

로터-베어링 시스템의 잔류불평형량을 결정하는 방법에 대한 연구

이형우[#], 이동환^{*}, 박노길^{**}, 김인환^{***}

A Study about Way to Decide on Residual Unbalance of Rotor-Bearing system

Hyoung Woo Lee [#], Dong Han Lee ^{*}, No Gill Park^{**} and In Hwan Kim^{***}

ABSTRACT

A new method to measure residual unbalance of rotor - bearing system was proposed. The method which determine residual unbalance based on polar plot and an analytical method which calculates the residual unbalance of the rotor from the vibration response of the Jeffcott rotor are proposed in this study with respect to a real rotor system of which the residual unbalance is unknown. The unbalance eccentricity of the produced experimental model is 3.78 mil, developing the measurement method of the residual unbalance more convenient than the proposed method of ISO and API standard. The proposed method was experimentally compared with the ISO standard, and the two methods were exactly correspondent to each other within an error of 1%.

Key Words: Residual unbalance (잔류 불평형량), Vibration (진동), Jeffcott Rotor (제프코트 로터)

1. 서론

가스터빈, 터보 공기 압축기, 고압 터빈 펌프 등 산업용 플랜트에 사용되는 회전기계는 단위 기계의 사소한 고장에 의해서 전 계통의 운동 정지를 초래하며, 이로 인하여 막대한 생산량 차질과 경제적 손실을 입히는 경우가 빈번하다. 이러한 회전기계는 현장요원이나 회전기계 자체 안전때문에, 시스템의 위험속도까지 운전속도를 상승시키는 것이 거의 불가능하며, 시스템의 불평형 편심량을 간편히 측정 또는 분석 할 수 있는 방법이

아직 개발되지 않은 것이 현재의 실정이다.

불평형 강제진동 응답의 중요한 파라미터인 로터의 잔류 불평형 편심량을 정량적으로 규명하는 연구는 Modal Testing이 주류를 이루는 로터동역학 분야에서는 시스템 매개변수로 다루어지지 않고 있으며¹ ISO 및 API Standard등에서 밸런싱의 한 분야로 언급되고 있을 따름이다.²⁻⁸ ISO1940/1에 의하면 밸런싱머신을 사용하지 않는 경우의 잔류 불평형을 결정하는 방법으로 (1) 로터의 진동변위 및 위상각을 측정할 수 있는 경우와 (2) 진동변위

접수일: 2004년 3월8일; 게재승인일: 2004년6월11일

교신저자: 부산대학교 기계기술 연구소

E-mail : rotor@dreamwiz.com Tel:(051) 510-2325

* 한국기계연구원 구조연구부 회전체그룹

** 부산대학교 기계공학부

*** 진주산업대학교 기계공학과

만을 측정할 수 있는 경우를 구별하여 방법을 제시하고 있다. 이 방법의 수행상 필요한 조건은 피(被)밸런싱 물체의 허용 잔류불평형량에 대한 정보를 요구하고 있다. 또한 이들 규정은 주로 로터의 밸런싱을 마친 후 잔류 불평형량을 조사 탐지하는데 적용함을 암시하고 있으며, 상기 (1)항의 경우 자세한 단계적 방법은 기술되어 있지 않고 다만 허용잔류 불평형량의 5배에 해당하는 시도질량을 부착하여 이에 대한 응답을 측정한 후 영향계수법으로 불평형량을 찾아낸다. 따라서 좀더 명확하고 자세한 단계적 방법과 그 배후에 포함되어 있는 이론적인 부분까지 함께 계통적으로 정리하고 불평형 편심량을 계산할 수 있는 효과적인 방법의 고안이 필요하다.

본 연구에서는 잔류 불평형량이 알려지지 않은 실제 로터계에 대해, 잔류불평형량 계산이 가능한 도식법과 Jeffcott Rotor의 진동응답 식으로부터 로터의 잔류불평형량과 불평형 편심량을 계산하는 해석적 기법을 제안하였다. 또, 제안한 방법을 ISO Standard²와 실험적으로 비교하였다.

2. 잔류 불평형량 결정방법 고찰

2.1 ISO에 의한 잔류 불평형량의 결정

2.1.1 진폭과 위상정보에 의한 잔류 불평형량

로터의 진동변위 및 위상각 측정이 가능한 경우에는 그 해당 로터의 허용 잔류 불평형량의 약 5배 정도 되는 시도질량(Trial mass)을 밸런싱 면에 부착한 후, 로터의 응답을 측정하여, 이들 결과로부터 영향계수법이나 이에 상응하는 방법을 이용하여 잔류 불평형량을 결정한다. 여기에서 ISO Standard 1941/1-1986이 언급하고 있는 "허용 잔류 불평형량"이란 로터의 Balancing Grade에 의해서 정해지는 로터의 허용 불평형 편심량과 그 로터의 유효질량을 서로 곱한 값을 의미한다. 위에서 언급된 "영향계수법에 의한 수행절차"를 간단히 요약하면 다음과 같다.

- i) 시도 불평형량을 허용 불평형량의 5배 정도로 정한다.
- ii) 시도 불평형량을 보정면에 부착한다.
- iii) 측정면에서 진동변위 및 위상각을 측정한다.
- iv) 영향계수법에 의해서 잔류 불평형량을 결정한다. 즉, 단면 밸런싱의 경우 측정값을 Z라고

하면,

$$Z = \alpha \times U \quad (1)$$

여기서, α 는 영향계수이며 U는 불평형량이다. 시도 불평형량을 부착하기 전의 "As-is" 상태에서 측정된 진동값을 Z_0 라고 하면, Z_0 은

$$Z_0 = \alpha \times U_R \quad (2)$$

이다. 여기서 U_R 은 잔류 불평형량을 의미한다. 시도 불평형량 T를 부착했을 때의 진동 측정값을 Z_1 이라하면, Z_1 은 아래의 식(3)으로 표시된다.

$$Z_1 = \alpha(U_R + T) \quad (3)$$

따라서 식(2) 및 식(3)으로부터 α 는 아래의 식(4)과 같이 된다.

$$\alpha = (Z_1 - Z_0) / T \quad (4)$$

그러므로 잔류 불평형량 U_R 을 결정하는 식은 다음과 같이 된다.

$$U_R = \frac{Z_0 T}{(Z_1 - Z_0)} \quad (5)$$

2.1.2 진폭정보에 의한 잔류 불평형량의 결정

로터의 진동변위만 측정이 가능한 경우는 주로 밸런싱을 행한 후 잔류 불평형량을 점검하는 차원에서 시도되는 방법으로서 각기 다른 밸런싱 원주면에 랜덤하게 3점 이상의 위치에 각각 예상되는 잔류 불평형량의 5배 내지 10배에 해당하는 시도질량을 부착한다. 만일 유연한 곡선의 측정 결과를 원한다면 밸런싱 보정면 상에서 등간격의 원주면을 8등분 내지 12등분하여 시도질량을 순차적으로 여러 번 부착하여 측정하기를 권장하고 있다. 측정된 응답은 밸런싱 면의 시도질량 부착각도에 따라 아래의 Fig. 1과 같이 진동응답을 도식화하면 식(6)과 같이 잔류 불평형량이 구해진다.

$$U_R = \frac{V_r}{V_e} U_T \quad (6)$$

여기서, V_r 은 잔류 불평형량에 의한 진동량이며 V_e 는 시도질량에 의한 진동량이다. 또한 U_R 은 잔류 불평형량이며 U_T 는 시도 불평형량이다. 이 방법을 사용하여 측정점을 연결하였을 때 정현파 곡선이 나오지 않는다면 로터에 존재하는 잔류 불평형량이 제한치 이하거나, 시도질량이 너무 작거나, 또는 측정장비의 감도가 충분치 못한 경우라고 ISO 1940/1-1986에는 기술되고 있다.

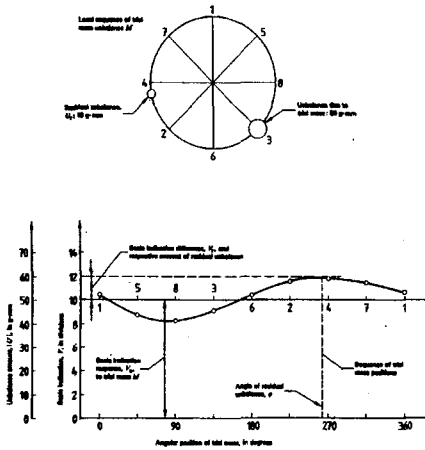


Figure 1 - Test procedure for determining the residual unbalance by ISO procedure

Fig. 1 Test for determining the residual unbalance by ISO procedure

2.2 API에 의한 잔류 불평형량의 결정

2.2.1 진폭정보에 의한 잔류 불평형량의 결정

API 610이 정하는 잔류 불평형량 결정 방법은 ISO에서의 진폭정보만으로 잔류 불평형량을 결정하는 방법과 거의 동일하며 로터를 밸런싱한 후 밸런싱 장치에서 내리기 전에 잔류 불평형량을 점검하는데 사용된다. 본 규격에서는 로터의 밸런싱면 원주에 등간격의 6점 또는 12점에 시도 질량을 부착하여 각 부착점 마다의 응답을 측정하게 되어있다. 이때 시도질량은 최대허용질량의 1배와 2배 사이의 질량으로 선택하도록 규정하고 있다. 실험의 시작점은 최종적으로 알려진 Heavy spot으로 하여 원주방향으로 60° 또는 30°씩 등간격으로 진동진폭

을 측정하게 된다. 이후의 방법은 ISO에서의 진폭 정보만으로 잔류 불평형량을 결정하는 방법과 동일하나 Polar 선도상에서 측정점들을 찍고 그 점들이 이루는 원호를 그려서 허용 잔류불평형량에 대한 실제 잔류불평형량을 구한다는 점이 다르다.

2.3 잔류 불평형량 직접 측정법 개발

ISO 및 API에 의한 잔류 불평형량 직접 측정 방법은 Balancing Machine상에서 로터가 밸런싱 된 후에 남아있는 잔류 불평형량을 조사하여 밸런싱 정밀도를 검증하는데 주로 사용되고 있다. 본 절에서는 시도질량을 순차적으로 시도하면서 측정된 진동량의 진폭뿐만 아니라 위상을 고려하여 Polar 선도에서 직접 산출하는 새로운 방법을 제안한다. 또한 측정시스템의 Receptance값을 모르는 상태에서 진동량의 측정 데이터로부터 잔류 불평형 편심량을 산출할 수 있는 수식을 Jeffcott Rotor의 응답관계식을 근거로 하여 제안한다. 따라서 로터가 밸런싱 되기 전의 잔류 불평형량을 계산하여 로터의 불평형 편심량을 구하는데 이용하기 위해서는 로터의 진동량을 모니터링 하면서 임의의 질량을 자유롭게 부착할 수 있도록 하기 위해서 기존의 ISO 및 API에 의한 방법보다 좀더 변형된, Balancing Machine과는 전혀 상관없이, 즉, Balancing Machine위에 올려 놓지않고서도 행할 수 있는, 새롭고도 일반적인 잔류 불평형량 계산 기법을 고안해낼 필요가 절실했다. 아래에서 보여지는 두 가지의 방법 즉 도식적 방법과 해석적 방법은 문제접근 방식에서 차이가 있으나 완전히 같은 결과를 보여주며 ISO 및 API에 의한 방법과 유사하나 표현방식이 다르며 시도 질량의 크기에 대한 제약을 받지 않을 뿐 아니라 앞에서 언급 한 바와 같이 Balancing Machine과는 전혀 상관없이, 즉, Balancing Machine위에 올려놓지 않고서도 산업 현장에서 행할 수 있는, 새롭고도 일반적인 기법이라고 사료된다.

2.3.1 Polar 선도에 의한 잔류 불평형량의 결정 방법 개발

2.3.1.1 진폭정보만에 의한 잔류 불평형량의 산출

이 방법은 ISO의 진폭정보만에 의한 방법과 거의 같으나 표현 방법이 ISO에 의한 방법인 Fig.1과는 달리 Polar 선도로 택하고 측정점의 개수는 측정

점을 Circle Fitting할 수 있을 정도로 충분한 한도 내에서 임의로 정하면 된다. Fig. 2에서는 밸런싱면의 등반경 원주상에 30°등간격으로 측정점을 정하고 시도질량을 각 각도마다 순차적으로 부착하여 특정 회전속도로 로터를 회전시킬 때, 시도질량의 부착각도와 측정한 진동진폭을 Polar 선도에 표시한 것이다.

Fig. 2에서 원의 반경 R은 ISO방법에서의 잔류 불평형량에 의한 진동진폭(V_r)에 해당하고, 선분 OC는 시도 불평형량에 의한 진동진폭(V_e)에 해당한다. 따라서 시도 불평형량을 U_T 라 하면, ISO방법에서의 식 (6)을 이용하여 잔류 불평형량 U_R 은

$$U_R = U_T \frac{R}{OC} \quad (7)$$

이다.

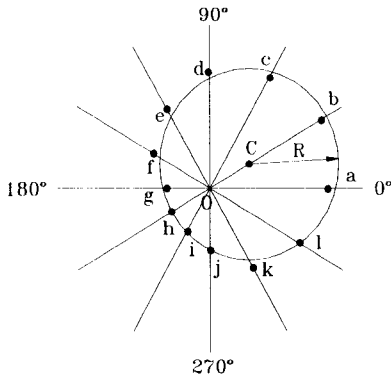


Fig. 2 Sample plot for calculations of residual unbalance using vibration amplitudes only.

2.3.1.2 진폭 및 위상정보에 의한 잔류 불평형량의 산출

Fig. 3은 밸런싱면의 등반경 원주상에 60°등간격으로 측정점을 정하고 시도질량을 각 각도마다 순차적으로 부착하여 특정 회전속도로 로터를 회전시킬 때, 그 각도에서 측정한 진동진폭과 위상각을 Polar 선도에 표시하고 최소자승법에 의하여 원을 그린 것이다. 원의 반경 R은 시도 불평형량에 의한 진동진폭, 선분OC는 잔류 불평형량에 의한 진동

진폭, 그리고 R_{max} 및 R_{min} 는 최대진폭 및 최소진폭을 나타낸다.

결국 잔류 불평형량 U_R 은

$$U_R = U_T \frac{OC}{R} \quad (8)$$

이고, 선분 OC 및 원의 반경을 R_{max} 및 R_{min} 로 표현하면

$$OC = \frac{R_{max} + R_{min}}{2}$$

$$R = \frac{R_{max} - R_{min}}{2} \quad (9)$$

이다. 식(9)를 식(8)에 대입하면, 잔류 불평형량 U_R 은

$$U_R = U_T \frac{R_{max} + R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (10)$$

이다. 잔류 불평형량 및 시도 불평형량은

$$U_T = m_t e$$

$$U_R = M \epsilon \quad (11)$$

여기서,

M 은 디스크의 질량

m_t 는 시도질량

e 는 시도질량의 부착반경

ϵ 은 불평형 편심량

이다. 식(11)을 식(10)에 대입하면, 불평형 편심량 ϵ 는

$$\epsilon = \frac{m_t e}{M} \left(\frac{R_{max} + R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \right) \quad (12)$$

이다.

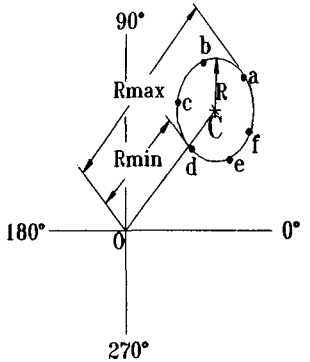


Fig. 3 Sample plot of calculations of residual unbalance when both vibration amplitudes and phase angles are available

2.3.2 불평형 편심량 결정을 위한 이론식

시도질량 m_t 를 부착하였을 때, 그 위치가 디스크의 기하학적 중심과 무게중심을 연결하는 직선상에 위치하며 이들과 서로 동위상에 있다면 진동 응답 변위의 크기는 최대(R_{max})로 되고, 이때 새로운 진동 불평형량은

$$U = M\epsilon + m_t e \quad (13)$$

로 표현된다. 여기서 e 는 시도질량 m_t 의 부착 반경이다. 여기서, U 란 원래의 디스크 질량에 새로운 시도질량을 더한 것으로

$$U = (M + m_t) \epsilon' \quad (14)$$

이다. 새로운 불평형 편심량은

$$\epsilon' = \frac{M\epsilon + m_t e}{M + m_t} \quad (15)$$

이다. $M + m_t \cong M$ 이므로, 위 식의 ϵ' 을 다시 쓰면

$$\epsilon' = \epsilon + \frac{m_t e}{M} \quad (16)$$

이다. 불평형 진동 응답 R_{max} 은 Jeffcott Rotor 응답 식으로부터 다음과 같이 구해진다.⁹⁻¹⁰

$$\begin{aligned} R_{max} &= \frac{\epsilon' \omega^2}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_c\omega)^2}} \\ &= \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_c\omega)^2}} \left(\epsilon + \frac{m_t e}{M} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

시도질량 m_t 를 부착하였을 때, 그 위치가 디스크의 기하학적 중심과 무게중심을 연결하는 직선상에 위치하며 이들과 서로 역위상에 있다면 진동 응답 변위의 크기는 최소(R_{min})로 되고, 이때 새로운 불평형량은

$$U = M\epsilon - m_t e \quad (18)$$

이다. 여기서 e 는 시도질량 m_t 의 부착반경이다. U 은 원래의 디스크 질량에 새로운 시도질량을 더한 것에 대한 총 불평형량이므로

$$U = (M + m_t) \epsilon \quad (19)$$

이다. 새로운 불평형 편심량은

$$\epsilon' = \frac{M\epsilon - m_t e}{M + m_t} \quad (20)$$

이다. $M + m_t \cong M$ 이므로, ϵ' 을 다시 쓰면

$$\epsilon' = \epsilon - \frac{m_t e}{M} \quad (21)$$

이다. 불평형 진동 응답 R_{min} 은 Jeffcott Rotor 응답 식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} R_{min} &= \frac{\epsilon' \omega^2}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_c\omega)^2}} \\ &= \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_c\omega)^2}} \left(\epsilon - \frac{m_t e}{M} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

식(17) 및 식(22)으로부터 불평형 편심량 ε 는

$$\varepsilon = \frac{m_f e}{M} \left(\frac{R_{\max} + R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right) \quad (23)$$

이다. 위의 식(23)은 식(12)와 동일하다. 즉, 불평형 편심량 ε 는 도식법 및 이론식으로 구한 결과가 서로 동일하다는 것을 보여준다.

3. 잔류 불평형 편심량의 실험 검증

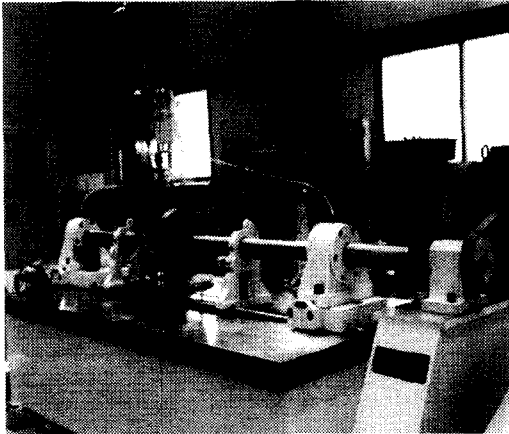


Fig. 4 An overview of rotor dynamics test facility

로터 베어링계의 매개변수 규명을 위한 실험을 위하여 Fig. 4와 같은 정밀 실험장치를 설계, 제작하였다. 실험의 재연성을 높이기 위하여 로터 베어링이 장치되는 Steel Bed는 상부면은 $0.005 \mu\text{m}$ 의 수평도를 유지하도록 연삭하였다. 정밀 가공된 Test Bed는 충분히 무거운 84", 48", 25"의 콘크리트 베이스위에 설치되었으며 그 Test Bed 위 및 위상각을 측정할 수 있는 경우와 (2) 진동변위만을 측정할 수 있는 경우를 구별하여 방법을 제시하고 있다. 이 방법의 수행상 필요한 조건은 피(被) 밸런싱 물체의 허용 잔류불평형량에 대한 정에 한가운데 한장의 디스크가 달린 Jeffcott Rotor축이 설치되었다. 축 중앙에 디스크가 있는 위치의 축에 수평 및 수직방향으로 비접촉식 변위센서를 설치하여 변위를 측정하고, 모터 반대축 축의 끝단에 10V 출력의 광센서를 설치하여 위상을 측정하였다.

3.1 도식법

본 실험로터의 Runout보정은 원심력의 영향이 거의 없고 정적 불평형신호가 약 0.2 mil 정도로 안정되게 출력되는 것으로 확인된 영역인 98RPM에서 신호를 채취하여 이루어졌으며 그 레벨 및 위상각은 다음과 같다.

X-Probe: 3.97 mil $\angle 223^\circ$

Y-Probe: 3.52 mil $\angle 137^\circ$

불평형 편심량을 실험적인 방법으로 검증하기 위하여 먼저 시도질량을 부착하지 않은 채 ("As-is") 로터의 불평형 진동응답을 측정한다. 바 다음과 같았다.

1503 rpm: 6.43 mil $\angle 230^\circ$ (X-probe)

5.59 mil $\angle 143^\circ$ (Y-probe)

반경 90mm에서 10° 간격으로 관통하여 뚫어진 로터 디스크 원주의 양쪽나사 구멍에 0° 부터 360° 까지 60° 간격으로, 즉 0° , 60° , 120° , 180° , 240° 및 300° 각도에 1.76g의 불평형 시도질량을 부착한 후, 1503 rpm으로 로터를 회전시키면서 진동 변위와 위상각을 측정하는 실험을 수행하였다. 이후 실험의 정밀도를 좀더 높이기 위하여 앞에서 측정된 각도의 중간각인 30° , 90° , 150° 및 210° 에 대해서도 추가로 측정하였다. 또한 이 방법의 재연성을 점검하기 위하여 앞선 1.76g의 불평형 시도질량을 제거한 후, 2.64g의 불평형 시도질량을 부착하고 다시 같은 방법으로 진동변위와 위상각을 측정하는 실험을 수행하였다. 이리하여 얻어진 실험결과는 Table 1과 Table 2에 보여진다. 이것을 Fig. 5로부터 도식적으로 구하면, 1.76g의 시도질량을 부착한 경우 X-probe의 최대 불평형 진동응답은 7.25 mil이며 최소 불평형 진동응답은 5.61 mil이다. 그 값 차이는 1.64 mil이며 따라서 1.76g의 시도질량에 의한 잔류 불평형 원의 반경은 0.82 mil에 해당하며 이 원의 중점까지의 거리는 6.43 mil이다. 이것은 앞에서 "As-is"로 측정된 X-probe의 값과 정확히 일치한다. 따라서 시도질량에 의한 불평형과 불평형원의 반경과의 관계는 잔류 불평형(U_R)과 이 원의 중점까지의 거리와의 관계와 같다. 즉,

1.76×90 g mm vs 0.82 mil
 U_R g mm vs 6.43 mil

U_R 은 1242 g mm에 해당하고 이것을 로터의 질량인 12.8621 kg으로 나누면 96.57 μ m (=3.8 mil) 이 얻어지며, 이것이 바로 로터가 원래 가지고 있던 잔류불평형 편심량이다.

Table 1 Vibration amplitude and phase angle of rotor when trial weight of 1.76 gram was applied. Units: mil and \angle deg.

Trial Weight Installation Angle	Reading rpm	Rotor response			
		X - probe		Y - probe	
0°	1504	6.24	\angle 237	5.45	\angle 149
30°	1503	6.64	\angle 237	5.74	\angle 150
60°	1503	7.02	\angle 235	6.12	\angle 147
90°	1504	7.27	\angle 232	6.21	\angle 145
120°	1502	7.25	\angle 229	6.28	\angle 141
150°	1503	7.10	\angle 226	6.03	\angle 138
180°	1503	6.81	\angle 223	5.82	\angle 136
210°	1502	6.33	\angle 223	5.35	\angle 135
240°	1503	5.98	\angle 224	5.10	\angle 137
300°	1504	5.61	\angle 232	4.88	\angle 145
360°	1503	6.22	\angle 237	5.39	\angle 150

Table 2 Vibration amplitude and phase angle of rotor when trial weight of 2.64 gram was applied. Units: mil and \angle deg.

Trial Weight Installation Angle	Reading rpm	Rotor response			
		X - probe		Y - probe	
0°	1503	6.20	\angle 239	5.34	\angle 152
60°	1503	7.35	\angle 236	6.32	\angle 148
120°	1503	7.68	\angle 227	6.59	\angle 139
180°	1503	7.11	\angle 219	5.90	\angle 129
240°	1503	5.76	\angle 219	4.90	\angle 131
300°	1503	5.23	\angle 231	4.51	\angle 144
360°	1503	6.15	\angle 240	5.34	\angle 152

3.2 이론식에 의한 불평형 편심량

제안한 해석적 이론식 (23)에 의해, 불평형 편심량은 Table 1의 측정 데이터에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{m_t e}{M} \left(\frac{R_{\max} + R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right) \\ &= \frac{1.76 \times 90}{12.8618} \left(\frac{7.28 + 5.61}{7.28 - 5.61} \right) \\ &= 95.058 \mu\text{m} (= 3.74 \text{ mil}) \end{aligned}$$

여기서, ϵ 는 불평형 편심량이며, m_t 는 시도질량, M 은 로터의 유효질량, e 는 시도질량의 부착반경, R_{\max} 및 R_{\min} 은 로터의 최대 및 최소 변위 응답이다. 마찬가지로 방법으로 시도질량을 2.64g로 하였을 때 Table 2의 측정자료를 같은 방법으로 구할 수 있는데, 이때의 측정결과로부터 구해지는 원래 로터 불평형 편심량도 시도질량을 1.76g의 경우와 같은 결과를 보여주어야 한다. 먼저 시도질량을 부착하지 않은 채(“As-is”) 다시 로터의 불평형 진동응답을 측정한 바 다음과 같았다.

1503 rpm : 6.46 mil \angle 230° (X-probe)
 5.55 mil \angle 141° (Y-probe)

이것은 앞선 “As-is”의 결과와 약 0.04 mil의 차이를 보이며 거의 일치하는 결과를 보여 주고있어 로터계의 동특성 결과의 재연성을 잘 보여주고 있다. 측정된 Table 2 데이터의 Circle Fit으로부터

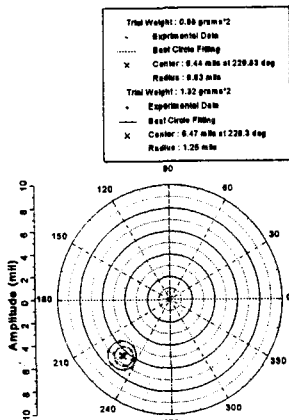


Fig. 5 A polar plot showing the effect of residual unbalance of Rotor.

원래 로터의 잔류불평형 편심량은 식(23)에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\epsilon &= \frac{m_t e}{M} \left(\frac{R_{\max} + R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right) \\ &= \frac{2.64 \times 90}{12.8618} \left(\frac{7.72 + 5.23}{7.72 - 5.23} \right) \\ &= 96.076 \mu\text{m} (= 3.78 \text{ mil})\end{aligned}$$

시도질량이 다른 이상의 두가지 결과는 원래 로터에 대해서 동일한 잔류불평형 편심량을 보여주며 이 결과로부터 본 실험 로터계의 불평형 편심량은 3.78 mil임을 알 수 있었다.

3.3 ISO Standard에 의한 불평형 편심량

본 연구에서 고안한 잔류 불평형 결정법과 ISO Standard²에 의거한 잔류 불평형 결정법을 비교 검토하기 위하여, 앞에서 수행한 실험과 동일한 시도 질량 (1.76g 및 2.64g)에 대해서 ISO Standard에 의거한 잔류 불평형 편심량을 산출하였으며 결과는 다음과 같다. ISO Standard에서 진폭과 위상 정보가 모두 알려져 있는 경우에 적용하였다. 즉, 본 로터에 시도 질량을 순차적으로 부착하고 진동량을 측정하는 계측시험을 통하여 얻어진 결과는 직접 밸런싱에 이용되는 영향계수법에 의하여 잔류 불평형량을 구한결과, 시도질량 1.76g 및 2.64g 적용시 잔류불평형량의 분포는 Fig. 6과 같고, 이 Pole선도로부터 각각 3.77mil, 3.79mil의 불평형 편심량을 얻었다. 제안한 방법(3.78mil)과 잘 일치 함을 알 수 있다.

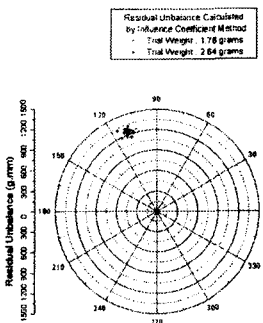


Fig. 6 Residual unbalance calculated by influence coefficient method.

4. 결론

1. 잔류 불평형량이 알려지지 않은 실제 로터계에 대해, 잔류불평형량 계산이 가능한 도식법과 Jeffcott Rotor의 진동응답 식으로부터 로터의 잔류불평형량과 불평형 편심량을 계산하는 해석적 기법을 개발하였다.
2. ISO 및 API Standard에서 제안한 방법보다 편리한 잔류불평형량 측정방법을 개발하여, 제작한 실험 모델의 불평형 편심량을 측정된 결과 3.78 mil이 나왔다.
3. 제안한 기법과 ISO Standard와 실험적으로 비교하였으며, 1%이내의 정확한 일치율을 보였다.
4. 제안한 기법이 향후, 회전기계 잔류불평형량을 구하는데 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Rieger, N. F., "Flexible Rotor-Bearing System Dynamics-III. Unbalance Response and Balancing of Flexible Rotor in Bearing,"The Flexible Rotor Systems Subcommittee, The Engineering Division, ASME.
2. ISO Standard, "Mechanical Vibration-Balancing Quality Requirements of Rigid Rotor,"Ref. No. ISO 1940/1-1986(E), pp. 10-13.
3. API Standard 610, 8th Edition, American Petroleum Institute, Wash D.C., 1995.
4. Tutorial on the API Standard Paragraphs Covering Rotor Dynamics and Balancing: An Introduction to Lateral Critical and Train Torsional Analysis and Rotor Balancing, API Publication 684, 1st Edition, Feb. 1996.
5. Nicholas, J.C., Gunter, E.J., Allaire, P.E., "Effect of Residual Shaft Bow on Unbalance Response and Balancing of a Single Mass Flexible Rotor,"Engineering for Power, Vol. 98, No.2, Apr., pp171-189, 1976,.
6. Jackson, C., "Shop Balancing,"Vibration Institute, Apr. 1993.
7. Walton, J., Lee, C., and Martin, M., "High Speed Balancing Applied to the T700 Engine," NASA CR-180899, AVSCOM TR-88-C-007,

1989.

8. Kim, Bong-Suk, Kim, Jong-Soo, Lee, Soo-Hun ,
"A Study on the Active Balancing Method for
High Speed Spindle System Using Influence
Coefficient," Journal of the Korean Society of
Precision Engineering, Vol. 18, No. 8, August,
pp. 48-53, 2001.
9. Ehrich, F. F., "Handbook of Rotor dynamics,"
McGraw-Hill, Inc., pp.423-433, 1992.
10. Jeffcott, H. H., "The Lateral Vibration of
Loaded Shafts in the Neighbourhood of a
Whirling Speed - The Effect of Balance,"
Philosophical Magazine and Journal of Science,
Vol. 37, Series 6, pp. 304-314, 1919.