

3점 방식 불평형량 측정법에서의 오차보상 기법

이선표[#]

Error-compensating Techniques in 3-Point Weighing Method to Measure Unbalance Properties

Sun Pyo Lee[#]

ABSTRACT

In this paper error-compensating techniques in three-point weighing method to precisely measure unbalance properties such as center of gravity and unbalance moment. In the conventional static methods, 1) fixture-errors, 2) effects of the contact between the fixture and the load scales, and 3) side effect due to the lateral frictional forces acting on the contact points between the fixture and the load scales are the major factors that lead to measurement errors.

The proposed error-compensating method perfectly eliminates both the fixture-error and the contact-error simultaneously by manipulating the three measured reaction forces at three different angular locations. Also the friction-error is calibrated by comparing the sum of three reactions with the actual mass of the specimen.

A set of measurement is performed using the same measuring system as Lee's, and a comparison of the results from the conventional, Lee's, and the proposed method is provided. The results show that the proposed method effectively compensates the errors listed above.

Key Words : Precise measurement (정밀 측정), Unbalance properties (불평형량), Fixture-error (치공구 오차), Measurement-error (측정 오차), Contact-error (접촉 오차), Side effect (측방향 효과), Error-compensation (오차 보상)

기호설명

M_U = unbalance moment

θ_U = direction of unbalance moment

W_1, W_2, W_3 = measured reaction forces

$\Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ = angles in fixture-error

$[\Delta R]$ = matrix of fixture-error compensation

F = frictional force

(x_{CG}, y_{CG}) = gravitational center

(f_x, f_y) = fixture-error

(e_x, e_y) = measurement-error

^{*)} 접수일: 2006년 6월 19일; 게재승인일: 2006년 10월 9일

[#] 경기대학교 기계시스템디자인공학부

E-mail splee@kyonggi.ac.kr Tel. (031) 249-9812

1. 서론

소형 정밀 회전부품은 부품의 수명 연장, 소비 전력의 감소, 회전시의 소음 및 진동의 방지 등을 위해 그 회전중심과 무게중심이 정확히 일치해야 하며, 제조 과정에서의 관리를 위해 정밀 측정이 반드시 필요하다.

무게중심, 불평형 모멘트 등과 같은 불평형량의 측정법을 크게 분류하면 정적인(static) 방법과 동적인(dynamic) 방법이 있는데,^{1,2} 정적인 방법이 동적인 방법들보다 더 정확한 불평형 측정값을 제공한다. 이들 방법들에서는 사용하는 센서의 분해능의 한계, 치구(fixture)의 가공오차, 접촉식 하중센서 등을 사용하는 경우에는 측방향 효과(side effect)로 알려진 마찰력의 영향 등으로 인해 불평형량을 정밀하게 측정하기 어렵다.^{3,4} 측정 대상이 소형, 정밀한 회전부품인 경우 불평형량의 정밀한 측정은 기술적, 경제적인 면에서 매우 중요하다.

Lee⁵는 정적인 방법 중에서 3점 측정방식을 채택하고, 세 전자력 평형 방식의 하중센서 위에 피검체를 고정하기 위한, 정밀하게 가공된, 플랫폼을 올려놓고 세 반력을 측정하여 모멘트 평형방정식으로부터 불평형 모멘트를 측정하였다. 이 방법에서의 발생하는 오차는 첫째, 피검체를 고정하기 위해 사용하는 치구인 플랫폼(platform)의 가공오차이다. 불평형량을 계산하기 위한 모멘트 평형 방정식에는 정확한 플랫폼의 치수가 사용되어야 하지만, 가공오차는 필연적으로 발생하며, 이 가공오차로 인하여 불평형량을 결정하기 위해 사용하는 모멘트 평형식 자체가 맞지 않는 문제를 제공한다. 둘째, 치구와 하중센서와의 상호작용에 의한 오차이다. Lee의 방법은 하중센서와 플랫폼의 다리 사이의 점 접촉을 사용하는데, 실제로는 플랫폼의 다리의 끝을 점으로 가공할 수 없기 때문에 다리와 하중센서의 접촉은 면 접촉이 되며 접촉면에 걸친 반력의 유효 작용중심은 측정할 때마다 변한다. 접촉면에서의 유효 작용중심 변화는 플랫폼의 가공오차와 더해지며, 작용중심의 변화량은 직접적인 방법으로는 측정이 불가능하다. 셋째, 측방향 효과(side effect)로 알려진 마찰력의 영향이다. 한 물체를 두 개의 저울에 걸쳐 놓고 양 저울에서 측정된 무게를 합하면 항상 실제 무게보다 작아지는데, 그 원인은 측정 대상 물체와 저울 사이에 수평 방향으로 작용하는 미세한 마찰력에 의해 측정 반력의 손실이 발

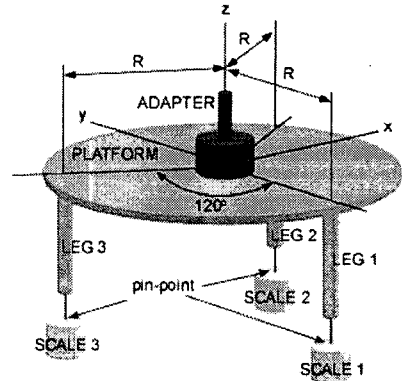


Fig. 1 Schematic illustration of the three-point static weighing method using three load scales and a platform

생하기 때문이다.

본 연구에서는 Lee의 3점 측정법에서의 오차 원인인 1) 플랫폼의 가공오차, 2) 접촉오차(유효 접촉중심이 매 측정시마다 변하는 현상), 3) 하중센서와 플랫폼의 다리 사이에 수평 방향으로 작용하는 마찰오차를 보상하는 방법을 제시하고 실제 피검체의 불평형량 측정을 통해 본 방법의 정밀성을 평가하고자 한다.

2. 이론

Lee⁵의 측정법을 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 고정하는 어댑터(adapter)를 위치시킨다. 플랫폼을 하중센서 위에 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 및 불평형 모멘트)을 측정하기 위해서는 플랫폼의 중심에 어댑터 위치와 이로부터 세 다리까지의 거리 및 각도가 정확하게 가공되어야 한다. 그러나 가공오차는 필연적으로 발생하며, 이로 인한 측정 오차는 정밀 측정에서는 매우 중요하다. Lee는 회전중심, 각 다리의 거리를 3차원 측정기로 정밀하게 측정하여 사용하였으나, 이 방법은 매 측정시마다 미세하게 변하는 측정 반

력의 유효 작용중심의 변화는 고려할 수 없다.

2.1 가공오차와 접촉오차의 보상법

피검체를 고정하는 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 가운데 홀(피검체의 회전중심)을 먼저 뚫고, 이 홀을 중심으로 하여 120도 간격으로 회전시키면서 다리 고정용 홀을 가공하였기 때문에 플랫폼의 중심과 다리 사이의 간격인 R 은 거의 일정하다. 이는 가공 후의 플랫폼의 치수를 정밀 측정한 결과⁵에서도 확인되며, 그 편차가 $8 \mu\text{m}$ 이다. 그러나 일반적으로 정밀가공의 오차범위는 약 $20 \mu\text{m}$ 이며, 플랫폼의 중심에서 다리까지의 거리는 $R \pm 10 \mu\text{m}$ 로 나타낼 수 있다. 만약 R 을 충분히 크게 선택하면 이 가공오차와 편차로 인한 측정결과의 오차는 거의 무시할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 플랫폼의 중심-다리 거리를 일정하다고 가정한다.

그러나 다리고정용 홀을 가공할 때, 120도 간격이 정확하지 않으면 다리 3개로 구성되는 삼각형은 정삼각형이 아니라 임의의 삼각형이 된다. 이러한 각도오차가 측정결과에 미치는 영향은 무시할 수 없으며 반드시 보상되어야 한다. 1번 다리를 기준으로 한 2번과 3번 다리의 기하학적인 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 1번 다리의 좌표를 소정하고 이를 기준으로 잡으면 1번 다리의 좌표 (R_{1x}, R_{1y}) 는 $(0, -R)$ 이며 2번 및 3번 다리의 좌표 (R_{2x}, R_{2y}) 와 (R_{3x}, R_{3y}) 는 다음과 같다.

$$R_{2x}(\Delta\theta_2) = R \cos(30^\circ + \Delta\theta_2) \quad (1a)$$

$$R_{2y}(\Delta\theta_2) = R \sin(30^\circ + \Delta\theta_2) \quad (1b)$$

$$R_{3x}(\Delta\theta_3) = R \cos(150^\circ + \Delta\theta_3) \quad (1c)$$

$$R_{3y}(\Delta\theta_3) = R \sin(150^\circ + \Delta\theta_3) \quad (1d)$$

여기에서 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 는 각각 2번, 3번 다리의 가공 오차각이다. 각 다리의 좌표는 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 만의 함수가 되며, 여기에서 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 가 아주 작다고 가정하면 $\sin\Delta\theta_2 \approx \Delta\theta_2$, $\sin\Delta\theta_3 \approx \Delta\theta_3$, $\cos\Delta\theta_2 \approx 1$, $\cos\Delta\theta_3 \approx 1$ 이고 삼각함수의 정리를 사용하면

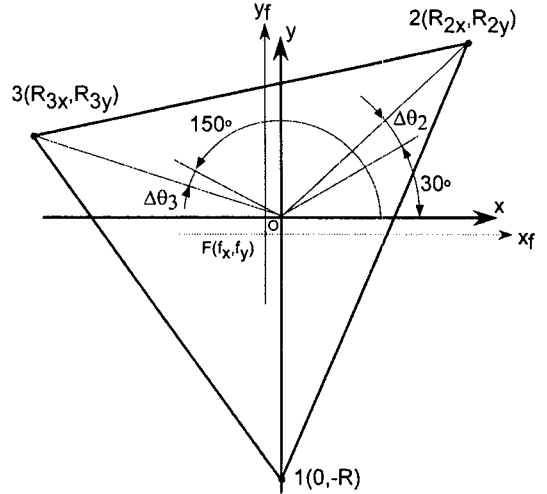


Fig. 2 Configuration of the platform and its fixture-error

$$R_{2x}(\Delta\theta_2) \approx \frac{R}{2}(\sqrt{3} - \Delta\theta_2) \quad (2a)$$

$$R_{2y}(\Delta\theta_2) \approx \frac{R}{2}(1 + \sqrt{3}\Delta\theta_2) \quad (2b)$$

$$R_{3x}(\Delta\theta_3) \approx \frac{R}{2}(-\sqrt{3} - \Delta\theta_3) \quad (2c)$$

$$R_{3y}(\Delta\theta_3) \approx \frac{R}{2}(1 - \sqrt{3}\Delta\theta_3) \quad (2d)$$

이므로 다음과 같이 다리의 위치행렬을 정리할 수 있다.

$$[R_c(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] = [R_0] + [\Delta R(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] \quad (3)$$

여기에서

$$[R_c(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] = \begin{bmatrix} 1 & R_{1x} & R_{1y} \\ 1 & R_{2x} & R_{2y} \\ 1 & R_{3x} & R_{3y} \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$[R_0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -R \\ 1 & \frac{\sqrt{3}R}{2} & \frac{R}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}R}{2} & \frac{R}{2} \end{bmatrix} \quad (4b)$$

$$[\Delta R(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\Delta\theta_2 R}{2} & \frac{\sqrt{3}\Delta\theta_2 R}{2} \\ 0 & \frac{-\Delta\theta_3 R}{2} & \frac{-\sqrt{3}\Delta\theta_3 R}{2} \end{bmatrix} \quad (4c)$$

이고 $[R_c(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)]$ 는 가공오차가 보상된 다리위치 행렬, $[R_0]$ 는 가공오차 보상 전의 다리위치행렬. $[\Delta R(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)]$ 은 다리위치 보상행렬이다.

가공오차각 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 로 인한 도심의 변화량 (f_x, f_y) 와 하중 측정점인 다리 1, 2, 3의 좌표 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f_x = (R_{1x} + R_{2x} + R_{3x})/3 \quad (5a)$$

$$f_y = (R_{1y} + R_{2y} + R_{3y})/3 \quad (5b)$$

가공오차가 없을 때, 즉 $\Delta\theta_2 = 0, \Delta\theta_3 = 0$ 일 때 $R_{2x} = \sqrt{3}R/2, R_{3x} = -\sqrt{3}R/2, R_{2y} = R_{3y} = R/2, f_x = 0, f_y = 0$ 이다.

원점에 위치한 피검체의 무게중심에서 모멘트의 평형이 이루어지므로 $\sum M_x = 0$ 및 $\sum M_y = 0$ 의 정적 평형조건으로부터 각각

$$x_{CG} = \frac{W_{1m}R_{1x} + W_{2m}R_{2x} + W_{3m}R_{3x}}{W_{tm}} \quad (6)$$

$$y_{CG} = \frac{W_{1m}R_{1y} + W_{2m}R_{2y} + W_{3m}R_{3y}}{W_{tm}} \quad (7)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 여기에서 W_{1m}, W_{2m}, W_{3m} 은 각각 1번, 2번 3번 저울에서 측정된 반력이다. W_{tm} 는 각 하중센서에서 측정된 반력의 합, 즉 $W_{tm} = W_{1m} + W_{2m} + W_{3m}$ 이다. 하첨자 m 은 측정값을 나타낸다.

피검체를 서로 다른 각도에서 세 번의 측정을 하면 불평형 거리 r_m , 및 가공오차각 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 를 동시에 구할 수 있다. 플랫폼에 피검체를 0도 방향에서 한번, 임의의 각도 위치에서 두 번의 측정을 한다. 임의의 각도는 대략 120° 와 240° 를 선택한다. (x_1, y_1) 은 피검체의 방향이 0도일 때 식(6)과 식(7)로 계산된 측정점이다. 마찬가지로 2번 및 3번 점의 좌표 (x_2, y_2) 와 (x_3, y_3) 는 각각 피검체의 방향이 약 $120^\circ, 240^\circ$ 일 때 계산된 좌표이다. 측정 중에 각 다리의 위치가 변하지 않는다고 가정하면, 총 세 번의 측정 결과 다음과 같은 행렬식을 구성할 수 있다.

$$[X_m(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] = [W_m] [R_c(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] \quad (8)$$

$$[X_m(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)] = \begin{bmatrix} 1 x_1 y_1 \\ 1 x_2 y_2 \\ 1 x_3 y_3 \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$$[W_m] = \begin{bmatrix} W_{1m,1}/W_{tm,1} & W_{2m,1}/W_{tm,1} & W_{3m,1}/W_{tm,1} \\ W_{1m,2}/W_{tm,2} & W_{2m,2}/W_{tm,2} & W_{3m,2}/W_{tm,2} \\ W_{1m,3}/W_{tm,3} & W_{2m,3}/W_{tm,3} & W_{3m,3}/W_{tm,3} \end{bmatrix} \quad (9b)$$

여기에서 $W_{im,j}$ 는 j 번째 측정에서 i 번 다리의 반력, $W_{tm,j}$ 는 j 번째 측정에서 각 다리의 반력의 합, x_j, y_j 는 j 번째 측정에서 각각 식(6)과 식(7)로 계산된 좌표이며, x_j, y_j 는 아직 가공오차가 결정되지 않았으므로 Lee⁵의 경우에서처럼 고정된 값이 아닌 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 의 함수이다.

피검체의 무게중심은 일정하므로 피검체의 방향에는 관계없이 원점에서부터 무게중심까지의 거리는 일정해야 한다. 이를 식으로 나타내면

$$x_1^2 + y_1^2 = r_m^2, \quad x_2^2 + y_2^2 = r_m^2, \quad x_3^2 + y_3^2 = r_m^2 \quad (10)$$

이다. 이 식에서 $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ 은 모두 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 의 함수이므로 식(10)은 결국 미지수가 세 개($\Delta\theta_2, \Delta\theta_3, r_m$)인 비선형 연립방정식이 된다. 이 비선형 연립방정식을 풀면 가공오차각 $\Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ 및 무게중심까지의 거리 r_m 을 동시에 구할 수 있다. 이렇게 구해진 $\Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ 를 식(1) 또는 식(2)에 대입하면 치구오차와 접촉오차가 보상된 치수들이 구해지고, 이들을 사용하면 식(6)과 식(7)의 모멘트 평형식의 오차는 완전히 제거된다.

2.2 수평방향 마찰오차의 보상법

플랫폼을 세 개의 전자저울 위에 올려놓는 순간 플랫폼의 다리와 전자저울 사이에는 마찰력이 작용하게 된다. 마찰력이 발생하는 가장 큰 원인은 플랫폼의 무게에 의해 세 다리가 삼각형의 도심으로 부터 멀어지려는 경향 때문이다.

Lee⁵는 측정된 피검체에 질량에 대한 모멘트의 관계가 선형임을 실험적으로 보였다. 그러나 직관적으로 피검체의 질량과 모멘트 팔의 관계가 선형이라고 가정하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 최소 두 번의 측정으로 마찰오차를 보정하는 방법을 수식화한다. i 번째 측정에서 얻어진 피검체의 질량을 $W_{tm,i}$, 모멘트 팔을 $r_{m,i}$ 라고 하면 n 번의 측정으로부터 $(W_{tm,1}, r_{m,1}), (W_{tm,2}, r_{m,2}), \dots, (W_{tm,n}, r_{m,n})$ 의 좌표를 얻는다. n 개의 좌표를 적합하는 직선의 방정식을

$$r_m(W_{tm}) = a_0 + a_1 W_{tm} \quad (11)$$

로 놓고, 최소자승법을 이용하여 식(11)의 계수를 다음과 같이 결정할 수 있다.

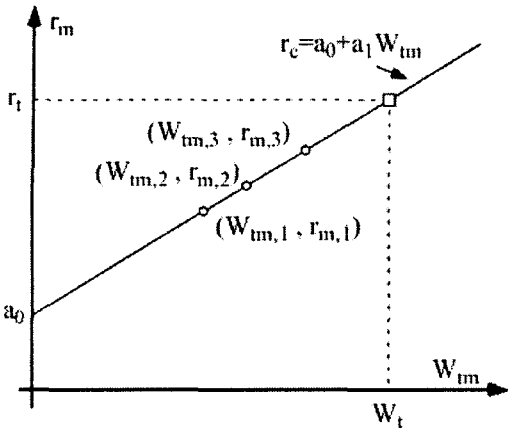


Fig. 3 Calibration of the measured moment arm with the true mass of the specimen

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma 1 & \Sigma W_{tm} \\ \Sigma W_{tm} & \Sigma W_{tm}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma r_m \\ \Sigma M_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

이 식에서 $M_m = W_{tm} r_m$ 이며, 측정된 불평형 모멘트이다. 그러므로 마찰오차가 보정된 모멘트 팔 r_t 는 식(11)에 실제 질량 W_t 를 대입하여 다음과 같이 결정된다.

$$r_t = r_m(W_t) = a_0 + a_1 W_t \quad (13)$$

이 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 원으로 표시된 점은 실제 질량보다 작은 측정값과 계산된 모멘트 팔 나타내며, 사각형으로 표시된 점이 실제 질량 W_t 일 때의 보정된 모멘트팔 r_t 를 나타낸다.

불평형 모멘트 M_m 은 피검체의 질량과 모멘트 팔을 곱하여 얻으므로, 즉 $M_m = r_m W_m$ 이므로 식(11)로부터 측정된 질량과 모멘트의 관계는 다음과 같다.

$$M_m(W_{tm}) = a_0 W_{tm} + a_1 W_{tm}^2 \quad (14)$$

3. 측정 결과 및 분석

이론에 제시한 오차 보상법을 검증하기 위해 0.1mg의 분해능을 가지는 전자저울을 사용하여 실험장치를 제작하였다. 측정장치의 구성은 Lee의 측정장치와 동일하며, 치구인 플랫폼에서 회전중심과 다리 사이의 길이는 $R=80\text{mm}$ 이다. 실험에 사용된 피검체는 5.25인치 하드디스크용 액츄에이터 아암이다.

측정한 반력들을 Table 1에 나타내었다. 각 측정 방향에서의 반력의 합은 모두 16.4802g으로 실험 중에 접촉에 의한 조건은 변하지 않았다고 판단된다. 또한 피검체의 실제 질량은 16.4911g으로 측정되었다. 먼저, Lee의 방법으로 무게중심을 계산하면 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. Fig. 4에서 1번, 2번, 3번점은 각각 피검체의 방향이 0° , 약 120° , 약 240° 일 때 측정된 반력으로 식(6)과 (7)에서 계산된 좌표 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 를 나타낸다. 이 때, 플랫폼의 치수인 R_{1x} , R_{1y} , R_{2x} , R_{2y} , R_{3x} , R_{3y} 는 3차원 형상측정기로 정밀하게(μm 단위) 측정된 고정값을 사용하였다.

이 세 점으로 구성되는 원의 반지름은 회전중심으로부터 무게중심까지의 거리를 나타내며, 원의 중심에 대한 1번 점(피검체 방향 0°)의 상대적인 위치로부터 불평형의 방향이 결정된다. Fig. 4의 결과를 보면, 원의 중심이 원점과 일치하지 않는데, 그 이유는 측정 시 앞에서 언급한 플랫폼의 다리와 하중센서가 접촉할 때 유효 작용중심이 미세하게

Table 1 Three sets of measured data at 0° , 120° , and 240° directions

specimen direction ($^\circ$)	$W_1(\text{g})$	$W_2(\text{g})$	$W_3(\text{g})$
0	5.5242	5.4694	5.4866
약 120	5.5304	5.4783	5.4715
약 240	5.5122	5.4872	5.4808

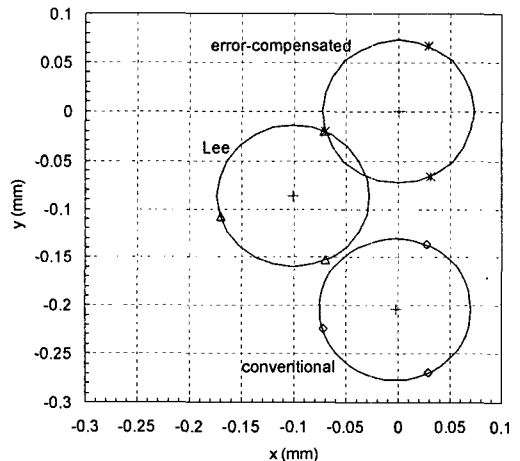


Fig. 4 Graphical comparison of measurement results from the conventional (without correction), Lee, and the error-compensating methods

변하여 결국 플랫폼의 가공오차처럼 작용했기 때문이다. 그러나 계산에 사용한 플랫폼의 형상 치수들은 불평형량 측정 전에 정해진 고정값이므로 이러한 영향을 반영할 수 없다.

본 논문에서 제시한 치수 및 접촉오차 보상 방법은 세 위치에서 측정된 데이터를 이용하여 현재 플랫폼이 놓인 상태에서의 치수오차와 접촉오차를 동시에 모두 구할 수 있다. Table 1의 측정값으로 식(9b)의 하중행렬

$$[W_m] = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} 5.5242 & 5.4694 & 5.4866 \\ 5.5304 & 5.4783 & 5.4715 \\ 5.5122 & 5.4872 & 5.4808 \end{bmatrix}$$

와 식(4b)의 보상을 다리위치행렬

$$[R_c] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -80 \\ 1 & 80 \cos(30^\circ + \Delta\theta_2) & 80 \sin(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ 1 & 80 \cos(150^\circ + \Delta\theta_3) & 80 \sin(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

를 구성하고 이를 (8)식에 대입하면 $x_1(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$, $x_2(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$, $x_3(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$, $y_1(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$, $y_2(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$, $y_3(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$ 가 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 의 함수로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_1(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} 437.552 \cos(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ + 438.928 \cos(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

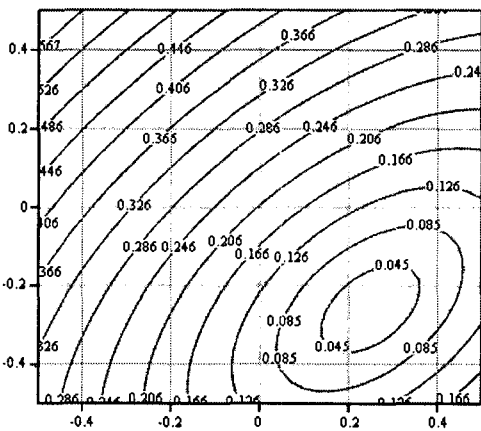


Fig. 5 Relationship between fixture-error angles($\Delta\theta_2, \Delta\theta_3$) and distance from the origin and the center of the circle

$$x_2(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} 438.264 \cos(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ + 437.720 \cos(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$x_3(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} 438.976 \cos(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ + 438.464 \cos(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$y_1(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} -441.936 \\ + 437.552 \sin(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ + 438.928 \sin(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

$$y_2(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \begin{bmatrix} -442.432 \\ + 438.264 \sin(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ + 437.720 \sin(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{bmatrix}$$

Table 2 Measurement results for a 3.5-inch hard disk drive actuator (a) without and (b) with the error-compensating method

method	test #	e_x (mm)	e_y (mm)	r_m (mm)	W_{tm} (g)
(a)	1	-0.0025	-0.2035	0.07283415	16.4802
	2	0.0999	-0.1191	0.07659507	16.4845
	3	0.0665	-0.1337	0.07029867	16.4766
	4	-0.0030	-0.2083	0.07342137	16.4811
	5	-0.0086	-0.2223	0.07532557	16.4832
(b)	1	0	0	0.07287228	16.4802
	2	0	0	0.07659364	16.4845
	3	0	0	0.07033948	16.4766
	4	0	0	0.07345204	16.4811
	5	0	0	0.07530212	16.4832

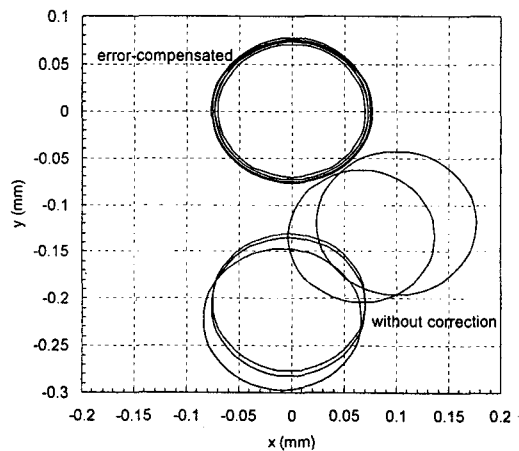
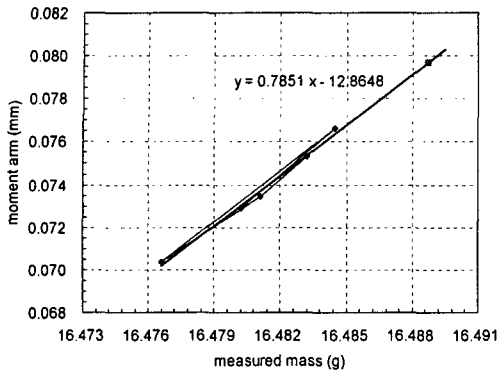
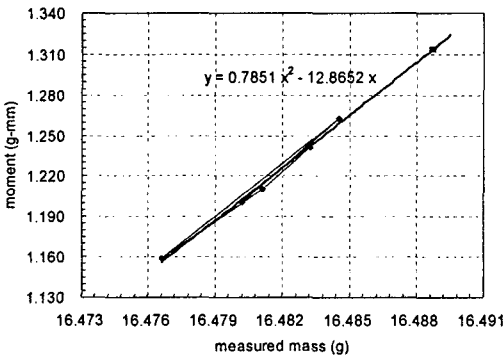


Fig. 6 Graphical representation of the 5 test results using the error-compensating method with those using the conventional method without error-correction



(a)



(b)

Fig. 7 Relations between measured mass and unbalance properties : (a) measured mass vs. moment arms and (b) measured mass vs. moments

$$y_3(\Delta\theta_2, \Delta\theta_3) = \frac{1}{16.4802} \left[\begin{array}{l} -440.976 \\ +438.976 \sin(30^\circ + \Delta\theta_2) \\ +438.464 \sin(150^\circ + \Delta\theta_3) \end{array} \right]$$

이들을 식(10)에 대입하면 미지수가 $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_3$, r_c 인 비선형 연립방정식이 구성된다. 연립방정식을 수치적인 방법으로 풀면 $\Delta\theta_2 = 0.2485948^\circ$, $\Delta\theta_3 = -0.258307388^\circ$, $r_m = 0.07287228mm$ 이다. Fig. 5에 가공오차각 $\Delta\theta_2$ 와 $\Delta\theta_3$ 의 변화에 따른 원의 중심과 원점 사이의 거리 $e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$ 와의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 $\Delta\theta_2 = 0.2485948^\circ$, $\Delta\theta_3 = -0.258307388^\circ$ 일 때 $e = 0$ 로 원의 중심이 원점과 일치함을 알 수 있다.

동일한 피검체에 대하여 다섯 번의 측정 결과를 Table 2와 Fig. 6에 나타내었다. 치구오차 및 접촉오

차를 보상하지 않은 경우와 본 논문에서 제시한 보상법을 사용한 결과를 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 보상법을 적용한 후의 원의 중심은 정확히 원점과 일치함을 알 수 있다. 이 결과는 측정용 치구인 플랫폼의 가공오차와 측정 시의 접촉오차를 완전히 제거한 것으로, 무게 중심 계산을 위한 모멘트 평형식인 식(6)과 식(7)이 정확히 적용될 수 있음을 보여준다.

Fig. 6에서 치수오차가 보상된 원을 살펴보면, 중심은 원점에서 일치하지만 반지름이 모두 다른데, 그 이유는 앞에서 언급한 마찰력의 영향으로 피검체의 질량이 실제보다 작게 측정되었기 때문이다. Fig. 7에 측정된 피검체의 질량에 대한 계산된 무게중심까지의 모멘트 팔의 관계를 나타내었다. 측정된 질량이 실제 질량에 가까워질수록 모멘트 팔의 크기가 증가한다. Table 2의 다섯 번의 측정값을 식(11), 식(12)에 대입하면 Fig. 7(a)에 나타낸 선형 추세선의 방정식을 얻는다. 실제 질량 $W_t = 16.4887g$ 을 식(13)에 대입하면 마찰오차가 보정된 모멘트 팔의 크기 $r_t = 0.079670401mm$ 를 얻는다.

측정된 질량에 대한 불평형 모멘트의 관계는 식(14)와 같으며, 이 관계를 Fig. 7(b)에 나타내었다. Fig. 7(b)의 비선형 추세선의 방정식은 5개의 측정점을 적합한다는 조건 이외에 측정된 질량이 0일 때 모멘트도 0이라는 조건을 사용하였다. 그러므로 피검체의 불평형 모멘트는 Fig. 7(b)의 추세선의 방정식으로부터 $M_U = 1.313661343 g\cdot mm$ 로 결정된다. 이 값은 위의 모멘트 팔의 크기 r_t 에 피검체의 실제 질량을 곱하여 ($M_U = W_t r_t$) 얻어지는 값과 동일하다.

본 연구에서 플랫폼의 중심-다리 거리를 일정하다고 가정하였는데, 세 다리까지의 가공 후 거리는 물론 모두 다르며, 80mm를 중심으로 일정한 오차 범위 내에 있다. 일반적인 가공오차의 범위인 $80mm \pm 10\mu m$ 에서 이 $\pm 10\mu m$ 의 편차가 불평형 모멘트에 미치는 영향은 약 $\pm 0.00015 g\cdot mm$ 이며, 이는 위에서 결정된 $1.313661343 g\cdot mm$ 의 모멘트값의 0.0114% 수준이다. 그러므로 플랫폼의 중심-다리의 거리 편차의 영향은 무시할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 정밀한 소형 회전부품의 불평형량인 불평형 모멘트와 무게중심을 정밀하게 측정하

기 위한 Lee⁵의 방법에서 측정값의 정밀도, 반복정밀도를 향상시키기 위한 오차 보상법을 개발하여 측정 과정에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 측정 실험을 통하여 본 연구의 보상법을 적용하여 분석한 결과, 가공오차와 접촉오차를 완전하게 보상할 수 있으며, 이는 불평형량들을 구하기 위한 평형방정식의 치수 오차(각도 오차)를 완전히 제거한다.
- 2) 마찰오차를 구하기 위한 Lee의 방법을 일반화하여 적용하였다. 여기에서 측정된 질량과 모멘트의 관계는 선형이 아닌 비선형으로 나타났다. 마찰오차를 더욱 정밀하게 보정하기 위해서는 마찰력과 측정 질량의 역학적 관계에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 2006학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. Boynton, R. and Wiener, K., "Mass Properties Measurement Handbook," 57th Annual Conference of the Society of Allied Weigh Engineers, PAPER No. 2444, 1998.
2. 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.
3. Boynton, R. and Wiener, K., "How to Calculate Mass Properties, An Engineer's Practical Guide," Space Electronics Inc., 2000.
4. Boynton, R., "Precise Measurement of Mass," 60th Annual Conference of the Society of Allied Weight Engineers, PAPER No. 3147, 2001.
5. Lee, S. P., "Precise Measurement of Unbalance Moment Using 3-Point Weighing Method," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 6, pp. 57-63, 2006.