한국정밀공학회 2006년도 춘계학술대회논문집 pp. 283~284 KSPE 06S192

3점 측정방식을 사용한 무게중심의 정밀 측정

유이준*(경기대 대학원 기계공학과), 이선표(경기대 기계시스템디자인공학부)

Precise Measurement of Center of Gravity Using 3-Point Weighing Method

I. J. Yoo(Mech. Eng. Dept., Kyonggi Univ.), S. P. Lee(Mech. Eng. Dept., Kyonggi Univ.)

ABSTRACT

In this paper 3-point weighing method is adopted to measure the unbalance moment of small-sized precision spinning elements using electronic scales with *0.1* mgf resolution. Firstly methods to eliminate the fixture error and to reduce the effects of frictional force that is known as side effect, are proposed. A measuring system is developed and various experiments are performed to verify the proposed approach. The measured and calculated values are analysed in statistical methods, and this provides the errors of the measuring system. The results show that the proposed theory and test procedures gives reliable unbalance moments and gravitational centers.

Key Words : Center of gravity (무게 중심), Precise measurement (정밀 측정), Unbalance moment (불평형 모멘트), Fixture-error (치공구 오차), Error calibration(오차 보정), Side effect (측방향 효과)

1. 서론

불평형 모멘트를 측정하는 방법은 많이 개발되어 있으나[1] 이들 방법들은 사용하는 센서의 분해능의 한계, 치공구의 가공오차, 접촉식 하중센서 등을 사용하는 경우에는 측방향 효과(side effect)로 알려진 마찰력의 영향 등으로 인해 불평형 모멘트를 *1* gf-mm 이하의 분해능으로 측정하기 어렵다.[2]

본 연구에서는 *0.1* mgf 의 분해능을 가진 3개의 전자력 평형 방식의 하중 센서를 사용하여 측정시스템을 구성하였다. 세 개의 하중센서를 *120*도 간격으로 베이스에 위치시키고, 그 위에 다리(LEG)가 정확하게 *120*도 간격으로 *3*개인 플랫폼(platform)을 올려놓는다. 플랫폼의 중심에는 피검체를 끼울 수 있는 어댑터(adaptor)를 위치시킨다. 플랫폼을 올려놓고 *0* 점 조정을 한 뒤 피검체를 어댑터에 끼우고 세 하중센서의 값을 읽으면 무게 중심점에서의 모멘트 평형 원리를 이용하여 무게중심 및 불평형 모멘트를 계산할 수 있다.

이 방법을 사용하여 정확한 무게중심을 측정하기 위해서는 어댑터의 위치인 플랫폼의 중심으로부터 세 다리까지의 거리 및 각도가 정확하게 가공되어야 한다. 그러나 가공오차는 필연적으로 발생하며, 이로 인한 측정 오차는 정밀 측정에서는 매우 중요하다. 정밀 불평형량 측정에서는 측방향 효과도 주요 오차 유발 요인이다. 플랫폼 위에 어댑터에 피검체를 설치하고 세 하중 센서의 값을 읽어 합하면 이론적으로는 피검체의 질량이 되어야 하나, 실제로 측정해 보면 항상 이보다 작은 값이 되며, 이는 플랫폼의 다리와 하중센서의 접촉점에서 발생하는 수평방향의 마찰이 그 원인이다.

본 연구에서는 플랫폼의 가공오차를 보상하는 방법과 측방향 효과로 인한 오차를 최소화하는 방법을 제시하고, 실험 장치를 제작하여 *3.5* 인치 하드디스크 드라이브에 사용되는 액츄에이터의 불평형량을 측정한다. 실험 결과는 통계적인 방법으로 분석하여 본 방법의 정밀성을 평가하고자 한다.

2. 이론

플랫폼의 가공오차로 인하여 플랫폼은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 임의의 삼각형이 된다. Fig. 1에서 실제 가공각 $\theta_2 \neq 30^\circ$, $\theta_3 \neq 30^\circ$로 인한 도심의 변화량을 (f_x, f_y)로 나타내었다. 원점에 위치한 피검체의 무게중심에서 모멘트의 평형이 이루어지므로 $\sum M_x = 0$ 및 $\sum M_y = 0$으로부터 각각

$$x_{CG} = (W_2 R_{2x} + W_3 R_{3x})/W \quad (1)$$

$$y_{CG} = (W_2 R_{2y} + W_3 R_{3y} - W_1 R_1)/W \quad (2)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 여기에서 R_1, R_{2x}, R_{2y}, R_{3x}, R_{3y}는 1um 분해능으로 측정할 수 있다.

플랫폼의 정밀 측정 후에 식 (1)과 (2)로 계산된 무게 중심은 마찰력의 작용, 측정점 변화 등의 영향으로 R_1, R_2, R_3, θ_1, θ_2는 플랫폼을 저울에 올려놓을 때마다 미세하게 변한다.

이러한 측정시의 조건 변화로 인한 오차를 보상하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 피검체의 방향(α)이 0° 방향에서 한번, 임의의 각도 위치에서 두 번의 측정을 한다. Fig. 2의 첫 번째 점은 피검체의 방향(α)이 0° 일 때 식 (1) 및 (2)로 계산된 측정점이

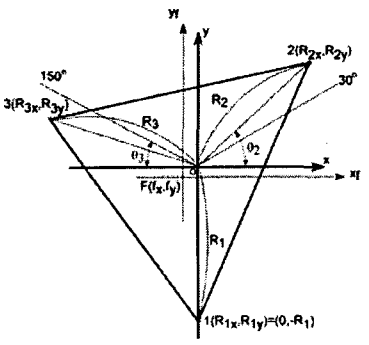

Fig. 1 Determination of fixture-error

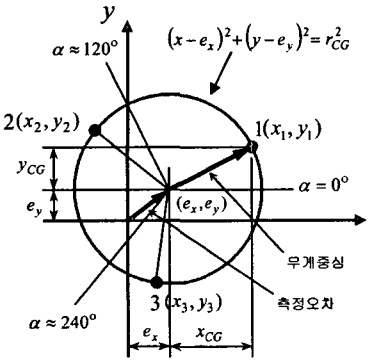

Fig. 2 Determination of measurement error

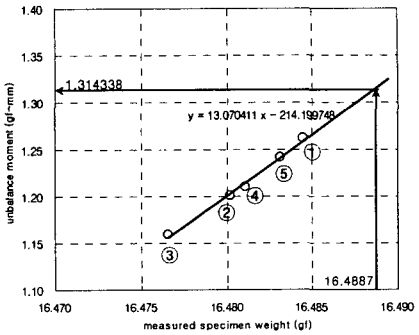

Fig. 3 Calibration of side-effect error

다. 마찬가지로 2번 및 3번 점은 각각 피검체의 방향이 $\alpha \approx 120^\circ$, $\alpha \approx 240^\circ$ 일 때 측정된 좌표이다.

세 점을 지나는 원은 유일하게 결정되므로 피검체의 위치가 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha \approx 120^\circ$, $\alpha \approx 240^\circ$ 일 때 측정된 좌표를 각각 (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3) 이라 하면 세 점을 모두 지나는 원의 방정식은

$$(x-e_x)^2+(y-e_y)^2=r_{CG}^2 \quad (3)$$

이고, 여기에서 e_x, e_y와 r_{CG}는 다음의 3원 1차 연립 방정식을 풀어 구할 수 있다.[5]

$$\begin{bmatrix}1 & 2x_1 & 2y_1\\ 1 & 2x_2 & 2y_2\\ 1 & 2x_3 & 2y_3\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}Z\\ e_x\\ e_y\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}x_1^2+y_1^2\\ x_2^2+y_2^2\\ x_3^2+y_3^2\end{Bmatrix},\ r_{CG}=\sqrt{Z+\left(e_x^2+e_y^2\right)} \quad (4)$$

원의 중심은 측정오차를 나타내며, 측정오차에 대한 1번 점의 좌표가 실제 피검체의 무게중심의 좌표를 나타낸다. 그러므로 무게 중심의 좌표는

$$x_{CG}=x_1-e_x,\ y_{CG}=y_1-e_y \quad (5)$$

로 결정된다.

3. 측정결과

제작된 측정장치를 사용하여 소형 정밀 회전 부품의 불평형량을 측정하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 피검체의 방향이 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha \approx 120^\circ$, $\alpha \approx 240^\circ$에서 각 다리의 반력을 측정하여 식 (1) 과 (2)에 의해 Fig. 8에 표시된 것과 같이 (x_1,y_1), (x_2,y_2), (x_3,y_3)가 계산되었다. 원의 방정식을 구하기 위해 식 (4)의 연립방정식을 구성하고, 측정오차를 나타내는 원의 중심좌표와 불평형 모멘트의 크기를 나타내는 반지름을 구하면 (e_x,e_y)=*(0.001464, -0.0021594)* mm이고 r_{CG}=*0.076594* mm이다.

이와 같은 실험에서 독립적으로 측정된 피검체의 실제 무게와 불평형량의 관계는 Fig. 3과 같다 이는 측방향 효과로 알려진 마찰력의 영향으로 인해 피검체의 총 무게가 작게 측정되기 때문이며 마찰력의 작용은 실험시마다 변한다. 5번의 실험값을 최소자승법을 적용하면 Fig. 3에 나타낸 선형 추세선의 방정식을 얻는다.

Table 1 Measured data for 3.5-inch HDD actuator

	W_1(gf)	W_2(gf)	W_3(gf)	W_t(gf)	x_i(mm)	y_i(mm)
0	5.5125	5.4888	5.4831	16.4844	-0.074452	-0.012327
120	5.5195	5.4999	5.4650	16.4844	0.048143	-0.062886
240	5.5017	5.5072	5.4757	16.4846	0.033716	0.067314

$$M_U=13.070411\ W_t\ -214.199748 \quad (6)$$

여기에 실제 무게 W_t=*16.4845*gf를 대입하면 피검체의 불평형 모멘트는 M_U= *1.314338*(gf-mm)로 추정할 수 있다.

위와 같은 실험을 총 10회 반복하여 실험결과에 대한 95% 신뢰구간을[3] 구하면 참평균 μ의 범위는

$$1.314623 < \mu < 1.318672 \quad (7)$$

이므로 최종적으로 불평형량은 *1.316648* gf-mm 이고 신뢰도 구간은 *0.004048* gf-mm 이다. 즉 95% 신뢰도의 오차범위는 ±*0.002024* gf-mm이다.

4. 결론

본 연구에서는 정밀한 소형 회전부품의 불평형 모멘트와 무게중심을 정밀하게 측정하기 위해 3점 측정방식을 채택하고, 이 방법에서의 오차 제공 원인인 치공구 가공오차를 제거하는 방법과, 측정오차를 최소화하는 방법을 제시하였다. 본 방법의 95%신뢰도 오차범위는 약 2gf-mm이다.

참고문헌

1. Boynton, R. and Wiener, K., "Mass Properties Measurement Handbook," SAWE PAPER No. 2444, 57th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, 1998.
2. Boynton, R., "Mass Properties Measurement Errors Which Could Have Been Easily Avoided," SAWE PAPER No. 2454, 58th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, 1999.
3. Bechwith, T. G., Marangoni, R. D. and Lienhard, J. H., Mechanical Measurements, 5th edition, Addison Wesley, 1993.