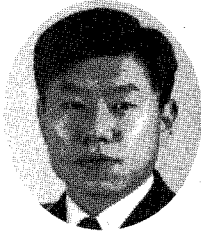


윤 활 연 구



산업 회전기계의 불평형

공군사관학교
윤 석 철 교수

목 차

1. 서 언
2. 기본 개념
3. 회전축의 분류
4. 밸런싱 종류 및 방법
5. 결 언

1. 서 언

산업현장에서 사용되고 있는 회전기계에서 가장 흔한 진동의 원인은 회전축의 불평형(Unbalance)이다. 그러므로 적합한 밸런싱(Balancing)이 없이는 회전축이 부드럽게 작동할 수 없으며, 또한 회전기계의 기능에 적합한 밸런싱을 수행하였다 하더라도 장시간 사용중에 생길 수 있는 불평형은 피할 수 없게된다. 따라서 산업현장에서 공정에 중요하게 영향을 주고 있는 회전기계류에 대하여 설치단계부터 일일 또는 정기적으로 진단 및 기록유지를 필수적으로 실시하여야 하며 이것은 회전기계류의 문제 발생시 이상진단 및 보수에 크나큰 도움이 된다.

인간은 몸에 이상현상이 생기면 증세가 피로, 발열 및 통증등에 의하여 나타나면서 심각한 상황이 아니면 의사의 간단한 조치 또는 인체의 완벽한 자동조절 시스템에 의하여 치유가 되나, 인간이 제작한 기계류는 진동, 마모 및 열등으로 정후를 나타내면서 완벽한 자동조절 시스템의 부재로 결국에는 정지하게 된다. 회전축이 불평형 되었을 경우, 장시간 사용할 때 만성적인 이상진동 현상이 나타날 수 있고 회전기계류의 갑작스런 브레이크 손실이 발생할 때에는 급성적인 이

상진동 현상이 나타난다.

불평형에 대하여 간략히 살펴보자. 만약에 회전하고 있는 디스크 또는 회전축의 무게중심이 회전하는 축과 일치되지 않으면, 결과적으로 축을 중심으로 궤적을 그리면서 원심력을 발생케하여 베어링과 지지 구조물에 힘을 전달한다. 이러한 힘은 축의 속도에 따라 회전을 하므로 회전하지 않는 구조물의 진동주파와 같게된다.

회전하는 불평형 힘은 Synchronous Whirl로 알려져 있는데 회전축을 공전하게 한다. 이와같이 회전축의 공전운동의 진폭을 감소시키는 기본적인 방법은 다음과 같다.

- 회전축의 밸런싱
- 작동속도를 시스템의 위험속도에서 멀리 이동
- 시스템에 댐핑의 추가

본 내용은 위의 3가지중 산업현장에서 나타날 수 있는 불평형 회전축을 밸런싱하는 분야에만 한정하되 밸런싱의 목적과 불평형의 원인, 단위 및 유형에 대하여 기본적인 개념을 설명하고 밸런싱의 대상이 되고 있는 회전기계류의 분류와 이에 대한 밸런싱의 종류 및 방법을 제시한다.

2. 기본 개념

가. 배런싱 목적

불평형(Unbalance)이 있는 회전기계는 진동을 하게 되고, 회전축과 지지 구조물내에 응력이 발생하게 된다. 그러므로 회전축을 배런싱 하는 것은 다음을 달성하기 위하여 필요하다.

- (1) 베어링의 수명 증대

- (2) 진동 감소
- (3) 소음 감소
- (4) 작업자의 피로 감소
- (5) 동력손실 감소
- (6) 생산품의 질 증가
- (7) 사용자의 안전

조립품중에서 하나의 회전요소가 불평형되어 있을 경우 전 조립품을 진동하게 할 수 있는데, 차례로 야기된 이러한 진동현상은 베어링, 부상, 축, 스펀들, 기어 등에 과도한 마모를 일으킬 수 있고 결국에는 보수 수명기간을 단축하게 된다.

또한 구조물을 파괴시킬 수도 있는, 원하지 않는 반복응력이 발생한다. 성능은 지지구조물에 의한 에너지 흡수로 인해서 감소된다. 진동은 지면을 통해서 인접한 기계류에 전달되기도 하고 기계의 정밀성과 적합한 기능에 심각한 손상을 미치게 된다.

나. 불평형의 원인

Fig.1에서 보는 것과 같이 회전축의 임의의 면에 존재하는 과도한 질량을 불평형이라고 한다. 이것은 다음과 같은 여러가지 원인에 의해 발생한다.

- (1) 주조, 기계가공 및 조립과정에서의 공차
- (2) 재료내의 틈새, 기공, 함유물, 조직 및 밀도에 의한 변화
- (3) 키홈, 부품의 모양, 위치, 끝마무리의 정도등으로 인한 비대칭

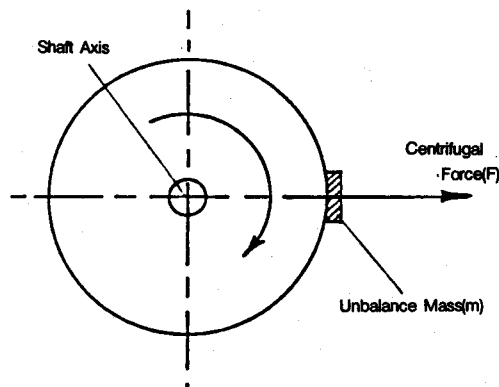


Figure 1. Unbalance Causes Centrifugal Force

(4) 사용중에 온도변화, 회전응력 등으로 인한 부품들의 뒤틀림 및 크기 변화

불평형 문제는 대칭설계 및 주의깊은 조립에 의해서 줄일수 있다. 불평형 양이 크게되면 역시 보상을 크게 하여야 하는데, 이것은 재료를 제거함으로써 해결할 수 있지만 추가비용과 부품의 강도에 영향을 미치게 된다.

제조과정 역시 불평형의 주요한 원인이 된다. 회전축의 중심에 대하여 비대칭이고 중심이 일치되지 않는 단조이거나, 기계가공을 하지 않은 주조부분은 실제로 불평형을 일으킨다.

가장 이상적으로 회전 부품들은 항상 배런싱을 하도록 설계되어야 하지만 그러나 제한된 설계 조건으로 인하여 불평형의 영향이 자주 발생한다. 예를들어, 고속에서 회전하는 부품들은 비대칭적으로 자주 뒤틀림이 발생하게 된다.

다. 불평형의 단위

불평형은 g-in 또는 g-mm 등의 단위로 측정되는데 불평형 질량과 회전축 중심으로 부터의 거리의 곱을 의미하고 있다. 예를들어, Fig.2에서 보는 것과 같이 100 g-in의 불평형량은 회전축의 중심으로 부터 10인치 위치에 10그램의 질량을 갖고 있거나 혹은 5인치의 위치에 20그램의 과도한 질량을 갖고 있다는 의미이다.

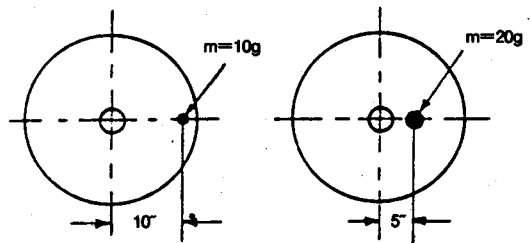


Figure 2. Example of 100g-in Unbalance

라. 불평형의 유형

다음은 ISO Standard No.1925에 의해 정의된 4가지 불평형 유형에 대하여 설명하고 있으며, 완전하게 평형을 잡은 회전축에 임의의 불평형 질량을 추가하여 생긴 관성축의 변위를 보여 주고 있다.

(1) 정적 불평형(Static Unbalance)

공식적으로 힉 불평형이라고 하는 정적 불평형은 Fig.3에 보여주고 있다. 이것을 관성 주축이 회전축의 중심과 평행할 때이다. 이러한 불평형 형태는 주로 플라이 휠과 터어빈 휠과같이 폭이 좁고 디스크 형태의 부품들에서 찾아 볼수 있다. 이에대한 질량보상은 무게중심(C.G)을 지나면서 회전축 중심에 수직한 면내에서 C.G의 반대 위치에 질량을 수정함으로써 해결된다.

정적 불평형이 큰 경우에는 고전적인 방법인 중력에 의한 배런싱 방법에 의해서 알 수 있는데, Fig. 3a는 knife-edge 위에 불평형 질량이 축의 중심으로 부터 편심되어 있다는 것을 알 수 있다. knife-edge가 수평인 경우에, 회전축은 무거운 지점 혹은 불평형된 지점이 아래방향을 향할때까지 회전할 것이다.

Fig. 3b는 편심된 회전축을 보여주고 있다. Fig. 3c에서 보는 것과 같이 C.G로 부터 동일한 거리에서 2개의 같은 불평형 질량을 갖는 회전축은 정적으로 불평형 되어 있다. 정적 불평형은 knife-edge 또는 Roiller 위에서 중력에 의한 방법보다는 배런싱 기계에 의하여 저속으로 회전시

켜 좀더 정확하게 측정될 수 있다.

(2) 커플 불평형(Couple Unbalance)

공식적으로는 모우멘트 불평형이라고 하며 Fig.4에 보여주고 있다. 이 조건은 관성 주축이 회전축의 중심에 있는 무게 중심을 통과하는 것이며, 2개의 동일한 불평형 질량이 180°의 반대 위치에 놓여 있을때 발생한다. 이러한 회전축은 knife-edge위에 있을때 회전하지 않으므로, 동적인 방법에 의해서 커플 불평형을 감지할 수 있다.

커플 불평형의 예가 Fig. 4a와 4b에 나타나 있다. 이러한 형태의 불평형은 한개의 면내에서 하나의 질량을 수정함으로써는 해결할 수 없고, 적어도 180° 방향으로 2개의 면에 질량보상을 해야 한다.

(3) 준 정적 불평형(Quasi-static Unbalance)

준 정적 불평형은 Fig. 5에 나타나 있으며 관성 주축은 회전축의 중심을 교차하고 있으나 무게 중심은 회전축 중심에서 벗어나 있다. 이것은 정적 불평형과 커플 불평형의 결합이며 동적 불평의 특별한 경우이다.

(4) 동적 불평형(Dynamic Unbalance)

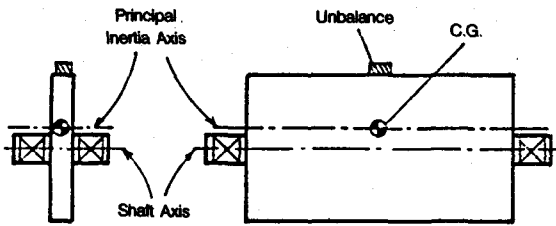


Figure 3. Static Unbalance

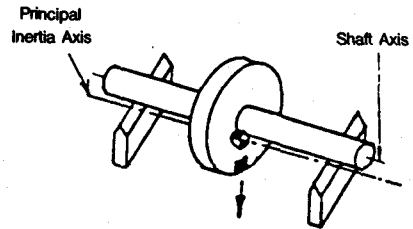


Figure 3a. Concentric Disc with Static Unbalance

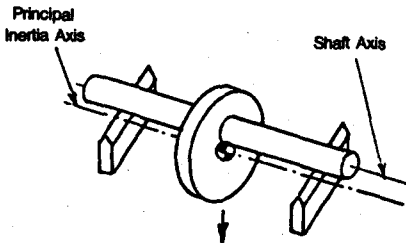


Figure 3b. Eccentric Disc, Therefore Static Unbalance

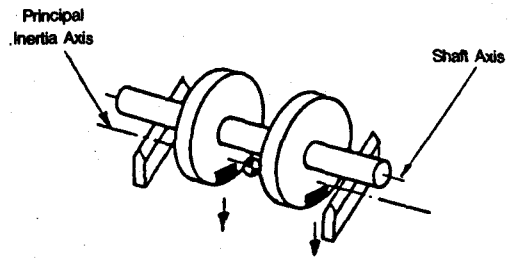


Figure 3c. Two Discs of Equal Mass and with Identical Unbalance

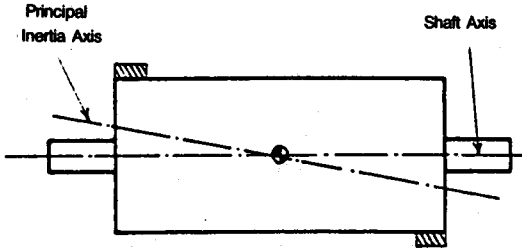


Figure 4. Couple Unbalance

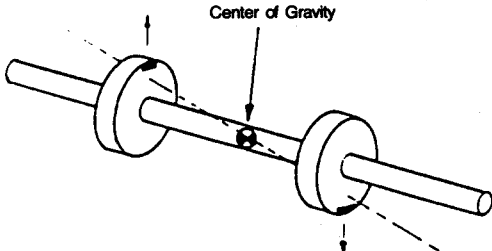


Figure 4a. Realigned Discs of Figure 3c now Have Couple Unbalance

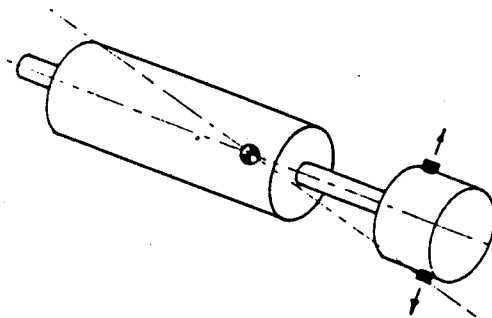


Figure 4b. Couple Unbalance in Outboard Component

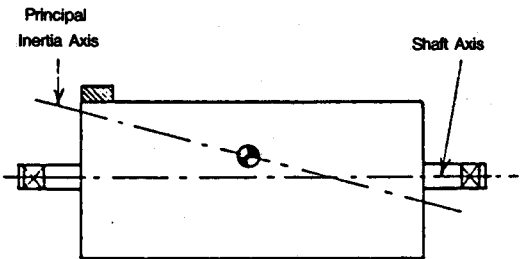


Figure 5. Quasi-static Unbalance

Fig.6에 나타나 있는 동적 불평형은 관성 주축이 회전축의 중심과 평행하거나 혹은 교차하기도

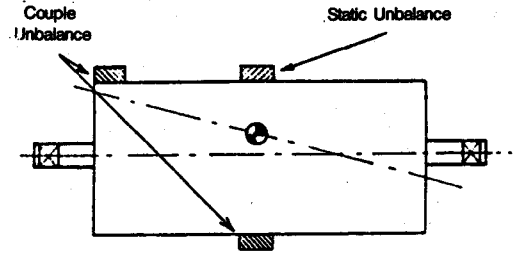


Figure 5a. Couple Plus Static Unbalance at Same Angle Results in Quasi-static Unbalance

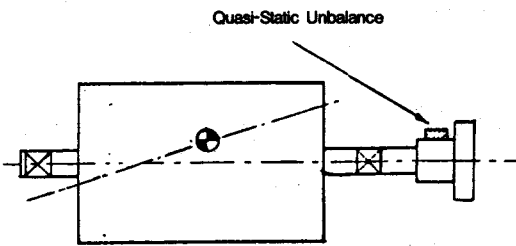


Figure 5b. Unbalance in Coupling Causes Quasi-static Unbalance in Rotor Assembly

않는 조건이다. 이러한 불평형은 흔히 발생하는 형태이며 회전축의 중심에 수직인 2면 이상을 질량보상함으로써 해결된다. 동적 불평형의 다른 예가 Fig. 6a에 나타나 있다.

불평형 회전축의 운동은 Fig. 7에서 보는 것과 같이 탄성 베어링내에서 공진 이상의 속도에서 공전하는 회전축에 의하여 설명될 수 있다. Fig. 7a는 정적 불평형이 존재할때 나타나는 진동현상이며 회전축의 중심선이 움직이는 것을 나타내고 있다.

Fig. 7b는 커플 불평형이 존재할때의 운동현상을 보이며 무게중심을 꼭지점으로 하여 2개의 원추형상의 운동을 하고 있다. 이러한 유형의 결합(준정적 불평형)으로 동일축 면에서 발생할 경우에 원추의 꼭지점은 무게중심에서 벗어나 있다. 동적 불평형에서는 꼭지점은 없으며 회전축은 Fig. 7에서 보이고 있는 운동보다는 더욱 복잡한 운동을 하게된다.

마. 회전속도에 대한 불평형 영향

지금까지 설명한 바와 같이 불평형되어 있는

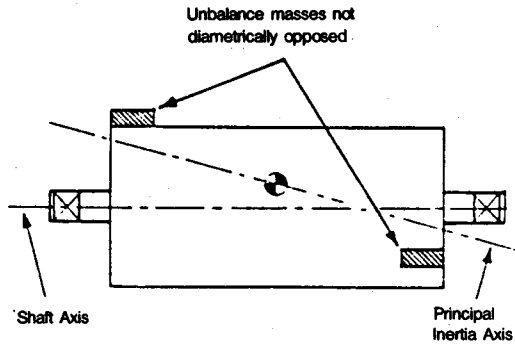


Figure 6. Dynamic Unbalance

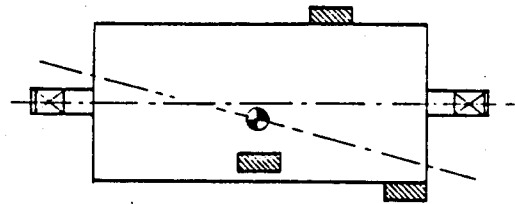


Figure 6a. Couple Plus Static Unbalance at Different Angles Results in Dynamic Unbalance

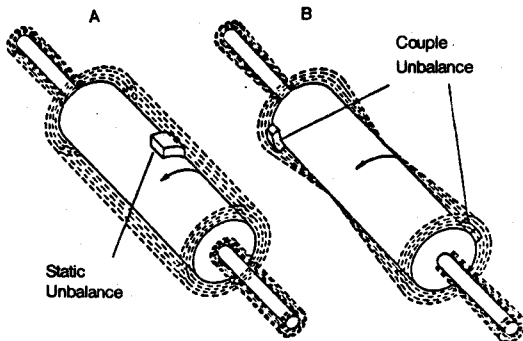


Figure 7. Effect of Unbalance on Free Rotor Motion

회전축은 관성축이 회전축의 중심선과 일치하지 않고 있다. 베어링 내에서 회전을 할때 이와같은 회전축은 주기적인 진동을 하고 베어링과 지지 구조물에 주기적으로 힘이 작용하게 된다. 구조물이 강체일 경우에는 탄성일때 보다 작용힘이 더 크다. 실제의 경우에, 지지 구조물은 완전한 강체이지도 않으며 완전히 탄성이지도 않고 이

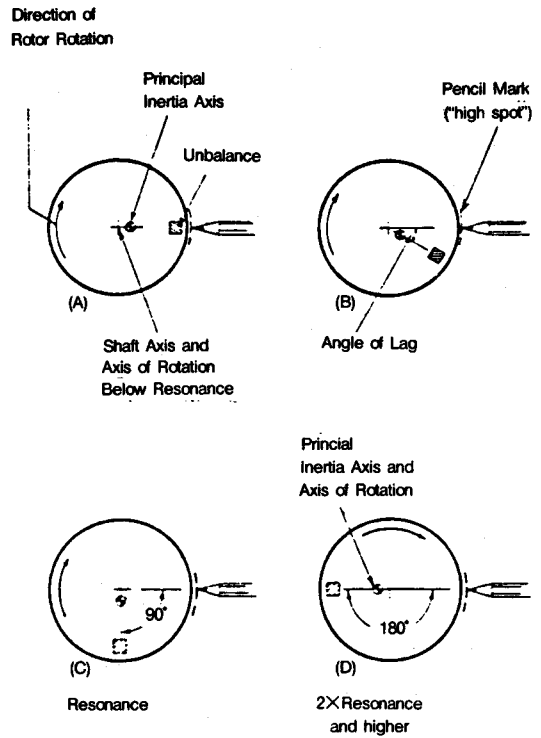


Figure 8. Angle of Lag Increases with Speed

들 사이에 존재하게 된다. 회전축의 속도가 공진 주파수이하 일때 회전축의 관성 주축은 반경방향을 향하면서 움직인다. 이러한 조건은 Fig. 8a에 나타나 있으며 만약에 부드러운 연필을 회전축에 가까이 접근시켜 놓으면 소위 High Spot가 불평형의 위치와 같은 각 위치에서 표시됨을 알 수 있다.

속도가 좀더 증가 되었을때 불평형이 연필을 지나는 순간과 회전축이 연필에 접촉하는 순간 사이에 약간의 시간적 지연이 존재한다. 이것은 시스템의 댐핑의 영향 때문이다. 이러한 두 점사이의 각을 지연각(angle of lag)이라 하며 Fig. 8b에 나타나 있다.

회전축의 속도가 공진속도까지 증가함에 따라 지연각은 90°까지 된다. 속도가 더욱 증가되어 거의 공진속도의 2배까지 증가되었을 경우에 Fig. 8d에 있는 것과 같이 지연각이 180°로 접근하게 되며 일정한 진폭을 갖고 관성 축을 중심으로 회전을 하게 된다.

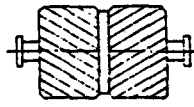


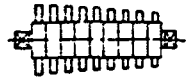
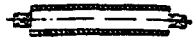
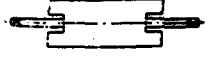
3. 회전축의 분류

불평형이 발생한 지점보다는 회전축을 따라 불평형을 보상하였다고 할지라도 회전축이 원래 보상된 속도이외의 속도들에서 진동이 야기될 수 있으며, 여러가지 환경조건하에서 이러한 진동은 명시된 공차를 초과할 수 있다. 특히 위험속

도에서는 더욱 그러하다. 그러므로 이렇게 문제가 되는 회전축을 확인하고 정상적 방법 또는 수정된 강제 회전축 기술에 의하여 평형을 잡을 수 있는 것과 구별할 필요가 있다.

회전축을 여러가지 범주로 분류하는 것은 밸런싱 방법을 단순하게 한다. 회전축은 크게 5개로

Table 1 Classification of rotors

| Class of Rotor | Description | Example |
|--|--|---|
| Class 1 Rotor Rigid Rotors | A rotor is considered rigid when its unbalance can be corrected in any two(arbitrarily selected) planes and, after that correction, its unbalance does not significantly change at any speed up to maximum service speed |  gear wheel |
| Class 2 Rotors Quasi-Flex Rotors | A rotor that cannot be considered rigid but that can be balanced in a low speed balancing machine | |
| <i>Rotors where the axial distribution of unbalance is known</i> | | |
| Class 2A | A rotor with a single transverse plane of unbalance, e.g. single mass on a light shaft whose unbalance can be neglected |  Shaft with grinding wheel |
| Class 2B | A rotor with two axial planes of unbalance, e.g., two masses on a light shaft whose unbalance can be neglected |  Shaft with grinding wheel and pulley |
| Class 2C | A rotor with more than two transverse planes of unbalance |  Jet engine compressor rotor |
| Class 2D | A rotor with uniformly distributed unbalance |  Printing press roller |
| Class 2E | A rotor consisting of a rigid mass of significant axial length supported by a flexible shaft whose unbalance can be neglected |  Computer memory drum |

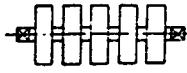
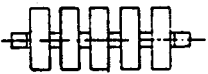

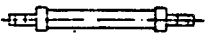
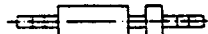
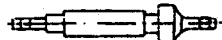
분류될 수 있으며 각각은 다른 밸런싱 기술을 요구한다. Table 1은 대표적인 회전축의 형상을 보여주고 있다.

(분류1) 강제 회전축 : 회전축이 임의의 2면에서 질량보상이 될수 있고, 보상후에 최대 작동속도까지 불평형이 변화하지 않을때 강제라고 생각할 수 있다. 이러한 조건을 만족하지 않으면 탄

성 회전축이다.

(분류2) 준 탄성 회전축 : 강제라고 할 수는 없고 저속 밸런싱 기계에서 평형을 잡을 수 있는 회전축

(분류3) 탄성 회전축 : 저속 밸런싱 기계에 의해 밸런스할 수 없고 특별한 탄성 회전축 밸런싱 기술에 의한 밸런싱을 요구하는 회전축

| Class of Rotor | Description | Example |
|--|---|---|
| <i>Rotors where the axial distribution of unbalance is known</i> | | |
| Class 2F | A symmetrical rotor, with two end correction planes, whose maximum speed does not significantly approach second critical speed, whose service speed range does not contain first critical speed and with controlled initial unbalance |  5-stage centrifugal pump |
| Class 2G | A symmetrical rotor with two end correction planes and a central correction plane whose maximum speed does not significantly approach second critical speed; and with a controlled initial unbalance |  Multi-stage pump impeller |
| Class 2H | An unsymmetrical rotor with controlled initial unbalance treated in a similar matter to class 2F rotor |  I.P. steam turbine rotor |
| Class 3 Rotors <i>Flexible Rotors</i> | A rotor that cannot be balanced in a low speed balancing machine and that requires high speed balancing techniques |  Generator rotor |
| Class 4 Rotors <i>Special Flexible Rotors</i> | A rotor that could fall into classes 1,2 or 3, but has in addition one or more components that are themselves flexible or are flexibly attached |  Rotor with centrifugal switch |
| Class 5 Rotors <i>Single Speed Flexible Rotors</i> | A rotor that could fall into class 3 for some reason, e.g. economy balanced only for a single service speed |  High speed motor |

(분류4) 부착물을 갖고 있는 탄성 회전축 : 1과 2의 범주에 속하면서 회전축 자체가 탄성이거나 탄성 부착물이 존재하는 회전축

(분류5) 하나의 속도에서 밸런싱된 탄성 회전축 : 3의 범주에 속하면서 몇가지 이유(예, 경제성)로 해서 작동 속도에서만 밸런싱으로 수행한 회전축.

4. 밸런싱 종류 및 방법

회전기계류는 제작단계에 이미 밸런싱이 되었으나, 설치후 부터 장시간 가동중에 불평형이 발생할 수 있으므로 불평형이라 판단되었을 때에는 Field 밸런싱을 수행하여야 하는 경우가 있다. 이와같은 경우에 회전축의 종류에 따라서 회전축에 수직인 단일면 또는 그 이상의 면에 대하여 밸런싱을 하여야 한다. 따라서 기본이 되는 영향계수에 의한 방법, 궤적 및 Four-Run에 의한 방법에 대하여 기술하고자 한다.

가. 영향계수(Influence Coefficient) 방법

본 방법은 극좌표 선도(Polar Plot) 방법이라고 널리 알려져 있으며 불평형 질량과 그 위치를 결정하기 위하여 도표를 만들어서 이용하고 있다. 회전기계류의 진단을 위하여 극좌표 선도를 이용하는 것은 밸런싱을 목적으로 축의 휨상태를 쉽게 읽을 수 있고 구조물 공진, 밸런싱 공진등을 구별할 수 있으며 속도, 하중, 시간등에 따라 진동변위 및 위상각을 보여주고 있기 때문이다.

기본적인 밸런싱을 수행하기 위하여 다음과 같은 도구와 절차가 요구된다. 첫째로 회전기계류의 각각 베어링 근방에서 축을 관찰할 수 있는 변위기와 축이 1회전 할때 마다 펄스를 생성시키는 장치(Keyphasor)이며 기계의 동적운동을 궤적 또는 시간에 따른 변화를 볼수 있는 모실로스 코프가 필요하다.

이와같이 준비가 되면 우선적으로 결정하여야 할 것은 회전기계 불평형 문제를 가지고 있는지 또는 다른 기능문제(마찰, 축연결의 일직선, 불충분한 베어링 간극등)가 존재하는지를 확인하여야 하며 그 후에 밸런싱을 수행한다. 절차는 다음과 같다.

(1) 저속에서 변위와 위상(Slow roll vector)를 측정하여 벡터A로 기록(Fig.9)

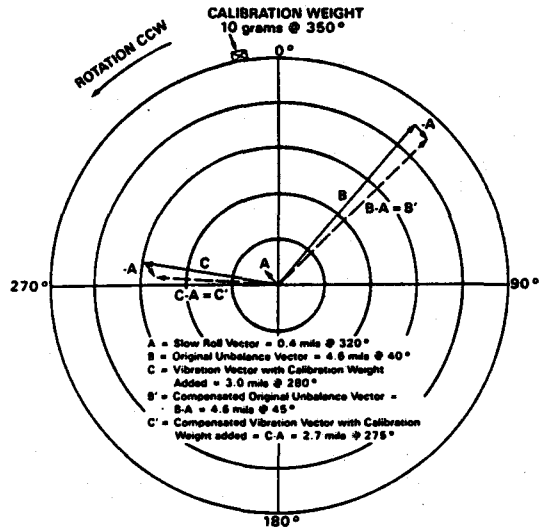


Figure 9. Subtracting slow roll vectors from vibration vectors

(2) 밸런싱을 하여야 할 속도 또는 속도를 높인 상태에서 초기의 불평형(변위 및 위상)을 벡터B로 기록

(3) 회전기계를 정지하여 알고 있는 각도에 이미 측정된 질량을 장착하여 회전을 하면서 동기진동(Synchronous Vibration)을 벡터C로 기록(예, 350° 위치에 10그램 무게)

(4) 벡터B와 C에서 벡터A를 제거하여 보상진동 벡터B'과 C'을 결정

(5) 알고 있는 보정무게에 대한 영향을 계산하기 위하여 벡터B'에서 벡터C'로 향하는 벡터D를 결정(Fig.10)

(6) 완전하게 밸런싱을 하기 위하여 벡터 B'과 크기는 같고 방향은 반대가 되도록 조절

a. 벡터B'과 비교하기 위하여 벡터D의 크기를 측정. 예를들어 길이의 비는 1.4 : 1(6.6mil : 4.6mil). 그러므로 40%의 무게가 보정무게로 더 추가 되었음. 최종 보상무게는 7.0그램임

b. 벡터D와 B'사이의 각도와 방향을 측정. 예를들어, 벡터D는 벡터B'의 반대가 되기 위하여 반시계 방향으로 18° 회전하여야함

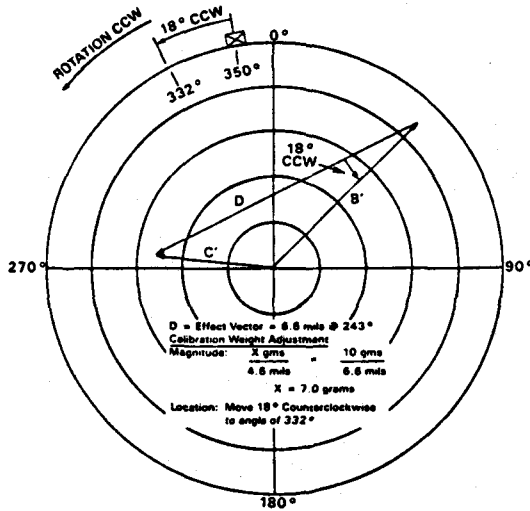


Figure 10. Diagramming effect vector and calculating adjustment of calibration weight

(7) 보정무게를 제거하고 계산된 보상무게를 장착

나. 궤적(Orbit) 방법

대부분의 질량이 단일면(축방향 분포가 얇임) 근방에 집중되어 있는 회전축은 커플 불평형이 무시된다는 가정하에 1개의 밸런스 보상면을 이용하여 평형을 잡을 수 있다. 축위에 2개의 수직 한 변위기에 의해 생긴 진동변위 신호는 Fig. 11에서 보는 것과 같이 축이 공전하는 궤적을 나타내고 있는 모실로스코프와 연결되어 있다. 키웨이저(K.P) 신호가 모실로스코프의 z축에 연결시키면 궤적의 일부가 교란을 받아서 공백이 생긴다.

이것은 회전축의 각 위치와 기준점에 대한 진동벡터의 위치를 알려준다. 예를들어 Fig. 11에서와 같이 K.P가 아래방향에 있을때 진동벡터V가 x축에서 반시계 방향으로 근사적으로 45°에 놓여 있다는 것을 축의 궤적에서 알 수 있다.

일반적으로 회전축의 불평형 U와 진동변위 V 사이에 위상각 β 가 존재하나 첫번째 위험속도의 80%이하의 속도에서 위상각은 영에 근사한다. 따라서 회전축에서 진동벡터의 위치는 불평형 백

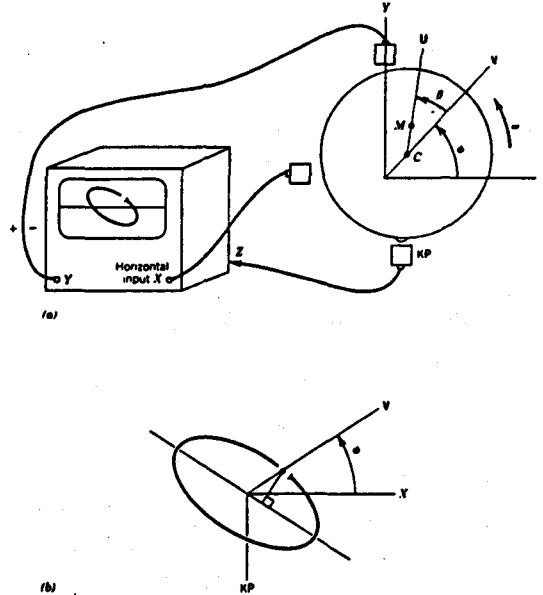


Figure 11. (a) Measurements for balancing by the orbit method. (b) Graphical determination of the location of the vibration vector by the orbit method.

터와 같게 된다. 일단 불평형의 위치를 알게되면 시행착오로 임의의 질량을 불평형 위치에서 180°에 부착한다.

회전축을 같은 속도로 다시 회전시켜서 새로운 궤적의 공백이 초기 공백 지점의 반대 위치에 놓여 전체 궤적이 더 크게 되면 시행착오로 부착한 질량이 크다는 의미이며, 질량을 줄여 가면서 계속 시행착오를 하여야 한다. 초기의 불평형이 정적이라면 회전축은 몇번의 반복에 의하여 평형을 잡을 수 있다. 이러한 방법은 회전축의 단일면 내에서 불평형의 위치를 알려 주지만 그 크기는 알 수가 없다.

다. Four-Run 방법

본 방법은 위상의 측정과 K.P의 신호가 없어도 회전축을 밸런싱할 수 있다. 회전축의 원주 방향으로 120°씩 구분하여 시행착오로 알고 있는 보정 질량을 부착하여 불평형 위치와 크기를 결정하는 간단한 방법이다.

5. 결 언

지금까지 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 회전기계류의 불평형에 대하여 기술하였으며 특히 석유 화학공장에서의 회전기계류는 모든 공정에 중요한 영향을 미치고 있다. 따라서 가동중에 회전축의 불평형은 흔히 나타날 수 있는 현상이므로 지속적으로 검사 및 기록유지를 통하여 모든 시스템이 원활히 작동되어야 할 것이며 갑작스런 정지 또는 사고를 예방하여 공장 가동정지로 인한 비용손실과 인명손실을 최대한 방지하여야만 할 것이다.

참고 문헌

1. Jackson, Charles; The Practical Vibration

Primer, Gulf Publishing Company, 1979

2. John M. Vance; Rotordynamics of Turbomachinery, Wiley, 1988
3. John W. Sawyer; Turbomachinery Maintenance Handbook, 1980
4. Donald E. Bently; Balancing of Rotors Using Calibration Weight Technique and Polar Plotting Techniques, Bently Nevada, 1985
5. J.S. Rao; Rotor Dynamics, 1983
6. Donald E. Bently; The Keyphasor-A Necessity for Machinery Diagnosis, R7/79

자원아껴 알뜰살림 · 다음세대 번영온다

엄마절약 집안행복 · 아빠절약 나라부강