

## 미소 힘 측정을 위한 이중 전자기힘 보상방법

최인묵\*, 우삼용\*, 김부식\*, 김수현\*\*

### Double Electro-Magnetic Force Compensation Method for the Micro Force Measurement

In-Mook Choi\*, Sam-Yong Woo\*, Boo-Shik Kim\* and Soo Hyun Kim\*\*

#### ABSTRACT

Micro force measurement is required more frequently for a precision manufacturing and investment in fields of precision industries such as semiconductor, chemistry and biology, and so forth. Null balance method has been introduced as an alternative of a loadcell. Loadcells have advantages in aspects of low cost and easy manufacturing, but have also the limitation in resolution and sensitivity to environment variations. In this paper, null balance method is explained and the dominant parameters related to system performances are mentioned. Null position sensor, electromagnetic system and controller are investigated. Also, the characteristic experiment is carried out in order to estimate the resolution and the measurement range. In order to overcome the limitation by the drift of position sensor and the performance of controller, double electromagnetic force compensation method is proposed and experimented. After controlling and filtering, the resolution under  $\pm 1\text{mg}$  and measurement range over 300g could be obtained.

**Key Words** : Force Measurement(힘 측정), Loadcell(로드셀), Null balance method(영위법), Electro-magnetic force compensation(전자기힘 보상), Resolution(분해능)

#### 기호설명

$B$  = Magnetic flux density  
 $R$  = Precision resistor  
 $\mathcal{P}$  = Permeance  
 $\mathcal{R}$  = Reluctance  
 $\mathcal{F}$  = Magneto motive force  
 $\mu$  = Permeability  
 $\phi$  = Magnetic flux  
 $L_g$  = Lever gain  
 $K_f$  = Mechanical sensitivity coefficient

$C(s)$  = Controller function  
 $K_s$  = Sensor gain  
 $G_M(s)$  = Mechanical transfer function  
 $F$  = Force  
 $V$  = Voltage

#### 1. 서론

미소 힘 측정은 첨단산업 분야에 필수적으로 사용되는 것으로서, 유전공학, 의학, 화학, 생명공학 등 많은 분야에서 미소 힘 및 중량 측정의 높

2002년 7월 10일 접수  
\* 한국표준과학연구원  
\*\* 한국과학기술원

은 측정 분해능 요구되고 있다.

미소 힘 측정 시스템은 분해능과 측정방법에 따라 크게 로드셀(Loadcell) 방식과 영위법(Null balance method) 방식으로 나눌 수 있다. 로드셀은 외부 힘에 의해 발생한 기계적 변형을 전기적 신호로 변환시켜 측정하는 방법으로 분해능은 다소 떨어지지만 저가이며 제작이 쉽다. 로드셀은 자체의 기계적 변형에 의한 비선형성을 갖고, 주위환경의 변화에 민감하기 때문에 특성 해석을 통해 정밀도를 향상시키기 어렵다. 이에 비해 큰 힘을 측정하기는 부적합하지만 높은 분해능을 얻을 수 있기 때문에 영위법이 미소 힘 측정에 널리 이용되고 있다.

영위법은 외부 힘이 가해져 메커니즘의 변위가 발생하면, 센서가 이를 감지하고 코일에 전류를 가하여 반대의 로렌츠 힘(Lorentz force)을 발생시키게 된다. 센서의 변위가 0 이 될 때까지 전류를 가하여 기구부가 항상 영점의 위치에 있도록 제어하게 되면 가해지는 입력 힘과 코일에 가해지는 전류가 비례 관계를 갖게 된다. 이러한 전자기 힘 보상을 이용한 영위법은 우수한 선형성을 갖고 과중량에 의한 영점의 이동에 무관하다는 장점이 있지만 다른 정밀 측정장비와 마찬가지로 온도문제에 민감하고 동적 힘 측정이 어려운 단점이 있다.<sup>1),2)</sup>

이외에도 힘 측정을 위한 여러 가지 방법들이 소개되고 있지만 미소 힘 측정에는 부적합하다.<sup>3),5)</sup>

영위법을 이용한 미소중량 측정 장치의 성능 향상을 위해서는 기계적 특성이 매우 중요하다. 영위법에서 적용되는 제어성능과 필터(Filter)들은 기계적 시스템에 의해 결정된 특성들을 감소시켜 시스템의 성능을 저하시키게 되는데, 설계된 기계적 성능을 최대한 활용하기 위해 본 논문에서 제안된 이중 힘 보상 방법이 이용될 수 있다. 본 논문은 영위법에 의한 미소 힘 측정에 관련된 여러 특성들을 분석하고 이를 향상시키기 위해 이중 힘 보상시스템을 제안하여 적용하고자 한다.

2 장에서는 영위법을 이용한 힘 측정에 대한 일반적인 원리 및 구성요소의 역할 등에 대해 설명한다. 3 장에서는 미소 힘 측정 시스템의 성능을 결정하는 특성들을 분석하고 설계한다. 4 장에서는 이중 힘 보상시스템에 대해 제시하고 실험 결과를 통해 검증한다. 5 장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

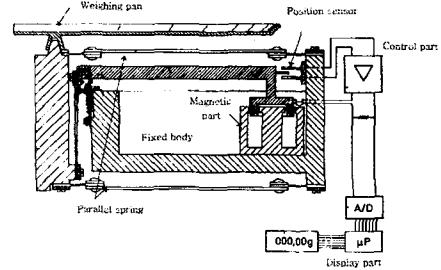


Fig. 1 Conventional micro-weighing device

## 2. 힘 측정 시스템

그림 1 은 기존의 미소 중량 측정장치의 개략도이다. 물체가 중량 팬(Weighing pan)에 올려져 힘이 수직으로 발생하면 연결된 로버발(Roberval) 메커니즘으로 불리는 평행스프링에 의해 수직 변위가 발생하며, 수직 변위는 변위 확대 메커니즘에 전달되어 코일부를 상승시킨다. 이때 코일 끝단에서의 변위를 고감도 센서에서 정밀하게 측정한 후 제어부에 전달하면, 코일에 전류가 가해지고 로렌츠 힘에 의해 반대 방향의 힘이 발생하여 코일부가 상승하지 못하도록 하게 된다. 변위센서에서 얻어지는 오차전압이 0 이 될 때까지 제어하게 되면 코일에 가해지는 전류와 외부 힘과는 비례관계에 있기 때문에 미소 힘을 측정할 수 있다.

영위법의 특성은 기구부를 항상 0 점에 위치시키는 것이기 때문에 위치제어 특성에 많은 연관성을 갖는다. 그림 1 에 보여지는 미소 중량 측정 장치는 평행스프링과 변위확대기구의 메커니즘부, 전자기부, 위치 센서부, 제어 및 필터부로 나눌 수 있다. 각 부분별로 특성을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

우선 평행스프링은 힘이 가해지는 위치, 다시 말해 힘이 중량팬의 중심으로부터 벗어남 오차(off center error)와 관계가 있다. 입력 힘이 중량팬의 중앙에 가해지는 경우와 끝단(Edge)에 가해지는 경우 센서에서 얻어지는 변위는 다르게 되고 이러한 차이는 곧 시스템의 측정결과 오차를 발생시킨다. 일반적으로 평행스프링은 이러한 힘의 위치 변화에 대해 변위가 크게 다르지 않지만, 정밀한 힘 측정에서는 매우 큰 오차 요인이 된다.

변위확대 메커니즘은 시스템의 분해능 및 측정 범위의 증가와 관련이 있다. 분해능보다 더 큰

질량의 변화가 있을 경우 센서에서 변화를 감지할 수 있어야 하기 때문에, 변위확대 메커니즘을 통해 평행스프링의 작은 변위를 확대시켜 분해능을 향상시키게 된다. 또한 같은 보상 힘에 대해 레버비(Lever ratio)를 증가시키면 측정 범위가 향상된다. 시스템의 최대 보상 힘은 레버비에 비례하기 때문이다.

전자기부는 보상 힘 설계와 직접적인 관련이 있기 때문에 자속의 포화(Saturation)가 발생하지 않는 범위에서 코일이 힘을 받는 부분에서의 자속 밀도를 최대화 시켜야 한다. 코일 권선 수는 측정 힘의 보상 민감도와 관련이 있게 된다. 코일 권선 수를 증가시키면 큰 로렌츠 힘을 발생시켜 측정범위는 향상시키게 되지만 상대적으로 분해능은 저하되며, 반대로 권선 수를 감소시키면 측정범위는 감소하지만 분해능은 향상된다.

위치 센서부는 작은 힘 변화에 의한 변위를 감지해야 하므로 민감할수록 분해능을 향상시킬 수 있다. 같은 변위가 발생하더라도 광 센서에서 큰 출력을 주게 되면 분해능을 향상시킬 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 2 분할 포토다이오드(Photo Diode)와 레이저 다이오드(Laser Diode)를 이용하여 광 센서의 민감도를 향상시켰다.

제어는 적용이 쉽고 성능이 비교적 우수한 PID (Proportional-Integral-Derivative) 제어를 적용한다. 정상상태오차(Steady state error)가 없어야 하기 때문에 적분기능(Integral action)이 반드시 포함되어야 하며, 코일에 가해지는 전류를 측정할 때 포함된 잡음을 필터를 통해 제거해야만 한다. 정상상태에서의 값이 중요하기 때문에 차단주파수(Cutoff frequency)가 아주 낮은 저역 필터(Low Pass Filter)를 제어루프 밖에서 사용한다.

위에 설명된 설계 요소들은 전체 시스템의 특성에 민감하게 영향을 주게 되며 이중에서 메커니즘부의 특성이 가장 중요하다. 메커니즘부가 요구 사항을 충족시키지 못하면 제어나 잡음제거가 우수하더라도 시스템의 성능을 향상시키는 것은 불가능하다. 본 논문은 메커니즘부에 의해 구현된 시스템 특성을 전자기부, 위치 센서부 및 제어부의 관점에서 분석한다. 이러한 인자들에 의해 감소될 수 있는 시스템 특성을 향상시키기 위해 이중 힘 보상시스템에 대해 제안하고 실험을 통해 이의 타당성을 검증한다.

### 3. 시스템 특성

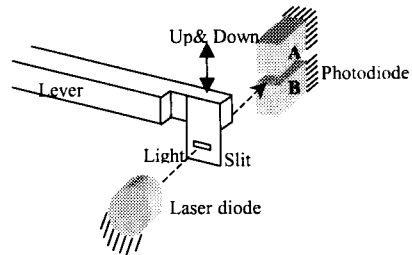


Fig. 2 Position sensor used in the force sensing system

#### 3.1 위치 센서와 전자기부설계

영위법에서 사용되는 위치센서는 측정 범위보다 분해능에 초점을 맞추어 설계해야 한다. 미세한 힘의 변화를 감지할 수 있어야 하기 때문에 센서의 분해능은 힘 측정시스템의 분해능에 직접적으로 연관되기 때문이다. 측정범위는 좁지만 분해능이 우수한 갭(Gap)센서와 광학센서가 사용될 수 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같은 이분할(Bicell) PD와 LD로 구성된 광학센서를 구축하였다. 입력 힘의 변화에 의해 레버가 회전을 하게 되면, 슬릿(Slit)의 상하 변위가 발생하게 되고 LD에서 각각의 PD에 도달하는 광량의 차이가 발생하게 된다. 이때 두개의 PD에서 발생하는 전압차를 이용하여 변위를 측정하게 된다.

이러한 위치센서로 정밀한 변위를 측정하기 위해서는 LD에서 발생하는 빔의 세기(Intensity) 변화에 의한 드리프트(Drift) 문제와 빔의 확산(Diffusion)에 의한 2차측 움직임(Parasitic motion)이 감지되는 문제를 해결해야 한다.

LD에서 발생하는 빔의 세기변화에 의한 드리프트 문제는 신호의 정상화(normalization)에 의해 해결될 수 있다. 단순히 전압의 차에 의해 변위를 감지하는 것이 아니라 식 (1)과 같이 정상화 후 신호를 증폭하여 사용하게 되면 드리프트 문제를 해결할 수 있다.

$$V_s = 10 \frac{V_A - V_B}{V_A + V_B} \quad (1)$$

또한 빔의 확산에 의해 슬릿이 이동한 상태에서 2차측 움직임이 발생하면 광량의 차이에 의해 오차가 발생할 수 있게 되는데 이것은 시준렌즈

(Collimating Lens)를 통해 빔을 평행하게 만듦으로써 해결할 수 있다.

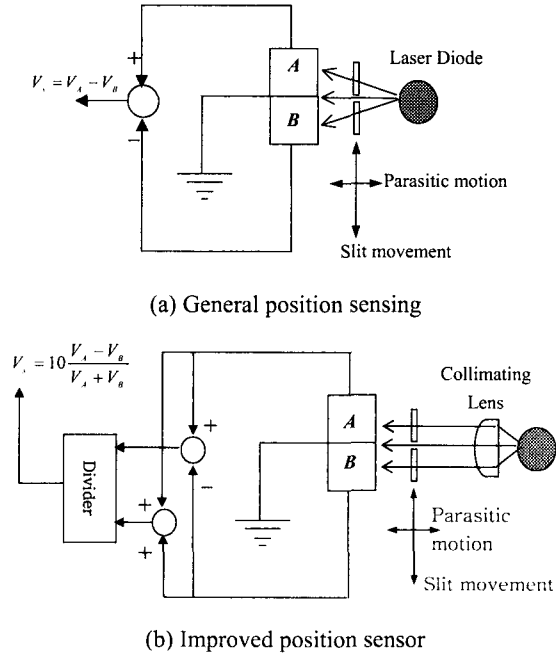


Fig. 3 Normalization and collimating

발광부와 수광부의 사이의 거리를 감소시키며 안정화된 LD 를 사용하게 되면 더욱 안정된 위치 감지를 할 수 있다.

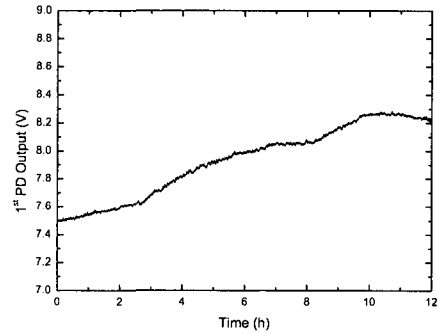
그림 3 은 이러한 특성들을 고려한 위치센서의 개략도이다. 그림 4 는 외부 입력이 없는 상태에서 정상화 회로를 사용했을 경우의 드리프트가 크게 감소하는 효과를 보여주고 있다. 그림 4(a)는 하나의 PD 의 출력이 LD 의 세기변화 및 주위 환경 변화에 의해 민감함을 보여주고 있으며 그림 4(b)는 이러한 출력의 변화가 정상화 회로를 통해 크게 개선될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 5 는 시스템의 기계적 민감도 (Mechanical sensitivity) 실험 결과이다. 외부 입력 힘에 의한 변위발생에 대해 위치센서의 출력이 클수록 분해능을 향상시킬 수 있다. 민감도가 3.395 V/g 이므로 위치센서에서 0.3 mV 의 전압출력 변화를 감지하게 되면 약 0.1 mg 의 분해능이 예측된다.

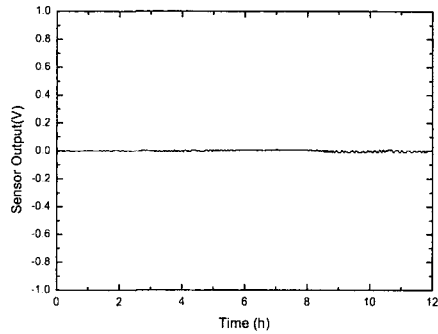
전자기부는 시스템의 측정범위를 크게 하기 위한 설계에 필요하다. 입력 힘과 보상 힘의 관계는 다음 식과 같다.

$$F_i = L_g F_c = L_g B l i_c = L_g \frac{B l}{R} V_c = K_f V_c \quad (2)$$

여기서  $F_c$  는 코일이 발생시키는 출력 힘이고,  $B$  는 자속밀도,  $l$  은 힘을 받는 코일의 유효길이, 그리고  $V_c$  는 코일에 가해지는 입력전압이다.  $L_g$  는 기계부의 증폭 비인 레버이득이 된다.



(a) One PD Output



(b) Normalization circuit effect

Fig. 4 Drift characteristics for no input force change

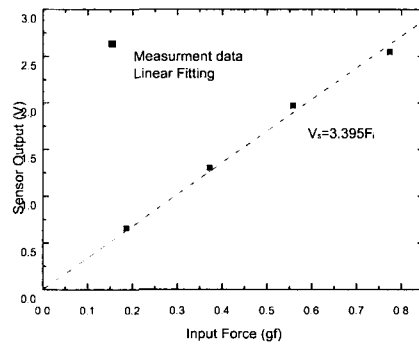


Fig. 5 Mechanical Sensitivity

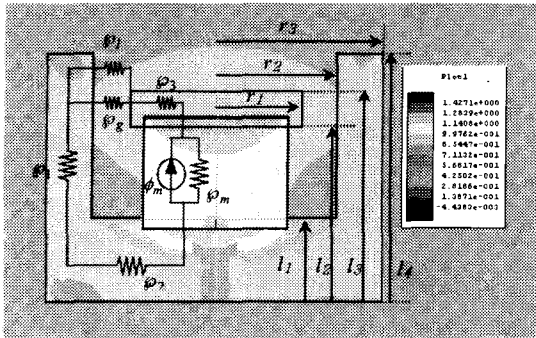


Fig. 6 Magnetic flux distribution by MAXWELL

코일에 가해지는 전압은 열 발생문제 등으로 5 V 로 제한된다. 제한된 전압에서 큰 힘을 보상하기 위해서는 기계부의 레버이득을 증가시키거나 전자기력을 증가시키도록 설계되어야 한다. 자속 밀도  $B$  를 크게 설계 하기 위해서 투자도법 (Permeance Method)을 사용할 수 있다.

투자도법은 전기장 해석과 유사한 방법으로 전자기부 설계시 해석적 접근이 가능하다. 자기장에서 성립되는 다음 식을 이용한다.

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{R}\phi \quad (3)$$

여기에서  $\mathfrak{F}$  는 기자력(Magnetomotive force)이고,  $\mathfrak{R}$ 은 자기저항(Reluctance)이며,  $\phi$ 는 자속(Magnetic flux)을 나타낸다.<sup>6)</sup>그림 6 은 전자기 해석프로그램인 MAXWELL 을 이용한 자속의 분포도와 코일이 위치하는 간극에서의 자속 밀도 해석 결과를 보여 주고 있다.

그림 6 의 자기부 치수들의 민감도 분석을 해 보면 자속 밀도는 코일이 위치하는 갭의 간극 및 자석의 세기를 결정하는 자석의 두께 및 반경에 지배적인 영향을 받는다. 퍼미언스법으로 코일 및 전체 시스템의 크기를 고려하여 설정한 후 자속 밀도를 구한 결과 0.25 T 였다. 이때 MAXWELL 을 이용한 간극에서의 평균 자속밀도는 약 0.24 T 로 약간 작은 값을 나타내고 있다.

이렇게 자속 밀도가 결정되면 코일의 권선 수는 측정범위 및 분해능과 관련이 있다. 열 발생문제를 고려한 코일에 가할 수 있는 최대 전압을 5 V 설정하게 되면 측정범위가 결정되며 잡음이 포함된 코일 입력 전압으로부터 얻을 수 있는 최소

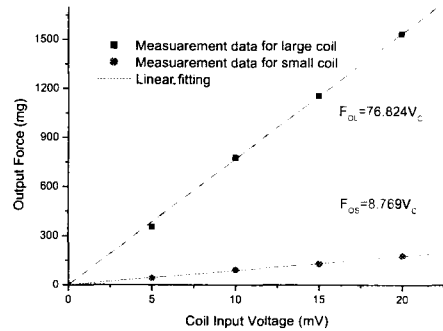


Fig. 7 Force sensitivity

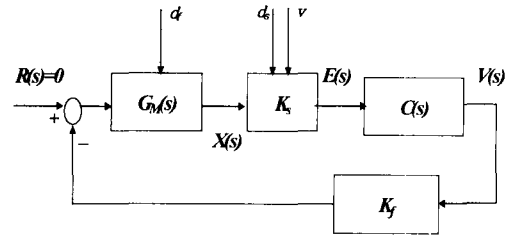


Fig. 8 Control block diagram

전압에 의해 분해능이 결정 된다. 잡음제거 후 최소 전압 분해능을 0.1 mV 라고 하면 분해능 대 측정범위가 결정될 수 있다. 코일의 권선 수를 많게 하면 식 (2)에서의  $K_f$  값이 증가하게 되어 5 V 에 해당하는 측정범위는 커지는 대신 0.1 mV 에 해당하는 보상힘이 증가하기 때문에 측정 분해능 또한 증가하게 된다. 반대로 코일의 권선 수를 작게 하면  $K_f$  값이 감소하게 되어 측정범위는 감소하지만 분해능은 향상될 수 있다.

그림 7 은 입력전압에 대한 발생 힘의 민감도를 보여주고 있다. 이 결과는 제어를 적용하지 않고 코일에 전압을 가하여 생긴 변위를 기계적 민감도를 이용하여 힘으로 환산한 것이다. 500 회를 권선한 큰 코일의 경우 76.824 g/V 이기 때문에 5V 에 해당하는 측정범위는 약 384 g 이 된다. 이것에 해당하는 측정 분해능은 7.68 mg 이 된다. 50 회를 권선한 작은 코일은 큰 코일의 약 1/10 에 해당하는 43.8 g / 0.88 mg 에 해당하는 측정범위/분해능 값을 예측할 수 있다.

이 결과는 제어후의 결과가 아니기 때문에 위치센서의 비선형성 및 좁은 영역에서의 측정으로 오차가 크지만 대략적인 시스템 성능의 예측이 가능하며 정확한 측정 결과 및 특성은 제어 및 잡음

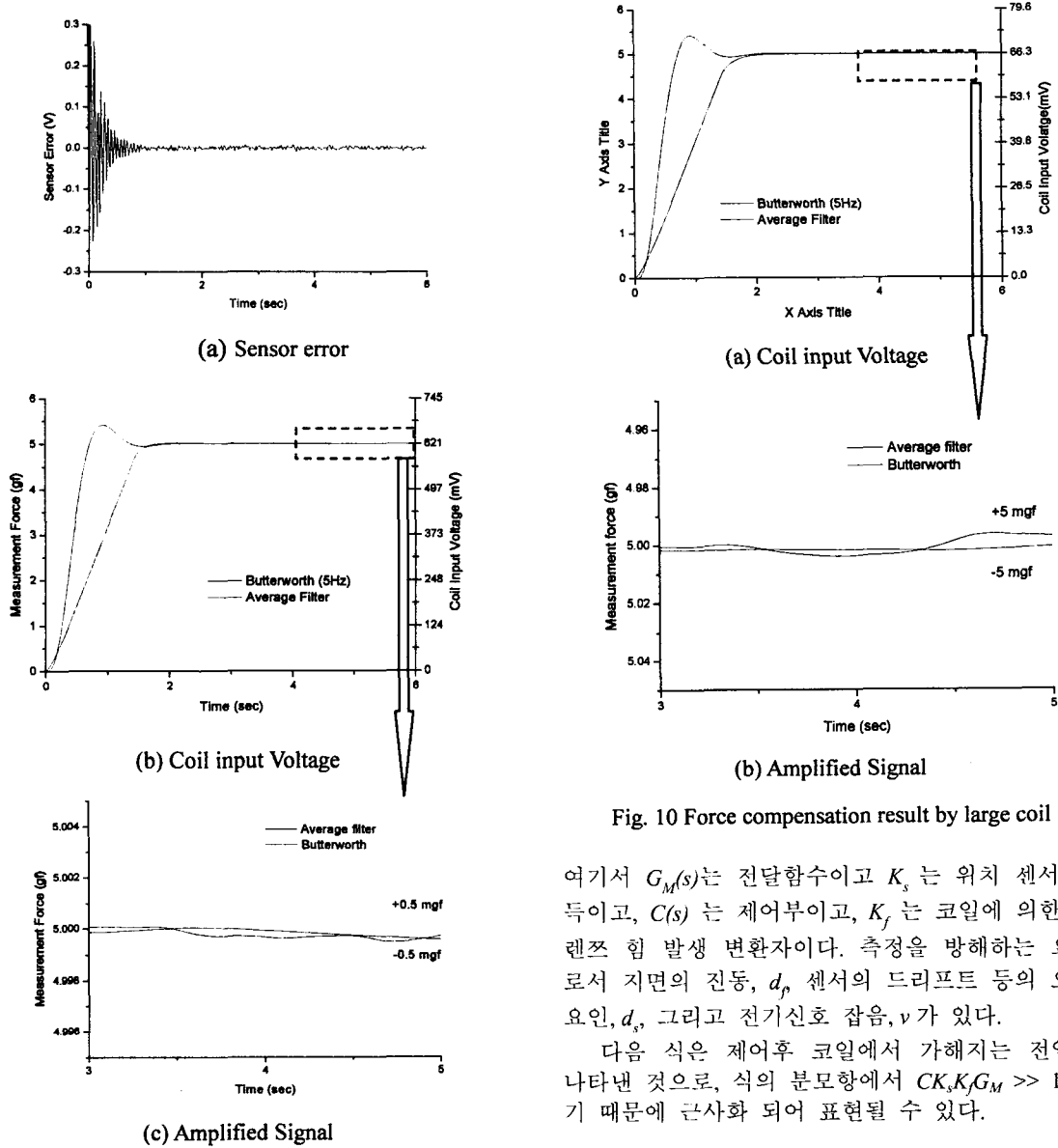


Fig. 9 Force compensation result by small coil

제거를 거친 후 결정된다.

### 3.2 제어기 설계

영위법을 이용한 힘 측정 시스템에 관련되어 측정오차를 줄이기 위한 여러 가지 제어 및 필터 설계기법이 소개되고 있다.<sup>7)-9)</sup>

그림 8 은 영위법에 적용되는 제어 루프이다.

Fig. 10 Force compensation result by large coil

여기서  $G_M(s)$ 는 전달함수이고  $K_s$ 는 위치 센서 이득이고,  $C(s)$ 는 제어부이고,  $K_f$ 는 코일에 의한 로렌즈 힘 발생 변환자이다. 측정을 방해하는 요소로서 지면의 진동,  $d_p$  센서의 드리프트 등의 오차 요인,  $d_s$ , 그리고 전기신호 잡음,  $v$ 가 있다.

다음 식은 제어후 코일에서 가해지는 전압을 나타낸 것으로, 식의 분모항에서  $CK_sK_fG_M \gg 1$  이기 때문에 근사화 되어 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V(s) &= \frac{CK_fG_M}{1+CK_sK_fG_M}F(s) + \frac{CK_s}{1+CK_sK_fG_M}d_i + \frac{C}{1+CK_sK_fG_M}d_s + \frac{1}{1+CK_sK_fG_M}v \\
 &\cong \frac{F(s)}{K_f} + \frac{1}{K_fG_M}d_i + \frac{1}{K_sK_fG_M}d_s + \frac{1}{CK_sK_fG_M}v
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그림 8 로부터 코일에 가해지는 전압  $V(s)$ 를 측정하여 외부에서 가해지는 힘을 측정하게 된다. 식 (4)의 첫 번째 항이 기본 측정 신호이고 나머

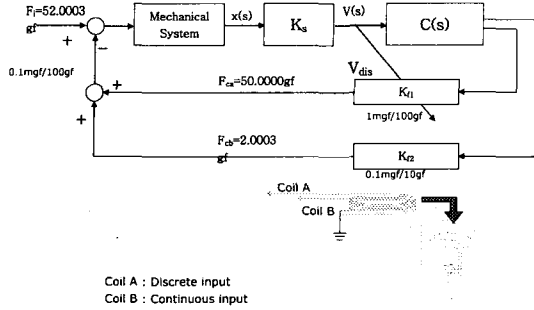


Fig. 11 Double force compensation

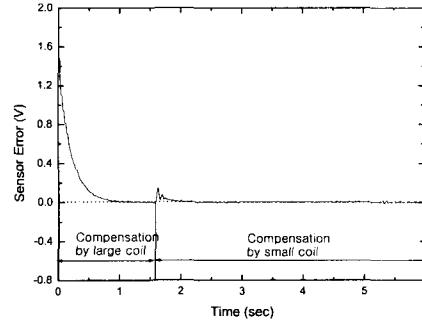
지 항들은 잡음들로서 제거되어야 한다. 분해능을 향상시키기 위해서는 코일의 보상 힘을 증가시키고 센서이득 및 제어부 이득을 증가시켜야 한다.

앞 절에서 언급했던 것과 같이 코일에 가해지는 전압의 범위와 분해능이 정해져 있을 경우  $K_s$ 를 변화시키면 측정할 수 있는 힘의 범위와 분해능이 달라지게 된다. 이를 검증하기 위하여 코일의 권선 수를 다르게 한 2 개의 코일을 제작하여 실험 하였다. 입력 힘은 표준분동 5 g 에 의해 발생되었다.

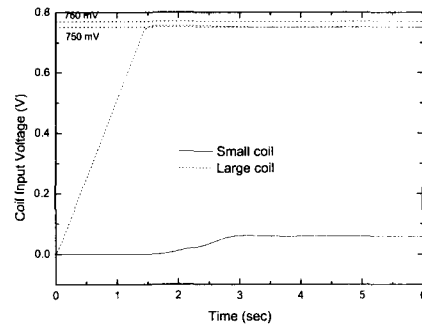
그림 9 와 10 에서 보여지는 것처럼 동일한 입력 힘에 대해 코일에 가해지는 전압의 크기가 다르다. 작은 코일에 의한 힘을 보상할 경우 입력 힘 5 g 에 대해 분해능이  $\pm 0.5$  mg 이하이다. 큰 코일의 경우 입력전압이 작은 코일에 비해 약 1/10 이 작으며 얻을 수 있는 분해능은  $\pm 5$  mg 이다. 작은 코일의 힘 민감도는  $K_{\mu L} = 8.052$  g/V 이고,  $K_{\mu S} = 75.369$  g/V 로 앞절에서 얻어진 값과 비슷한 값을 갖는다.

#### 4. 이중 전자기힘 보상

3 장에서 보여지는 것과 같이 큰 코일을 사용하였을 경우 측정 범위는 증가하지만 제어의 오차와 센서 드리프트(Drift) 그리고 필터의 성능의 한계에 의해 분해능 면에서는 작은 코일 보다 떨어진다. 반대로 작은 코일에서는 큰 힘을 측정하기 어렵다. 이러한 두 특성을 이용하여 이중 힘 보상 시스템을 제안하고자 한다. 그림 11 은 이중 힘 보상 시스템의 제어선도이다. 두 개의 코일을 겹쳐 권선하고 하나의 자석을 이용하게 된다.



(a) Sensor position error



(b) Coil input voltages

Fig. 12 Control of double force compensation

제어 후에 얻어지는 코일 입력 전압은 제어오차 및 센서의 드리프트 그리고 외란 등의 오차요인들을 포함하게 된다. 개루프(Open loop)로 알고 있는 전압을 가하게 되면 이러한 오차를 포함하지 않게 되는 점을 이용하고자 한다.

우선 큰 코일로 입력 힘에 대한 보상을 한 후 센서 오차가 일정한 범위 안으로 수렴하게 되면 보상된 힘의 전후에 미리 설정한 불연속적인 (Discrete) 값으로 전압 입력 값을 변화시킨다. 이때 설정한 값의 정확도는 ADC(Analog-to-Digital Converter)의 분해능에 의해 결정되는 것으로 정확하게 인가할 수 있으며, 제어되지 못한 나머지 입력 힘에 의한 차이는 작은 코일에 의해 보상하게 된다. 즉 다음 식과 같이 정상상태 후 입력 힘을 측정할 수 있다.

$$F_i = F_L + F_S = K_{\mu L} V_{\mu L} + K_{\mu S} V_{\mu S} \quad (5)$$

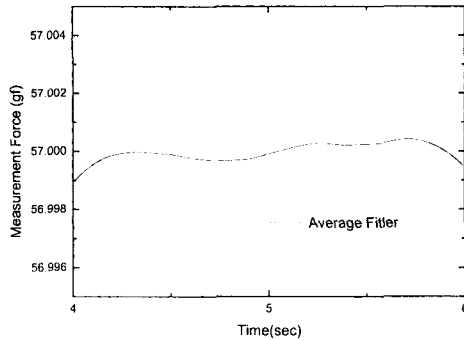


Fig. 13 Double force compensation result

$K_{fs}$  과  $K_{fl}$  는 3.2 절에서 이미 구한 값이다.  $V_{fl}$  은 제어 후의 얻을 수 있는 전압이 아니라 이미 설정해 놓은 값이기 때문에 큰 코일은 레퍼런스 힘의 역할을 하며 작은 코일에 의한 보상 힘만이 분해능에 영향을 주게 된다.

본 논문에서 제안된 이중 힘 측정시스템은 조동/미세(coarse/fine) 구동기의 개념과는 다르다. 조동/미세 구동기와 같이 큰 코일을 제어한 상태에서 작은 코일을 제어하게 되면 큰 코일에서 발생한 오차가 작은 코일의 분해능 보다 크기 때문에 측정결과는 큰 코일에 분해능에 의해 결정된다.

그림 12 는 이중 힘 보상시스템의 실험결과를 보여주고 있다. 우선 큰 코일을 제어하여 일정한 오차범위로 수렴을 하게 되면 입력전압을 미리 설정한 10 mV 의 간격의 일정한 값으로 바꾸게 된다. 그 후 발생하는 오차는 작은 코일에 의해 보상된다. 그림 13 은 각각의 코일에 입력되는 전압을  $K_{fs}$  와  $K_{fl}$  의 값과 식 (5)에 대입하여 변환한 결과이다. 이때 얻어지는 분해능은  $\pm 1$  mg 이하이다.

### 5. 결론

본 논문은 영위법을 이용하는 힘 측정 시스템의 성능에 영향을 주는 요소들에 대해 분석하고 이를 설계하였다. 메커니즘부가 우수한 특성을 보여주더라도 제어의 오차에 의해 성능을 향상시키기 어려웠던 점을 이중 힘 보상시스템을 이용하여 극복할 수 있었다.

기계적 민감도와 힘 민감도를 분석하고 이를 이용해 분해능과 측정범위를 향상시키기 위한 이중 힘 보상시스템을 제안하고 설계하였다. 레퍼

런스 힘으로 큰 코일을 사용하게 되며 작은 코일의 분해능이 시스템의 분해능을 결정하게 된다. 실험을 통해 분해능 1 mgf 이하, 측정범위 300 gf 이상의 힘을 안정적으로 측정할 수 있었다.

향후 과제로는 온도에 의한 영향을 해석하고 응답특성을 개선하기 위한 적합한 필터설계기법에 대한 연구가 필요하다.

### 참고문헌

1. I. R. Peterson, "Design considerations for an electrobalance microforce sensor," Rev. Sci. Instrum. Vol. 68, No. 2, pp. 1130-1136, 1997.
2. T.J.Quinn, "The beam balance as an instrument for very precise weighing," Meas. Sci. Technol. Vol. 3, pp. 141-159, 1992.
3. A. Cheshmehdoost and B.E.Jones, "Design and Performance characteristics of an integrated high capacity DETF-based force sensor," The 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Solid-state Sensors and Actuators and Eurosensors IX. Stockholm, Sweden, June25-29 pp. 608-611, 1995.
4. S. Hara, S. Kasai, T. Nishitani and A. Nagashima, "Development of steady-state magnetic sensor," Rev. of Sci. Instrum. Vol.70, No.1, pp435-438, 1999.
5. Shigeru Kurosu, "Performance of gyroscopic force measuring apparatus," Proc. of the Measurement of Force and Mass, pp. 129-134, 1996.
6. Alexander Kusko and Theodore Wroblewski, "Computer-Aided Design of Magnetic Circuits," The MIT Press.
7. Robert K. Butler, Vittal S. Rao, Leslie R. Koval, "Controller implementation on infinite order structural systems using distributed sensors," SPIE Proc. 2190, pp. 358-368, 1994
8. Finn Gronlund, "Synthesis of feedback control unit for beam balance," Phys. E:Sci. Instrm. Vol. 22, pp. 899-903, 1989.
9. W.Balachandran, M.Halimic, M.Hodzic, M.Tariq, Y.Enab and F.Cecelja, "Optimal Digital Control and Filtering for Dynamic Weighing System," IEEE Instrumentation/ Measurement Technology Conf. - IMTC/95, Waltham, Boston, MA, USA, April 24- 26, pp. 293-298, 1995.