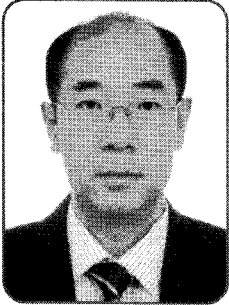


진동 Data의 형태 및 해석기술



한진KPS 기술연구원
수석전문원 봉석근
TEL : (031)710-4390

1. 서문

최근에는 IT 기술의 발전과 함께 성능이 좋은 진동 Monitoring System과 진동 계측기가 지속적으로 출시되고 있으며, 이와 아울러 진동분야의 전문가가 아니라도 정밀한 진동 자료를 취득하는데 큰 어려움은 없는 것이 현실이다.

회전기계의 특정 문제점을 검출하고 확인하기 위하여 진동 자료를 취득하고 분석하는 방법은 여러 가지가 있다. 여기에서는 취득되는 진동 자료의 종류와 분석 기술에 대하여 설명하고자 한다. 진단을 실시하기 전에 기계이력 및 기계특성을 파악하는 것은 정확한 진단의 기본이라 할 수 있다.

2. 기계의 이력과 진동

진동이 과도하게 증가되었을 때 기계의 이력을 검토해 보면 많은 것을 알 수 있게 된다. 예를 들면 Coupling, Sheaves 또는 Bearing과 같은 부품을 교체한 경우라면 Balance나 Alignment가 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 구조물에 기계를 추가로 설치한 경우는 구조물의 고유진동수가 변하여 공진의 원인이 될 수 있다. 속도, 부하, 온도 또는 압력 등 정상운전 조건이 변하면 Unbalance, Cavitation, Aerodynamics 또는 Hydraulic Force 등에 의해 기계진동의 큰 변화를 일으킬 수 있다. 기계에 Arc 용접을 할 때 부적절한 Grounding은 Bearing이나 Coupling에 손상을 일

으킬 수 있다.

기계진동이 증가하는 것이 보이면 어느 경우든지 그 원인은 일반적으로 기계의 기계적 상태의 마모 또는 변형에 의한 것이든지 또는 기계나 구조물에 발생된 변화에 의한 것이다. 많은 경우 이런 변화들이 진동증가와 관련이 되었는가를 알기 위해서 기계의 이력을 검토함으로써 상당한 분석시간과 노력을 절약할 수 있다.

3. 기계의 특성과 진동

회전수(rpm), Bearing 형식, Gear 주파수, Coupling의 형태 등과 같은 기계의 특성을 검토하면 예상되는 진동주파수를 파악하는데 크게 도움이 된다. 이러한자료는 분석을 위해 필요한 계측장비 및 진동픽업(transducer)의 형식을 결정하는데 도움이 될 것이다.

기계의 운전특성 또한 필요한 계측장비의 형식을 결정하는데 도움이 된다. 예를 들면 수명이 대단히 짧은 생산 기계 공구는 제한된 분석시간 때문에 Real Time Spectrum Analyzer가 필요하다. 연속적으로 속도나 부하가 변화되는 가변상태를 가지는 기계는 Real Time Analysis Tracking Filter 기능을 가진 계측장비의 사용이 요구된다. 대단히 복잡적이고, 불규칙하거나 과도적인 진동을 가지는 기계는 Spectrum Averaging 또는 "Transient Capture" 기능을 필요로 한다.

진동분석은 통상 2가지 단계가 있다. 첫째는 정확하게 진동 자료를 취득하는 것이고, 둘째는 이 자료를 평가, 분석하는 것이다.

4. 운전 상태에 따른 진동 Data

4.1 정상 운전상태(Steady State Operation Conditions)

기계가 정속으로 운전되고 있고, 주요 및 보조 운전 자료가 변화하지 않거나, 비록 변하더라도 아주 서서히 변화할 때를 정상 운전 상태로 정의한다.

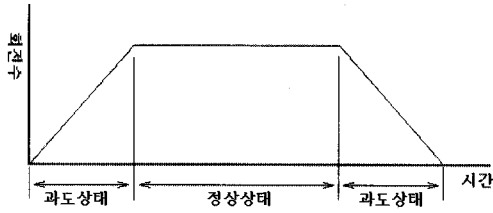


그림. 과도상태와 정상상태 구분

▣ 정상 운전 상태에서 분석에 유용한 Plot

Time Base Display, Orbit Plot, Trend Plot(진동, 위상각), Spectrum 등

4.2 과도 운전상태(Transient Operating Conditions)

과도운전 상태는 통상 기동 및 정지 시와 관련이 있다. 부하나 속도변화를 가지는 과도 상태에서의 진동 Data 분석은 설비의 결합상태 또는 특성을 파악하는데 중요한 정보를 제공해 준다.

▣ 과도상태에서 분석에 유용한 Plot

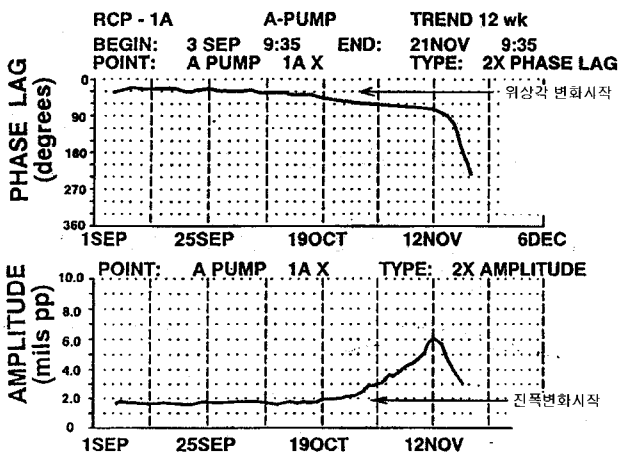
Bode Plot, Polar Plot, Cascade Plot, Average Shaft Centerline Plot, Spectrum 등

5. 각종 진동 Data의 이해 및 해석

5.1 진폭, 위상 대 시간선도(The amplitude, phase vs time plot)

진동 진폭 및 위상각을 계속하여 기록함으로써 기계적인 문제가 시간의 경과에 따라 급격히 발생했는가, 점진적으로 발생했는가를 알 수 있다.

이것은 중요기계의 정지여부를 결정하는데 중요한 정보가 된다. 만약 진동이 오랜 기간에 걸쳐 매우 서서히 증가되어 왔다면 정비를 위한 정지는 필요시 연기할 수



있다. 그러나 만약 진동이 갑자기 증가한다면 정밀진단을 즉시 실시해야 하고 필요시 정비를 실시하여야 한다. 이때 정밀진단 결과는 정비범위와 정비공정을 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다. 진폭, 위상 대 시간 선도는 이상 문제를 조기 발견하는데 결정적인 도움을 준다.

5.2 축 중심선도(The Shaft Centerline Plot)

X-Y 비접촉식(Non-Contact) 픽업으로 부터 DC Gap Voltage를 계속 감시하면 결합을 진단할 수 있는 유용한 정보를 얻을 수 있다. 정지상태→기동상태→정상운전 상태에서 DC Gap Voltage를 연속적으로 취득하면 베어링 내에서의 축 중심의 위치변화를 알 수 있어 설비진단 및 정비에 유용하게 활용할 수 있다.

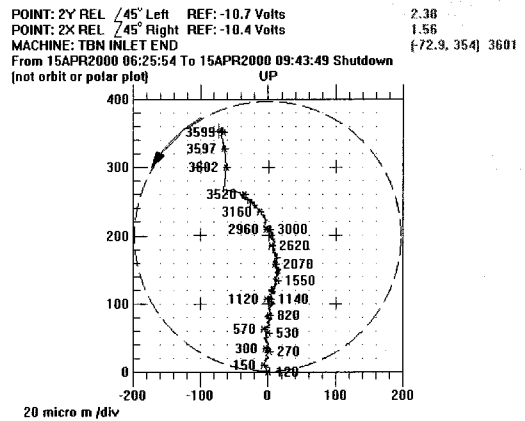


그림. Average Shaft Centerline Plot (기동부터 3600RPM 승속 예)

5.3 스펙트럼 (Spectrum, 주파수 대 진폭)

진동주파수별 진동진폭 크기를 나타낸 것으로 진동분석을 위해서 매우 유용한 방법이다. Spectrum은 Y 축은 진폭, X 축은 진동주파수를 나타낸다.

기계의 진동은 그 구성요소나 고장 원인에 따라 각기 고유한 주파수의 진동을 발생시키므로 Spectrum은 진동 발생의 원인 규명에 매우 유효한 데이터이다.

진동진폭 대 진동주파수는 여러 가지 방법으로 얻을 수 있는데, 크게 나누어 Swept Filter를 이용하는 방법과 Real Time 분석기(FFT)를 이용하는 방법이 있는데 근래에는 거의 Real Time 분석기가 사용된다.

진동이 크게 발생하는 주파수 대역은, 결합원인을 파악할 수 있는 중요한 실마리를 제공해 준다. 따라서 기계 문제점 진단 시에는 Filter-out(Total 진동) 진동값만으로 심각도를 판단하지 말고, 철저한 진동주파수 분석이 이루어져야 정확한 기계진단이 가능해 진다.

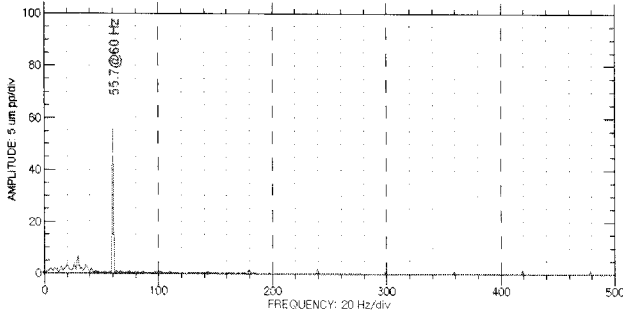


그림 3. Spectrum Plot (1X 주파수가 60Hz의 경우 예)

상기 그림은 Steam Turbine에서 Shaft 진동에 대한 Spectrum의 일예로, 종축은 진폭을 횡축은 진동 주파수를 나타내 주고 있다.

5.4 Waterfall Plot(주파수 대 진폭 대 시간 또는 Spectrum 대 시간)

Waterfall Plot은 선택된 기계 진동 측정 점에서의 Spectrum Plot들을 일정시간 주기로 나타내어 비교한 것이다. 가장 좋은 비교는 동일한 운전 조건하에서 Spectrum을 취했을 때 이루어진다. Waterfall Plot은 진동 Spectrum의 분명한 경향을 나타낸다. 따라서 진동이 변화되었을 때 언제, 어떤 주파수가 변화되었는지를 찾아내는데 유용하게 활용된다.

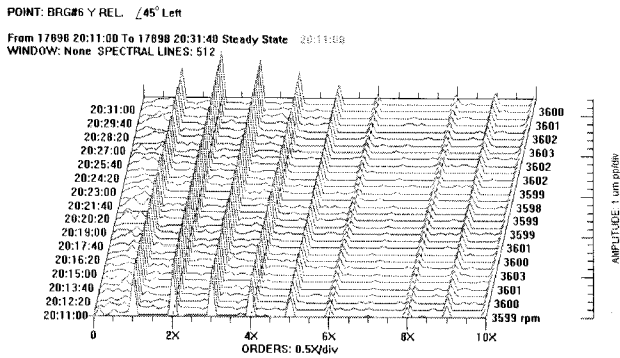


그림. Waterfall Plot

5.5 Cascade Plot (주파수-진폭 대 RPM = Spectrum 대 RPM)

Waterfall과 Cascade는 Plot이 비슷하나, Waterfall이 Spectrum을 시간대별로 나타내 주는 것, 즉 Spectrum의 경향분석인데 비하여 Cascade는 Spectrum을 회전기계의 속도별로 나타낸 것이다. 따라서 정상 운전 상태일 때는 Waterfall이 사용되며 과도 운전 상태일 때는 Cascade가 사용된다. 비록 과도 상태일지라도 일정 회전수마다가 아닌 일정 시간마다 Sampling하여 Waterfall을 사용할 수는 있다.

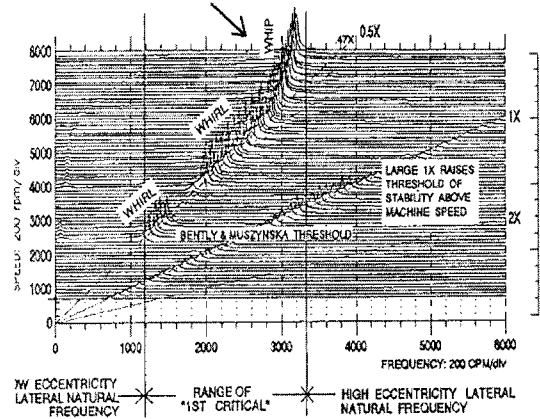


그림. Cascade Plot

하나의 Spectrum은 특별한 속도 특별한 부하에서 한순간의 진동특성을 보여주는데 반하여, Cascade Plot은 기동(또는 정지)시 반복하여 Spectrum을 관찰하는 것이 가능하다. 예를 들어 기동시 발생된 여러 주파수에 대하여 임계속도에서 가진 되는지 혹은 공진 구간이 있는지와 부하, 온도 등 다른 운전변수의 변동에 따른 기계의 진동진폭과 주파수의 변화를 알아야 할 필요가 있다.

Real Time Spectrum Analyzer는 고속으로 분석할 수 있는 능력이 있으므로 이러한 요구조건에 이상적으로 부응할 수 있다. 즉, Cascade 및 Waterfall은 고유진동 구역의 통과여부, Oil Whip과 Oil Whirl의 존재 및 Oil Whirl로부터 Oil Whip으로 변화되는 모습은 물론 1X, 2X, 3X 등의 존재여부와 이들의 크기를 비교할 수 있으므로 진동원인 규명에 아주 유용하다.

5.6 Bode Plot(진폭-위상각 대 RPM)

회전기계의 응답 특성을 파악하기 위해서 일반적으로 Bode Plot이 사용된다.

이는 RPM에 대한 회전속도의 진동진폭(1X, 2X 등)

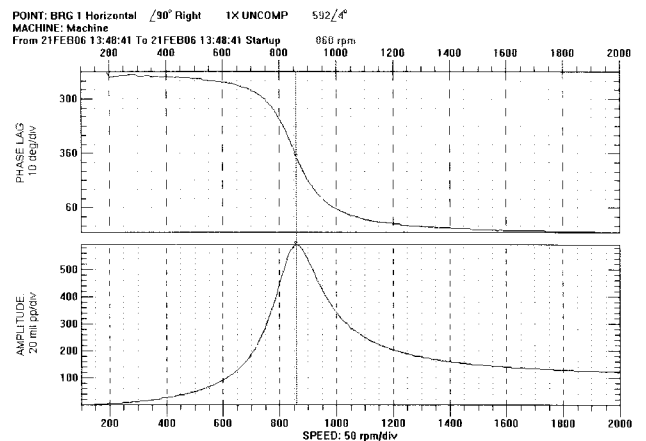


그림. Bode Plot (위험속도 855RPM)

과 위상 지연각을 나타낸 것이다. 이 Plot은 기계의 일정 속도영역에서 나타나는 위험속도(Critical Speed)를 정확히 판단할 때, Damping Ratio, Rotor의 공진여부, 위험속도 영역의 진동을 감소시키기 위한 Critical Weight Balancing시 매우 유용하게 활용된다.

상기 그림에서 위험속도는 855RPM에서 나타나고 있다. 일부는 위험속도를 기계의 기동, 정지 시에 진동이 급격히 상승하는 현상으로 인식하고 있으나, 위험속도의 정확한 정의는 진동이 크게 증가되는 속도 영역이 아니라 위상각이 180° 변화되는 영역으로 정의한다. 따라서 어떤 기계에서는 진동의 큰 증가없이 위상각만 180도 변화하는 경우도 종종 발생되며, 이러한 경우는 통상 Rotor가 잘 Balance되었을 때 나타나게 된다.

5.7 Polar Plot(진폭, 위상각 대 RPM)

Polar Plot은 극좌표에서 축의 회전속도 함수로써 그려진 연속된 진동 Vector(전형적으로 1X)이다. 각기 다른 회전속도에서 1X 진동 Vector의 진폭 및 위상 지연각이 2 축상에 직접 그려진다. 대응하는 축 회전속도도 기재될 수 있다.

Polar Plot은 Bode Plot과 동일한 정보를 가지고 있으나, 강조하는 바는 다르다. 즉, Slow Roll Speed, Slow Roll Vector 및 동기 증폭계수는 통상 Bode Plot에서 얻기가 용이하고, Heavy spot과 Structural Response는 통상 Polar Plot으로 확인하기가 보다 쉽다.

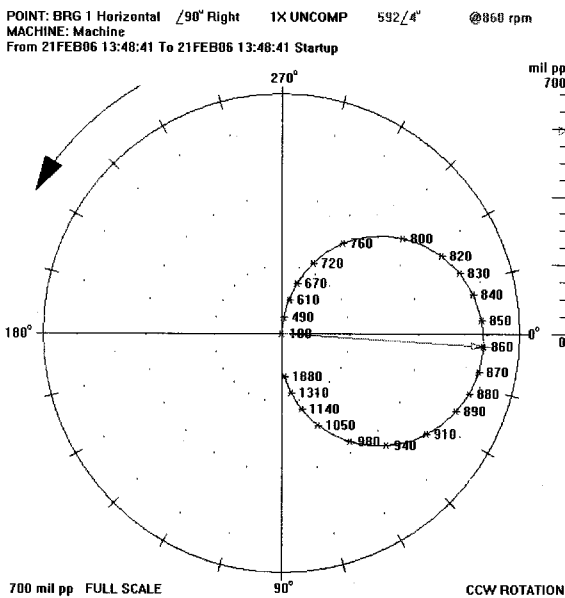


그림. Polar Plot

5.8 시간파형(Time Waveform)

비록 진폭 대 주파수(스펙트럼) 특성에 의한 진동분석이 기계 진동문제 해결에 유용하지만, Gear나 구름베어링을 구성부품으로 갖는 기계의 결함을 진단하고 거동을 진단하기 위해서는 Time Waveform을 관찰하는 것이 도움이 된다.

Waveform의 수직 축은 진폭이고 수평축은 시간을 나타낸다.

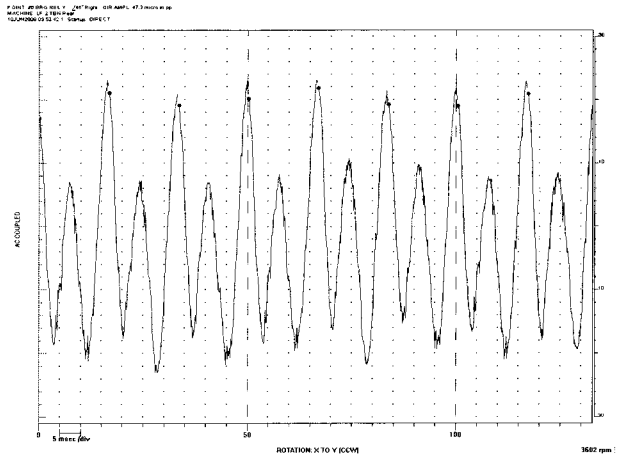


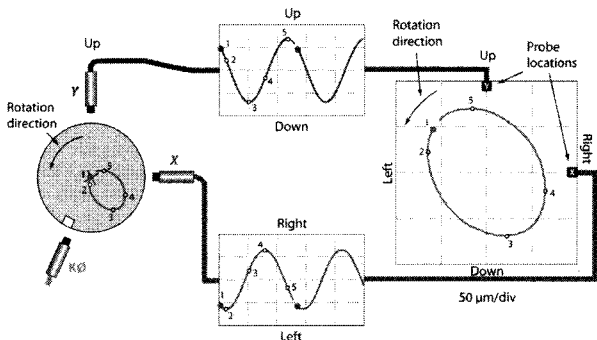
그림. Time Waveform

어떤 기계적 문제의 경우 주파수는 같더라도 동적 거동(dynamic behavior)은 아주 다르다. 예를 들어 기어에서 하나의 이가 변형되거나 손상된 경우 그 이 매 회전시 마다 맞물리는 기어에 충격을 가하여 1X RPM의 진동주파수를 발생시킬 것이다. 이것은 Unbalance에 의한 진동으로 잘못 판단할 수 있다.

그러나 Waveform으로 보면 손상된 기어에 의한 진동과 Unbalance에 의한 진동은 확연히 구별된다.

5.9 Shaft Orbit Plot

Spectrum 및 Waveform 이외에 진동 해석에 유용한 데이터는 Shaft Orbit이다. 이를 얻기 위해서는 각 베어링에 두 개의 Non-contact 픽업을 그림과 같이 90° 각도로 설치해야 한다. 한 픽업으로부터 발생된



신호는 수평축 입력이 되고 다른 픽업으로부터 발생된 출력은 수직 축 입력이 된다.

Orbit Data를 수집할 때 취득하려는 주파수 기준이 없으면(예 : 1X rpm) 주파수 정보를 얻을 수 없다. 예로써 그림과 같은 경우 주파수가 1X RPM인 곳에서는 통상적으로 Unbalance 상태라고 간주될 수 있다.

동기 기준 Pulse는 X, Y 픽업 이외에 또 다른 Non-Contact 픽업을 설치하면 얻어질 수 있으며, 계측기에서는 이 기준 Pulse를 Orbit에서 “Blank”로 표시한다.

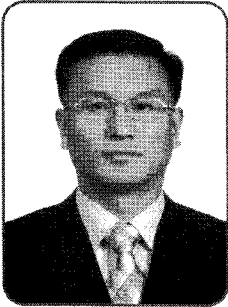
Orbit Plot은 무게 불평형, 예압(Preload)의 상태,

Rubbing 상태, Shaft면의 흠집(Glitch) 등을 진단하는 유용한 도구로 활용된다.

참고 문헌

1. 봉석근외 6명, 2007, “기계상태 감시 및 진단 실무”, 한전KPS.
2. BENTLY NEVADA, 1993, “Machinery Diagnostics”
3. Donald E, Bently, 2002, “Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics”

증기터빈 성능시험 및 성능분석 기법(3)



한전전력연구원
엔지니어링센터
책임연구원/항공원
Tel : (042)865-7591

- 2) 고품미립자에 의한 침식
- 3) 증기통로의 기계적 손상
- 4) Peening 혹은 이물질에 의한 손상
- 5) 증기통로의 Radial 및 Axial Seal 간극 증대 등이 있으며

상기 문제는 다음과 같은 사유로 손실이 일어난다. 즉 ① 노즐이나 버킷의 면적변화에 따른 단락에너지 분배변화, ② 노즐이나 버킷의 형상변화에 따른 공기역학적 손실(Aerodynamic loss), ③ 표면조도에 악화에 의한 마찰손실 증가, ④ 실 및 패킹 간극 증가로 인한 누설손실 증가, ⑤ 압력비, 증기속도, 증기의 유입각도 변화에 따른 속도삼각형 변화에 기인하며, 성능저하형태에 따른 손실비율은 ① 노즐 형상변화에 따른 손실이 40 %, ② 버킷 형상변화에 따른 손실이 5 %, ③ 표면 거칠기 증가에 따른 손실이 35 %, ④ 실, 패킹의 누설 손실이 20 %를 각각 점유하고 있다.

[주1] 단락에너지 분배 손실

이상적인 단락의 효율은 그림에서처럼 속도비(Wheel 속도/이론증기속도)와 버킷의 반동도에 따라 변한다. 속도비 중 터빈의 날개속도는 일정하게 주어져 있다.

7. 터빈의 설비상태에 따른 성능분석

가. 터빈성능에 영향을 미치는 인자

터빈성능에 영향을 주는 설비는 크게 터빈본체와 터빈의 부속기기의 2가지로 대별되며, 터빈본체에 의한 성능저하로는 크게 운전조건과 터빈 기계적 조건의 2가지로 구별할 수 있고, 터빈본체 이외의 설비에 의한 성능저하로는 복수기, 급수가열기, 급수펌프 구동터빈 및 각종 밸브들의 격리상태 등이 있다.

나. 터빈본체설비의 성능저하형태 분류

- 1) 증기통로의 침전물 부착