리딩 에지에서는 소성 변형이 발생되며 저주기 피로 하에서 균열 전파에 의한 손상은 국소적이다. 그러나 일단 균열이 성장하기 시작하면, 고주기 피로에서 나온 큰 변형 보다 훨씬 더 큰 영향을 미친다.

피로에 의한 손상은 터빈 블레이드의 전역에 걸쳐 발생할 수 있으나 주로 저압 터빈 후단의 경우, 블레이드 길이가 비교적 길어 높은 응력과 공진 현상으로 인하여 피로 현상이 많이 발생된다. 특히 이러한 현상이 주로 발생하는 위치는 집중 응력이 생기는 저압 블레이드의 루트 부, steeple 필렛 부, 슈라우드 테논, 타이와이어와 타이와이어 구멍을 들 수 있다.



[그림 6] 블레이드의 고주기 피로 손상

한편, 피로 현상에 의하여 발생된 손상의 형태를 통하여 피로 파손을 유발하는 힘의 형태를 짐작할 수 있다. 비틀림 진동은 주로 슈라우드/커버에서, 축방향의 진동은 주로 블레이드 루트 부에서 탁월하게 나타나며 공진에 의한 동 응력은 블레이드 끝부분에서 크게 나타난다. 또한, 고주기 피로의 한 형태로서 공기역학적 불안정으로 인하여 발생하는 플러터 현상은 블레이드 균의 손상을 가져올 수 있다.

5.2 터빈 블레이드의 피로 메커니즘

피로는 주기적 또는 변동 응력에 의해 야기된 손상 가속화의 현상이다. 터빈 블레이드에서의 피로는 저주기(고 응력) 또는 고주기(저 응력) 피로라고 볼 수 있다. 이들 두 가지 형태의 피로는 메커니즘 상 근본적인 차이는 없다. 고주기 피로는 국부 소성 변형을 야기시키는 하중과 더불어 대부분 탄성 영역 내의 하중을 받고 있다. 반면에 저주기 피로는 일반적으로 큰 소성 변형을 발생시키는 하중에 의해 발생한다. 저주기와 고주기 피로 사이의 정확한 구별은 매우 모호하나 일반적으로 사이클 보다 작은 영역에서 일어나는 파손은 저주기 피로로 간주하며 그보다 큰 주기에서의 파손은 고주기 피로라고 취급한다.

저주기 피로는 기동-정지, 과속도 또는 열 사이클 동안 일어나는 원심력과 같은 큰 응력 사이클에 의해 기인된 점진적인 균열의 성장이다. 저주기 피로는 주로 블레이드의 설계가 운전 하중을 수용할 수 없는 조건이거나 블레이드에 제조 결함 등이 있는 경우에 발생된다. 한편, 고주기 피로 손상은 비교적 낮은 응력에서 발생되나 많은 블레이드 손상이 다양한 하중 조건에서의 고주기 피로의 결과로 발생된다. 가장 일반적인 블레이드의 파손은 가진 주파수가 블레이드의 공진 주파수 또는 조화파(harmonic)에 근접했을 때 발생한다. 고주기 피로 균열의 성장률은 원심력 하중에 의한 높은 평균 응력과 동 응력의 중첩의 결과로 급진전될 수 있다. 동 응력은 가진력의 주파수와 형태, 블레이드의 응답, 고유진동수와 진동모드 그리고 감쇄로 인한 에너지 전환과 관련이 있다. 즉, 동응력은 아래와 같은 관계를 가지게 된다.

$$\sigma_d = \frac{2\zeta\sigma_r}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2\zeta\eta)^2}}$$

여기에서, σ_d 는 동응력(dynamic stress), σ_r 은 공진 응력(resonant stress), η 는 주파수비(frequency ratio), ζ 는 임계감쇠비(critical damping ratio)이다. 피로 균열의 성장은 일반적으로 3단계 즉, '발생 → 균열 전파 → 파손'의 순서로 이루어진다. 블레이드의 파손은 균열의 크기가 임계 크랙 크기까지 성장하였을 때 발생된다.