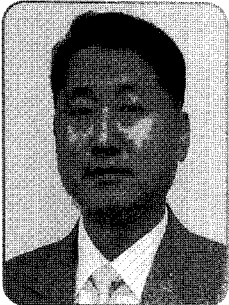


가스터빈 진동특성



한진KPS(주)
기술연구원 설비진단그룹
선임전문원 김아용
Tel : (031)710-4398

1. 서론

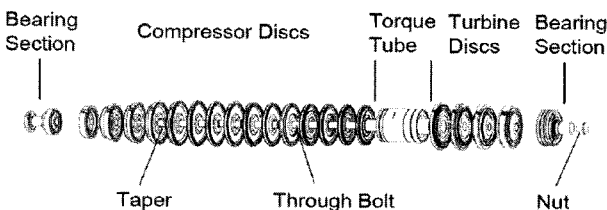
대형 발전용 가스터빈에서 발생하는 진동은 회전체 불평형 진동, 축 정렬 불량, 마찰(rub), 자력 진동 등과 같이 일반적으로 증기터빈에서 발생하는 진동원인과 유사하지만 압축기와 연소기에서 생성된 고온 고압의 가스를 작동유체로 운전되기 때문에 증기터빈에서는 잘 나타나지 않는 다음과 같은 진동특성이 나타난다.

- 1) Thermal growth(열 성장) 진동
- 2) 연소가스에 의한 연소진동
- 3) 터빈 rotor 및 지지구조로 의한 진동특성

위 3가지 진동발생 메커니즘과 개선대책을 사례를 들어 설명하고자 한다.

2. Thermal growth(열 성장) 진동 특성

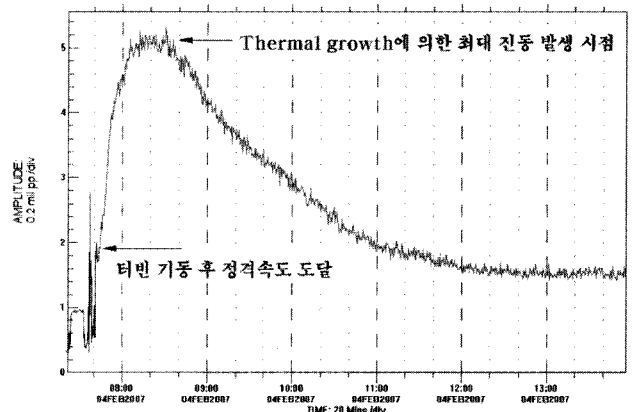
가스터빈 로터는 [그림 1]과 같이 여러 개의 disk를 through bolt (또는 distance piece bolt)로 체결한 구조가 대부분이고, 드물게 각 disk를 용접으로 연결한 형식으로 제작하기도 한다.



[그림 1] V84.3A Gas turbine rotor

발전용 대형 가스터빈을 냉간기동(cold startup)할 때 [그림 2]의 진동 trend 처럼 초기운전 30~60분 사이에 진동이 급속히 증가하는 현상이 발생한다.

이러한 현상을 통상 "thermal growth"(열 성장)라 부른다. 이 thermal growth에 의한 진동증가 현상은 운전시간 경과에 따라 서서히 해소되는데 빠른 경우 3~4시간 길게 발생할 경우 3~4일 정도까지 진동변화가 발생한다.

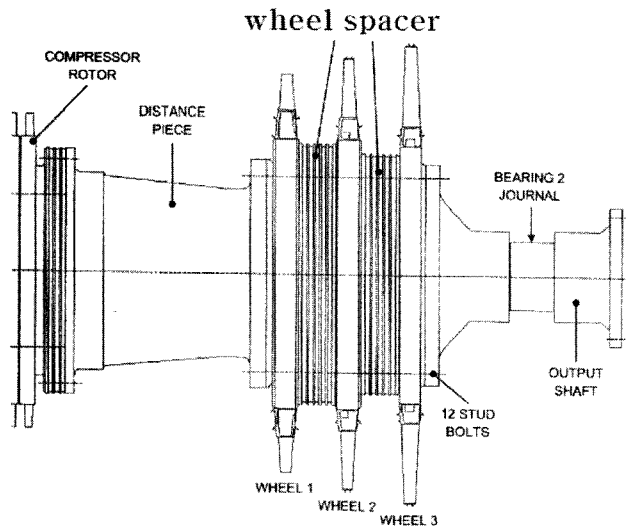


[그림 2] MS7001F G/T 진동 trend plot

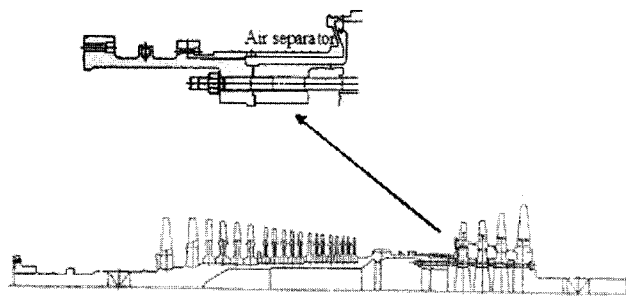
Thermal growth가 발생하는 원인은 압축기에서 추출된 냉각용 공기는 marriage coupling을 통하여 터빈 rotor 내부로 공급되며, 연소기에서 발생한 고온 고압의 가스는 rotor 외부의 blade를 통과하면서 rotor 내/외부간의 온도차의 발생과 함께 로터 구성품(각 disk)간의 결합에 변형을 일으키게 된다. 이러한 변형은 결과적으로 rotor 전체의 구속과 힘을 가져온다. 각 disk간의 결합 틈새가 클수록 축이 더 심하게 휘게 되며 여기에 비례하여 thermal growth 현상은 심해진다. 가스터빈 제작자들은 이러한 문제점들에 대한 해결책으로 curvic coupling과 welded transition 사용을 제시하고 있다.

또 하나의 원인은 rotor 구조상 열 응력에 취약한 부품에서 발생한다는 점이다. 대표적으로 MS 7F 및 9F 계열의 가스터빈은 wheel spacer 부분이 열 응력에

취약하며, W501D5 계열의 가스터빈은 air separator 부분이 취약하여 thermal growth의 주요 원인이 된다([그림 3 및 4] 참조).



[그림 3] MS 7001F rotor의 wheel spacer



[그림 4] W501D5 rotor의 air separator

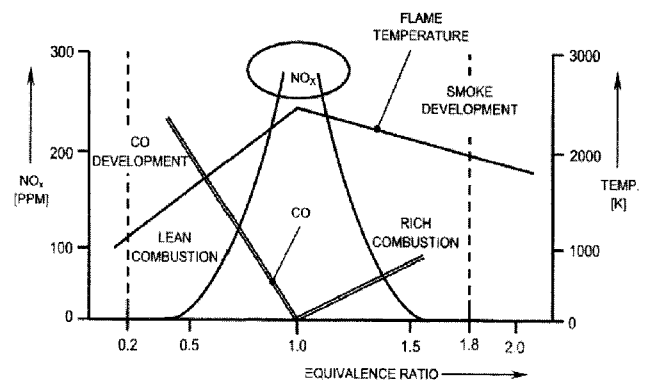
Thermal growth에 의한 진동이 발생할 경우 현장에서 weight balancing을 실시하여 부분적으로 진동 개선은 가능하다. 그렇지만 thermal growth에 의한 열 응력이 해소되는 것은 아니기 때문에 진동이 양호하여도 rotor는 계속해서 열 응력을 받으므로 이 상태가 오래 지속될 경우 rotor 손상사고로 연결되기 쉽다.

Thermal growth는 rotor를 제작할 때부터 잠재적인 문제를 가지고 있기 때문에 발생하며, rotor shop에서 class II B(rotor의 disk를 분해하여 재조립하는 정비)를 실시하여도 해소되지 않는 경우가 많다. 이것을 사전에 예방하는 최선의 대책은 터빈 건설 시운전 때부터 엄격한 성능 인수 시험을 실시하여 잠재적인 문제점을 찾아내는 것이다. 만약 사후에 문제가 드러날 경우 가능한 빨리 제작사와 협의하여 문제를 해결하는 것이 최선의 방안이다.

3. 연소가스에 의한 연소진동

가스터빈에서 연소진동은 배기가스 압력이 맥동을 일으키면서 rotor 및 casing 진동을 발생시키거나 배기가스가 exhaust casing을 가진(exciting)시켜 터빈 casing 및 배기관 전체에 진동을 발생시킨다. 연소진동은 연소가스 중의 NOx 발생을 줄이기 위하여 사용하는 DLN(dry low nox) 연소기에서 연료와 공기의 혼합비를 제어가 적당하지 않을 때 주로 발생한다.

NOx는 가스터빈 배기가스에서 배출되는 질소산화물(Nox)인데 환경오염을 유발하므로 일정 농도 이하로 배출하도록 정부에서 규제하고 있다. [그림 5]는 연소온도와 NOx 발생량 관계 그래프이다.



[그림 5] 연소가스 온도에 따른 Nox 배출 농도

가스터빈 배기가스의 NOx를 줄이기 위하여 일반적으로 다음 3가지 방법을 사용한다.

- 1) Firing using catalyst (촉매 사용)
- 2) Water and steam injection (물/증기분사)
- 3) Pre-mixed gas firing (예 혼합 연소기 사용)

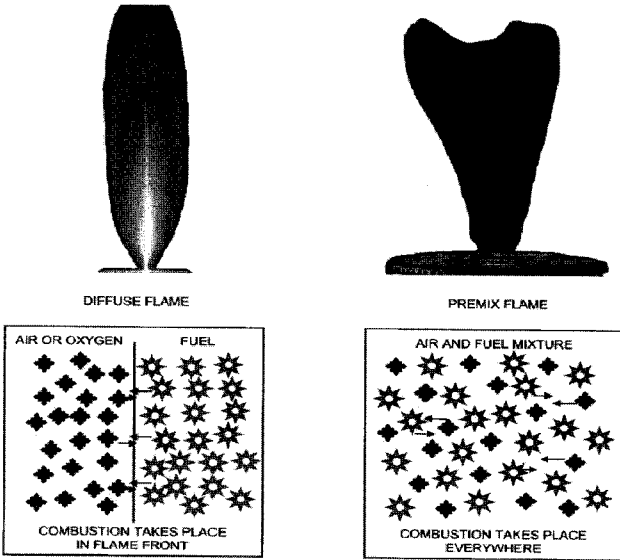
촉매 사용방법은 고비용으로 사용하지 않으며 물/증기 분사방법은 종래의 확산화염에 물 또는 증기를 분사하여 화염온도를 낮춤으로서 NOx 배출량을 줄이는 방식인데 가스터빈 효율이 상대적으로 낮아지고, 물/증기 분사로 인해 고온부의 수명이 저하되고 물/증기의 과도한 소모량이 큰 단점이다.

이러한 문제점들 때문에 근래에는 예 혼합 연소방식인 DLN 연소기를 주로 사용한다. DLN 연소기술의 핵심은 희박 예(豫)혼합연기(Lean Premixed burner)이다.

3.1 DLN 연소기 소개

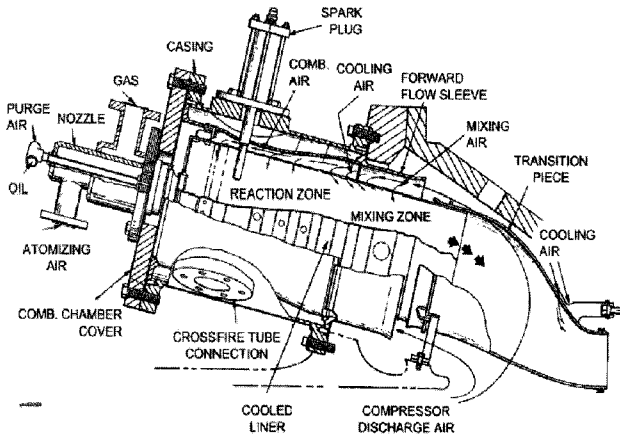
재래식 가스터빈의 확산화염 연소기가 연료와 연소용

공기를 연소실내로 별도 공급하여 연소시키는 확산연소(diffusion burn)를 이용한 데 반하여, DLN 연소기는 연료와 연소공기를 미리 혼합하여 연소실에서 연소하는 방식으로 화염온도가 재래식 확산화염에 비해 낮아 NOx 발생이 적다. 연소실 내에서는 예 혼합 연소방식의 최대 화염온도가 확산 연소방식에 비하여 낮지만 1단 노즐을 통과할 때는 확산화염 연소방식과 온도차가 없어 열 효율 저하는 거의 없다.

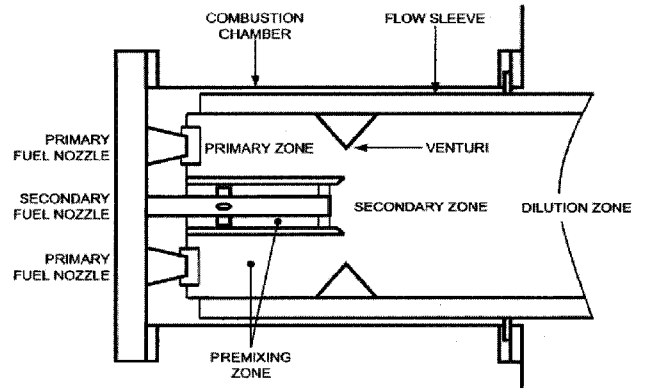


[그림 6] 좌 : 확산화염 우 : 예혼합 화염

그러나 DLN 연소는 당량비(완전연소에 필요한 이론 공기량/실제공기량) 0.6 근처의 희박연소를 하는 방식으로서 화염이 불안정해지기 쉬워 연료/공기의 혼합비율이 부적절할 경우 연소진동이 발생한다. 연소진동은 연소기내의 압력파와 연소열의 변동에 의해 주로 발생되며, 이러한 연소진동이 커지면 연소기 부품의 수명을 단축시키고, 가스터빈의 기계적인 손상을 일으킨다.

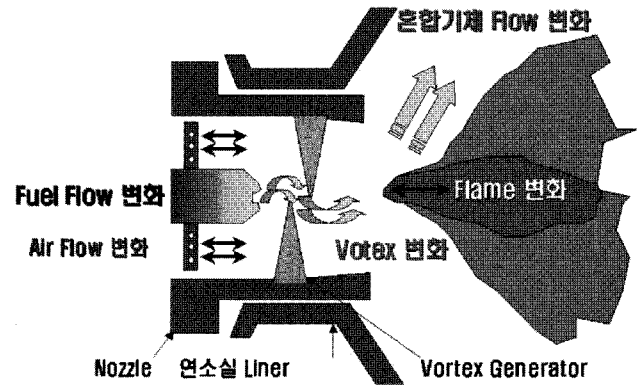


[그림 7] GE 7F 계열 Dual 연료용 연소기



[그림 8] GE사 DLN 연소기 원리

[그림 8]의 fuel nozzle에서 공급된 연료가스는 연소용 압축공기와 primary zone에서 예 혼합되어 dilution zone에서 연소가 이루어진다. [그림 9]는 시각적으로 표현하였다.



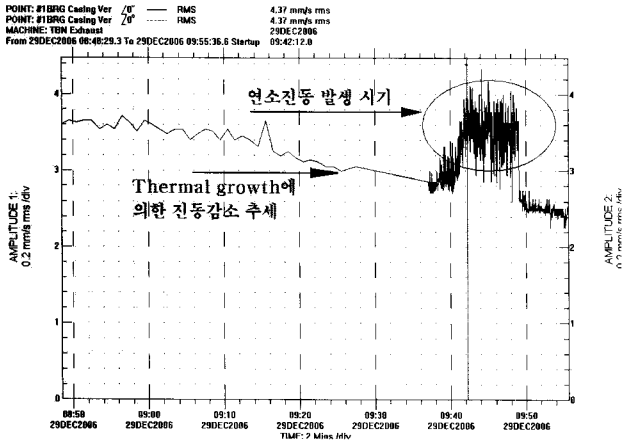
[그림 9] DLN 연소기의 예 혼합 연소

3.2 연소진동 사례

다음 표는 연료/공기 비율제어가 부적절하여 발생한 발전용 가스터빈의 연소진동 사례이다.

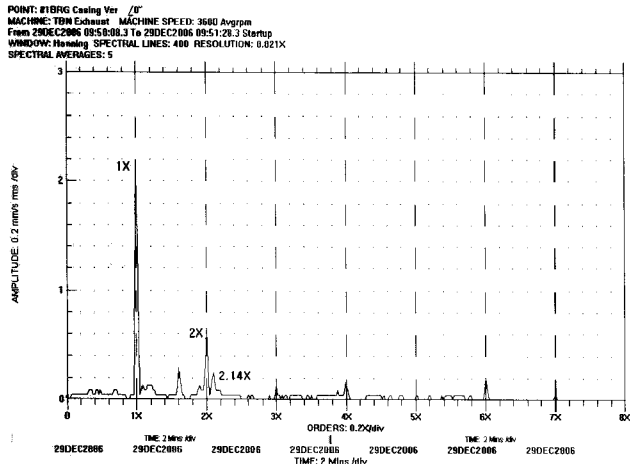
연소진동	출력	진동
발생 전	79MW	3.2 mm/s
발생 후	84MW	3.2~4.5 mm/s

[그림 10]의 연소진동 trend plot을 보면 79MW 정상부하 운전 중 thermal growth 영향으로 진동이 3.6mm/s에서 3.2mm/s까지 점차 감소하던 중 출력을 84MW로 증발하자 진동이 3.2~4.5mm/s로 급격히 증가하면서 hunting하는 현상이 발생하였다. 연소진동 발생여부를 확인하기 위하여 출력을 다시 79MW로 감발하자 진동이 원상태로 감소하면서 hunting하는 현상도 같이 소멸된 사례이다.

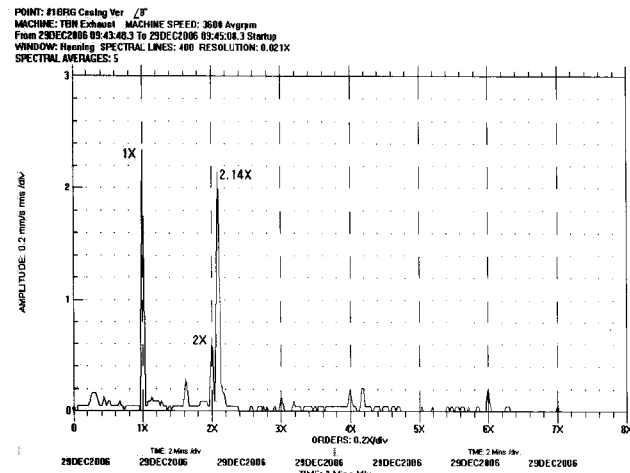


[그림 10] 연소진동 trend plot

[그림 11]은 연소진동 발생 전 FFT이며, [그림 12]는 연소진동 발생 당시 FFT이다. 두 FFT를 비교하면 정상상태에서는 1X, 2X RPM 성분이 주로 발생하였으나 연소진동 발생 시에는 2.14X 진동 성분이 크게 증가하였다.



[그림 11] 79MW 정상상태 진동 주파수

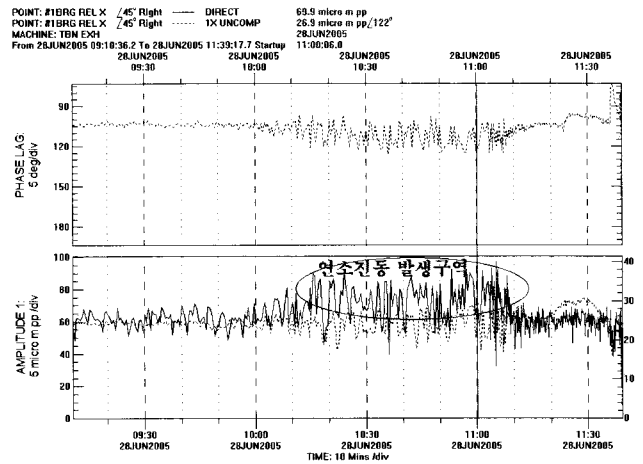


[그림 12] 84MW 연소진동 발생 중 진동 주파수

2.14X 진동이 크게 증가한 원인은 연소가스 압력이 맥동하면서 가스터빈 exhaust casing을 가진시켜 (exciting) 발생하는 일종의 공진 성분의 진동으로 판단된다.

3.3 물 분사에 의한 연소진동 사례

재래식 NOx 저감방식인 물/증기를 분사하는 경우도 DLN과 비슷한 화염 불안정에 의한 압력 맥동이 발생하면서 연소진동이 발생한다. 물 분사 방식은 연료제어에 관계없이 확산화염에 물을 분사하기 때문에 연료/공기 제어와 관계없이 발생하며, 진동은 물 분사량에 비례하여 증가하고 크게 hunting하는 현상이 발생한다.



[그림 13] Water injection에 의한 연소진동

[그림 13]은 Westinghouse 계열 가스터빈에서 확산화염 연소 중 water injection 49.5% 운전 중 연소진동이 발생한 사례이다.

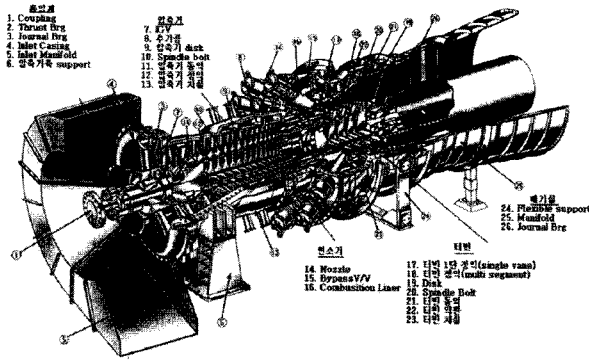
3.4 연소진동 발생대책

- 1) DLN 연소기에서 연소진동이 발생할 경우 연료와 연소공기의 비율제어(tuning 작업)가 부적절한 경우이므로 이를 정확히 조정하면 대부분 문제는 해결된다.
- 2) 물 분사방식은 열 효율이 낮아지게 되고 연소진동으로 인한 기계 수명이 단축되므로 가능한 DLN 연소기로 교체하는 것이 유리할 것이다.

4. 지지구조에 의한 진동특성

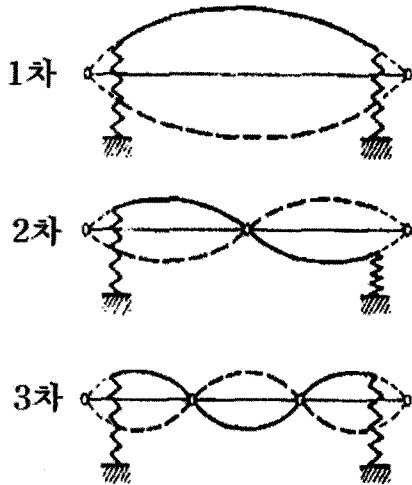
가스터빈 로터는 지지구조에 비하여 매우 무겁다는 특성을 가지고 있다.

[그림 14]를 보면 가스터빈은 압축기 전단과 터빈 후

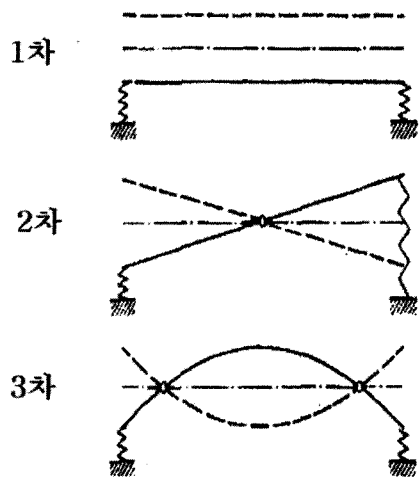


[그림 14] M501D5 Gas turbine 지지구조

단 2곳에서 유연한 지지대(support)로 지지되게 되어 있다. (세 번째 지지대는 exhaust casing과 duct를 지지하고 있다) 이러한 구조는 터빈 열 팽창에 의한 casing의 이동을 원활하게 흡수할 수 있도록 설계된 것이다.



[그림 15] 일반 유연 베어링으로 지지된 탄성 회전체 저차 고유모드 (증기터빈)



[그림 16] 매우 유연한 베어링으로 지지된 탄성 회전체 저차 고유모드 (가스터빈)

그러나 rotor 중량에 비하여 지지구조가 취약하게 되므로 Rotor 동력학적인 고유모드는 일반 증기터빈과 매우 다르게 나타난다. 즉 대부분 증기터빈의 경우 [그림 15]의 “일반 유연 베어링으로 지지된 탄성 회전체 저차 고유모드” 형태를 나타내는 반면에 가스터빈은 지지구조의 취약으로 [그림 16]과 같은 “매우 유연한 베어링으로 지지된 탄성 회전체 저차 고유모드”의 형태를 나타낸다.

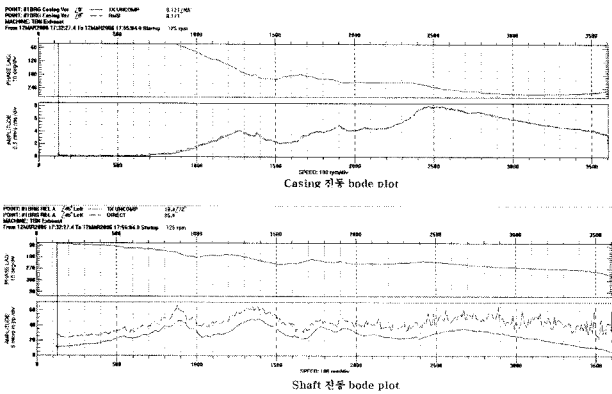
대부분의 발전용 대형 가스터빈 로터는 1차 임계속도가 1100~1600rpm, 2차 임계가 2400~2900rpm에 존재하며, 3차 임계는 운전속도 부근에 근접해 있다. 가스터빈의 1차 임계는 “bouncing mode”로 rotor가 bending 모드가 아니고 터빈을 지지하는 양단의 support가 동상(static phase)으로 상하 진동을 하게 된다. 2차 임계는 “rocking mode”로 터빈 양단의 support가 서로 180도 다른 역상(couple phase)으로 진동하게 된다. 3차 임계는 “1차 bending mode”로 rotor bending이 처음으로 발생하는 모드이다.

이러한 지지구조로 인한 진동특성은 두 가지가 있는데 하나는 1, 2차 임계에서 축 진동에 비하여 casing 진동이 높게 발생하고, 둘째는 3차 임계에서 static unbalance 진동이 발생하면 field balancing 으로 교정하는 것이 매우 어렵워지게 된다.

4.1 Casing 진동 사례

[그림 17]은 가스터빈의 전형적인 기동 중 casing 및 shaft 진동 bode plot(회전수대 진폭/위상)이다. 1차와 2차 임계속도는 약 1300rpm과 2500rpm이다. Casing 진동(상부 bode)은 critical 진동이 명확히 나타내는데 반하여 shaft 진동(하부 bode)에서는 분명하게 나타나지 않는다. 또 이 터빈의 진동 경보값 설정치는 casing 7.1mm/s, shaft 150 μ m인데 2차 임계(2500rpm)에서 casing은 경보 설정치를 초과한 7.9mm/s인데 반하여 shaft 진동은 53 μ m로 양호하다. 이러한 원인은 지지구조가 유연하고, 감쇠가 작기 때문에 casing 진동은 높게 발생하지만 축의 상대진동은 낮게 발생하는 현상이다.

그러므로 가스터빈 진동 감시기구는 casing 진동이 우선되어야 하며, shaft 진동은 보조 감시기구로 활용하는 것이 필요하다. 만약 casing 진동을 감시하지 않고 shaft 진동으로만 감시할 경우 축의 상대진동과 절대진동 두 가지를 함께 감시하는 것이 필수적이다.



[그림 17] Casing 진동과 shaft 진동 비교

4.2 현장 balancing의 문제점

가스터빈 3차 모드를 다시 살펴보면 [그림 18]처럼 고 유모드에 대응하는 절점이 베어링 인쪽에 위치해 있다.

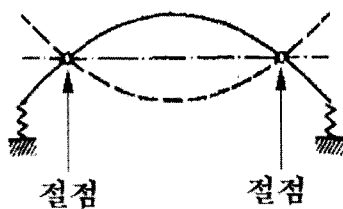
정격 운전속도에서 불평형 진동이 발생하면 3차 모드에 근접해 있기 때문에 양단 베어링 진동이 동상 (static unbalance)이 되기 쉽고 이 경우 현장에서 balancing을 실시하여도 진동이 교정되지 않는 경우가 많다.

첫째 원인은 부착하는 weight 위치가 절점에 가까운 위치이기 때문에 balancing 응답이 작게 나타나 교정이 어렵고,

둘째 rotor 중간부분에 unbalance가 있는 경우 이 위치에서 balancing을 실시해야하는데 현장에서 이 위치에 weight를 부착할 수 없는 구조의 터빈이 대부분이기 때문에 교정이 어렵다. 터빈 양단의 베어링에서 balancing을 실시하여 정격속도 진동이 감소할 수는 있지만 1차 또는 2차 임계속도에서 진동이 증가하는 특성이 있다. 이러한 경우에는 정비공장에서 shop balancing을 실시하여야 진동교정이 가능하다.

5. 요약 및 기타 진동문제

가스터빈에서 진동이 주로 발생하는 3가지 사안에 대하여 발생하는 메커니즘과 개선대책을 사례를 들어 설명하였다. 3가지 내용을 간단히 요약하면



[그림 18] 가스터빈의 3차 모드

1) Thermal growth 문제

Thermal growth는 터빈 제작당시부터 잠재적인 문제점을 가지고 있기 때문에 발생하며, 최선의 대책은 터빈을 설치할 때 엄격한 성능/인수시험을 실시하여 조기에 문제점을 발견하여 제작자와 협의하는 것이 필요하다.

또 Thermal growth는 기동/정지 횟수가 많을수록, 냉간상태에서 기동할 경우 심각하게 발생하는 특성이 있으므로 운전에 주의하여야 한다.

2) 연소진동 문제

DLN 연소기에서 발생하는 연소진동 문제는 연소기 tuning(연료와 연소공기의 비율제어)을 정확히 실시하는 것이 중요하고, 물 분사방식의 NOx 저감방식은 고비용과 진동제어가 되지 않으므로 DLN 형식으로 바꾸는 것이 유리하다.

3) 지지구조에 의한 문제

정상부하 운전 중 진동이 발생할 경우 그 원인 진단과 교정대책을 세우기 위하여 가스터빈의 지지구조와 rotor의 구조적인 특성을 잘 파악하는 것이 중요하다. Rotor 특성상 현장에서 balancing이 되지 않는 경우 shop balancing이 필요한지는 지지구조와 rotor의 bending 모드를 면밀한 검토하는 것이 필요하다.

4) 기타 진동문제들

가스터빈에의 회전부위와 고정부위의 마찰로 인한 진동(rub)이 있다. Rub에 의한 진동은 빈번하게 발생하지만 증기터빈에서 발생하는 진동과 유사하다.

가스터빈 압축기에서 발생하는 서징과 실속(stall)은 자주 발생하지는 않지만 일단 발생할 경우 매우 큰 진동을 발생시킨다. 서징과 실속은 정상적인 운전절차를 지키는 경우 발생가능성은 희박하다.

가스터빈 blade(또는 bucket) 진동이 과도할 경우 blade 절손 사고가 종종 발생한다. 그렇지만 운전 중인 가스터빈의 blade 진동을 감시할 수 있는 상업용 감시 시스템은 현재 없기 때문에 현장에서 이를 사전에 미리 진단하기는 어렵다.

Blade 손상사고가 발생하면 경제적 손실도 크지만 사고에 따른 책임문제로 사고원인이 왜곡될 수 있다. 이러한 논쟁을 피하려면 가스터빈 설계에 관한 자료 특히 campbell diagram 등을 제작자로부터 꼭 확보해 두어야 한다.