

3점 측정방식을 사용한 불평형 모멘트의 정밀 측정

이선표[#]

Precise Measurement of Unbalance Moment Using 3-Point Weighing Method

Sun Pyo Lee[#]

ABSTRACT

Gravitational centers of precise spinning components must coincide with the rotational centers of those to reduce noise and vibration and to extend those life as well. Therefore quality control should be performed in the manufacturing process, in which the unbalance moments are accurately measured. 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 mg 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 : Precise measurement (정밀 측정), Unbalance moment (불평형 모멘트), Fixture-error (치공구 오차), Error Calibration(오차 보정), Side effect (측방향 효과)

기호설명

M_U = unbalance moment
 θ_U = direction of unbalance moment
 W_1, W_2, W_3 = measured reaction forces
 (x_{CG}, y_{CG}) = gravitational center
 (f_x, f_y) = fixture-error
 (e_x, e_y) = measurement error

1. 서론

하드디스크의 액츄에이터, 고속 소형 스피들, 정밀 소형 모터 등과 같이 정밀한 회전 부품은 무게중심과 회전중심이 정확하게 일치하여야 한다. 이들이 일치하지 않으면 부품이 회전할 때 불평형 모멘트로 인한 진동과 소음이 발생하며, 부품의 수명 연장, 소비 전력의 감소를 위해서도 제조 과정에서 불평형량의 정밀 측정 및 관리는 반드시 필요하다.

접수일: 2005년 12월 19일; 게재승인일: 2006년 4월 14일
 # 경기대학교 기계시스템디자인공학부
 E-mail splee@kyonggi.ac.kr Tel. (031) 249-9812

불평형 모멘트를 측정하는 방법은 많이 개발되어 있으나^{1,2} 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 g-mm 이하의 분해능으로 측정하는 것은 불가능하다.^{3,4} 측방향 효과는 한 물체를 두 개의 저울에 걸쳐 놓고 양 저울에서 측정된 질량을 합하면 실제 질량보다 작다는 것이다. 이는 측정 대상 물체와 저울 사이에 수평 방향으로 작용하는 미세한 마찰력 때문이다.

본 연구에서는 3개의 전자력 평형 방식의 하중센서를 사용하는 다점 측정방식을 채택하였다. 연구에는 0.1 mg 의 정확도를 가지는 전자력 평형방식의 하중 센서모듈을 사용하였다. 측정방식을 간략히 설명하면, Fig. 1과 같이 세 개의 하중센서를 120도 간격으로 베이스에 위치시키고, 그 위에 다리(LEG)가 정확하게 120도 간격으로 3개인 플랫폼(platform)을 올려놓는다. 플랫폼의 중심에는 피검체를 끼울 수 있는 어댑터(adaptor)를 위치시킨다. 플랫폼을 올려놓고 0점 조정을 한 뒤 피검체를 어댑터에 끼우고 세 하중센서의 값을 읽으면 무게 중심점에서의 모멘트 평형 원리를 이용하여 무게중심 및 불평형 모멘트를 계산할 수 있다. 물론 이 방법을 사용하여 정확한 불평형량(무게중심)을 측정하기 위해서는 플랫폼의 중심에 어댑터 위치와 이로부터 세 다리까지의 거리 및 각도가 정확하게 가공되어야 한다. 그러나 가공오차는 필연적으로 발생

하며, 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. 플랫폼이나 피검체가 무거울수록 마찰력 역시 크기 때문에 이로 인한 오차는 커진다.

본 연구에서는 위에서 언급한 플랫폼 가공오차를 보상하는 방법과 측방향 효과로 인한 오차를 최소화하는 방법을 제시하고, 실험 장치를 제작하여 3.5 인치 하드디스크에 사용되는 액츄에이터 날개의 불평형량을 측정한다. 실험 결과는 통계적인 방법으로 분석하여 본 방법의 정밀성을 평가하고자 한다.

2. 이론

2.1 3점 불평형 무게중심 측정 원리

정밀 하중센서를 사용하여 반력 W_1, W_2, W_3 를 측정한다. Fig. 2의 구성에서 x 축에 대한 모멘트는

$$M_x = W_1 R - (W_2 + W_3) \frac{R}{2} \quad (1)$$

이고 y 축에 대한 모멘트는

$$M_y = \frac{\sqrt{3}}{2} R (W_2 - W_3) \quad (2)$$

이다. Fig. 2에서 무게중심의 좌표를 (x_{CG}, y_{CG}) 라 하면, 무게중심에서는 모멘트의 평형이 이루어지므로 $\sum M_{x,CG} = 0$ 에서

$$W_2 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R - x_{CG} \right) = W_3 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} R + x_{CG} \right) + W_1 R \quad (3)$$

이고 $\sum M_{y,CG} = 0$ 에서

$$W_1 (R + y_{CG}) = (W_2 + W_3) \left(\frac{R}{2} - y_{CG} \right) \quad (4)$$

이므로 이를 정리하면 다음과 같은 무게중심의 좌표를 구할 수 있다.

$$x_{CG} = \frac{M_y}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (5)$$

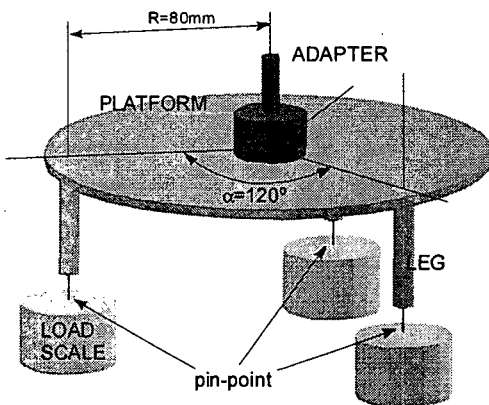


Fig. 1 3-point unbalance moment measuring system

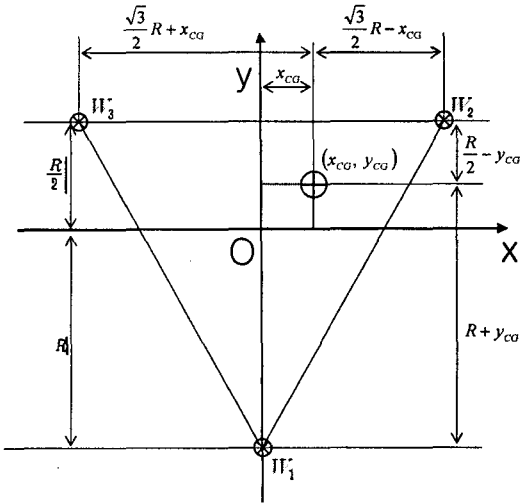


Fig. 2 Measuring principle for 3-point weighing method

$$y_{CG} = -\frac{M_x}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (6)$$

2.2 플랫폼의 가공오차

피검체를 끼우는 어댑터의 회전 중심은 이론적으로 세 다리가 구성하는 삼각형의 도심에 정확하게 위치해야 한다. 그러나 필연적으로 가공오차는 발생하며 이러한 가공오차는 정밀한 측정에서는 매우 중요하다. 플랫폼을 가공할 때 어댑터를 위치시키기 위한 가운데 홀(피검체의 회전중심)을 먼저 뚫고, 이 홀을 중심으로 하여 120도 간격으로 회전시키면서 다리 고정용 홀을 가공하였기 때문에 플랫폼의 중심과 다리 사이의 간격인 R은 거의 일정하다. 그러나 다리 고정용 홀을 가공할 때, 120도 간격이 정확하지 않으면 다리 3개로 구성되는 삼각형은 정삼각형이 아니라 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 임의의 삼각형이 된다. Fig. 3에서 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

$$x_{CG} = \frac{W_2 R_{2x} + W_3 R_{3x}}{W} \quad (7)$$

$$y_{CG} = \frac{W_2 R_{2y} + W_3 R_{3y} - W_1 R_1}{W} \quad (8)$$

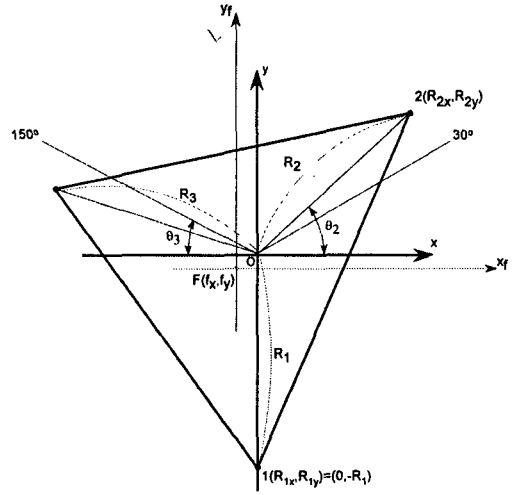


Fig. 3 Determination of fixture-error

의 관계를 얻을 수 있다. 여기에서

$$R_{1x} = 0, R_{1y} = -R_1 \quad (9a)$$

$$R_{2x} = R_2 \cos \theta_2, R_{2y} = R_2 \sin \theta_2 \quad (9b)$$

$$R_{3x} = -R_3 \cos \theta_3, R_{3y} = R_3 \sin \theta_3 \quad (9c)$$

이고 가공오차로 인한 도심의 변화량 (f_x, f_y) 와 하중 측정점 1, 2, 3의 좌표 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f_x = (R_{1x} + R_{2x} + R_{3x})/3 \quad (10a)$$

$$f_y = (R_{1y} + R_{2y} + R_{3y})/3 \quad (10b)$$

가공오차가 없을 때, 즉 $\theta_2 = 30^\circ$, $\theta_3 = 150^\circ$ 일 때 $R_{2x} = \sqrt{3}R/2$, $R_{2y} = -\sqrt{3}R/2$, $R_{2y} = R_{2y} = R/2$, $f_x = 0$, $f_y = 0$ 이다. 가공오차는 플랫폼의 가공 후에 $\overline{O1}$, $\overline{O2}$, $\overline{O3}$, $\overline{12}$, $\overline{23}$, $\overline{31}$ 을 정밀 측정하고 제 2 코사인 정리를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_1 = \overline{O1}, R_2 = \overline{O2}, R_3 = \overline{O3} \quad (11a)$$

$$\theta_2 = -90^\circ + \cos^{-1} \frac{\overline{O1}^2 + \overline{O2}^2 - \overline{12}^2}{2 \overline{O1} \overline{O2}} \quad (11b)$$

$$\theta_3 = -90^\circ + \cos^{-1} \frac{\overline{O3}^2 + \overline{O1}^2 - \overline{31}^2}{2 \overline{O3} \overline{O1}} \quad (11c)$$

식 (11)의 측정값과 반력 W_1, W_2, W_3 를 식 (7), (8), (9)에 대입하여 무게중심의 좌표 (x_{CG}, y_{CG}) 를 구할 수 있다.

2.3 측정 오차

플랫폼의 정밀 측정 후에 식 (7)과 (8)로 계산된 무게 중심은 가공오차는 보상되었으나, 마찰력의 작용, 측정점 변화 등의 영향으로 $R_1, R_2, R_3, \theta_1, \theta_2$ 는 플랫폼을 저울에 올려놓을 때마다 미세하게 변한다.

이러한 측정시의 조건 변화로 인한 오차를 보상하기 위해 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 피검체의 방향(α)이 0° 방향에서 한번, 임의의 각도 위치에서 두 번의 측정을 한다. Fig. 4의 첫 번째 점은 피검체의 방향(α)이 0° 일 때 식 (7) 및 (8)로 계산된 측정점이다. 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

$$(x - e_x)^2 + (y - e_y)^2 = r_{CG}^2 \quad (12)$$

이고, 여기에서 e_x, e_y 와 r_{CG} 는 다음의 3원 1차 연립방정식을 풀어 구할 수 있다.⁵

$$\begin{bmatrix} 1 & 2x_1 & 2y_1 \\ 1 & 2x_2 & 2y_2 \\ 1 & 2x_3 & 2y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z \\ e_x \\ e_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

$$r_{CG} = \sqrt{Z + (e_x^2 + e_y^2)} \quad (14)$$

원의 중심은 측정오차를 나타내며, 측정오차에 대한 1번 점의 좌표가 실제 피검체의 무게중심의

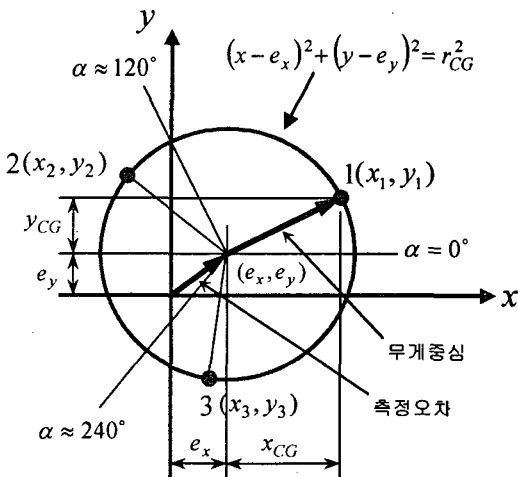


Fig. 4 Determination of measurement error

좌표를 나타낸다. 그러므로 무게 중심의 좌표는

$$x_{CG} = x_1 - e_x, y_{CG} = y_1 - e_y \quad (15)$$

로 결정되고 불평형 모멘트는

$$M_x = -y_{CG} W_t, M_y = x_{CG} W_t \quad (16)$$

이다.

불평형 모멘트의 크기는

$$M_U = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (17)$$

이며, 불평형 모멘트의 방향은

$$\theta_U = \tan^{-1} \frac{y_{CG}}{x_{CG}} \quad (18)$$

이다.

3. 측정 결과 및 분석

3.1 실험 장치

정밀 회전 부품의 무게중심 및 불평형 모멘트를 측정하기 위해 0.1mg의 분해능을 가지는 전자저울을 사용하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 장치에 사용된 전자저울은 SHIMADZU사의 AUX220이며, 측정 범위는 0~200g이다. 이 전자저울은 내부 분동을 사용하는 자동 교정기능을 가지고 있다. 장치에 사용된 3개의 저울은 동일한 피검체에 대하여 0~200g의 범위에서 동일한 질량 측정 결과를 주는 것을 확인하였다.

Fig. 6에는 측정장치의 플랫폼, 어댑터와 피검체를 나타내었다. 플랫폼의 치수는 1um의 분해능을 갖는 ZEISS의 3차원 측정기인 CONTURA로 정밀하게 측정하였다. CONTURA는 홀의 셀프센터링 기능을 가지고 있어 홀 간의 치수를 정밀하게 측정할 수 있다. 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 중심

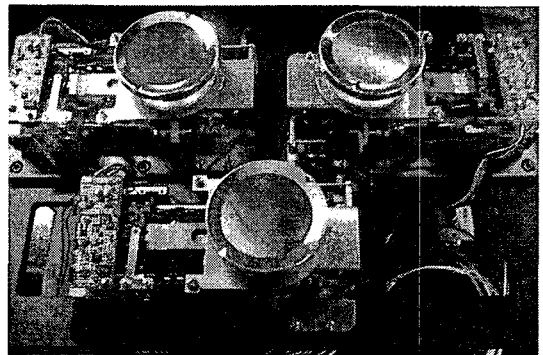


Fig. 5 3-point unbalance moment measuring system

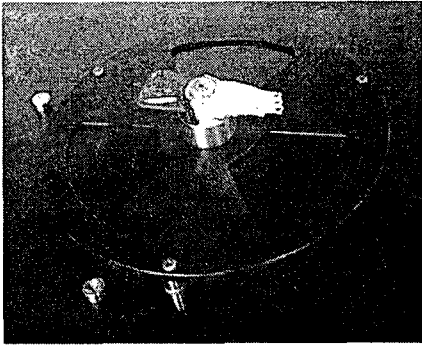


Fig. 6 Platform, adaptor and specimen

홀과 다리 홀의 거리는 10um 이하의 편차를 갖는 것을 알 수 있다. 플랫폼을 가공할 때 가운데 홀(피검체의 회전중심)을 먼저 뚫고, 이 홀을 중심으로 하여 120도 간격으로 회전시키면서 다리 고정용 홀을 가공하였기 때문에 플랫폼의 중심과 다리 사이의 간격 $\overline{O1}$, $\overline{O2}$, $\overline{O3}$ 은 거의 일정하다. 그러나 다리 홀간의 간격인 $\overline{12}$, $\overline{23}$, $\overline{31}$ 의 편차는 최대 500um 인데, 이는 다리고정용 홀을 가공할 때, 120° 간격으로 정확하게 가공되지 않았기 때문이다. Table 1의 정밀 측정 결과를 식 (11)에 대입하면 $R_1 = 80.004mm$, $R_2 = 80.002mm$, $R_3 = 79.996mm$, $\theta_2 = 30.361565^\circ$, $\theta_3 = 29.932619^\circ$ 로 결정된다.

제작된 실험 장치는 일정 간격의 홀이 정밀 가공된 바(bar)와 강구를 사용하여 교정되었다. 바를 어댑터에 끼우고 0점 조정을 한 후, 여러 질량의 강구를 여러 위치에 올려놓고 무게 중심까지의 거리를 측정하여, 정밀 측정된 바의 홀 거리와 비교하는 실험을 반복한다. 교정 과정과 측정 과정은 동

Table 1 Dimension of platform measured using 3D scanner (unit:mm)

$\overline{O1}$	$\overline{O2}$	$\overline{O3}$	$\overline{12}$	$\overline{23}$	$\overline{31}$
80.004	80.002	79.996	138.821	138.517	138.356

Table 2 Measured data for 3.5-inch actuator

방향	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	W_t (g)	x_i (mm) 식 (7)	y_i (mm) 식 (8)
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

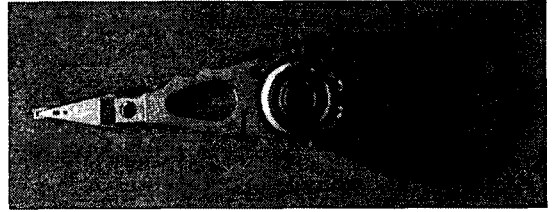


Fig. 7 3.5-inch hard-disk actuator

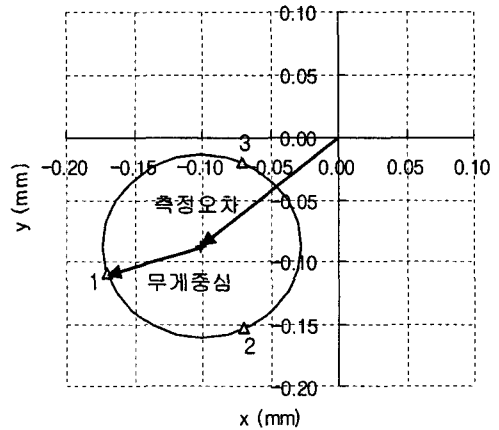


Fig. 8 Illustration of calculated measurement error and gravitational center for 3.5-inch hard-disk actuator

일하며, 본 논문에서는 실제 정밀 회전 부품인 3.5 인치 하드 디스크 액츄에이터를 선택하여 측정과정 및 계산과정을 설명한다.

3.2 측정 결과 : Hard-Disk Actuator

제작된 측정장치를 사용하여 소형 정밀 회전 부품인 3.5 인치 하드디스크 드라이브의 액츄에이터 날개 (Fig. 7)의 불평형량을 측정하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 피검체의 방향이 $\alpha = 0^\circ$, $\alpha \approx 120^\circ$, $\alpha \approx 240^\circ$ 에서 각 다리의 반력을 측정하여 식 (7) 및 (8)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 (12)의 연립방정식을 구성하고, 측정시의 오차를 나타내는 원의 중심좌표와 불평형 모멘트의 크기를 나타내는 반지름을 구하면 $(e_x, e_y) = (0.001464, -0.0021594)$ mm이고 $r_{CG} = 0.076594$ mm이다.

측정된 피검체의 질량의 평균은 $W_t = 16.4845g$ 이므로 피검체의 불평형모멘트는

Table 3 Results for unbalance moments for 3.5-inch hard-disk actuator

	e_x (mm)	e_y (mm)	r_{CG} (mm)	W_t (g)	M_U (g-mm)
1	0.001464	-0.002159	0.076594	16.4845	1.262616
2	-0.100696	-0.087142	0.072878	16.4802	1.201040
3	-0.031899	-0.016909	0.070325	16.4766	1.158717
4	-0.101215	-0.091909	0.073456	16.4811	1.210626
5	-0.106781	-0.105881	0.075327	16.4832	1.241620

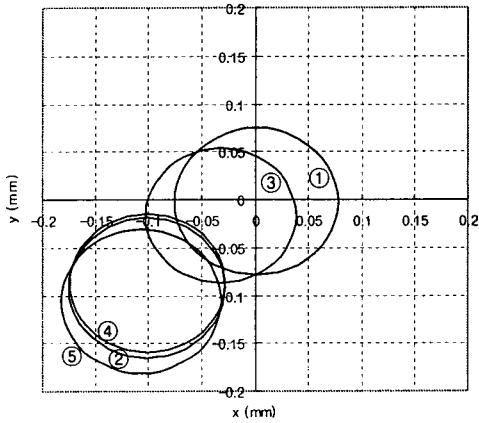


Fig. 9 Graphical representation of test results for a 3.5-inch hard-disk actuator

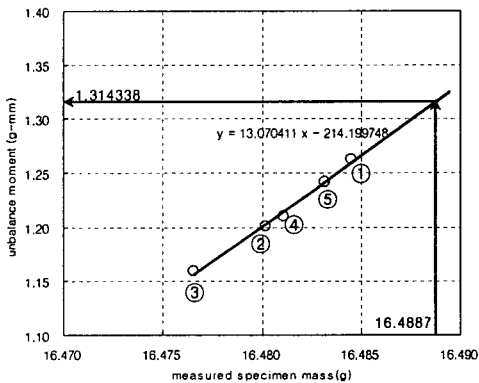


Fig. 10 Calibration of side-effect error

Table 4 Moment error for each measured data

Test No.	1	2	3	4	5
오차 (g-mm)	-0.00220	0.00361	0.00297	-0.00394	-0.00039

$$\begin{aligned}
 M_U &= W_t \cdot r_{CG} \\
 &= 16.4845 \text{g} \cdot 0.076594 \text{mm} \\
 &= 1.262616 \text{ g-mm} \quad (19)
 \end{aligned}$$

로 계산된다.

측정 결과를 보면 실험에 사용한 피검체의 실제 질량은 16.4887g 이지만 측정된 질량 3개는 각각 16.4844g, 16.4844g, 16.4846g 이며, 이들의 평균값인 16.4845g 는 실제 질량보다 0.0042g 작다. 이는 앞에서 설명한 측방향 효과로 인한 마찰력의 영향으로 실제 질량보다 작게 측정된 것이다.

동일한 피검체에 대한 5번의 측정 결과를 Table 3과 Fig. 9에 나타내었다. 매 측정 시마다 원의 중심이 다르게 나타나지만 원의 반지름은 거의 일정함을 알 수 있다. 원의 중심이 다르게 나타나는 이유는 가공오차는 일정하지만 측방향 효과로 인한 마찰력은 측정할 때마다 다르게 작용하고, 플랫폼을 전자저울에 올려놓을 때마다 접촉하는 점이 미세하게 달라지기 때문이다. 그러나 피검체에 비해 상대적으로 큰 질량을 가지는 플랫폼(약 100g)을 하중 센서 위에 올려놓은 상태에서는 측정 중에 마찰력의 변화는 거의 없다. 각 측정 시에 측정된 피검체의 질량이 다르다는 것은 이러한 마찰력의 영향이 측정할 때마다 다르다는 것을 나타낸다. 마찰력의 영향이 클수록 피검체의 질량(반력 3개의 합)는 작게 나타나며, 계산된 불평형 모멘트의 값도 작다. Fig. 10에 측정된 피검체의 질량에 대한 계산된 불평형 모멘트의 관계를 나타내었다. 각 실험에서 측정된 피검체의 질량과 계산된 불평형 모멘트는 선형 관계에 있음을 알 수 있다. 최소자승법을 적용하여 선형 추세선의 방정식을 구하면

$$M_U = 13.070411 W_t - 214.199748 \quad (20)$$

이다. 실제 피검체의 질량은 16.4887g 이므로 최종적으로 불평형 모멘트는 추세선의 방정식을 이용하여

$$\begin{aligned}
 M_U &= 13.070411 \times 16.4887 - 214.199748 \\
 &= 1.314338 \text{ (g-mm)} \quad (21)
 \end{aligned}$$

와 같이 추정할 수 있다.

Fig. 9에서 추세선과 각 측정점의 오차를 Table 3에 나타내었다. 측정점의 최대 오차는 4번째 측정에서의 0.00394 g-mm 이다.

이와 같은 방법으로 각 실험 당 5회의 측정을

Table 5 Calibrated unbalance moments from 10 sets of measurements

Test No.	1	2	3	4	5
불평형 모멘트 (g-mm)	1.314338	1.319846	1.317112	1.315812	1.318539
Test No.	6	7	8	9	10
불평형 모멘트 (g-mm)	1.314745	1.320957	1.317758	1.310284	1.317084

통하여 측방향 마찰 영향을 보상하여 불평형 모멘트를 결정하는 실험을 10회 실시하였다. 실험결과는 Table 5에 나타내었다.

위와 같은 반복 실험을 통하여 95% 신뢰도 구간에서의 성능을 구한다. 작은 표본에 대한 신뢰도 구간식은⁶

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, \nu} \frac{S_x}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2, \nu} \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (22)$$

이며, 여기에서 \bar{x} 는 평균, α 는 유의수준(level of significance), ν 는 $n-1$, S_x 는 표준 편차, n 은 샘플 개수, μ 는 참평균이고, 95% 신뢰구간에서 스튜던트 t-분포의 필요값은⁶

$$t_{\alpha/2, \nu} = 2.093 \quad (23)$$

이다. 이를 이용하여 반복정밀도 참평균 μ 를 구하면

$$1.314623 < \mu < 1.318672 \quad (24)$$

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

4. 결론

본 연구에서는 정밀한 소형 회전부품의 불평형량인 불평형 모멘트와 무게중심을 정밀하게 측정하기 위해 3점 측정방식을 채택하고, 이 방법에서의 오차 제공 원인인 치공구 가공오차를 제거하는 방법과, 측정시의 오차를 최소화하는 방법을 제시하였다.

측정 실험에는 0.1 mg의 분해능을 갖는 전자저울을 사용하였으며, 본 연구에서 제시한 방법으로 제작된 측정 장치는 치공구의 가공 오차와 측정오차의 영향을 최소화하여 소형 회전 부품의 불평형

모멘트를 약 0.004 g-mm(4 mg-mm)의 분해능으로 구할 수 있다.

후 기

본 연구는 ‘2005학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. Boynton, R. and Wiener, K., "Mass Properties Measurement Handbook," 57th Annual Conference of the the Society of Allied Weight Engineers, PAPER No. 2444, 1998.
2. Boynton, R. and Wiener, K., "How to Calculate Mass Properties, An Engineer's Practical Guide," Space Electronics Inc., 2000.
3. Boynton, R., "Mass Properties Measurement Errors Which Could Have Been Easily Avoided," 58th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, PAPER No. 2454, 1999.
4. Boynton, R., "Precise Measurement of Mass," 60th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, PAPER No. 3147, 2001.
5. Taylor, D. L., "Computer Aided Design," Addison Wesley, pp. 34-43, 1992.
6. Bechwith, T. G., Marangoni, R. D. and Lienhard, J. H., "Mechanical Measurements," 5th edition, Addison Wesley, pp. 45-75, 1993.