

강성회전체의 평형특성 요구조건 - 평형 오차

Balance quality requirements of rigid rotors - Balance errors(ISO 1940-2)

전 오성*, 최 상규**

Sang-Kyu Choi, Oh Sung Jun

Key Words : Balance quality requirement(평형특성 요구조건), Rigid rotor(강성 회전체), Balance error(평형 오차)

ABSTRACT

This part of ISO 1940 covers the following: a) identification of errors in the balancing process of rigid rotors: b) assessment of errors: c) guidelines for taking into account: d) the evaluation of residual unbalance in two correction planes. Detailed consideration of errors associated with the determination of residual unbalance is covered in the first part of ISO 1940.

1. 서 론

평형 오차는 아래 범주 중 하나로 분류될 수 있다.

- a) 크기와 위상이 계산이나 측정에 의해 구해질 수 있는 계통오차들(systematic errors)
- b) 동일한 조건 하에서 수행되는 여러 번의 측정 중 크기와 위상이 예측할 수 없이 불규칙적으로 변하는 오차들
- c) 최대치는 구해지지만 위상은 불규칙한 스칼라 오차 제조공정에 따라, 동일한 오차도 상기 범주 중의 하나 이상에 속할 수 있다.

2. 오차의 분류

2.1 계통오차(systematic error)

계통오차 원인들의 예를 정리한다.

- a) 평형 시험기(balancing machine) 구동축 상의 고유 불평형
- b) 심축(mandrel)에 있는 고유의 불평형
- c) 회전축에 대한 구동요소 상의 반경방향 및 축방향 런아웃
- d) 부품들을 위한 회전체 접합부 또는 심축에 있는 반

경방향 및 축방향 런아웃

- e) 평형잡기를 위한 지지부 표면과 저어널 사이의 동심도 결여
- f) 실제 운전용 베어링이 아니고 평형 시험기에서 회전체를 지지하는 데 사용하는 구름요소 베어링의 반경방향 및 축방향 런아웃
- g) 평형잡기 후 운전용 구름요소 베어링의 레이스(및 그 트랙)의 반경방향 및 축방향 런아웃
- h) 키 및 키 홈에 의한 불평형
- i) 회전체 및 심축에서의 잔류 자성
- j) 재조립에 의한 오차
- k) 평형잡기 계측장비에 기인한 오차
- l) 운전용 축 지름과 평형시험기 심축 지름 사이의 차이
- m) 유니버설 조인트에서의 결합
- n) 평형잡기 후 회전체의 영구 굽힘

2.2 불규칙적으로 변하는 오차

불규칙적으로 변하는 오차 원인들의 예를 정리한다.

- a) 헐거운 부품
- b) 빠져 들어간 액체 및 고체 이물질
- c) 열효과에 의한 뒤틀림
- d) 편차 효과
- e) 헐거운 커플링을 구동요소로 사용
- f) 회전체가 정지되어 있을 때 중력에 의한 수평회전체의 과도기적인 굽힘

* 전주대학교 기계공학과

** 한국기계연구원

2.3 스칼라 오차

스칼라 오차 원인들의 예를 정리한다.

- a) 평형잡기 공정 후 해제될 접촉면에서의 간극
- b) 유니버설 조인트의 과도한 간극
- c) 심축 또는 축 상의 과도한 간극
- d) 설계 및 제조 공차
- e) 평형시험기 지지 롤러들의 지름과 회전 저널의 지름이 같거나 거의 같거나 또는 정수비를 갖는 경우, 평형시험기 지지 롤러들의 런아웃

3. 오차의 평가

일부 경우의 회전체는 설계가 제대로 되고 재료도 균질하며 제조 후에 평형잡기가 필요하지 않을 정도로 정밀한 공차 내에 들도록 가공된다. 그러나 많은 회전체에서는 초기 불평형이 ISO 1940-1의 허용값을 상회하며, 이들 회전체는 평형잡기를 해야 한다.

3.1 평형잡기 설비 및 계측기에 의한 오차들

평형잡기 설비 및 계측기에 기인한 평형오차들은 불평형 크기를 증가시킬 수 있다. 따라서 대칭적인 회전체를 만들도록 모든 노력을 기울여야 한다. 설계단계에서 불평형의 원인을 고려함으로써, 예를 들어 몇 개의 부품을 하나로 단일화하거나 접합 공차를 감소시켜, 몇 가지 원인들을 일괄하여 제거하거나 줄일 수 있다. 그러나 엄격한 공차에 따르는 비용은 증가한다. 이러한 원인들이 제거되거나 무시할 수 있을 정도로까지 줄여질 수 없을 때, 수학적으로 평가를 해 봐야 한다.

3.2 부품 접합부의 반경방향 및 축방향 런아웃에 기인한 평형 오차들

완벽하게 평형잡기된 회전체 부품이 회전축에 편심되게 부착될 때, 그 결과로 인한 정적 불평형 U_s 는 부품의 질량 m 과 편심거리 e 의 곱과 같다.

$$U_s = m \cdot e \quad \dots(1)$$

부품이 회전체 질량 중심면이 아닌 면에 편심되어 부착이 된다면, 부가적인 불평형 우력이 발생한다. 이 면이 질량 중심으로부터 떨어질수록 불평형 우력은 커지게 된다.

완벽하게 평형된 부품이 그의 관성주축은 회전축에 경사지고 질량 중심은 회전축과 일치하도록 부착되면, 불평형 우력이 발생한다. 두 축 사이의 작은 각 변위 $\Delta\gamma$ 이 있을 때, 이로 인한 불평형 우력 D_c 는 부품의 질량중심을 지나는 횡방향축에 대한 관성모멘트 I_x 과 그의 관성주축에 대한 관성모멘트 I_z 사이의 차에 라디안으로 표시된 각 $\Delta\gamma$ 를 곱한 것

과 같다.

$$D_c \approx (I_x - I_z) \cdot \Delta\gamma \quad \dots(2)$$

이 표현은 부품이 회전 대칭이 될 때에만 성립한다. 식(2)는 따라서 축 상의 디스크 평형잡기에 특히 적용할 수 있다. 부품의 반경방향 및 축방향 런아웃이 발생한다면, 각각의 오차를 베어링이나 보정면에 배분된 값으로 별도로 계산한 다음 벡터적으로 합성할 수 있다. (ISO 1940-1:1986 그림 1 참조)

3.3 평형잡기 작업에서의 오차의 평가

평형잡기의 목적은 잔류불평형이 한계 범위 내에 존재하도록 회전체를 만드는 것이다. 오차가 그 한계 범위에 도달했는지 확인하기 위하여, 잔류불평형 측정을 통해서 확인된다.

평형시험기를 사용할 때, 오차를 유발하는 여러 가지 원인들이 존재한다. 즉 평형잡기 대상의 회전체 형태, 회전체를 지지하거나 구동하는 데 사용되는 모든 도구, 평형시험기 지지구조물(기계베어링, 받침틀 등), 평형시험기 감지 시스템, 전자부품 및 표시 시스템 등이 이에 속한다. 이러한 원인들의 일부 또는 전부가 오차들을 유발할 수 있다. 대부분의 오차들의 특성을 구별하여 인지함으로써, 그들의 원인에 초점을 맞추어 수정하거나 최소화하거나 그들의 효과를 계산함으로써 잔류불평형을 평가하는 데 고려할 수 있다.

사용되는 평형시험기는 ISO 2953을 만족하여야 한다. 그래야 계통오차가 제거되거나 수정되고, 불규칙적으로 변하는 오차들이 ISO 2953에 정의한 U_{mar} 제한 값에 들게 된다.

측정평가가 평형시험기에서 수행될 때, 회전체 질량이나 측정면 위치들이 평형시험기 시험에서 사용되는 검증용 회전체의 그것들과 판이하게 다르면, 제품의 특정한 측정위치에서의 최소 가능 잔류불평형을 결정하기 위하여 실제 제품을 가지고 많은 실험을 수행해야 한다.

3.4 불규칙적으로 변하는 오차들의 실험적 평가

심하게 불규칙적으로 변하는 오차들이 의심스러우면 이들 오차의 크기를 평가하기 위한 수 차례의 측정 운전을 수행할 필요가 있다. 그렇게 해서 불규칙적인 오차들이 운전 때마다 불규칙적으로 생성된다는 것을 확인하는 것이 중요하다. (예를 들어 회전체 회전방위 위치가 각각의 운전 시작 때마다 다르다는 것을 확인함으로써) 측정 데이터에 기본적인 통계방법을 적용하면 오차 크기는 구할 수 있다. 그러나 대부분의 경우 아래의 근사적 절차를 사용하면 충분하다.

측정된 잔류불평형 벡터들을 도시하고 이 결과들로부터 평균 벡터 \overline{OA} 를 구한다.(그림 1 참조) 중심 A를 기준으로 모든 점을 포함하는 최소의 원을 그린다. 벡터 \overline{OA} 는 잔류불평형 평가치를 나타내고 원의 반지름은 각각의 데이터 채취 시 발생할 수 있는 최대 가능 오차를 나타낸다. 이

들 결과의 불확실성은 통상적으로 시험의 횟수를 증가시키므로써 감소시킬 수 있다. 한 점이 다른 점들로부터 확연히 떨어져 있는 특별한 경우에, 평가된 오차가 용납하기 어려울 만큼 클 수 있다. 이 경우 오차를 결정하기 위한 보다 상세한 분석이 필요할 것이다.

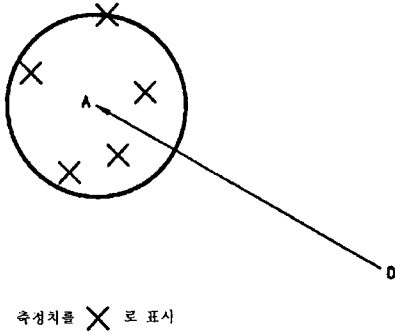


그림 1 - 측정된 잔류불평형 벡터의 그림(불규칙적으로 변하는 오차들)

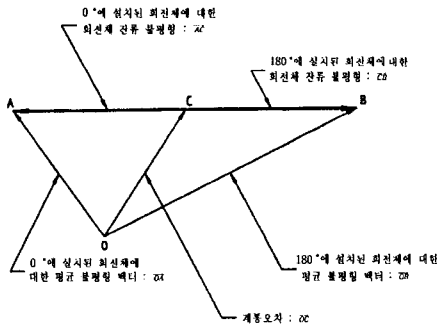


그림 2 - 측정된 잔류불평형 벡터와 계통오차의 그림

3.5 계통오차의 실험적 평가

많은 경우, 계통오차의 대부분은 지표 평형잡기(index balancing)를 사용하여 찾을 수 있다. 이는 다음의 절차를 따른다. 회전체를 특정한 오차의 원인이 되는 사항에 대해서 0°와 180° 위치에 번갈아 설치한다. 양 위치에서 불평형을 여러 차례 측정한다. 그림 2의 \overline{OA} 와 \overline{OB} 가 각각 0°와 180°에 설치된 회전체에 대한 평균 불평형 벡터들을 나타낸다면, C가 길이 AB의 중앙에 오도록 각각의 측정 면에 대하여 그림을 구성할 수 있다. 벡터 \overline{OC} 는 특정 계통오차가 되고 벡터 \overline{OA} 와 \overline{OB} 는 각각 0°와 180°에 설치된 회전체를 가지고 구한 회전체 잔류불평형을 나타낸다. 이 경우, 회전체는 위상 기준에 대하여 회전된다고 가정되어 진

다. 그러나 위상 기준이 회전체에 대하여 고정되어 유지된다면, 벡터 \overline{OC} 는 회전체 잔류불평형을 나타내며, 벡터 \overline{OA} 와 \overline{OB} 는 각각 0°와 180°에 위상 기준을 갖는 특정한 계통오차를 각각 나타낸다.

4. 결합된 오차의 평가

크기와 위상이 알려진 계통오차들은 제거가 가능하다. 예를 들어 평형잡기 공정 중에 회전체에 일시적인 보정질량을 가하거나 정확하게 결과를 보정함으로써 제거가 가능하다. 이러한 방법으로도 계통오차들이 보정되지 않거나 보정 불가능하면, 아래와 같이 불규칙적으로 변하는 오차 및 스칼라 오차들과 결합된 것이다.

$|\Delta \vec{U}_i|$ 를 충분한 신뢰성범위 내에서 완벽하게 평가된 어떤 원인으로 인한 비보정 오차의 크기라고 하고, ΔU 를 결합된 비보정 오차의 크기라고 하자. 그러면 아래의 식은 가장 안전한 오차들의 값을 제공하는 식이 된다.

$$\Delta U = \sum |\Delta \vec{U}_i| \quad \dots(3)$$

다음 절의 수용기준에 적합하게 되면, 이는 가장 바람직하지 않은 오차 혼합의 경우조차에서도 회전체가 조건에 부합된다는 것이 보장된다.

공식 $\Delta U = \sum |\Delta \vec{U}_i|$ 는, 모든 비보정 오차들이 동일한 위상방향을 가지며 따라서 그들의 절대값들이 대수적으로 합해지는 가장 부적절한 가정에 기초한 것이다. 이 공식을 적용하였을 때 이 기준에 벗어나면, 중요 오차들을 줄이기 위한 시도를 하도록 해야 한다.

일부 경우 보다 더 실제적인 접근이 사용될 수도 있다. 즉, 여러 가지 원인들로 인한 모든 오차가 다 동일한 위상방향으로 떨어지는 것은 아니라는 점을 고려하면, 결합된 오차 ΔU 는 "제공합의 제공근" 공식을 사용하여 평가할 수 있다. 즉

$$\Delta U = \sqrt{\sum |\Delta \vec{U}_i|^2} \quad \dots(4)$$

이 과정을 각각의 측정면에 대해서 수행한다.

회전체들은 적절한 조건하에서 회전체 주요 샘플 측정에 의해 오차들이 평가된다. 동일한 방법으로 제조되고 조립된 유사한 회전체에는 동일 크기의 오차들이 존재할 것이라는 가정이 주어진다.

사용자와 공급자 사이에는, 대량 생산되는 회전체에 대하여 종합적인 오차를 찾기 위한 통계에 바탕을 둔 절차를 합의할 필요가 있다.

5. 수용 기준

각각의 측정면에 대해,

U_{per} : ISO1940-1에서 구한 허용 잔류불평형의 크기

U_{rm} : 크기와 위상이 알려진 계통오차 제거를 위해 수

행된 보정 후에 1회 계측된 잔류불평형의 크기

ΔU : 앞 절에서 정의된 결합 오차의 크기라고 하자.

아래의 조건이 만족되면, 회전체 평형은 제작자에 의해 수용 가능한 것으로 여겨져야 한다.

$$U_{rm} \leq U_{per} - \Delta U \quad \dots(5)$$

만약 ΔU 이 U_{per} 의 5%보다 작다면, 무시될 수 있다.

추가적인 평형 점검이 사용자에게 의해 수행된다면, 아래 조건이 만족될 때 회전체 평형은 수용되어야 할 것이다.

$$U_{rm} \leq U_{per} + \Delta U \quad \dots(6)$$

이 조건이 안 맞으면, 평형잡기 절차를 재고하거나 반복하여야 할 것이다. 회전체 운송 도중 불평형의 변화가 예상된다면, 이는 고려되어야 한다.

6. 잔류불평형의 결정

ISO 1940-1:1986의 8은 강성회전체의 잔류불평형 결정을 위한 방법들이다. 가장 중요한 방법들은 아래와 같다.

a) 8.1에서 설명된 방법: 이는 ISO 2953에 따라 평형시험기를 필요로 한다.

b) 8.2에서 설명된 방법: 이는 크기와 위상을 읽는 장비를 필요로 한다. 양면 평형잡기가 요구되는 경우, 면 배분을 위한 추가 절차가 필요하다. 예를 들어 영향계수법을 위한 알고리즘과 컴퓨터이다.

대부분의 실제 경우 위에서 든 두 가지 방법으로 충분하다. 그러나 절차에 대한 의구심이 있다면, 알고 있는 시행질량을 두 면의 서로 다른 위상위치에 사용함으로써 개선된 정확도를 얻을 수 있다. 이를 위한 가능한 방법은 많다. 두 개의 면에 적용하는 ISO 1940-1의 8.3에 언급된 방법이 한 방법이다. 불평형 응답의 선형성에 대한 관심이 있다면, 다른 크기의 시행질량을 사용하는 절차를 반복해야 한다.

7. 오차와 그의 규명 및 평가의 예

7.1 보조장비로부터 원인이 된 오차들

잔류불평형과 관계되며 보조장비로부터 원인이 된 오차들의 예를 보면 다음과 같다.

(1) 구동요소와 심축 등에서의 고유의 불평형과 편심으로 부터 원인이 된 오차들

이들 오차는 지표 평형잡기에 의해 평가될 수 있다. 기계적 접합의 비반복성((3) 참조)과 작업물에 기인한 오차(7.2 참조)에 의해 이 절차가 복잡하게 될 수 있다.

(2) 베어링으로부터 기인한 오차들

구름요소 베어링이 평형잡기 작업을 위해 적용된다면, 회전 레이스 (및 트랙)의 편심도 또는 각정렬불량과 회전체 질량에 비례하는 오차를 만들어 낼 것이다.

(3) 기계적 접합으로부터 기인한 오차들

기계적 결합은 오차의 잠재 원인일 수 있다. 예를 들면 재조립의 결과로 불평형의 변화가 생길 수 있다. 결합으로부터 오차가 발생할 수 있는 원인은 많다. 예를 들어, 반경방향 간극, 과도한 간섭, 또는 연결볼트의 간섭과 같은 것들이다. 접합의 비반복성에 기인한 편차는, 간극 각도를 바뀌게 하며 반복적인 재조립에 의해 결정되어야 한다. 매번 불평형을 읽어 이들의 평균값을 구한다.

(4) 평형잡기 장비의 질량과 관련한 오차들

접속부에서의 간극이나 런아웃으로부터 기인한 오차를 줄이기 위해 평형잡기를 위한 회전도구(반드시 심축일 필요는 없음)의 질량을 최소로 줄여야 한다.

심축 질량의 감소는 연성베어링 시험기에서는 감도를 높여주지만, 강성베어링 시험기에서는 일반적으로 장점이 별로 없다.

7.2 작업물로부터 기인한 오차들

잔류불평형과 관계되며 작업물로부터 기인한 오차들의 예를 들면 아래와 같다.

(1) 헐거운 부품에 의한 오차들

헐거운 부품에 의한 오차는, 회전체를 기동 및 정지하면서, 회전체의 방위위치가 매 운전 시 다르다는 것을 확인하며 매 운전 시 데이터를 읽음으로써 구할 수 있다. 오차와 평균 불평형은 3.4에 설명한 방법으로 구해질 수 있다. 회전 방향을 바꾸는 것이 어떤 경우엔 도움이 될 수 있지만, 주의를 기울여야 한다. 어떤 기계에서는 헐거운 부품이 실제의 운전 조건하에서만 명확해질 수 있다는 것을 주목해야 한다.

(2) 빠져 들어간 액체 이물질이나 헐거운 조각의 존재에 기인한 오차들

빠져 들어간 액체 이물질이나 헐거운 조각이 의심되어 피할 수 없을 때, 회전체의 0° 위치를 위로 한 후 회전을 시키면서 회전 시마다 측정한다. 회전체의 90°, 180°, 270° 위치도 차례로 위로 한 후 이를 반복한다. 그리고 3.4의 방법이 오차와 평균 불평형을 구하기 위해 적용될 수 있다.

(3) 열 효과로부터 기인된 오차들

불균일한 온도에 의한 뒤틀림과 그로 인한 불평형은 기다량거나 관의 형상을 갖는 회전체에서 특히 눈에 띈다. 이러한 오차는 회전체를 잠시도 평형시험기 내에 정지시켜 방지하지 않거나 불평형 벡터가 안정될 때까지 회전체를 작동시킴으로써 감소될 수 있다. 회전속도는 매우 낮은 속도, 예를 들어 5rpm에서 10rpm 사이에서 이루어진다.

불평형 보정을 위한 용접이나 열을 발생시키는 가공 작업은 심각한 회전체 변형을 일으킬 수 있다. 국부 열의 분산 및 또는 안정화시키는 운전 기간이 회전체 내의 온도 균등화와 회전체의 원형 복원에 일반적으로 요구된다.

(4) 베어링에 기인한 오차

평형잡기하는 동안 회전하는 베어링의 레이스들은 회전체와의 적절한 각도 관계를 유지해야 한다. 그렇지 않으면, 7.1(2)에 기술된 것과 유사한 오차들이 발생할 수 있다. 연성 및 강성 베어링 평형시험기에서 잘못된 유히 불평형이 나타나는 것은 회전하는 트러스트 면의 축방향 런아웃이나, 회전축에 대하여 기울어진 볼베어링, 또는 굽어진 회전체로부터 기인할 수 있다. 이러한 효과들을 증명할 수 있는데, 회전체를 아래와 같이 다른 속도들 n_1 과 n_2 로 작동시켜 오차를 평가할 수 있다.

a) 강성베어링 평형시험기에 있어서, 축방향 런아웃 효과는 속도 n_1 에서 ΔU_{1L} 과 ΔU_{1R} 와 같은 불평형 단위로 구해질 수 있다.

$$\Delta U_{1L} = \frac{1}{1 - (n_1/n_2)^2} (\overline{U}_{1L} - \overline{U}_{2L}) \quad \dots(7)$$

$$\Delta U_{1R} = \frac{1}{1 - (n_1/n_2)^2} (\overline{U}_{1R} - \overline{U}_{2R}) \quad \dots(8)$$

여기서 \overline{U}_{1L} , \overline{U}_{1R} , \overline{U}_{2L} , \overline{U}_{2R} 은 n_1 과 n_2 속도에서 좌우 면에서의 축방향 런아웃의 불평형-모사 효과와 (잔류)불평형 \overline{U}_L , \overline{U}_R 의 합에 의해 나타나는 값들이다.

시험기는 이들 속도와 면에서 동일 불평형 단위들로 교정하여야 한다.

b) 연성베어링 평형시험기에 있어서, 불평형-모사 효과는 연성베어링 시험기 현가계에서의 진동 매질에 의존하며, 속도 제곱에 역비례한다. 따라서 동일한 공식이 된다.

이들 계산에서, 회전 트러스트 면의 축방향 런아웃 때문에 강성베어링 시험기의 베어링에 가해지는 힘은 속도에 무관하며, 반면에 연성베어링 시험기에서 불평형에 기인한 베어링 진동이 속도에 무관하다.

위 공식은 축정이 회전체 및 또는 평형시험기의 공진속도로부터 멀리 떨어진 속도에서 이루어졌을 때에만 해당한다.

유사한 효과가 매우 저속의 평형작업 속도에서 관측될 수 있는데, 굽은 회전체 저널이 개방형 롤러 위에 설치되어 있을 때나, 평평한 롤러 표면을 가진 평형시험기의 지지대가 수직방향 자유도를 잃었을 때이다. 이러한 오차는 평형시험기 지지구조물의 적절한 설계에 의해 최소화할 수 있다. 어떤 경우, 트러스트 면의 축방향 런아웃에 기인한 오차는 트러스트 베어링의 조정을 통해 피해될 수 있다.

(5) 기계적인 접합부에 기인한 오차들

접합부의 설계나 부적절한 조립 때문에 작동 중에 불평형이 변할 수 있다. 평형잡기나 제조립 후 회전체가 일부 잘못 조립되면 역시 변할 수 있다.(7.1(3) 참조)

(6) 끝단-구동 설치 표면의 런아웃에 기인한 오차들

평형시험기 끝단-구동 축이 회전체 끝에 편심되어 연결된 경우, 지표 평형잡기에 의해 감지될 수 없는 오차가 출현할 수 있다. 이는 유효질량과 회전축좌표에 대한 상대적인 편심 벡터를 알 때에만 계산될 수 있다. 필요하다면, 임시적인 보상이 평형잡기 작업 중 적절한 각도로 적용될 수 있다.

(7) 자기 효과(magnetic effects)에 기인한 오차들

자기 효과는 해당 주파수가 회전속도 부근에 있을 때 불평형 판독에 오류를 일으켜서 평형시험기에서의 존재여부를 보여준다. 예를 들면, 이는 회전주파수에서 평형시험기 픽업을 가로지르는 회전체의 자장에 기인한 때문일 것이다. 자화가 된 회전체의 영향은 픽업을 차폐하든지, 강성베어링 평형시험기라면 그 영향이 심하지 않을 충분히 높은 평형작업 속도를 선정함으로써 가장 잘 제거될 수 있다. 자기 영향의 존재는, 회전체가 강성인 영역의 서로 다른 회전 속도에서 불평형을 읽어서 발견해 낼 수 있다.

참고문헌

1. ISO 2953: 1985, Balancing machines - Description and evaluation.
2. ISO 1940-1:1986, Mechanical vibration - Balance quality requirements of rigid rotors - Part 1: Determination of permissible residual unbalance.
3. ISO 1940-2:1997(E), Mechanical vibration- Balance quality requirements of rigid rotors-part 2: Balance errors