

강성회전체의 평형특성 요구조건 - 허용 잔류불평형량의 결정 (ISO 1940-1)

ISO/TC/108/SC1 1940-1 (Mechanical vibration - Balance quality requirements of rigid rotors- Determination of permissible residual unbalance)

최 상규*, 전 오성**

Sang-Kyu Choi, Oh Sung Jun

ABSTRACT

This part of ISO 1940 gives recommendations for determining unbalance and for specifying related quality requirements of rigid rotors; it specifies a) a representation of unbalance in one or two planes; b) methods for determining permissible residual unbalance; c) methods for allocating it to the correction planes; d) methods for identifying the residual unbalance state of a rotor by measurement; e) a summary of errors associated with the residual unbalance identification. This part of ISO 1940 is also intended to facilitate the relations between manufacturer and user of machines. Detailed consideration of errors associated with the determination of residual unbalance is covered in the 2nd part of ISO 1940 (ISO 1940-2 will deal with these errors).

1. 서론

ISO 1940-1은 강성회전체의 불평형량을 정하고 관련된 특성 요구조건을 규정하기 위한 다음과 같은 방법을 제시하고 있다.

- a) 1면 또는 2면상의 불평형량 표현
- b) 허용 잔류 불평형량의 결정 방법
- c) 보정면 상에 배분하는 방법
- d) 잔류 불평형 상태를 계측하는 방법
- e) 잔류 불평형 결정과 관련된 오차

이 규격에서는 또한 강성회전체의 형태, 질량 및 최대 운전속도에 따라 허용 잔류 불평형량을 제시하고 있는데 이는 평형 특성 요구조건에 관련하여 세계적으로 쌓여진 경험에 기초한 데이터라고 밝히고 있다.

잔류 불평형의 결정과 관련된 오차의 상세한 취급은 이 규격에는 포함되지 않으며, ISO 1940-2에서 취급한다. 탄성회전체에 대한 허용 잔류 불평형 및 평형잡기 방법은 ISO 11342에서 다루고 있다.

2. 평형잡기와 관련된 사항

2.1 불평형 상태의 표현

* 한국기계연구원 회전체그룹

** 전주대학교 기계공학과

강성회전체의 불평형 상태는, 그림 1a)에서 1f)에 보는 것처럼 벡터량을 사용하여 여러 가지 방법으로 표현할 수 있다. 대부분의 회전체에서 불평형량은 그림 1a)에서 1c)처럼 2개의 면에서 나타낸다. 불평형 보정 절차는 일반적으로 이와 같은 방식으로 실시하는데, 예를 들어, 그림 1a)의 표현을 사용한다면, 2.24 그림과 3.15 그림의 불평형 보정을 I 과 II의 면에 각각 적절한 방위각에 적용한다. 그림 1a)와 1c)를 비교해 보면, 보정면 사이의 거리가 짧아지면서 보정량의 합은 커지고 이들 벡터 사이의 각의 차이도 증가함을 알게 된다. 혹은, 그림 1d)의 표현 방법이 사용될 수 있다. 이러한 경우, 총 불평형 벡터의 평면상에서 보정을 해야 하며, I과 II의 면에서도 동시에 보정을 하게 된다. 전체 기계의 진동 거동에 미치는 불평형 효과를 조사할 필요가 있다면, 그림 1e)와 같이 불평형량을 분해할 수 있다. 여기서 점 S는 회전체의 질량 중심을 가리킨다. 그림 1f)과 같이 불평형 중심 C를 지나는 총 불평형량을 일부 회전체에 적용할 수 있다. 이 경우에는 우력 불평형이 최소가 되며, 이들 우력 벡터는 총 불평형량 벡터가 향하는 방향에 수직인 면상에 놓이게 된다.

2.2 불평형 효과

불평형된 회전 물체는 베어링과 기초에 힘을 발생시킬 뿐 아니라 기계의 진동을 유발한다. 주어진 회전 속도에서, 앞의 두 효과는 베어링과 기초의 동적 강성과 회전체의 기하학적 특성 및 질량 분포에 주로 의존한다. 많은 경우, 우력 불평형과 비교해 볼 때 정적 불평형이 중요하다. 반대 방향이며 동일한 크기의 불평형보다는 동일 방향에 서로 다른 면에 존재하는 두 개의 불평형이 더 큰 영향을 미친다. 우력 불평형이 주요 원인이 되는 경우들이 있는데, 예를 들어 베어링 사이의 간격이 보정면 사이의 거리보다 작은 경우(양단에 디스크를 가지는 내다지 회전체의 경우가 이에 속함)이다. 이러한 상황에서는 우력 불평형에 기인한 베어링 부하가 정적 불평형에 기인한 것보다 클 것이다.

2.3 한 개의 보정면을 갖는 회전체

디스크 형태의 회전체에 있어서는, 베어링 사이 거리가 크고 디스크가 충분히 작은 축방향 런아웃을 가지고 회전한다면 한 개의 보정면을 사용해도 충분하다. 이러한 조건이 만족되었는지는 각 경우에 따라 검토해야 할 것이다. 어떤 회전체에 대해 충분히 많은 수량에 대하여 1면 평형잡기를 수행한 후 최대 잔류 우력 불평형을 구한 다음, 베어링 간격으로 이를 나눈다. 이 방법으로 구한 값 모두 허용범위 내에 들게 되면 1면 평형잡기로 충분하다고 본다.

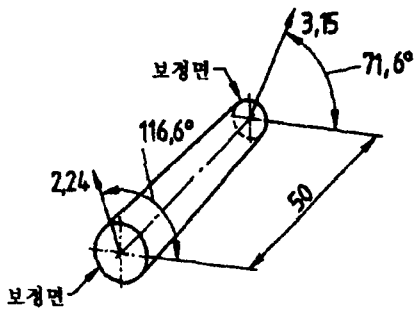
2.4 두 개의 보정면을 갖는 회전체

디스크 형태의 회전체에 대하여 2.3에서 서술한 조건을 강성 회전체가 만족하지 않으면, 두 개의 보정면이 필요하다. 이러한 평형잡기를 2.3에서 설명한 1면(정적) 평형잡기에 대조시켜 2면(동적) 평형잡기라고 한다. 1면 평형잡기에서는 회전체의 어느 위치에서도 단지 정적 평형만이 요구된다. 반면에 2면 평형잡기에서는 회전체를 돌릴 필요가 있다. 그렇게 하지 않으면 우력 불평형이 감지되지 않기 때문이다.

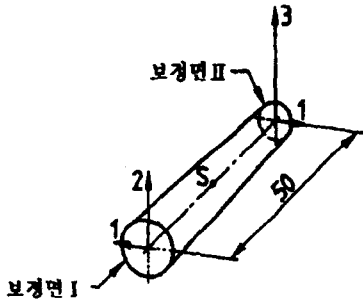
두 개의 보정면 각각에서의 허용 잔류 불평형은, 보정면과 베어링의 위치 뿐 아니라 두 잔류불평형 사이의 상대 방위각에 좌우된다. 허용 잔류불평형량을 결정하는 방법과 허용 잔류불평형을 보정면에 배분하는 방법은 뒤에 기술한다.

2.5 조립품

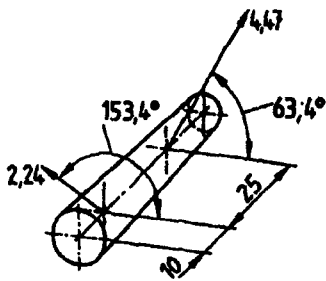
회전체들은 주요 단품 단위로, 혹은 조립상태로 평형잡기를 수행한다. 각 조립품들에 있어서는 이를 구성하는 모든 부품의 불평형들이 벡터적으로 합해지며, 조립품의 부정확성에 기인한 어떤 불평형도 모두 고려의 대상이 되어져야 한다. 부품이 평형시험기에서와는 다른 위치에 조립될 수 있기 때문에 특별한 주의가 필요하다. 개별 부품들을 독립적으로 평형잡기하여 조립품의 불평형 허용공차를 달성할 수 없다면, 조립품을 한 몸체로 보고 평형잡기를 수행한다. 개별 부품을 별도로 평형잡기한다면, 볼트 또는 키와 같은 연결 요소들에 대하여 사전 부착을 해야 한다.



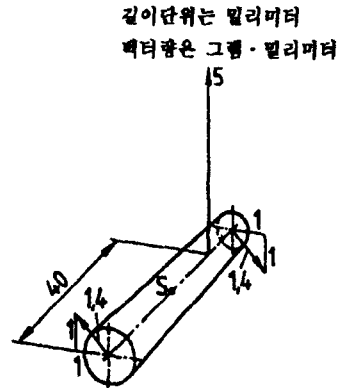
a) 보정면 I 과 II에서의 한 개의 불평형 벡터



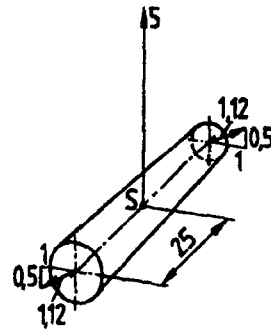
b) 보정면 I 과 II에서의 두 개의 불평형 벡터



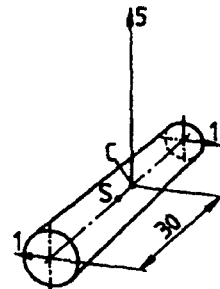
c) 다른 두 개의 보정면 상에서의 한 개의 불평형 벡터



d) 보정면 I 과 II에 우력 불평형을 가진 한 개의 불평형 벡터(합 불평형 벡터의 위치는 어느 곳이나 가능하다. 예를 들어 두 보정면 중의 하나일 수도 있다. 이때 우력의 크기는 합 불평형 벡터의 위치에 의존한다.)



e) d)의 특별한 경우, 이름하여 정적/우력 불평형(합 불평형 벡터가 질량 중심을 지나고, 이에 따른 우력 불평형이 존재한다.)



f) d)의 다른 특별한 경우 (합 불평형 벡터가 불평형 중심을 지나고, 이에 따른 우력 불평형이 최소가 된다.)

그림 1- 강성 회전체 불평형의 서로 다른 표현

3. 회전체 질량에 관련된 허용 불평형량

일반적으로 회전체 질량이 클수록 허용 잔류불평형은 크다. 그러므로 아래 식과 같이 허용 잔류 불평형 값 e_{per} 의 향으로 허용 잔류불평형 U_{per} 과 회전체 질량 m 을 연결시키는 것이 적절하다.

$$e_{per} = \frac{U_{per}}{m}$$

회전체에 존재하는 모든 불평형을, 우력 불평형이 0이 되는 축 상의 한 위치에서 축에 수직인 평면에 단일 불평형으로 등가적으로 표현할 수 있는 특별한 경우, 허용 잔류 불평형 값 e_{per} 는 회전체 질량 중심의 허용 변위와 동일하다고 간주할 수 있다. 그 밖의 모든 다른 경우에 있어서는, 그 중에 하나를 그림 1에 보였는데, 허용 값 안에 들도록 2면 평형잡기를 하면 질량 중심의 등가 잔류 변위 e 는 허용 잔류 불평형 값 e_{per} 보다 작아진다.

4. 특성 등급과 관련된 운전속도와 허용 잔류 불평형

경험에 의하면, 동일 형태의 회전체들에 있어서 허용 잔류 불평형 값 e_{per} 는 그림 2에서 보는 바와 같이 주어진 평형 특성 등급에 대한 속도 범위 내에서 회전체 속도와는 역으로 변화한다. 이 관계를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$e_{per} \times \omega = \text{일정}$$

여기서 ω 는 최대 운전속도에서의 회전체 각속도이다. 이 관계는, 동일한 원주속도로 작동하는 기하학적으로 유사한 회전체에 있어서 회전체와 베어링에서의 응력이 동일하다는 사실로부터도 얻어진다. (표 1과 그림 2에서 주어진) 평형 특성 등급은 이러한 관계에 기초한 것이다.

5. 평형 특성 요구조건의 결정

5.1 일반

평형특성 요구조건은 5.2부터 5.4에 기술한 세 가

지 방법으로 정할 수 있다. 첫째 방법은 여러 형태의 많은 회전체를 가지고 오랜 기간 실제 경험으로부터 유도한 특성 등급에 기초한 것이다 (5.2 참조). 둘째 방법은 실험적인 방법이며 종종 대량생산 체제의 평형잡기에 사용한다 (5.3 참조). 셋째 방법은 불평형에 기인한 허용 베어링력이 정해져 있을 때 사용한다 (5.4 참조).

5.2 설정된 등급에 기초한 평형특성 요구조건

3절과 4절에 기초하여, 특성 요구사항을 분류하는 평형특성 등급이 설정되었다. 표 1의 각 평형특성 등급은 허용 잔류 불평형의 상한 값으로서 이로부터 0까지 범위를 이룬다. 이 상한 값은 밀리미터/초 단위를 갖는 $e_{per} \times \omega$ 곱으로 나타내는 어떤 값으로 주어진다. 평형 특성 등급은 곱의 값 $e_{per} \times \omega$ 에 따라 가려진다. 예를 들어 곱의 값이 630mm/s이면, 평형특성 등급은 G630이 된다. 평형 특성 등급은 서로 서로 2.5배로 구분된다. 보다 세밀한 등급이 요구될 수도 있는 경우가 있는데, 특히 고정밀 평형잡기가 요구될 경우이다. 그림 2에 e_{per} 의 상한 값을 최대 운전속도에 대하여 표현하였다.

허용 잔류 불평형은 $U_{per} = e_{per} \times m$ 로 표시되는데, m 은 회전체 질량이다. 이러한 평형특성 등급의 권고 값은, 축 저어닐의 정밀도(진원도 등) 및 베어링 정밀도가 충분하다면, 그때에만 실제로 달성할 수 있다. 평형특성 등급 G1을 달성하기 위해서는 통상적으로 회전체를 벨트구동 또는 자가구동을 사용하는 자신의 운전 베어링에 설치된 상태에서 평형잡기 할 필요가 있다. 평형특성 등급 G0.4를 달성하기 위해서는, 회전체를 자신의 베어링과 하우징에 설치하고 정상적인 운전 조건과 운전온도 하에서 평형잡기를 수행할 필요가 있다. 일반적으로 자가구동이 요구된다.

5.3 실험적 결정에 근거한 평형 특성 요구조건

평형 특성 요구조건의 실험적 결정은 대량생산적 용을 위해 종종 수행한다. 평형시험기 특성이 회전체가 사용되고자 하는 기계의 운전조건과 본질적

으로 동일할 때 경우에 따라 평형시험기에서 수행하기도 하지만, 실험은 보통 실제 상황에서 수행된다. 각 보정면에서의 허용 잔류불평형 값은 각 면에 연속적으로 여러 가지 시험질량을 적용하여 실험적으로 결정한다. 선정되는 기준은, 가장 대표되는 양 하나(불평형으로 기인된 진동, 힘 또는 소음 등)로 주어진다.

2면 평형잡기에서는, 동일 위상각을 갖는 불평형과 우력 불평형의 달라지는 효과를 염두에 두어야 한다. 더욱이 현장에서 발생할 수도 있는 국부적인 환경의 변화, 회전체에서의 변화를 고려해두어야 한다.

5.4 지정된 허용 베어링력에 근거한 평형 특성 요구조건

베어링에서 지지구조물로 전달되는 불평형력의 효과가 주 관심사이고 이들 힘의 한계치가 정해진 위치에서는, 허용잔류 불평형의 결정에 이 효과가 고려되어야 한다. 그리고 각 베어링 면에서의 허용 불평형값은, 각 베어링에서의 불평형에 기인한 최대 허용 힘으로부터 직접 유도될 수 있다. 베어링 면에서 잔류 불평형을 측정하는 평형시험기로 평형잡기를 수행한다면, 이들 값이 직접 적용될 수 있다. 그러나 잔류 불평형이 다른 면에서 측정된다면, 이들 면에서의 허용 잔류불평형은 7절에서 기술하는 방법을 통해 계산할 수 있다. 이 방법에서는 베어링 면들에서의 허용 잔류 불평형들의 합인 U_{per} 를 정의한다.

(각 베어링에서의 허용 잔류불평형을 각 베어링에서의 불평형에 기인한 최대 허용력에 의하여 유도하면, 운전속도, 회전체 질량 분포 및 베어링 지지 강성을 포함하는 여러 인자에 영향을 받는다. 그러나 강성 베어링에 지지된 강성 회전체의 특수한 경우에는, 각 베어링 면에서의 허용 잔류불평형은 해당 베어링에서의 불평형에 기인한 최대 허용력을 최대 운전 각속도의 제곱으로 나눈 값과 동일하다.)

6. 허용 잔류 불평형의 보정면 배분

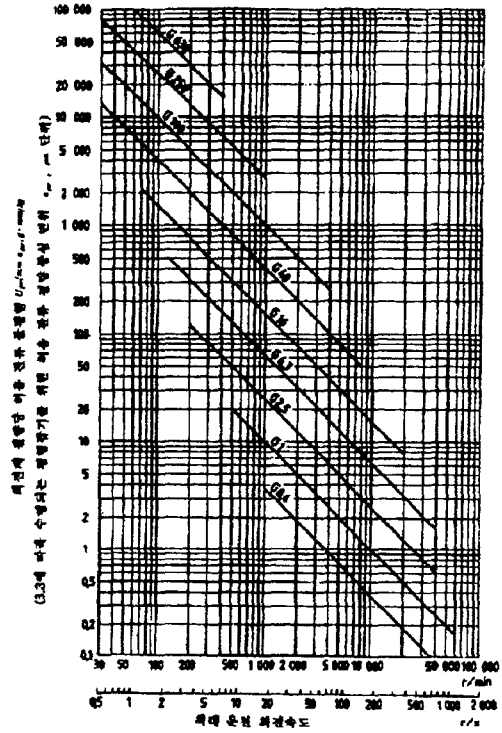


그림 2. 여러 가지 평형 특성 등급에 대한 최대 허용 잔류 비불평형값

6.1 일반

평형 특성 요구조건은 5절의 3가지 방법 중 하나로 정해질 수 있다. 5.2에서 기술한 방법에서는, 각 보정면의 잔류불평형의 최대 허용치로 평형 특성 요구조건을 정한다. 따라서 더 이상의 배분작업이 필요하지 않다. 그러나 5.1의 방법(및 5.3 방법을 사용하는 일부 경우)을 사용하면 허용 잔류 불평형의 총합인 U_{per} 을 구하게 되므로, 1개보다 많은 보정면을 사용한다면 각 보정면에 배분하는 작업이 필요하다.

일반적으로, 베어링 면을 기준으로 한 잔류불평형의 비가 운전 베어링에 대한 허용 동하중과 동일한 비율로 되도록 U_{per} 를 보정면에 배분해야 한다. 결과적으로, 운전베어링 면에서 불평형을 측정하는 평형시험기 상에서 회전체를 평형잡기 한다면, 위의 법칙은 그대로 적용되는 것이 된다.

표 1 - 여러 가지 강성 회전체 종류별 평형 특성 등급

평형특성 등급	$(e_{per} \times \omega)^{1,2}$ mm/s	회전체 형태 - 일반 예
G4000	4000	홀수의 실린더 ³⁾ 를 갖는 강성지지된 저속 선박디젤엔진의 크랭크축/구동장치 ³⁾
G1600	1600	강성지지된 대형 2행정 엔진의 크랭크축/구동장치
G630	630	강성지지된 대형 4행정 엔진의 크랭크축/구동장치 유연지지된 선박디젤엔진의 크랭크축/구동장치
G250	250	강성지지된 고속 4기통 디젤엔진의 크랭크축/구동장치 ⁴⁾
G100	100	6기통 이상의 고속 디젤엔진의 크랭크축/구동장치 ³⁾ 자동차, 트럭, 기관차에서의 완전한 (디젤 또는 가솔린) 엔진 ⁵⁾
G40	40	자동차 바퀴, 바퀴 립, 바퀴 세트, 구동축 유연지지된 6기통 이상의 고속 4행정 엔진(디젤 또는 가솔린)의 크랭크축/구동장치 ⁴⁾ 자동차, 트럭, 기관차 엔진의 크랭크축/구동장치
G16	16	특수 요구조건을 가진 구동축(프로펠러 축, 카단 축) 분쇄기 부품 농업용 기계 부품 자동차, 트럭, 기관차 엔진의 단위부품 특수 요구조건을 가진 6기통 이상 엔진의 크랭크축/구동장치
G6.3	6.3	공장 플랜트 기계의 부품 선박용 주엔진 기어(해운업) 원심분리기 드럼 제지기계 롤, 프린트 롤 팬 조립된 항공 가스 터빈 회전체 플라이 휠 펌프 임펠러 공구 및 일반 기계류 부품 특수 요구조건이 없는 중대형 전기 아마추어(최소 80밀리미터의 축 높이를 갖는 전동모터에서) 중중 대량생산되는, 진동에 둔감한 용도나 진동절연 설치된 소형 전기아마추어 특수 요구조건을 가진 엔진 개별 부품
G2.5	2.5	선박용 주 터빈(해운업)을 포함한, 가스 및 증기 터빈 강성 터보발전기 회전체 컴퓨터 메모리 드럼 및 디스크 공구 구동장치 특수 요구조건을 가진 중대형 전기아마추어 평형특성 등급 G6.3의 소형 전기아마추어에 대한 한가지 조건 또는 양 설치 조건을 만족시키지 못하는 소형 전기아마추어 터빈구동 펌프
G1	1	테이프 레코더 및 사진(축음기) 구동장치 연마기 구동장치 특수 요구조건을 가진 소형 전기아마추어
G0.4	0.4	스핀들, 디스크, 정밀 연마기의 아마추어 자이로스코프

비 고 1) $\omega = 2\pi n / 60 = n / 10$ (n 은 분당 회전수, ω 는 초당 라디안)

- 2) 보정면에 허용 잔류 불평형을 배분하기 위함. 7절 참조.
- 3) 크랭크축/구동장치는 크랭크축, 플라이 휠, 클러치, 풀리, 진동 댐퍼, 커넥팅 로드와 회전부 등을 포함하는 조합체임.
- 4) 본 규격에서, 저속 디젤엔진은 9 m/s 이하의 피스톤 속도를 가지며, 고속 디젤엔진은 9 m/s 이상의 피스톤 속도를 갖는다.
- 5) 완전한 엔진에서는, 회전체 질량이 앞의 3번 비교에서 기술된 크랭크축/구동장치에 속한 모든 질량의 합을 나타낸다.

그러나 일반적으로, 잔류불평형은 운전 베어링 면이 아닌 면에서 측정된다. 더욱이 운전 베어링 면들 사이에 다른 비율로 허용 잔류불평형을 분산시킬 것을 요구하는 특별한 요구조건들(예를 들어 진동 방출, 소음, 피로 한계)이 있을 수 있다.

그러므로 본 절에서는 각 보정면에서의 허용 잔류불평형을 U_{per} 로써 결정하는 다른 여러 가지 방법을 기술한다. (운전 베어링에 대한 허용 동하중은, 베어링 카탈로그나 허용 비 하중, 베어링의 길이와 지름에 대한 정보로부터 유추할 수 있다.)

6.2 1면 평형잡기

한 개의 보정면을 갖는 회전체에 대하여 이 면에서 측정되는 허용 잔류불평형은 U_{per} 와 동일하다.

6.3 2면 평형잡기

6.3.1 일반

두 개의 보정면을 갖는 회전체에서 허용 잔류불평형을 정하는 여러 가지 방법이 6.3.2와 6.3.3에 기술된다. 세 가지 간단한 방법을 6.3.2에 기술하였다. 이들은, 실제적인 모든 경우에, 각 보정면에서 타당한 허용 잔류불평형을 제공할 수 있는 방법들이다. 때문에 허용 잔류불평형들 사이의 어떠한 위상 관계에 있어서도 양 베어링의 최대 동하중은 무게에 대한 베어링 정하중 비와 잘 일치한다. 근사적이지만 이들 간단한 방법들은 많은 회전체에 성공적으로 적용되어 왔다.

6.3.3.1의 방법은 완전히 일반적인 방법이며, 모든 종류의 회전체에 적용할 수 있다. 이 방법은 보정면의 위치와 보정면에서의 잔류불평형들 사이의 위상각 관계 중 가장 바람직하지 못한 경우를 고려한 것이다. 양 보정면이 내다지형 회전체에 있는 형태가 있다. 이때 베어링의 간격은 보정면 사이의 거리보다 훨씬 크다. 이러한 회전체에 있어서는, 양 보정면의 잔류불평형이 동일 위상 또는 180도 위상차가 있을 경우에 허용 잔류불평형 사이에 큰 차이가 존재할 수 있다. 6.3.3.1에 기술한 방법이 이 경우에 적용될 수 있지만, 어떤 상황에서는 필요 이상의 정밀 평형잡기가 이루어질 수 있다. 이

때문에 보정면과 일치하지 않는 다른 면에서 잔류불평형을 측정하는 방법을 6.3.3.2에 기술하였다. 이는 위상각을 직접 측정해야 할 필요없이 알맞은 위상관계를 얻을 수 있는 장점을 확인시켜 준다.

기술된 방법들은 대부분의 회전체에서 허용 가능한 결과를 제공할 것이지만, 몇가지 특수한 경우에 있어서는 계산치가 비현실적일 정도의 정밀한 평형잡기 공차를 초래할 수 있다. 이러한 경우, 이들 공차가 베어링의 하중 부여 없이 또는 다른 제한 파라메타들의 초과됨이 없이 경감될 수 있을 정도로 고려가 되어져야 할 것이다.

6.3.2 간소화된 근사 방법

대부분의 회전체에 있어서, 6.3.2.1에서 6.3.2.3의 방법은 권고에 잘 맞추어 적용하면 만족스런 결과를 제공하게 된다.

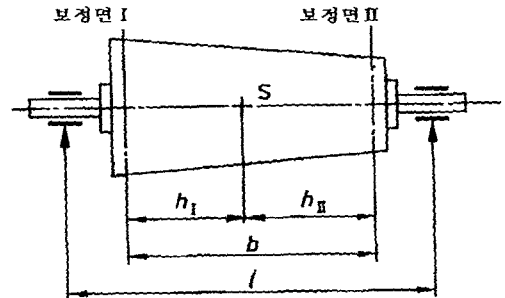


그림 3 - 간소화된 방법에 사용되는 회전체 세원

6.3.2.1 베어링 간격보다 작은 보정면 사이의 간격(그림 3을 참조)

이 간소화된 방법은 아래의 운전 조건을 만족하는 회전체들에 적용할 수 있다.

- 무게중심이 베어링 간격의 세 토막 중 가운데에 있다.
- 보정면 사이의 거리가 베어링 사이 간격의 1/3보다는 크고 1보다는 작다.
- 보정면들이 회전체 무게중심으로부터 본질적으로 같은 거리에 있다.

이러한 회전체에 대해서는, 허용 잔류불평형 U_{per} 의 반을 각 보정면에 배분한다. 즉

$$U_{perI} = U_{perII} = \frac{U_{per}}{2}$$

a)와 b)에서 기술한 조건이 맞지 않고 보정면이 무게중심으로부터 중앙에 있지 않다면, 아래와 같이 각 보정면에 허용 잔류불평형을 배분한다.

a) 보정면 상의 허용 잔류불평형 합이 U_{per} 이 된다.

b) 각 보정면의 허용 잔류불평형 비율을 각 보정면에서 회전체 무게중심까지의 거리와 같게 되도록 하되, 큰 잔류불평형이 무게중심에서 가장 가까운 보정면에 오도록 한다. 그러나 그림에도 불구하고 큰 잔류불평형과 작은 잔류불평형의 비가 0.7/0.3을 넘지 않도록 한다. 즉,

$$0.3U_{per} \leq U_{perI} = U_{per} \frac{h_{II}}{b} \leq 0.7U_{per}$$

$$0.3U_{per} \leq U_{perII} = U_{per} \frac{h_I}{b} \leq 0.7U_{per}$$

6.3.2.2 베어링 간격보다 큰 보정면 간격(그림 4)

보정면 간격 b 가 베어링 간격 l 보다 큰 경우의 회전체에서 우력 불평형 효과는 점점 중요성이 증가한다. 이 경우 회전체에 대한 허용 잔류불평형 U_{per}^* 을 아래와 같은 l/b 비율로 줄인다.

$$U_{per}^* = U_{per} \times \frac{l}{b}$$

그리고 U_{per}^* 의 값을 7.3.2.1과 동일한 방법으로 보정면들에 배분한다.

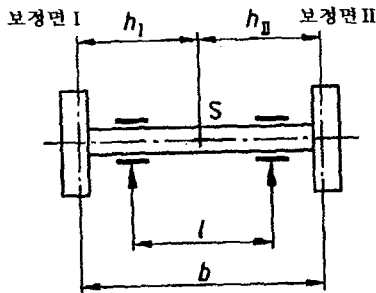


그림 4 - 양단에 내다지가 있는 회전체

6.3.2.3 베어링 간격의 1/3보다 작은 보정면 간격 (그림 5 참조)

보정면 간격이 작은 회전체에 있어서, 각 보정면의 잔류불평형 효과는 각 보정면 불평형 사이의 위상각에 민감하다. 결과적으로 6.3.2.1 방법의 사용은 필요보다 더 정밀한 평형상태를 가져온다. 따라서 이러한 회전체에 대하여는 아래에 기술한 것처럼 정적 잔류불평형과 우력 잔류불평형을 통하여 U_{per} 를 보정면에 배분하도록 권고한다.

- 정적(또는 준 정적) 불평형의 보정을 위한 임의의 면 III을 정한다.(면 III은 면 I 또는 면 II와 일치할 수 있다.) 그림 5와 같이 면 III으로부터 먼 거리에 있는 베어링까지의 거리를 c 라고 한다. 180도 각 차이가 있는 면 I과 면 II에 주어질 우력 보정을 위해 U_{per} 에 대하여 보정면에 배분하기 위한 조정을 아래와 같이 한다.

$$U_{perIII} = \frac{U_{per}}{2} \times \frac{l}{2c}$$

$$U_{perI} = U_{perII} = \frac{U_{per}}{2} \times \frac{3l}{4b}$$

앞에서 U_{per} 의 배분은,

- 동일한 허용 베어링 동하중을 가정하고
- 잔류 정 불평형과 우력 불평형 사이의 가장 바람직하지 않은 위상관계를 고려한 것이며
- 정 보정면의 위치에 무관하며
- $0 < b \leq \frac{l}{3}$ 영역에서 유효하다.

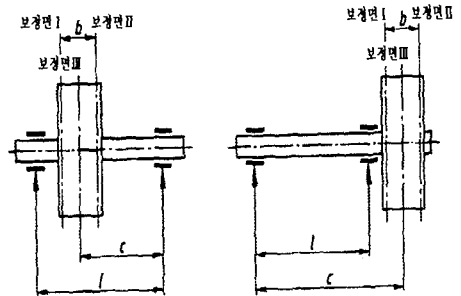


그림 5 - 베어링 간격의 1/3보다 작은 간격에 우력 보정면 I과 II를 갖는 회전체

6.3.3 일반 회전체

6.3.3.1과 6.3.3.2의 방법은 질량분포와 보정면 위치에 관계없이 모든 회전체에 적용될 수 있다.

6.3.3.1 모든 회전체에 대한 일반적 방법 (위상에 무관)

U_{perI} 과 U_{perII} 를 각각 아래의 방법에 따라 결정할 보정면 I과 II에서의 허용 잔류불평형이라고 하자. 기준으로 한 베어링을 선정하고, 이 기준 베어링으로부터 다른 베어링까지의 모든 거리를 측정한다.

아래의 매개변수들을 결정한다. (그림 6참조)

- 베어링 사이의 거리 l
- 기준 베어링으로부터 보정면 I까지의 거리 a
- 보정면 사이의 거리 h

총 허용 잔류불평형 U_{per} 에 대한 기준 베어링에서의 허용 잔류불평형의 비율 k 를 결정한다 (k 값은 일반적으로 0.5, 운전 베어링들의 부하용량이나 강성이 다를 때는 0.3과 0.7 사이). 다른 베어링에서의 허용 잔류불평형은 $(1-k)U_{per}$ 이 될 것이며, 따라서 베어링들에서의 허용 잔류불평형의 합은 U_{per} 이 된다. 보정면 I에서의 허용 잔류불평형에 대한 보정면 II에서의 허용 잔류불평형의 비 R , 즉 $R = \frac{U_{perII}}{U_{perI}}$ 을 결정한다.

아래 식을 따라 U_{perI} 의 4개 값을 계산한다.

$$U_{perI} = U_{per} \frac{kl}{[(l-a) + R(l-a-b)]}$$

$$U_{perI} = U_{per} \frac{kl}{[(l-a) - R(l-a-b)]}$$

$$U_{perI} = U_{per} \frac{(1-k)l}{[a + R(a+b)]}$$

$$U_{perI} = U_{per} \frac{(1-k)l}{[a - R(a+b)]}$$

위 4개 값 중에서 가장 작은 절대값을 보정면 I에서의 허용 잔류불평형 U_{perI} 로 선택한다. 이에 대응하는 보정면 II에 대한 허용 잔류불평형 값

U_{perII} 을 아래 식에 따라 계산한다.

$$U_{perII} = R \times U_{perI}$$

잔류불평형이 보정면 I에서 U_{perI} 와 보정면 II에서 U_{perII} 를 넘지 않는다면, 회전체는 평형특성 요구조건을 만족하게 될 것이다.

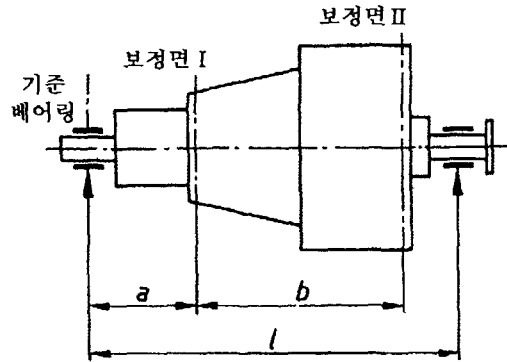


그림 6 - 일반 회전체 계산을 위해 사용할 회전체 제원

6.3.3.2 보정면 간격이 베어링 간격보다 훨씬 작은 회전체에 대한 일반적 방법

이 방법은 두 보정면이 동일한 내다지에 있는 내다지형 회전체에 있어서 특히 유용하다.

이 방법의 근거는, 6.1에 약속된 일반 법칙이 적합하도록 불평형 상태가 운전 베어링면에서 측정 판정되는 것이다. 즉 베어링면에 기준한 잔류불평형의 비가 운전베어링에 대한 허용 동하중과 동일 비율이 되도록 U_{per} 를 베어링면에 배분해야 한다. 만약 운전 베어링에서의 측정이 불가능하다면, 가능한 한 운전 베어링에 근접한 면들을 선정해야 한다.

7. 잔류불평형 결정

잔류불평형의 결정방법에는 1) 평형시험기를 사용하는 방법, 2) 진폭 및 위상 측정 장비를 이용한 결정 방법, 3) 위상지시가 없는 측정장치를 이용한 결정 방법 등이 있으며 자세한 내용은 규격서를 참조하기 바란다.

8. 2면 편형잡기의 허용 잔류불평형 계산 예

터빈 회전체

회전체 질량 : $m = 3600 \text{ kg}$

운전 속도 : $n = 4950 \text{ r/min}$

요구되는 편형 특성 등급 : G2.5

허용 비 불평형, e_{per} :

$$e_{per} = 2.5 \left[\frac{30}{\pi \times 4950} \times 10^3 \right]$$

$$= 4.8 \text{ g} \cdot \text{mm/kg}$$

허용 불평형, U_{per} :

$$U_{per} = m \times e_{per}$$

$$= 3600 \times 4.8$$

$$= 17.3 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

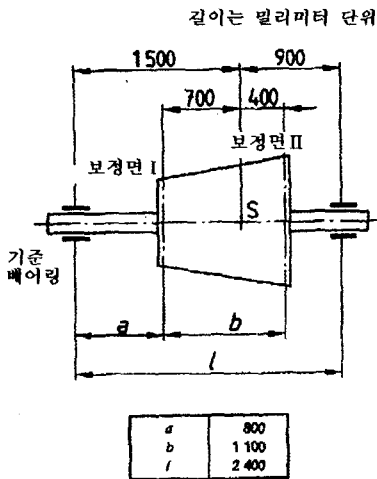


그림 7 - 회전체 채원 (단위는 밀리미터)

식 (3) : $U_{perI} = 7.7 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

식 (4) : $U_{perI} = 18.9 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

를 사용하면,

U_{perI} 의 최소 절대값은 :

$$U_{perI} = 7.7 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

$$U_{perII} = R \times U_{perI} = 1 \times U_{perI} : U_{perII} = 7.7 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

허용 최대 잔류불평형 :

$$U_{perI} + U_{perII} = 15.4 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm} < U_{per}$$

<경우 2 >

(매개변수 k 와 R 에 대한 다른 가정을 사용하여)

$$k = \frac{900}{2400} = 0.38 \left(\frac{\text{기준베어링에의 정하중}}{\text{총 정하중 또는 회전체질량}} \right)$$

$$R = \frac{700}{400} = 1.75 \left(\frac{\text{무게중심으로부터 보정면 I까지 거리}}{\text{무게중심으로부터 보정면 II까지 거리}} \right)$$

따라서

식 (1) : $U_{perI} = 6.3 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

식 (2) : $U_{perI} = 21.8 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

식 (3) : $U_{perI} = 6.3 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

식 (4) : $U_{perI} = -10.2 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

를 사용하면,

U_{perI} 의 최소 절대값은 : $U_{perI} = 6.3 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

$$U_{perII} = R \times U_{perI} = 1.75 \times U_{perI} : U_{perII} = 11 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

허용 최대 잔류불평형 :

$$U_{perI} + U_{perII} = 17.3 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm} < U_{per}$$

참 고 문 헌

<경우 1>

$k = 0.5$ (기준 베어링에서 허용 잔류불평형 비)

$R = 1$ (두개의 보정면 I과 II에서 허용 잔류불평형 비) 따라서

식 (1) : $U_{perI} = 9.9 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

식 (2) : $U_{perI} = 18.9 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{mm}$

[1] ISO 1940-1 "Mechanical vibration - Balance quality requirements of rigid rotors - Part 1 : Determination of permissible residual unbalance" First edition, 1986-09-01