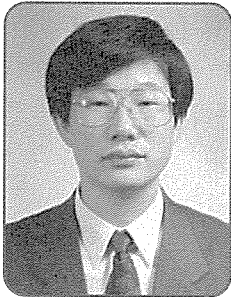


증기 터빈 블레이드의 손상 및 진동 특성 해석(Ⅱ-2)



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

6. 터빈 블레이드-디스크 해석

6.1 개요

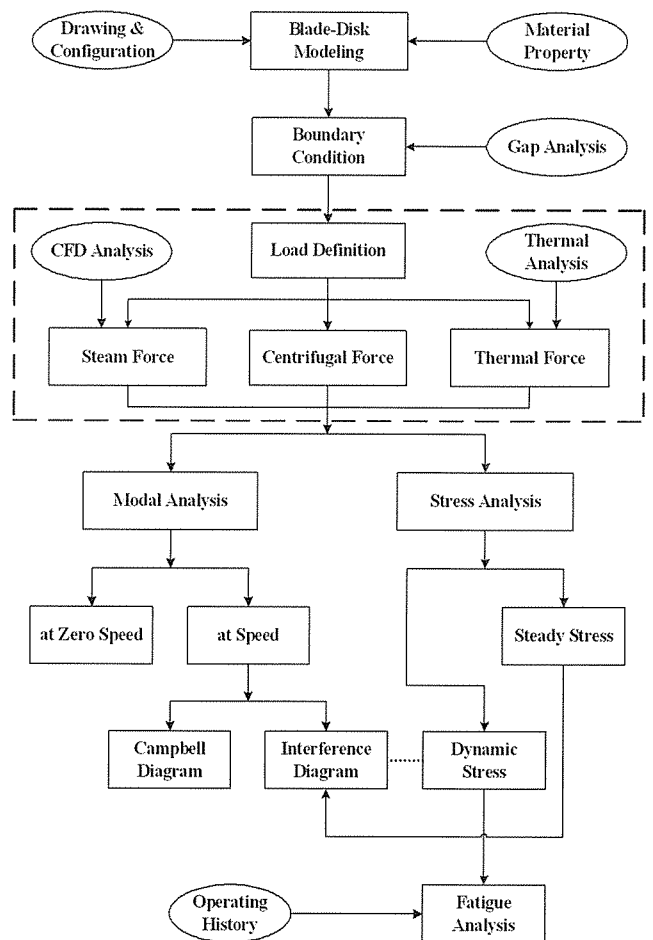
터빈 블레이드는 터빈 운전 중에 발생하는 여러 가지 가진 원인에 의하여 진동이 발생될 수 있으며 특히, 공진에 의한 고주기 피로가 급속히 진전되어 블레이드의 파손을 야기시킬 수 있다. 따라서 터빈 제작사와 운용자는 터빈 블레이드의 공진 발생의 원인 규명과 진단에 큰 관심을 가져야 한다. 터빈 블레이드의 공진 상태 진단 및 대책 수립을 위하여 일반적으로 수행하는 방법으로 터빈 블레이드에 대한 해석적 방법과 시험적 방법을 동시에 사용하고 있다.

6.2 해석 절차

터빈 블레이드의 손상 원인 규명 및 대책 수립을 위하여 규명되어야 할 해석은 크게 터빈 블레이드-디스크 계의 진동 특성, 터빈 블레이드의 각종 가진 주파수에 대한 공진 여부와 심각성, 블레이드에 작용하는 각종 힘에 따른 정, 동응력과 이에 따른 손상 가능성 여부, 그리고 현재 작용되고 있는 응력으로 인한 피로 정도와 수명 예측이 될 것이다. 이러한 제반 문제에 대한 답을 얻기 위해서 터빈 블레이드 계에 대한 각종 해석을 수행하여야 하며 일반적인 해석 절차는 [그림 7]과 같다.

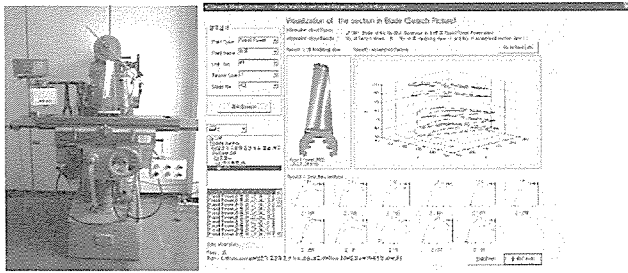
6.2.1 모델링

해석을 위해서 가장 먼저 수행하여야 하는 단계는 터빈 블레이드계의 모델링이다. 여기서 반드시 고려할 사항은 터빈 블레이드와 디스크를 함께 고려해야 한다는 것이다. 터빈 블레이드와 로터 디스크계는 서로 연성되어서 고유 진동수를 저감시키므로 이들을 함께 고려함으로써 해석의 신뢰성을 높일 수 있다. 터빈 블레이드의 모델링을 위하여 필수적으로 준비되어야 할 것은 터빈 블레이드-디스크에 대한 도면과 재질에 대한 자료이다. 그러나 제작사에서는 이러한 자료를 제공하지 않으므로 3차원 형상 측정기를 이용하



[그림 7] 터빈 블레이드 해석 절차

여 블레이드의 각 단면에 대한 형상을 실측 할 수밖에 없다. 참고로 전력 연구원에는 [그림 8]과 같이 터빈 블레이드 측정용 3차원 측정기와 DB system을 개발하여 운용하고 있다.



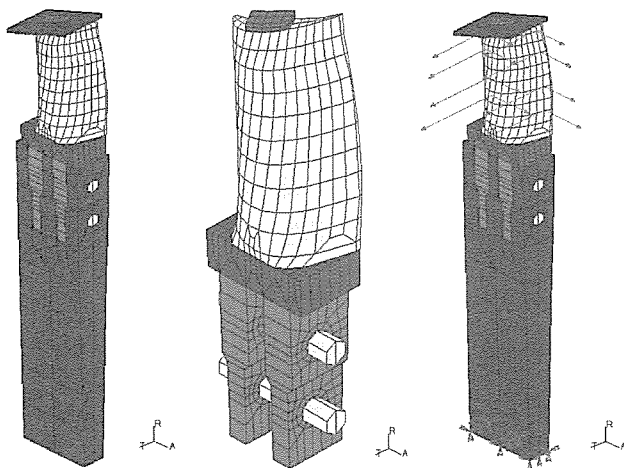
[그림 8] 터빈 블레이드 3차원 형상 측정 장치 및 DB 시스템

6.2.2 경계 조건 수립

터빈 블레이드의 모델링이 완료되면 단일 블레이드 뿐 아니라 전체 블레이드 군에 대한 해석을 위하여 블레이드 개수와 테논 및 grouping 상태, tie wire 또는 lacing wire 등에 대한 정보를 제공하여야 한다. 즉, 테논 사이의 접합 상태 및 블레이드 root부의 디스크와의 force distribution 등은 해석 결과에 영향을 미치므로 잘 고려해야 할 사항이다. 특히 블레이드 루트 부에 대한 신뢰성을 높이기 위해 gap 해석을 하는 경우도 있다.

6.2.3 작용력

터빈 운전 중 블레이드에 작용하는 힘은 크게 원심력, 증기력 그리고 온도 상승에 의한 힘으로 대분 할 수 있다. 일반적으로 원심력은 모델링이 잘 이루어지고 터빈 회전수 등과 같은 정보가 주어지면 자체적으로 계산되어 문제가 없으나 터빈에 작용되는 증기력



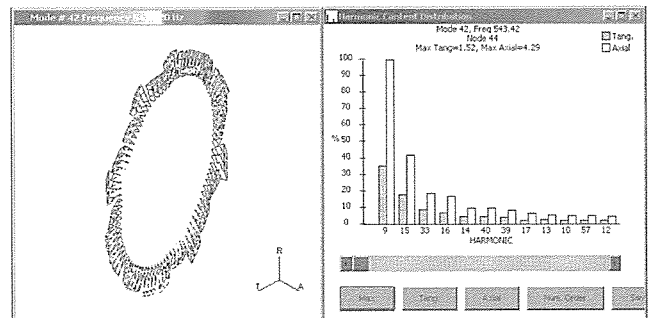
[그림 9] 터빈 블레이드 모델링 및 증기력

은 계산하기가 쉽지 않다. 따라서 CFD 코드를 이용하여 블레이드에 작용하는 힘을 따로 계산하는 것이 일반적이다. [그림 9]는 터빈 블레이드의 모델링 및 증기력 분포 계산 결과를 보이고 있다.

또, 터빈 기동 및 운전에 따른 블레이드 온도 상승에 따른 thermal load를 해석하여 이를 고려함으로써 해석의 신뢰성을 높일 수 있으며 이때는 블레이드 재질의 온도 관련 특성 정보가 필요하다.

6.2.4 진동 특성 해석

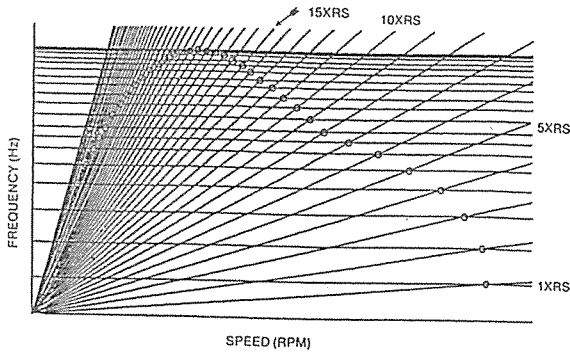
터빈 블레이드의 진동 특성 해석을 위하여 모드 해석을 수행한다. 모드 해석은 정지 중 모드 해석과 운전 속도에 따른 모드 해석을 구분하여 수행한다. 정지 중 모드 해석 결과는 해석 결과에 대한 검증과 신뢰성을 높이기 위해 실제 터빈 블레이드에 대한 진동 특성 시험을 수행하여 이를 근거로 tuning을 할 수 있는 좋은 자료가 된다. 터빈 회전 속도에 따른 모드 해석 결과를 통해 그림 10과 같이 블레이드의 고유진동수와 진동 모드를 알 수 있다. 즉, 터빈 운전 중 블레이드가 어떠한 주파수에서 어떠한 거동의 형태로 진동할 것인가를 예측할 수 있는 좋은 정보가 되는 것이다.



[그림 10] 터빈 블레이드 군의 진동 모드

진동 특성 해석을 통하여 얻을 수 있는 정보 중 또 다른 유용한 정보로 Campbell 선도와 Interference 선도를 들 수 있다. Campbell 선도는 [그림 11]과 같이 터빈의 운전 속도와 블레이드의 고유 주파수와의 관계를 나타내는 그림으로써 블레이드의 가진 주파수와 고유 특성을 표시하여 운전 주파수에 따른 블레이드의 공진 가능성을 예측하는데 사용되고 있다. 그러나 블레이드에 작용하는 각 가진력과 모드가 교차하는 소위 공진 가능점이 매우 많이 존재함을 알 수 있으며 실제로 이 모든 점에서 공진이 발생되지는 않는다. 사실 블레이드의 공진은 터빈 블레이드에 작용되는 가진 주파수와 블레이드의 고유 주파수가 일치 할

지라도 가진되는 힘의 shape과 블레이드의 모드가 일치하지 않는 경우 발생되지 않는다. 즉, 가진력과 모드가 일치하는 일부 교차점에서만 공진이 발생하는 것이다. 현재 블레이드의 진동 진단 시 많이 사용되고 있는 이 선도로는 운전 중 블레이드의 공진 가능성 여부는 알 수 있으나 블레이드의 공진 여부를 파악하기란 매우 어렵다.



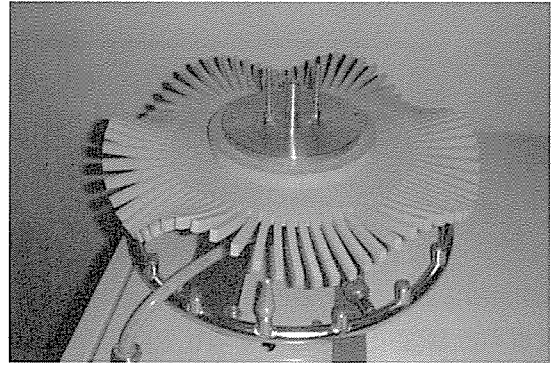
[그림 11] Campbell 선도

블레이드의 가진력에 의한 공진 여부를 판단하는 자료로 Interference 선도를 사용한다. 이는 진동 shape과 주파수의 관계를 나타내는 그래프로써 safe diagram이라고 부르기도 한다. 터빈 블레이드의 진동에 의한 손상을 방지하기 위하여 블레이드에 대한 가진 주파수와 블레이드의 고유 주파수의 공진 가능성 여부를 진단하여야 한다.

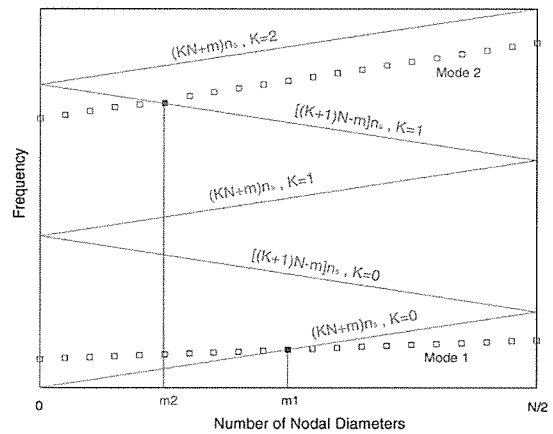
그러나 블레이드는 shroud, tie wire 등으로 grouping 되어 있을 뿐 아니라 터빈 디스크에 조립되어 있으므로 단일 블레이드만의 진동 해석은 큰 의미를 갖지 못한다. 따라서 터빈 블레이드 진동 해석시 터빈 로터의 영향을 고려하여 블레이드와 디스크를 동시에 고려한 bladed disc의 진동 특성을 파악하여야 한다. 일반적으로 디스크의 flexibility로 인하여 bladed disc의 고유 주파수는 블레이드 자체에 비하여 낮아진다. 이러한 bladed disc의 진동 해석을 위하여 디스크의 변형 형태(shape)에 따라 nodal diameter를 사용한다.

즉 진동에 의한 변형이 존재하지 않는 선의 개수를 바탕으로 nodal diameter를 정의하여 bladed disc의 고유 주파수와 nodal diameter와의 관계를 나타내는 interference diagram을 그려 가진력과 모드의 교차점을 찾아낸다. 이 교차점에서는 가진 주파수와 변형의 shape이 일치하는 실제 공진점이라 할 수 있다. 그러나 이러한 공진점에서도 가진력의 크기, 감쇠의 정도

에 의하여 응력의 크기가 다르므로 진단에 있어 충분한 고려가 필요하다. [그림 12]와 [그림 13]은 blade의 노달 모드와 Interference 선도를 보인다.



[그림 12] 6 ND mode



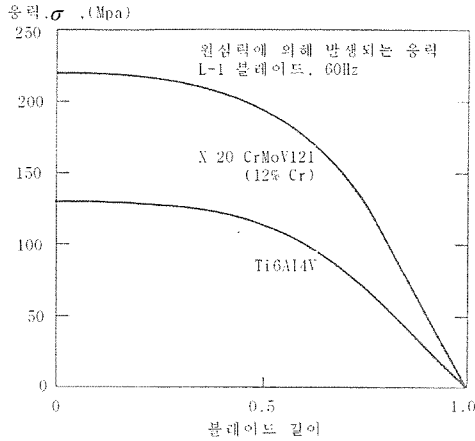
[그림 13] Interference 선도

6.2.5 응력 해석

증기 터빈 블레이드에는 터빈 운전 중 작용되는 여러 힘에 의하여 응력을 받는다. 이는 크게 정 응력과 동 응력으로 나눌 수 있으며 정 응력의 경우 터빈 로터의 회전에 따른 원심력과 블레이드에 작용하는 증기력에 의하여 발생된다. 동 응력의 원인으로는 여러 가지를 들 수 있으나 특히 특정 가진력에 의하여 블레이드 고유 진동수와 일치함으로써 진동이 증폭되는 공진 현상에 의한 응력을 주의 하여야 한다.

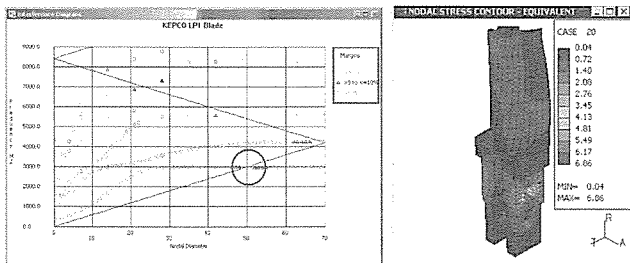
회전에 의해 발생하는 원심 하중은 블레이드의 응력의 주요 원인이다. 고압 및 중압 블레이드는 상대적으로 낮은 응력 흐름으로 인하여 블레이드가 짧고 직경이 작기 때문에 원심 하중이 상대적으로 작다. 반면에 일반적인 저압 최종 단 터빈 블레이드의 정 응력은 블레이드 에어포일(airfoil) 길이의 절반 이상에서 대략 0.5Sy가 되고 길이 80% 이상에서는

0.25Sy(극한 강도)를 초과한다. [그림 14]는 원심 응력의 일반적인 분포를 나타내고 재료의 밀도가 낮은 티타늄의 사용으로 얻는 이점을 보여주고 있다. 원심 응력은 특히 루트 부나 타이와이어 구멍과 같이 응력이 집중되는 곳에서 많은 영향을 받는다.



[그림 14] 원심응력 비교

터빈 블레이드는 유입되는 증기의 유동장의 변화에 의하여 상이한 속도의 압력을 받으며 이로 인한 교번 하중을 받게 된다. 이러한 교번 하중은 블레이드 사이의 유동장에 영향을 받기 때문에 블레이드에 작용하는 응력 또한 변하게 된다. 이 응력의 크기는 블레이드의 설계에 따라 크게 영향을 받는다. 즉, 설계를 잘 못하는 경우 블레이드 내 유동의 분리 현상이 발생되어 큰 bending force를 받기도 한다. 이러한 동응력을 유발시키는 bending load의 교변에 대한 심각성은 블레이드에 작용하는 dynamic force, 블레이드 고유 주파수의 근접 정도, 그리고 감쇠 특성에 따라 다르다. 블레이드의 dynamic force가 크고 가진 주파수가 블레이드의 고유 주파수와 가까이 존재한다고 할지라도 감쇠의 영향이 매우 클 경우 그 위험도가 높지 않다는 것이다. 즉 동적 힘에 의하여 발생하는 에너지는 열로 변하기 때문에 진동의 크기는 감소되



[그림 15] 동응력 해석

는 것이다. 실제 동응력 해석은 [그림 15]에서 보는 바와 같이 Interference 선도에 의해 공진 가능성이 있는 모드를 선택하여 해석한다.

6.2.6 피로 해석

평균 응력에 대한 피로 자료를 나타내는 한 가지 방법으로는 동응력(응력 진폭)과 평균 응력의 관계를 나타내는 Heig-Soderberg 방법, Goodmam 방법, Gerber 방법 등이 있으나 일반적으로 Goodmam 방법이 많이 사용된다. 즉,

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^x = 1$$

이 되고 goodmam 선의 경우 x=1, Gerber 선의 경우 x=2를 적용한다. 또 안전을 위해 항복 강도에 바탕을 두고 설계한다면 Soderberg 선을 이용하고 위 식에서 Su 대신 Sy를 사용하면 된다. Goodman 선도를 사용하는 목적은 피로 손상에 대한 응력 분석 허용치를 설정할 수 있기 때문이다. 즉, 항복 응력점(ultimate strength point)과 endurance limit를 연결한 선을 안전도가 1인 failure line으로 규정하고 응력의 크기가 이 선 이내에 존재하는 경우 안전하다고 생각하는 것이다.

7. 결론

발전소에서 운전되고 있는 터빈은 발전소 운전 신뢰성 및 유용성에 직접적으로 영향을 미치는 핵심 설비이다. 따라서 본 고에서는 증기 터빈 블레이드의 진동에 의한 피로 손상과 해석에 대하여 개략적으로 기술하였다.

일반적으로 터빈 블레이드의 진동 해석을 위하여 주로 단일 블레이드만을 고려하고 있으나 디스크에 의한 영향으로 진동 특성이 변화되므로 전 블레이드와 디스크계를 함께 고려하여 연성 해석하는 것이 신뢰성을 높일 수 있다. 또한 블레이드의 공진 해석을 위하여 주로 고유주파수만을 고려하고 있으나 신뢰성 있는 해석을 위해서 고유주파수와 모드를 함께 고려하여야 하는 것이 바람직하다. 현재 전력연구원에서는 발전소 증기 터빈 블레이드의 모델링을 위하여 블레이드 3차원 측정 장치 및 DB 시스템을 개발하여 활용하고 있으며 블레이드-디스크 계의 진동, 응력 및 피로, flutter해석을 수행하고 있다.