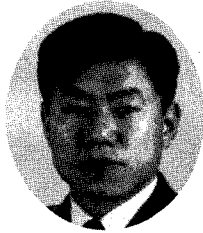


운 활 연 구



산업 회전기계의 안전성에 대하여

空軍士官學校
尹錫哲教授

1. 서론

현대의 산업 회전기계(터어빈, 펌프, 압축기)는 상대적으로 작은 용적내에서 큰 양의 동력을 흡수하거나 생산하고 있다.

예를들어 석유화학 공장에서 터어빈-압축기는 놀랄만한 생산 공정률을 수행하고 있고, 증기 터어빈의 경우 메가 와트의 전력을 생산하고 있으며, 스페이스 셔틀의 주 터보펌프는 2단 터어빈내에서 70,000HP를 생산하고 있다.

이러한 고 에너지 밀도와 유동률을 갖고 있는 현대의 산업 회전기계의 성질을 회전축이 매우 높은 속도를 갖고 있다는 점이다.

따라서 고속으로 회전하는 기계는 고 내부 부하가 나타나고 축의 Whirl, 진동, 불안정성 등의 잠재적인 문제가 발생하게 된다.

산업 현장에서 고속 회전기계를 취급, 관리하는 운영자 혹은 관리자 그리고 설계를 담당하는 설계자 모두가 회전체(터어빈의 휠, 압축기의 디스크, 펌프를 포함한 회전축)에 대한 역학적 요구조건의 이해 부족으로 인하여 값비싼 기계가 조립 및 설치되었다가 성능을 발휘하지 못하거나, 심지어 전혀 구동을 할 수 없다는 것을 알게 된다.

회전체 역학의 문제를 고려할때, 해석적 예측은 실험과 비교하면 거의 일치되나 인간의 직관과는 가끔 상반되는 경우가 있다.

예를들어 회전기계의 불평형된 질량은 고속에서 축의 whirl 궤적의 외부방향에 위치해 있는 것이 아니고, 내부방향에 위치해서 공전하게 된다. 또한 회전기계의 댐핑은 고속에서 격렬하고 불안정한 whirling 운동을 낳을 수 있다.

그러므로 산업현장에서 회전기계에 대한 지식 및 이해는 내과의사가 청진기 및 각종 진단장비를 통해서 환자를 진찰 또는 병을 예방하는 것과 같이, 전체 생산공정에 중요하게 영향을 미치는 회전기계의 고장을 조기 진단예방할 수 있는데 큰 도움을 주게 된다.

2. 회전기계의 이해

산업 회전기계의 작동 및 고장발견 수리를 함에 있어서 다음과 같은 회전기계에 대한 해석적인 이해가 필요하다.

가. 위험속도 예측

회전기계의 불평형으로 인한 진동이 최대일 경우의 속도는 설계 데이터로 부터 계산할 수 있다. 기계의 정상속도내에서는 절대적으로 위험속도를 피해야 한다.

나. 위험속도를 변화시키는 설계수정

기계의 작동속도 범위를 변경하기 위한 설계변경은 항상 위험속도의 변화를 동반하게 된다.

다. 비틀림 진동의 고유진동수 예측

구동계에 적용이 되는데, 예를들면 기어박스를 통해서 전기모터에 의해 구동되는 원심 압축기는 시동을 하는 동안에 모터의 펄스에 의해서 비틀림 진동을 기대할 수 있다.

라. 평형 보상질량과 위치계산

회전기계를 평형잡이(Balancing)하여 진동폭을 감소시킬수 있다.

마. 회전기계의 불평형으로 인한 진폭의 예측

회전기계의 진폭은 회전기계를 따라 분포된 불평형과 회전축-베어링계의 댐핑에 의존하게 된다.

바. 동적 불안정에 대한 안정 한계속도 및 진동수 예측

불안정은 "Oil Whip"이라고 알려져 있는데, 저어널 베어링에 의해 발생된다.

사. 동적 불안정성을 억제할 수 있는 설계수정
컴퓨터 시뮬레이션에 의해 여러가지 설계수정의 상대적 안정성 영향을 예측할 수 있다.

3. 산업 회전기계의 특성

다음은 산업 회전기계 중에서 터빈 압축기 및 펌프에 대한 개괄적인 특징에 대한 설명이다.

가. 1단 압축기

- 돌출형태의 회전기계
- 회전축이 고속
- 토오크가 큼
- 기어를 통해서 구동
- 평형잡이(Balancing)이 어려움

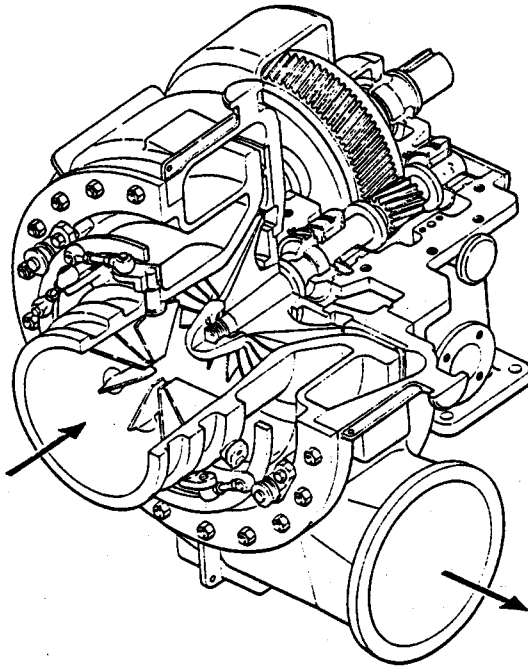


Fig. 1. Single-stage centrifugal compressor with an overhung wheel. Cutaway courtesy of The Single Stage Products Division of Ingersoll-Rand's Air Compressor Group.

나. 다단 산업압축기

- 양단 베어링간의 거리가 큼

- 조립식 회전기계
- 유체압력이 큼(5,000psi)
- 유막 베어링 사용
- Floating-Ring 오일 실 사용

다. 소형 공기 터빈

- 회전축이 초고속(100,000rpm)
- 온도문제 없음
- 탄성 베어링 사용

라. 산업 터보펌프

- 유체압력이 우세
- 속도에 따라 베어링 영향 적음
- 위험속도가 발생가능

4. 회전기계의 진동변위 감소방법

산업 회전기계를 이해하기 위해서 다음과 같은 단순한 가정을 하여, 회전기계의 영향을 해석할 수 있다.

- 유연한 회전축은 질량을 무시
- 베어링은 강체지지
- 회전축의 중심은 불평형이 존재하며 질량이 있는 디스크가 존재

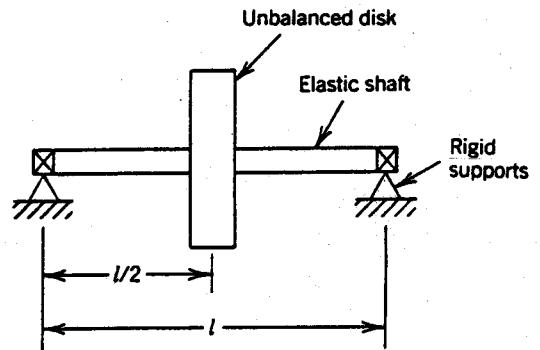


Fig 2. The Jeffcott rotor.

이와 같은 가정하에서의 모델을 Jeffcott Rotor라고 한다. 따라서 Jeffcott Rotor에 대한 해석을 통해서 회전기계의 진폭이 위험속도에서 어떻게 최대값이 되는지 알 수 있다.

同期(synchronous) whirl의 진폭을 최소화하는 방법은 3가지가 있는데 회전기계의 밸런스, 위험속도로 부터 멀리 작동속도를 변경하는것 그리고 회전축-베어링계에 댐핑의 추가 등이다.

이러한 모델이 단순하다 할지라도, 같은 3가지 방법이 더욱 복잡한 회전기계에서도 同期 whirl

을 제어하는데 매우 효과적으로 작용하고 있다.

첫째로 회전기계를 밸런싱하는 것은 가장 직접적인 접근방법이나, 실제로 완전하게 밸런싱을 할 수 없다. 다음으로 회전기계의 작동속도를 위험속도로 부터 멀리하는 방법은 위험속도 자체 혹은 회전축의 작동속도를 변경에 의해 이루어질 수 있다. 실제로 후자는 회전기계를 지지하고 있는 베어링의 강성을 강하게 함으로써 해결할 수 있다. 그리고 회전기계의 작동속도가 위험속도 근방에 있던가, 또는 위험속도를 반복적으로 천천히 지난다면, 이러한 whirl의 진폭을 줄이는 가장 효과적인 방법은 댐핑을 추가하는 것이다.

실제로 구름 베어링에 댐핑을 추가하기 위해서 윤활유의 점성을 이용한 베어링이 S.F.D.B (Squeeze Film Damper Bearing)이라고 한다. 이러한 윤활유의 점성을 이용한 베어링은 현재 직물공장의 섬유봉, 항공기 엔진에 직접 이용하고 있으나 응용분야는 많으리라 사료된다.

현재 완전한 해석은 윤활유 막의 비선형 때문에 한계가 있어 실험을 통해서 현상을 측정하려고 하고 있다.

실험장치는 제어기를 통해서 10,000rpm까지 회전축을 가변시킬 수 있도록 설계되었고 윤활유는 입구와 출구를 통해서 순환하고 있고, 체크 밸브에 의해 역류를 방지하고 있다. PT에 의해서 윤활유의 압력을 측정하고, pp에 의해서는 회전축의 변위측정이 가능하다.

실험실에서 관심의 대상인 윤활유의 압력현상을 측정하기 위해서 Reynolds수($R_e = \rho \omega c^2 / \mu$)에서 보는것 같이 점도가 큰 윤활유를 이용하면서 저어널과 하우징 사이의 간극을 실제보다 크게 하였다.

본 실험을 통해서 점성 윤활유의 압력분포 현상을 측정할 수 있었고 이로인한 성능에 중요하게 영향을 미치는 반경방향의 윤활유막 힘은 순수하게 윤활유의 관성에 기인한 것이다.

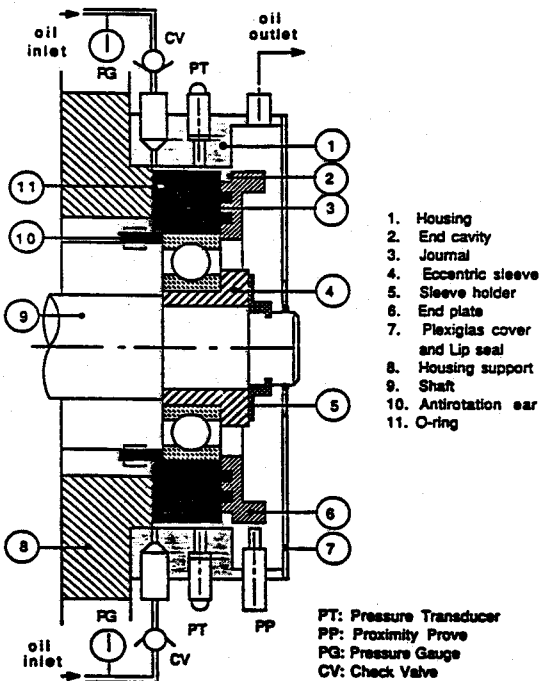


Fig 3. Section of TRC Squeeze Film Damper Test Rig.

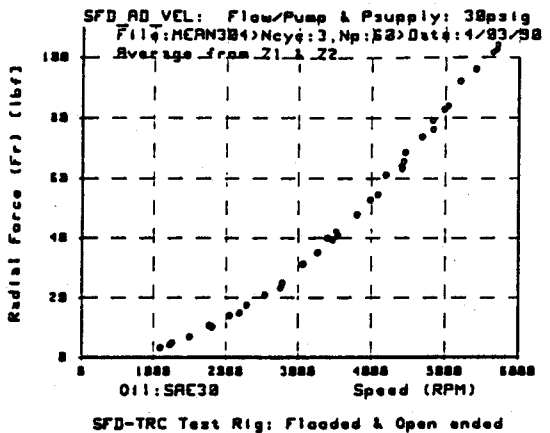


Fig 4. Experimental Radial Force vs. Whirl Speed.

36 tests: 1-26, T=80-120°F; 27-36, T=125°F.

SFD TRC Test Rig: Open Ends, Nominal e/c=0.50

REFERENCES

- San Andres, L., 1985, "Effect of Fluid Inertia on Squeeze Film Damper Force Response," Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University.
- San Andres, L., and J. Vance, 1987, "Effect of Fluid Inertia on Squeeze Film Damper

- Forces for Small Amplitude Circular Centered motions," ASLE Transactions, 30(1), pp.69-76.
3. S. Y. Jung, 1990, "Effects of Fluid Inertia and Cavitation on the Force Coefficients of a Squeeze Film Damper", Ph. D. Dissertation, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University.

본 내용은 Texas A&M Univ.에서 연구한 논문
의 일부를 수록한 것임