

회전기계

석유화학공장에서의
회전기계류에 대한 소고

空士 機械工学科 尹錫哲

1. 서론

석유화학 공장에서는 각 종류의 압축기, 펌프, 팬 등의 회전기계류와 저장 탱크 및 파이프라인 등등으로 구성되어 있다. 그런데 philip석유회사에서 8단계 압축기의 불안정한 작동으로 인하여 6개월간 전 생산라인을 중단한 경우가 발생한 사례가 있고, 또한 Kaybob 천연가스 공장에서도 9단계 원심압축기의 불안정성으로 8개월간 공장 전체가 가동 정지되었다. 이러한 사례로 보아서 회전기계류가 석유화학 공장의 공정에 미치는 영향은 가히 짐작할 수 있다.

우선 에틸렌 플랜트에서 사용하고 있는 회전기계류는 표 1에 53개 종류와 전 공정에 미치는 정도에 대하여 나타내었다. 이들은 넓은 범위의 공정조건에서 작동되는데, 온도는 1580°F ~ -240°F의 범위이고 압력은 585psig ~ -28Inch Hg, 회전수는 35,000rpm ~ 2rpm, 동력은 최대 30,000HP가 요구되고 있다. 표 2에서 보는 것과 같이 190개에서 22개의 회전기계류는 에틸렌 플랜트 공정에 Critical한 범주에 속하는데 이것은 전체 제조공장 기계류의 12%에 해당되나, 공장 요구동력의 81%를 사용하고 있다. 또한 Essential에 속하는 회전기계류는 25%에 해당되면서 공장동력의 11%를 소모하고 있다. 그러므로 전 제조공장의 회전기계류 중에서 37%가 공장동력의 92%, 즉 거의 공장 전체동력을 사용하고 있다는 결론을 얻을 수 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 석유화학 공장에서의 회전기계류가 전 공정에 중요한 영향을 주고 있으므로 이러한 기계류의 이상진동 현상을 조기에 관찰하여 진단하는 것을 필수적이라 할 수 있다.

회전기계류의 모니터링은 기계가 생긴 이래로 존재하여 왔다. 기계가 파손되어 인명의 안전과 기계의 경제적 운영에 심각한 영향을 미침에 따라, 인간은 회전기계류의 모니터 시스템에 대하여 인식하게 되었다. 초기에는 사람의 감각을 이용하였는데 경험에 의하여 감각기술의 축적에도 불구하고 실제적인 기계의 파손을 가져왔다. 기계류가 대형화 및 고속화되어 정교한 설계를 요구함에 따라 파손으로 인한 인명안전의 중요성이 증대하게 되고 파손된 기계를 보수하는데 비용 또한 증가하게 되었다. 이로 인한 가동중지로 원가 상승을 초래하게 되었다.

따라서 기계의 성능을 연속적으로 표시하거나 위험한 상황에 이르기 전에 조기에 이상진동 현상을 감지할 필요가 있고 진단을 통하여 조속히 가동시킬 시스템이 갖추어져야 한다.

2. 회전기계류의 설계 개념

석유화학 공장에 설치된 회전기계류를 관찰해 볼 때 성능을 중요시하는 엔지니어는 보통 Volume Flow Rate 및 Pressure을 최대화하고, 유체 에너지 손실을 최소화하기를 원한다. 이러한 것을 일반적으로 고속, 다중 Stage, 베어링

TABLE 1. ETHYLENE PLANT ROTATING MACHINERY LIST

Service	Number of Cases	Classification
Charge Gas Compression Train	4	Critical
Propylene Refrigeration Train	2	Critical
Ethylene Refrigeration Train	2	Critical
Plant Air Compressor	2	Essential
Instrument Air Compressor	2	Critical
Ethylene Vapor Compressor	2	Essential
Boiler F. D. Fan	2	Essential
Boiler F. D. Fan	2	General Purpose
Off Gas Expander	2	General Purpose
Amine Circulating Pump	4	General Purpose
Amine Stripper Reflux Pump	4	General Purpose
Quench Water Pump	5	Essential
Oily Water Pump	4	General Purpose
Heavy Aromatic Distillate Pump	4	General Purpose
De-Oiler Settler Pump	4	General Purpose
De-Oiled Water Pump	4	General Purpose
Caustic Circulation 2nd Stage Pump	4	General Purpose
Caustic Circulation 1st Stage Pump	2	General Purpose
Caustic Makeup Pump	4	General Purpose
Stripper Bottoms Pump	4	General Purpose
Injection Oil Pump	4	Essential
Charge Gas Condensate Hotwell Pump	4	Essential/Critical
Spent Caustic Pump	2	General Purpose
Caustic Sump pump	2	General Purpose
Demethanizer Reflux Pump	4	General Purpose
Deethanizer Reflux Pump	4	General Purpose
Ethylene Fractionator Reflux Pump	4	General Purpose
Ethylene Product Pump	4	General Purpose
Depropanizer Reflux Pump	4	General Purpose
Propadiene Converter Change Pump	4	General Purpose
Debutanizer Reflux & Product Pump	4	General Purpose
Propylene Fractionator Refluxpump.	4	General Purpose
Propylene Fract Intertower Transfer Pump	2	General Purpose
Methanol Injection Pump	1	General Purposes
Propylene Storage Vapor Return Pump	2	General Purpose
C ₄ Inhibitor Injection Pump	2	General Purpose
Refrig Condensate Hotwell Pump	4	Essential/Critical
Propylene Pumpout Pump	2	General Purpose
Ethylene Pumpout Pump	2	General Purpose
Condensate to De-Aerator Pump	4	General Purpose
Desuperheater Pump	4	General Purpose
Boiler Feed Water Pumps	8	Essential/Critical
De-Aerator Feed Pumps	4	General Purpose
Cooling Water Circulating Pumps	4	Essential/Critical
Flare Drum Transfer Pumps	2	General Purposes
Propylene Loading Pump	2	General Purpose
Butadiene Loading Pump	2	General Purpose
Aromatic Conc. Loading Pumps	2	General Purpose
Ethylene Product Pump	4	General Purpose
Lube/Seal Oil Pumps-Charge Gas Console	6	Essential
Lube/Seal Oil Pumps-Refrig Console	6	Essential
Firewater Pumps	8	Essential
Cooling Water Tower Fans	8	General Purpose

TABLE 2. SUMMARY OF MACHINERY CLASSIFICATION

CATEGORY	Total Number Machine Cases	Percentage of Total Number Machine Cases	Percentage of Total Installed Horsepower
Critical	22	12%	81%
Essential	47	25%	11%
General Purpose	121	63%	8%
	190	100%	100%

에 고부하 및 Stage 사이의 큰 공간 등을 암시하고 있다. 이러한 특징들은 회전축의 역학적 문제를 발생케한다. 성공적으로 설계된 회전기계류는 다음과 같은 사항을 고려하여 설계되었다.

- (1) 가능한한 회전축의 위험속도를 회피.
- (2) 위험속도를 통과해야 할 경우, 공진에서 동적인 응답이 최소화.
- (3) 작동속도 범위에서 기계구조물에 전달된 진동과 동적하중의 최소화.
- (4) 터빈 또는 콤프레서의 브레이드 Tip 과 Seal 마모를 피하고, 효율을 증가시키기 위해서 Tip 간격과 Seal을 정확히 유지.
- (5) 회전체역학의 불안정성의 회피.
- (6) 구동 시스템의 비틀림진동 공진 또는 비틀림 불안정성의 회피.

3. Monitor를 위한 변환기

비접촉 변위기(proximity probe)는 상대적인 축의 운동을 측정하기 위해서 이용되는데, 축에 접촉하지 않은 상태에서 고주파 발전기에 의하여 와류를 만든다. 회전축이 센서에 상대적으로 움직임에 따라 와류 에너지가 변하게 되고 변조기의 전압이 변조된다. 이러한 신호는 변위에 비례한다. 비접촉 변위기는 유연한 베어링과 하우징들이 반경방향 또는 축방향으로 작은 변위가 발생함으로 해서 산업용 터보기계류에 실제로 이용된다. 이것은 석유화학 공장을 위한 API (American Petroleum Institute) 설계명세에 나타나 있다. 또한 항공기 엔진의 가스터빈에서 축의 운동측정에도 이용된다. 그림 1에는 비접촉 변위기의 대표적인 응용에 대하여 나타내었다. 회전축에 2개의 Probe를 서로 90° 되게 배열하는데 베어링에서 6인치보다 작은 위치에

설치해야 한다.

만약에 센서가 축의 노달점(Nodal Point)에 위치하면 터보기계류의 이상현상에서도 작은 출력을 보임으로 해서 정상적으로 작동하고 있다는 착각을 주게 되 큰 문제를 야기시킬 수 있다. 그리고 센서의 설치시에, 터보기계류의 안정된 운전상태에도 불구하고 센서 자체의 진동으로 인하여 비정상 작동으로 오인할 수 있으므로 센서의 고정장치 주파수가 높은 것이 바람직하다.

속도기(Velocity Transducer)는 최초의 진동측정기로, 실제로 심한 진동하에 있는 작업에서 속도제한을 위해서 이용되었다. 자장내에서 움직이는 진동코일은 Signal conditioning이 필요없이 큰 출력전압을 나타낸다. 그림 2에 속도계에 대한 구조가 나타나 있다.

가속도기(Accelerometer)는 넓은 범위에 응용이 되고, 정확성이 있기 때문에 일반적인 진동

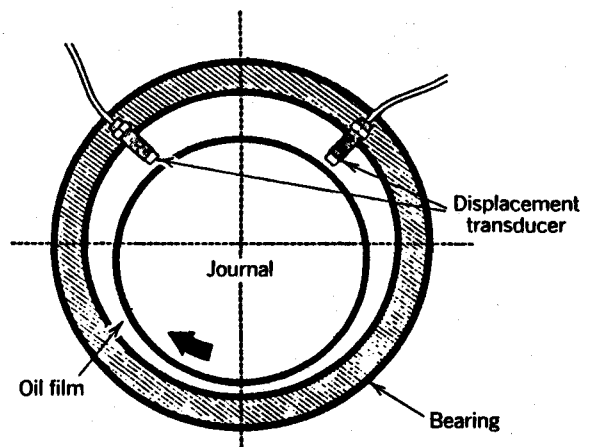


Figure 1 Typical application of proximity probes.

을 위한 측정기이다. 진동하는 물체가 피에조 일렉트릭 크리스탈 위에 힘을 가해서 힘에 비례하는 charge를 만들어내고, charge 증폭기는 전압으로 변화시킨다. 그림 3에는 가속도기의 구조가 나타나 있다.

회전기계류의 이상현상 측정을 위한 변환기 (Transducer) 선정에 있어서, 우선 관심있는 변수(변위, 속도, 가속도)를 결정하고, 기계적 임피던스와 주파수를 고려해야 한다. 표 3에는 여러가지 회전기계류에 대하여 변환기의 종류와 위치가 나타나 있다. 설치해야 하는 변환기의 갯수는 기계가 공정에 얼마나 결정적으로 영향을

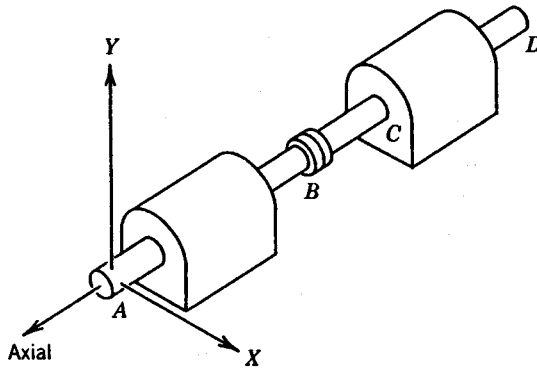
주는가? 그리고 기계의 보수와 교체비용이 얼마나 소요되는가?에 의하여 결정된다.

4. 회전기계의 이상 진동현상 진단

이와같은 회전기계류 진동 변환기에서 얻어진 신호들은 내부(또는 외부) 힘들의 곱에 의해서 복잡하게 결합된 응답이다. 효과적인 분석에 대한 중요한 열쇠는 복잡한 신호를 각각의 성분으로 분해하여 그 원인을 찾는 것이다.

BODE PLOT이란 회전속도에 따른 진폭과 위상각의 변화를 측정할 직각좌표 그래프인데 불평형 응답도표라 부르기도 한다. (그림 4)

TABLE 3 Suggested Transducer Locations



Machine Description	Transducer	Location
Steam turbine/large pump or compressor with fluid film bearings	Displacement	Radial horizontal and vertical at A, B, C, D. Redundant axial at A and D.
Gas turbine or medium size pump.	Displacement	Radial horizontal and vertical at A and B.
	Velocity	Radial horizontal or vertical at A and B.
Motor/fan, both with fluid-film bearings.	Displacement or Velocity	One radial at each bearing. One axial displacement to detect thrust wear.
Motor/pump or compressor with rolling element bearings.	Velocity or Acceleration	One radial at each bearing. One axial, usually on motor, to detect thrust wear.
Gearbox with rolling element bearings.	Acceleration	Transducers mounted as close to each bearing as possible.
Gearbox shafts with fluid film bearings.	Displacement	Radial horizontal and vertical at each bearing. Axial to detect thrust wear.

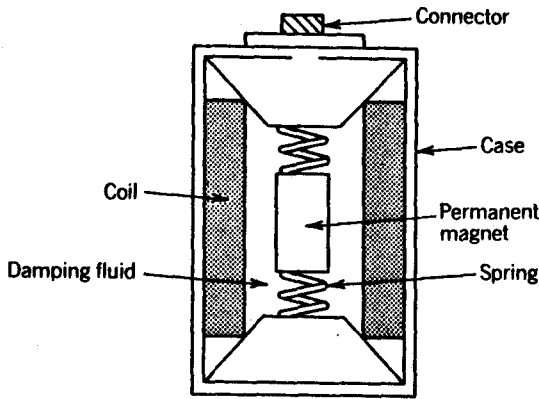


Figure 2 Velocity transducer construction.

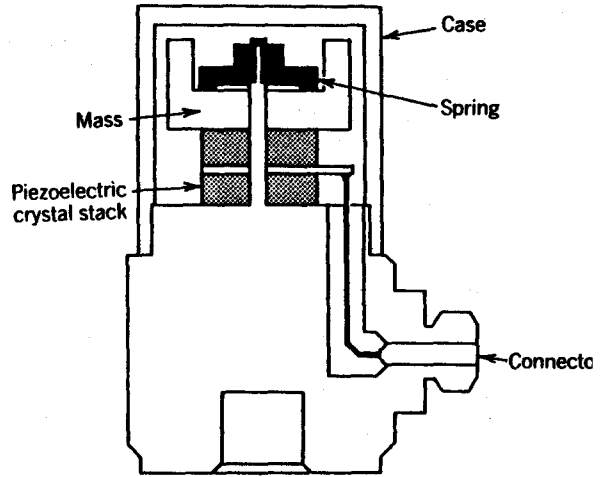


Figure 3 Accelerometer construction.

CAMPBELL DIAGRAM은 회전기계류의 공진을 피하기 위하여, 설계에서 회전축 속도의 선택 및 체크를 위한 도구로 이용되는 XY 도표이다. X축은 여러가지 가진주파수(Excitation Frequency) 즉 회전속도, Misalignment(2X), Oil Whirl(40~48%X), 진동수를 지나는 브레이크 또는 베인, 기어 메쉬의 진동수를 나타낸다. Y축은 휨과 토오션 공진수를 나타내고 있다 [그림 5]. CASCADE PLOT는 회전축의 속도에 따라 진동주파수의 변화를 관찰하는데 이용된다. 이 그래프는 여러가지 회전속도에서 얻어진 연속적인 진동주파수 스펙트라(Vibration Frequency Spectra)를 구성하고 있다. X축은 진동주파수, Y축은 진폭을 나타내는데 Waterfall Plot이라고도 한다[그림 6]. POLAR PLOT

는 회전속도에 따라 회전축 처짐의 궤적을 극좌표로 표시한 것이다 [그림 7].

지금까지의 그래프에 의하여 이상현상을 초기에 관찰하여 그 원인을 분석하여 개선하는데 이용할 수 있다. 회전기계류의 거동의 이해를 돕기 위하여 초기에 독일의 VDI에서 유연한 축의 진동진단을 취급하는 안내서를 발표하였는데 개정을 거듭하여 표 4에서와 같이 축의 진동에 따른 모니터의 현상을 세분화하여 설명하고 있다. 이것은 역으로 회전기계류에서 모니터된 최대변위의 시간응답, 최대변위가 운전조건에 미치는 영향, 진동스펙트럼에서 특성 주파수, 축의 궤적형상, 변위대 시간의 그래프 등을 측정하여 회전기계류의 이상진동현상 원인을 진단할 수 있다.

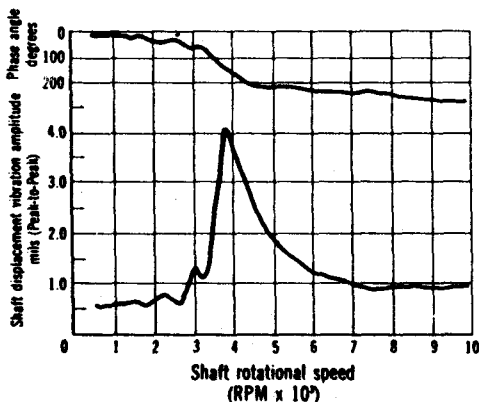


Figure 4 BODE PLOT

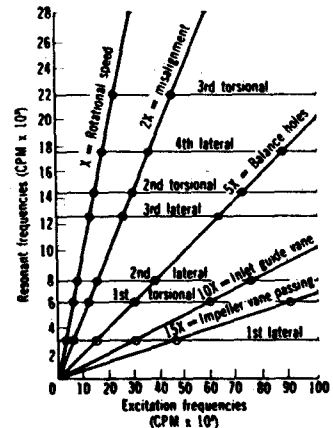


Figure 5 CAMPBELL DIAGRAM

TABLE 4. Interpretation of the results of shaft vibration measurements

Cause of shaft vibrations	Time response of maximum displacement	Dependence of the maximum displacement on the operating conditions	Characteristic frequencies in the vibration spectrum	Shape of the kinetic shaft orbit	Graph of displacement versus time
Constant unbalance	Constant	Speed-dependent	Rotation frequency	Ellipse, in some cases also as circle or straight line	Sinusoidal
Thermal unbalance	Variable, depending on changes in the operating conditions (e. q. after start-up), often reaching a steady-state value	Dependent on power and power changes	Rotation frequency	Ellipse, in some cases also as circle or straight line	Sinusoidal
Unbalance due to corrosion, erosion or soiling	Slowly variable over long periods	Speed-dependent	Rotation frequency	Ellipse, in some cases also as circle or straight line	Sinusoidal
Unbalance due to rupture of rotor parts (e. q. rotor blades)	Sudden increase or decrease	Speed-dependent	Rotation frequency	Ellipse, in some cases also as circle or straight line	Sinusoidal
Self-excited vibrations, e. q. due to elastic hysteresis, blade tip excitation or bearing instability	As a rule, heavy fluctuations	Dependent on speed, power (in particular with blade tip excitation) bearing oil temperature (only in the case of bearing instability)	Frequency by magnitude often equal to the lowest lateral natural frequency of the shaft, taking into account the bearings	Irregular, rarely as a closed curve	Frequently similar to sinusoidal and fluctuating
Restraints (e. g. due to misalignment or coupling seizing) and loose bearing cups	Constant	Dependent on speed and power	Rotation frequency and its multiples (especially its double)	Frequently as a closed curve of varying shape (e. g. like an eight)	As a rule, generally periodic
Gearbox defect	Constant	Dependent on speed and power	Special gearbox frequencies with simultaneous rotation frequencies of input and output side	Irregular, usually not as a closed curve	Mostly periodic, rarely sinusoidal
Electrical or magnetic faults on electric motors and generators	Constant or sometimes periodically beating	As a rule, dependent on power	Rotation frequency, quency, mains frequency, double mains frequency, single and double slip frequency as modulation frequency	Frequently as elliptical curve	Sinusoidal or similar, sometimes amplitude-modulated

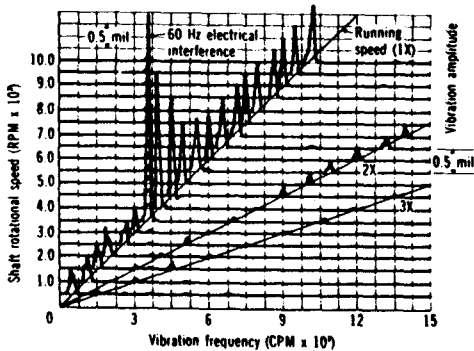


Figure 6 CASCADE PLOT

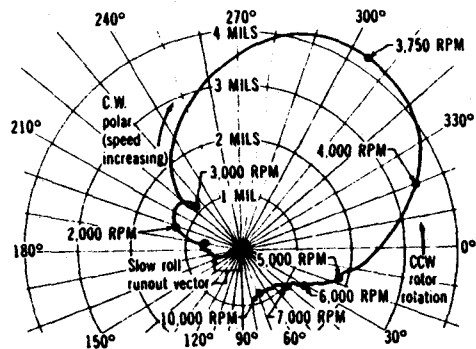


Figure 7 POLAR PLOT

따라서, 석유화학 공장에서 모든 공정마다 서론에서 언급한 것과 같이 공정에 결정적인 역할을 하는 12%의 대형 회전기계류가 81.6%의 동력을 소비하고 있으므로 해서 공정에 중요한 부분을 차지하고 있기 때문에 Monitoring의 재인식과 그에 따른 진단이 요망된다.

참 고 문 헌

1. Magge, N. "Philosophy Design and Evaluation of Soft-mounted Engine Rotor system" J. of Aircraft, Vol 12, 1975
2. Den Hartog, J. P., "Mechanical vibration," 4th ed, McGraw-Hill
3. Gunter, E. J., "Dynamic Stability of Rotor-Bearing system," NASA SP-113
4. Dimentburg, F. M. "Flexural Vibrations of Rotating Shafts," Butter worths, London, 1961
5. Vance, J. M., "Rotordynamics of Turbo machinery," Wiley, 1988
6. Rieger. N. F., "Vibrations of Rotating Machinery, Pt. I, 1982
7. "Dynamic Signal Analyzer Applications," H. P. Co
8. Alford, J. S., "Protecting Turbomachinery from Self-Excited Rotor Whirl," J. of E. for power, 1965
9. Pinkus, O. "Theroy of Hydrodynamic Lubrication," McGraw-Hill 1961