전자기력 보상방식의 힘 측정을 위한 평행도 오차 보상

최인묵*(한국표준과학연구원 질량힘), 우삼용(한국표준과학연구원 질량힘), 김부식(한국표준과학연구원 질량힘)

Parallelism Error Compensation for Force Measurement by Electromagnetic Compensation

I. M. Choi (Mass and Force, KRISS), S. Y. Woo (Mass and Force, KRISS) and B. S. Kim (Mass and Force, KRISS)

ABSTRACT

For micro-weighing, null balance method is widely used in the precision industrial fields, such as biomedicine, semiconductor, chemistry and so on. In order to obtain high resolution and large measurement range simultaneously, the mechanism should be analyzed and optimized. However, large measurement error can be generated according to the mass loading position and this error is called as a corner loading error. The corner loading error is caused by the parallelism error of a Roberval mechanism used to minimize it. The corner loading error is one of the most dominant error sources that should be removed. It is possible to design that the mechanism has no corner loading error theoretically, but the mechanism of the micro weighing device is very difficult to be realized as original design due to assembling and manufacturing error. For the required specification of the device, the precise manufacturing technique under a few μm is required for the realization of the design. In this paper, the effects of the parallelism error are analyzed by using Lagrange method and verified by experiment. Also, the compensation mechanism is proposed and the corner loading error is reduced by restoring the parallelism.

Key Words : Null balance(영위법), Force(힘), Measurement(측정), Repeatability(반복능), Parallel spring(평행 스프링), Parallelism(평행도)

1. 서론

미세 중량 측정은 유전공학, 의학, 화학, 생명공학, 반도체 공정 등 많은 첨단산업 분야에 필수적으로 사용되고 있으며 더욱 높은 정밀도의 측정성능이 요구되고 있다.

전자기력 보상방식에 의한 미세 중량 측정기술은 상용화된 측정방식 중에서 로드셀 방식의 한계를 극복하기 위한 가장 정밀한 방법으로 1/5,000,000 이상의 분해능 대 측정범위의 비를 구현하고 있다. 이러한 영위법은 물체가 중량팬(weighing pan) 위에 올려져 기구부의 변위가 발생하게 되면 이를 측정하여 변위에 비례하는 반대 힘을 발생시켜 변위가 발생하지 못하도록 하는 방식이다. 발생힘이 로렌츠 힘(Lorentz force)일 경우 물체의 중량에비례하는 전류를 측정함으로써 힘을 측정할 수 있다. 이때 물체가 중량팬 위에 올려지는 위치에 따라 측정결과가 변하는 편심오차(corner loading error)가 매우 중요하게 되며 요구되는 성능중에서 분해능과 측정범위등과 함께 만족되어야 하는 중요한 요소중의 하나이다. 물체가 올려지는 위치의 변화는 시스템에 중력에 의한 수직힘 이외에 모멘트(moment)와 비틀림힘(torsion)을 추가적으로 발생시키며 이 성분들은 정밀 측정에서 오차의 큰 원인이 되고 있다. 이러한 추가적인 모멘트나 비틀림힘에 의해 발생되는 편심오차는 메커니즘 해석을 통해 설계시에 제거될 수 있지만 가공 및 조립 오차에 의해 항상 존재하게 되며 이에 대한 새로운 접근이 필요하게 된다.

미세 중량측정을 위한 메커니즘의 설계는 수직한 힘에 의한 민감도를 증가시키고 가해지는 힘의 위치에 따라 발생하는 모멘트와 비틀림힘에 의한

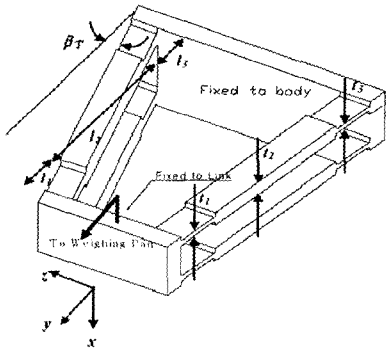


Fig. 1 Modified parallel spring

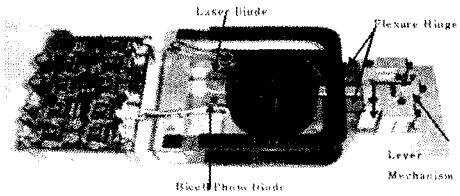


Fig. 2 Micro weighing device picture

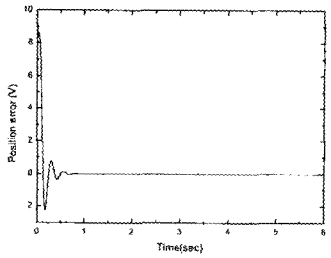
변형을 최소화시키는 방향으로 이루어져야 한다. 이러한 설계목적을 위해 Fig.1 과 같은 미소 힘 측정용 평행스프링이 사용된다. 로버발(Roberval) 메커니즘으로 알려진 이러한 평행스프링은 모멘트와 비틀림힘에 의한 변형이 거의 일어나지 않지만 수백만분의 일의 측정능력을 요구하는 시스템에서는 그 영향이 매우 크게 나타난다. 물체가 올려지는 위치 변화에 의한 추가적인 모멘트와 비틀림힘의 영향을 줄이기 위해 평행스프링 메커니즘에서는 빔의 형태 변화를 이용한다. 우선 빔의 두께를 변화시켜 모멘트에 의한 영향을 최소화하며, 빔을 안쪽으로 기울여 비틀림힘에 의한 영향을 최소화하게 된다.

우수한 분해능을 유지하면서 편심오차를 최소화하기 위한 선행연구를 수행하였다.[1)-2)]

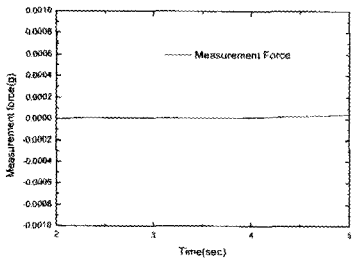
본 연구에서는 6 축의 변위와 힘에 대한 해석이 용이한 라그랑지법을 이용하여 1 단 증폭 메커니즘과 평행스프링이 결합된 기구에 대해 설계를 수행하고 시스템을 제작하였다. 이때 발생되는 편심오차를 분석하고 이를 보상하기 위한 구조를 제안하여 제작 및 조립오차에 의한 영향을 최소화하였다.[3)]

2. 시스템 제작 및 특성실험

Fig.2 는 평행스프링과 1 단 증폭 메카니즘 그리고 전자기부, 센서부로 구성된 시스템을 보여주고 있다. 빔 및 구동부들은 휨힌지에 나사에 의해 체결되고 대부분의 변위는 휨힌지에서 일어난다. 많은 체결부위를 갖기 때문에 특별한 지그없이 조립하게 되면 조립오차가 많이 발생하게 되고 조립 작업이 매우 어렵게 된다.



(a) Sensor error



(b) Force measurement error

Fig. 3 Control performance

영위법에 관한 제어 연구는 메커니즘 설계 및 해석과 관련된 연구에 비해 비교적 많이 수행되었다.[4)-5)] 이러한 연구 중에서 가장 일반적으로 적용되는 디지털 PID 제어를 적용하여 힘을 측정하였다. Fig.3 은 시스템 제어결과를 보여주고 있다. F1 급의 5 g 표준 분동에 의해 힘을 발생시켰을 때 얻어진 센서의 신호와 이를 질량 오차값으로 환산한 결과를 보여주고 있다.

Fig.3 의 결과에서 보여주듯이 ±0.1 mg 이하의 우수한 분해능을 보여주고 있으며 이의 반복특성 또한 우수하였다. 위치 반복능 특성 실험을 하기 위해 힘의 위치를 변화시키면서 측정하였다.

이때 분해능과 함께 중요한 항목이 물체의 위치에 따른 측정 반복능이다. Fig.4 는 100 g 질량의 물체를 사용하였을 경우의 위치 반복능 실험 결과를 보여 주고 있다. 중량팬에 가해지는 힘의 위치를 변화시키기 위해 물체의 위치를 y 축과 z 축 방향으로 이동시키면서 측정한 결과의 오차이다. y 축과 z 축 반복능 모두 중량팬의 중심을 기준으로 증감하는 직선형태의 오차를 보여 주고 있다. 재조립하여 측정하더라도 크기의 차이는 있지만 같은 경향을 보여준다.

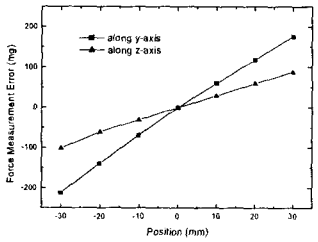


Fig. 4 Corner loading error before compensation

이것은 평행스프링의 평행도 오차에 의한 영향으로 이에 대한 해석 및 보상이 필요하다.

3. 평행도 해석 및 고찰

Fig.4 에서 얻어진 결과를 해석하기 위해 시스템 해석시 사용된 라그랑지 법을 적용하였다. 이러한 위치 반복능 특성은 평행스프링 빔의 평행도와 연관이 있다. 고정단에 연결되는 네개의 평행스프링 빔들은 가공 및 조립오차에 의해 더 이상 평행관계에 있지 못하게 되고, 이에 대한 영향을 해석할 필요가 있다.

조립후의 임의의 평행스프링 빔의 수직 위치는 Fig.5 의 세가지 형태의 조합으로 표현될 수 있다. 수평 평행도 또한 같은 방식으로 표현될 수 있지만 위치 반복능 특성에 영향을 미치지 않기 때문에 해석에서는 제외하였다. 평행스프링 빔의 수직 오프셋(offset) δ_1, δ_2, δ_3에 대한 레버 끝단에서의 수직 힘에 대한 민감도 변화(δ_P), 모멘트에 대한 변화(δ_M), 비틀림힘에 대한 변화(δ_T)등의 영향으로부터 위치 반복능을 해석할 수 있다.

Fig.6 은 Fig.5 의 세가지 오프셋에 대한 해석결과를 보여주고 있다. Fig.6(a)는 1 N 의 수직 힘을 가하였을 경우 세가지 형태의 ±0.1 mm 오프셋에 대한 레버 끝단의 변위를 보여주고 있다. 세가지 형태의 오프셋이 발생하더라도 수직 힘 민감도에 대한 영향은 거의 없다. 마찬가지로, Fig.6(b)와 (c)는 세가지 형태의 오프셋에 대해 각각 0.04 N·m 모멘트와 비틀림힘을 가했을 경우 레버끝단의 변위를 나타낸다. 모멘트에 대해서는 오프셋 δ_1 에 대해 크게 증감하며, 비틀림힘에 대해서는 오프셋량 δ_2 에 대해 변화를 보여주고 있다. δ_3의 오프셋 효과는 거의 없다.

이것은 Fig.5 의 실험에서 얻어진 결과에 대한 효과와 일치하고 있다. 특히 Fig.6(b)에서 보여지듯이 미세한 δ_1 오프셋 오차가 발생하더라도 모멘트 힘에 의한 매우 큰 y 축 위치 반복능 오차가 발생

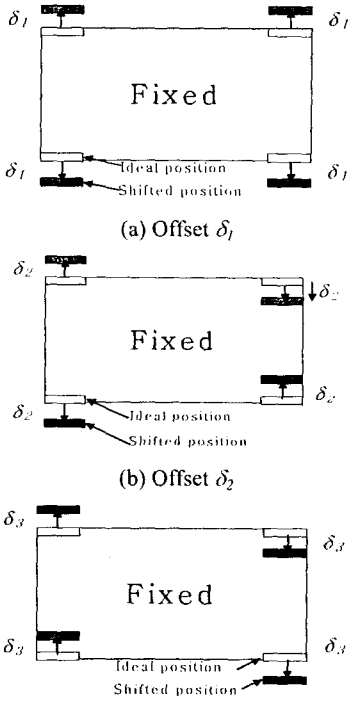
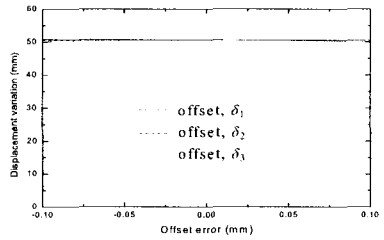


Fig. 5 Beam offsets

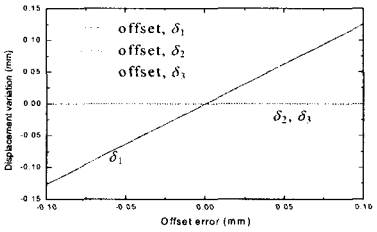
함을 알 수 있다. 그러나, δ_1 을 μm 수준으로 매우 정밀하게 조절할 수 있다면 설계에서 얻을 수 없었던 모멘트에 의한 영향을 0 으로 만들 수도 있다. 비틀림 힘에 대한 편심오차는 δ_2 오프셋에 의한 것이다. δ_1 의 영향과 마찬가지로 정밀하게 오프셋을 제거할 수 있다면 비틀림에 의한 영향을 0 으로 만들 수 있다. 이와 같이 빔사이의 완전한 평행관계를 복원하지 않더라도, δ_1 과 δ_2 를 제거하면 위치 반복능을 회복할 수 있다. 이러한 두 오프셋을 제거하기 위한 구조와 관련되어 빔의 상대거리를 조절하기 위한 특허들이 발표되었다.[6)-8)] 그러나 중요한 것은 빔의 위치가 μm 수준으로 조절될 수 있도록 하는 것이 매우 중요하기 때문에 적합한 구조의 제작이 필요하다.

본 연구에서는 평행스프링 빔의 수직 평행도 오차를 제거하기 위해 Fig.7 과 같은 구조를 제작하여 위치 반복능 실험을 수행하였다. 임의의 평행스프링 빔의 오프셋에 대해 완벽한 평행도를 복원하지는 못하지만 δ_1 과 δ_2 의 효과를 제거하여 δ_3 의 오프셋만 남도록 조절하는 것이 가능하다.

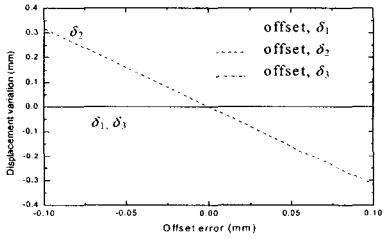
①번 나사와 ②번 나사를 동시에 같은 방향으로 회전하게 되면 δ_1 오프셋을 조절하는 것이 가능하고, 서로 반대 방향으로 회전시키면 δ_2 오프셋의 조



(a) Displacement by the vertical force



(b) Displacement by the moment



(c) Displacement by the torsion

Fig. 6 Analysis results according to beam offset

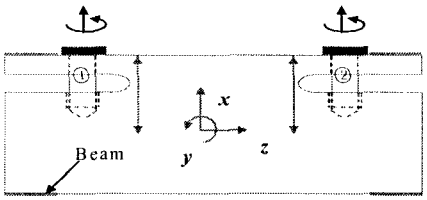


Fig. 7 Parallelism compensation mechanism

절이 가능하다.

Fig.8 은 평행도 보상구조를 통해 빔의 평행도를 복원한 후 위치반복능 특성에 대한 실험 결과이다. 결과에서 보여지는 것과 같이 빔의 평행도가 임의의 위치에 있을 경우에 비해 힘의 위치에 따른 효과가 ±2 mg 정도로 크게 감소하였음을 볼 수 있다. Fig.7 의 구조를 개선하여 빔의 평행도를 더욱 정밀하게 조절할 수 있다면 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

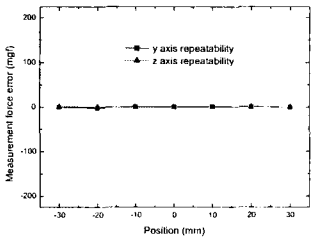


Fig. 8 Corner loading error after compensation

4. 결론

본 연구에서는 최적설계를 통해 미소 중량 측정 장치를 설계한 후 제작하였다. 제작된 시스템이 갖는 가공 및 조립오차에 의한 위치 반복능에 대하여 해석하고 빔의 평행도에 의한 영향을 실험적으로 보여주었다. 우수한 위치 반복능을 위해서는 빔의 평행도가 매우 중요하며 이를 조절하기 위한 메커니즘을 적용해야 할 필요가 있다. 빔을 조절할 별도의 메커니즘이 없다면 μm 수준의 가공정밀도와 조립 정밀도가 필요하게 된다.

참고문헌

1. Choi, I.M., Choi, D.J., and Kim, S.H., "The modeling and design of mechanism for micro-force measurement," Meas. Sci. Technol.,Vol.12, pp.1270-1278, 2001
2. 최인묵, 우삼용, 김부식, 김수현, "영위법을 이용한 미소중량 측정 장치의 기구설계," 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권, 제 1 호, pp. 183-193, 2003.
3. Ryu, J.W., Lee, S.Q., Kweon, D.G., and Moon, K.S., "Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism," Mechatronics, Vol. 9, pp.657-674, 1999
4. Maier,R., and Schmidt,G., "Integrated digital control and filtering for an electrodynamically compensated weighcell," IEEE transactions on Instrumentation and Measurement Vol.38, pp,998-1003, 1989
5. Choi, I.M., Choi, D.J., and Kim, S.H., "Double force compensation method to enhance the performance of a null balance force sensor," Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41, pp.3987-3993, 2002
6. US Patent 4,732,228
7. US Patent 4,723,615
8. US Patent 4,653,600