

# 모바일 카메라 모듈용 볼베어링 방식 OIS 액추에이터 설계

## Design of Ball Bearing Type OIS Actuator for Mobile Camera Module

송 명 규\*. 손 동 훈\*\*. 박 노 철†. 박 경 수\*\*. 박 영 필\*\*. 임 수 철\*\*\*

Myeong-Gyu Song, Dong-Hun Son, No-Cheol Park, Kyoung-Su Park,  
Young-Pil Park and Soo-Cheol Lim

(2009년 12월 21일 접수 ; 2010년 3월 17일 심사완료)

**Key Words** : Mobile Camera Module(모바일 카메라 모듈), Optical Image Stabilization(광학식 손떨림보정),  
Voice Coil Actuator(음성코일구동기)

### ABSTRACT

Optical image stabilization is a technique to compensate the image blurring caused by some vibrations of camera at the exposure time. Pitching and yawing of camera are sensitive to the image quality so they are usually compensated by optical image stabilization. Corresponding pitching and yawing of a camera, a lens or the image sensor is translated in two-axis direction and then the optical path of camera is adjusted. In this paper, two-axis OIS actuator for mobile camera module is suggested and designed. The actuator is a voice-coil actuator that uses the electromagnetic force of voice-coil to make compensation motions. And ball bearing is used to reduce friction force. Magnetic attractive force between magnets and yokes acts as a preload and magnet springs. Prototype actuator is fabricated to measure the friction force and to verify the feasibility of the OIS actuator with ball bearing. At last, the actuator is improved in consideration of driving force and friction force. Design of experiments is used for designing the actuator.

### 기 호 설 명

$x$  : 가동부 변위

$\omega$  : 진동주파수

$F$  : 외력

$F_f$  : 마찰력

$F_n$  : 수직항력

$F_d$  : 구동력

$h$  : 이력 감쇠 상수

$k$  : 스프링 상수

$m$  : 가동부 질량

### 1. 서 론

모바일 카메라 모듈은 휴대전화, 노트북, 웹캠 등에 장착되는 초소형 카메라이다. 일반 디지털 카메라에 비해 화질이 떨어지지만 어느 곳에서나 찍을 수 있다는 즉시성을 장점으로 인기를 끌어 현재 대부분의 휴대전화가 카메라를 내장하고 있다. 또한 이동통신 기술 발달로 휴대전화의 영상통신이 가능해지면서 카메라는 점점 휴대전화의 필수기능으로 자리 잡아가고 있다. 모바일 카메라의 화질은 지속적으로 개선되어 왔는데 고화소 이미지 센서 적용이 대표적이다. 그러나 고화소 이미지 센서의 적용

† 교신저자; 정회원, 연세대학교 기계공학과  
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

Tel : (02)2123-4530, Fax : (02)365-8460

\* 연세대학교 정보저장기연구센터

\*\* 연세대학교 기계공학과

\*\*\* (주)삼성전기

만으로 얻을 수 있는 화질 개선에는 한계가 있기 때문에 실제로 일반 디지털 카메라에서는 자동초점 (autofocus: AF), 손떨림보정(image stabilization: IS), 플래시 등의 기능들이 내장되었고, 모바일 카메라 모듈에도 이미 자동초점 기능이 적용된 제품이 상용화된 상태이다. 손떨림보정은 노출시간 동안 카메라가 흔들렸을 때 발생하는 화상의 흐려짐을 방지하는 기능으로 흔들림이 심하고 노출시간이 길어지는 저조도 환경에서의 촬영 때 필요하다. 모바일 카메라 모듈은 일반 카메라와 비교하였을 때 그룹이 불안정하여 흔들림이 심하게 발생하며 저조도 환경에서의 노출시간도 훨씬 길기 때문에 손떨림보정 기능이 더욱 필요하다.

손떨림보정은 크게 디지털 손떨림보정(digital IS: DIS), 전자식 손떨림보정(electronic IS: EIS), 광학식 손떨림보정(optical IS: OIS)으로 나뉜다. DIS는 흐려진 이미지를 디지털 필터링을 통해 개선시키는 방식으로 추가적인 장치를 요구하지 않기 때문에 가격이 저렴하다<sup>(1,2)</sup>. EIS는 화상의 면적보다 훨씬 더 큰 이미지 센서를 갖추어 흔들리는 화상을 쫓아 처리하는 방식이다<sup>(3)</sup>. 이때 자이로스코프 센서를 이용하여 카메라의 움직임을 감지하여 이를 바탕으로 화상의 흔들림을 계산해낸다. OIS는 렌즈나 이미지 센서를 광축에 수직인 방향으로 움직여 광로를 수정함으로써 흔들림에 의한 화상저하를 원천적으로 차단한다. 기계적 구동장치가 필요하기 때문에 장치 구현이 복잡하며 가격이 비싼 대신에 가장 좋은 보정성능을 보여준다. OIS 역시 EIS처럼 자이로스코프 센서를 통해 카메라의 움직임을 감지하고 이를 바탕으로 렌즈나 이미지 센서가 움직여야 할 변위량을 산출한다. 현재 판매되는 모바일 카메라 모듈 중 OIS가 적용된 제품은 없지만 이를 위한 연구들은 진행되어 왔다. 압전형 바이모프 굽힘 구동기를 이용한 초소형 OIS에 대한 연구가 이루어졌고<sup>(4)</sup>, 유전 알고리즘(genetic algorithm)으로 최적화된 음성코일구동기(voice coil actuator) 방식에 대한 연구도 행해졌다<sup>(5)</sup>. 또한 자동초점 기능과 OIS가 동시에 구현될 수 있도록 자동초점모듈을 구동시키는 OIS에 대한 연구도 행해졌다<sup>(6-8)</sup>. 그러나 압전 구동기는 휴대폰에 적용하기에는 구동전압이 너무 높으며, 음성코일을 이용한 구동기<sup>(5-8)</sup>들은 프리즈매틱 조인트(prismatic joint)에서 발생하는 마찰로 인해

보정성능이 제한되는 문제점이 있다. 따라서 이 논문에서는 볼베어링을 적용한 음성코일구동기를 사용하여 마찰력을 최소화한 구동기를 제안하였다. 마찰력을 최소화하면 마찰손실이 줄어들기 때문에 최대가속도성능이 증가하는 것은 물론 마찰로 인한 위상지연(phase delay)도 줄일 수 있다. 이 논문에서 설계된 구동기는 배선 문제가 없는 가동자석형 구동기이며 가동자석과 코일요크 사이에서 발생하는 인력이 볼베어링을 유지하는 예압력(preload)으로서 작용하는 동시에 자성스프링으로도 작용한다. 코일에서 발생하는 구동력과 마찰력을 동시에 고려하여 최대의 성능을 발휘할 수 있는 전자기 설계가 필요하다. 초기 모델을 제작하여 볼베어링의 마찰력을 측정하고 볼베어링 구조를 갖춘 구동기의 가능성을 실험적으로 검증하였다. 또한 이를 바탕으로 구동력과 마찰력을 동시에 고려한 설계를 제안하였다.

## 2. 볼베어링방식 OIS 구동기

### 2.1 기본 구조 소개

크기 제약이 심한 모바일 카메라 모듈에서 기존의 자동초점 기능과 OIS 기능을 동시에 구현하기 위해서 자동초점과 OIS 부분을 융합해야 할 필요가 있다. 이를 위해 OIS 구동기가 자동초점 장치 전체를 이동시키는 방법이 제안되었다<sup>(6-8)</sup>. 기존의 OIS 구동기는 프리즈매틱 조인트를 이용하였는데 조인트

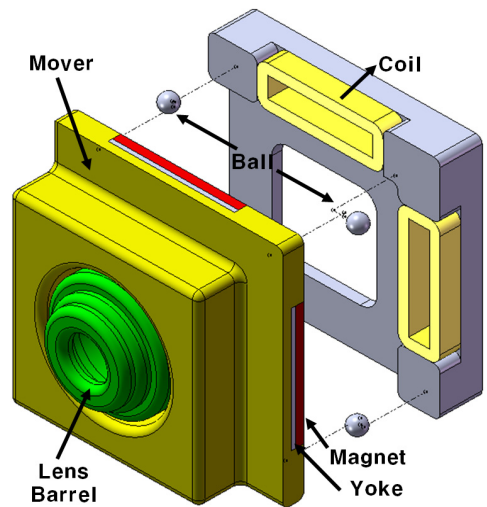


Fig. 1 Plane ball bearing mechanism

트에서 발생하는 마찰력이 최대가속도 및 정밀도 감소, 위상지연 발생 등 다양한 성능저하를 유발하게 된다. 따라서 이 논문에서는 기존의 프리즈메틱 조인트를 볼베어링으로 대체하여 마찰력을 최소화한 새로운 방식을 제안한다.

OIS 구동기에 필요한 운동은 광축에 수직한 평면에서의 2축병진운동이다. 일반적으로 사용되는 선형볼베어링은 선형 홈을 타고 구르는 볼로 구성되어 있으며 이를 통해 1축병진운동이 가능하다. 이와 같은 1축 병진운동 메커니즘 2개를 직렬로 연결하여 2축병진운동을 가능하게 하는 방법은 이미 특허로 출원되었지만<sup>9)</sup>, 구조가 복잡하여 모바일 카메라 모듈에 적용하기 어렵다. 따라서 Fig. 1과 같이 홈을 이용하지 않고 3개의 볼만 사용하여 평면을 지지하는 3축평면운동 메커니즘이 제안되었다. 이 메커니즘은 2축병진운동 이외에 광축방향의 회전운동까지 가능해지는 문제점이 있지만, 다행히 렌즈 경통의 광축방향 회전운동은 실질적으로 화상의 질에 영향을 끼치지 않는다. 왜냐하면 렌즈 경통이 광축을 기준으로 회전대칭형상을 갖고 있기 때문이다. Fig. 2와 같이 렌즈 경통이 광축방향으로 회전하더라도 광학계에 차이를 가져오지 않는다. 단, 렌즈경통을 제외한 다른 부분들은 특히 센서와 구동력을 발생시키는 음성코일 부분은 광축방향 회전운동에 영향을 받으므로 설계 과정에서 타당성이 검토되어야 한다.

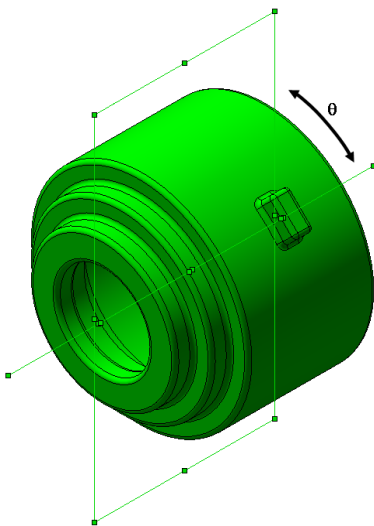


Fig. 2 Rotation of a lens barrel

## 2.2 예압력과 자기스프링

제안된 구동기는 코일이 고정되고 자석이 움직이는 가동자석형 구동기이다. 가동자석형 구동기는 배선의 제약을 받지 않는 장점이 있는 대신에 코일요크를 사용할 경우 코일요크와 가동자석 사이에 발생하는 인력이 구동기의 운동에 영향을 주는 단점이 있다. 그러나 제안된 구동기에서는 자석-요크 사이의 인력이 문제점이 아닌 필수요소이다. 볼베어링에서 볼이 빠지지 않고 그대로 유지되게 하기 위해 광축방향의 예압력을 계속해서 가해주어야 하는데 제안된 구동기는 자석과 요크 사이의 인력을 예압력으로 이용한다. Fig. 3은 예압력의 역할과 크기에 대한 설명을 보여준다. 예압력에 의해 볼베어링 구조가 유지되며(Fig. 3(a)), 예압력이 너무 약하면 구동부와 볼이 이탈하여 볼베어링 구조가 파괴되고(Fig. 3(b)), 너무 강하면 마찰력이 커지며 마멸도 심해진다(Fig. 3(c)). 따라서 예압력은 외란이 가해져도 볼베어링 구조가 파괴되지 않도록 적당한 크기를 갖는 동시에 마찰력이 작게 생기도록 작아져야 하므로, 예압력의 최소값을 정하여 그 값을 갖도록 설계해야 한다.

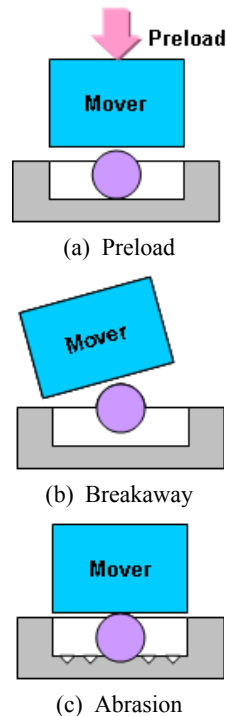


Fig. 3 Role of the preload

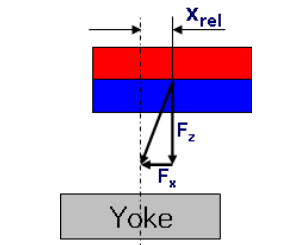
자석-요크 사이의 인력은 단지 예압력으로서만 작용하는 것이 아니다. Fig. 4와 같이 자석과 요크 중심의 위치가 서로 일치하지 않을 경우 자석-요크 사이의 인력은 수직방향뿐만 아니라 수평방향 성분도 갖게 되며, 이 성분의 힘은 가동부의 운동에 영향을 끼치게 된다. Fig. 4(b)는 자석 중심과 요크 중심 사이의 상대 위치와 인력의 수평방향 성분의 크기를 비교한 그래프이다. 그래프를 보면 인력의 수평방향 성분이 상대위치에 대해 선형으로 변화하는 구간이 있는데 구동기의 가동부가 이 구간 안에서만 움직인다고 가정한다면 자석-요크 사이의 인력을 기계적인 선형스프링으로 간주할 수 있다. 선형구간의 범위는 자석 및 요크의 크기와 자석과 요크 사이의 간격 등에 의해 좌우되며, 구동기가 갖춰야 할 구동범위보다 더 커야 선형스프링으로 간주할 수 있으므로 자석과 코일 요크를 설계할 때 이를 유의해야 한다.

**2.3 음성코일과 홀효과센서**

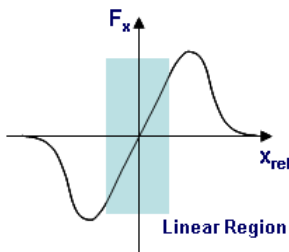
자기장에 놓인 도선에 전류를 가하면 그 도선에 전자기력이 가해지게 되는데 음성코일구동기는 이 힘을 이용하여 원하는 움직임을 만들어낸다. 단위입력전압에 대한 출력 구동력인 구동력 감도(mN/V)가 음성코일의 가장 주요한 성능이며, 이외에 위치에

대한 출력구동력 편차나 원하지 않는 방향의 힘 성분 생성이 작을수록 좋다. Fig. 5는 음성코일 구동기를 구성하는 자석, 요크, 코일 그리고 위치되먹임센서로 사용되는 홀효과센서(hall effect sensor)의 배치를 보여준다. 각각의 전자기부가 1축 구동 및 위치측정을 담당하므로 그림과 같이 2개의 전자기부를 수직으로 배치하여 2축 구동 및 위치측정을 가능하게 한다. Fig. 6은 음성코일 전자기부의 작동원리를 보여준다. Fig. 6처럼 z축 방향의 자속에 노출된 코일에 y축 방향 전류를 가해주면 x축 방향 힘이 발생한다. Fig. 6의 그래프는 점선에서의 z축 방향 자속밀도의 분포를 나타낸다. 그래프처럼 중앙분극지점을 기준으로 z축 방향 자속밀도가 x축 위치에 대해 비교적 선형적으로 변화하는 구간이 있다. 이 구간에 홀효과센서를 위치시키면 위치센서로 활용할 수 있다. 선형 홀효과센서는 자속밀도에 대해 전압을 선형적으로 출력하는 센서이므로 위치-자속밀도의 관계가 선형인 구간에 홀효과센서를 배치시키면 위치-자속밀도-출력전압의 관계가 모두 선형이므로 결과적으로 위치-출력전압이 선형인 선형 위치센서로 작용한다.

일반적으로 음성코일 구동기의 전자기부는 코일

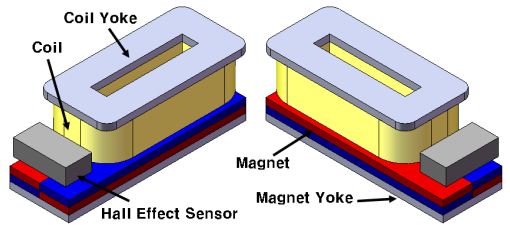


(a) Attractive force

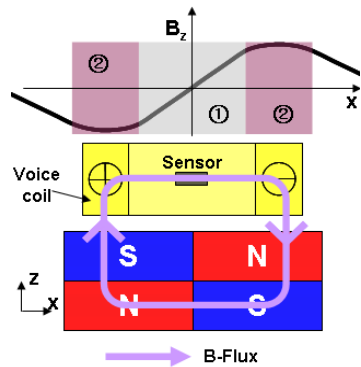


(b) Force & Rel. Disp.

**Fig. 4 Magnet spring**



**Fig. 5 Electromagnetic part**



**Fig. 6 Mechanism of coil and sensor**

에서 발생하는 전자기력의 최대화와 선형화를 목적으로 설계되어왔다. 하지만 본 논문에서 제안된 구동기의 전자기부는 구동과 위치측정을 동시에 수행하므로 이를 만족시키는 설계를 해야만 한다. 또한 이 설계의 주요 핵심은 영구자석이 발생시키는 자속 밀도를 적절하게 배치시키는 것이다. Fig. 6 그래프에서 홀효과센서가 배치되는 중앙 부위인 영역1은 자석밀도가 최대한 선형적으로 변화해야 하며, 변화하는 기울기가 클수록 센서의 감도가 커져 외부잡음에 강건해진다. 좌우 양단의 길은 음영 부분인 영역2와 영역3은 코일 구동력을 좌우하는 구간이다. 구동력을 최대화하기 위해서는 자속밀도의 절대값이 커야 하며, 위치에 따른 구동력 변화인 선형성을 확보하기 위해서는 변화 없이 일정해야 한다<sup>(6)</sup>.

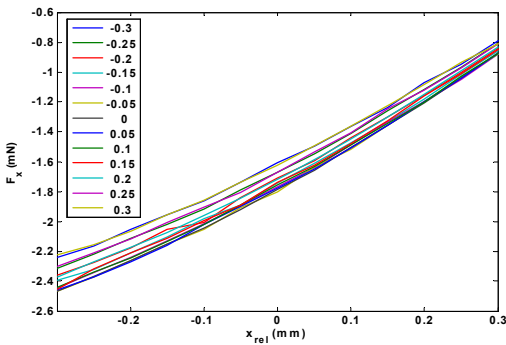
### 3. 구동기 해석 및 검증

이 장에서는 제안된 구동기의 성능을 해석하고 실험적으로 검증하는 과정을 서술하며 이를 위해

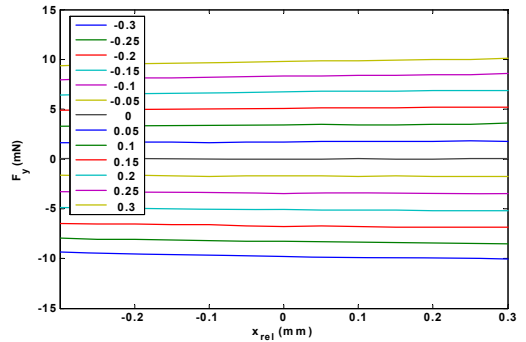
이미 설계된 전자기부를 초기 설계안으로 활용하였다. 초기 설계안은 구동력과 홀효과센서의 성능을 고려하여 설계된 것으로 예압력과 자기스프링 효과는 고려되지 않았기 때문에 개선될 필요가 있다.

#### 3.1 예압력과 자기스프링 해석

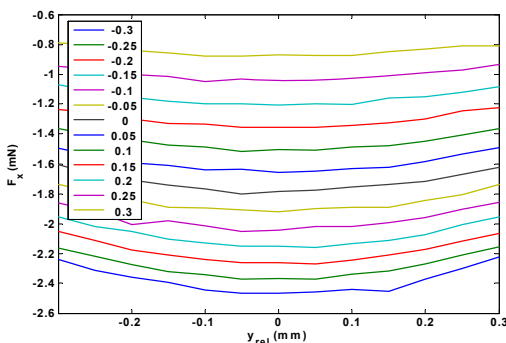
전술한 바와 같이 가동자석과 코일요크 사이에 발생하는 인력은 볼베어링을 유지시켜주는 예압력으로서 작용하는 동시에 선형스프링으로도 작용한다. 예압력과 자기스프링의 스프링계수는 가동자석과 3D를 이용하여 이를 해석하였다. 요크에 대한 자석의 상대위치에 따른 인력분포를 구했으며, 상대 위치의 범위는 x축과 y축 모두 동일하게 -0.3 ~ 0.3 mm이었으며 0.05 mm 간격으로 이동시키면서 해석을 수행하였으므로 총 169(132)회의 해석을 수행하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 해석 결과 얻은 인력분포를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 x축 상대위치에 대한 x축 인력성분 분포를 나타낸 것이다. x축 인력성분이 x축 상대위치에 대해 비교적 선형적



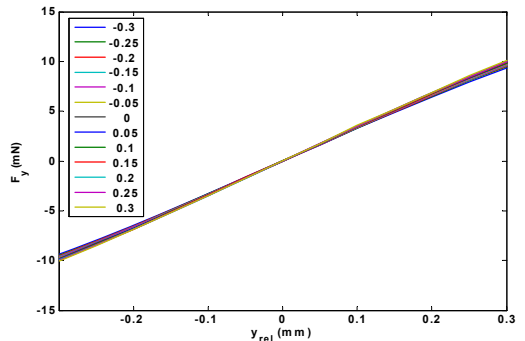
(a)  $F_x$  with respect to  $x_{rel}$



(a)  $F_y$  with respect to  $x_{rel}$



(b)  $F_x$  with respect to  $y_{rel}$



(b)  $F_y$  with respect to  $y_{rel}$

Fig. 7 Distribution of  $F_x$

Fig. 8 Distribution of  $F_y$

으로 변화하는 것을 볼 수 있으며 따라서  $F_x = k_x \cdot x$ 와 같이 x축 입력성분을 스프링력으로 취급할 수 있다. Fig. 7(b)는 y축 상대위치에 대한 x축 입력성분 분포를 나타낸 그래프로 x축 입력성분은 y축 상대위치와 크게 연관되어 있지 않음을 알 수 있다. Fig. 8 역시 마찬가지로 y축 입력성분을 스프링력으로 취급할 수 있으며, x축 입력성분과 무관하다는 사실을 보여준다. Fig. 9는 y축 상대위치에 따른 예압력의 분포를 보여준다. 예압력 역시 상대위치에 따라 변화하는데 중앙에 위치했을 때 크고 가장자리로 이동하면 작아지는 것을 볼 수 있다.

OIS 구동기의 구동범위는 카메라 광학계 및 보정하고자하는 카메라의 흔들림 각도범위에 따라 다르다. 일반적으로 OIS는 사용자의 손떨림에 의한 흔들림 보정을 목적으로 하며, 손떨림에 의한 진동은 그 크기가 1.2도 안쪽으로 매우 작고 주파수도 10 Hz 안쪽이다. 이 논문의 구동기가 탑재될 모바일 카메라 광학계의 경우 1.2도의 기울어짐을 보정하기 위해서 렌즈 경통을 약 101 μm 움직여줘야 한다. 해석결과 자기스프링은 ±101 mm의 범위에서 충분한 선형성을 보여주므로 구동범위를 만족시킬 수 있다.

제안된 구동기는 2개의 전자기부를 갖추고 있으므로 전체 계의 스프링은 Fig. 10처럼 개별 자기스프링의 조합이다. 전체 계의 스프링은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} k_{tot,x} &= k_{x1} + k_{y2} \\ k_{tot,y} &= k_{y1} + k_{x2} \end{aligned} \quad (1)$$

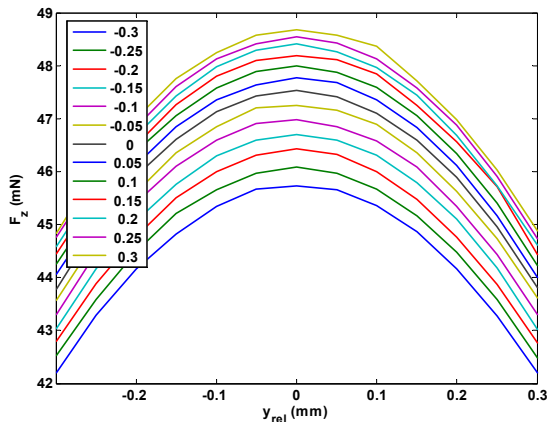


Fig. 9 Distribution of preload( $F_z$ )

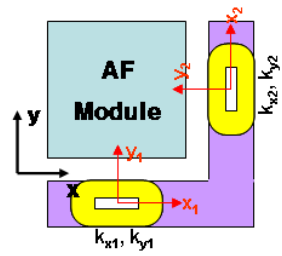
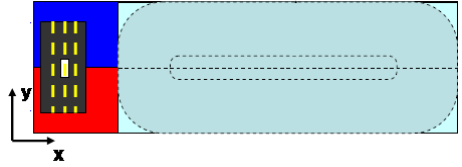
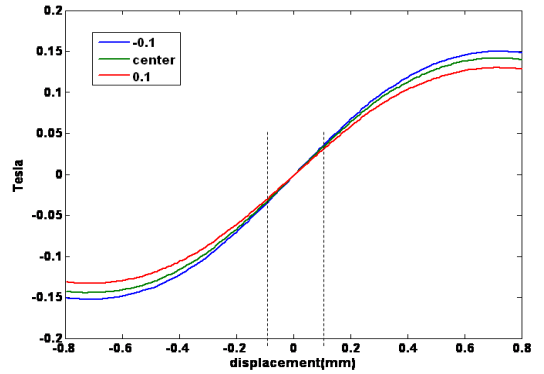


Fig. 10 The spring of total system



(a) Measurement line of magnetic flux density



(b) Distributions of magnetic flux density

Fig. 11 Analysis of hall effect sensor

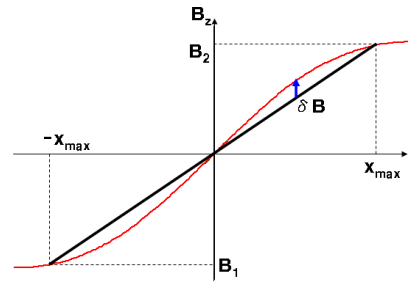


Fig. 12 Linearity of hall effect sensor

Table 1 Summary of hall effect sensor

$x_{rel}$ (mm)	Sensitivity (T/mm)	Linearity error (%)
-0.1	0.6742	1.2
0	0.6742	1.1
0.1	0.6742	1.8



3.2 음성코일과 홀효과센서 해석

음성코일과 홀효과센서 역시 Maxwell 3D를 이용하여 해석하였다. 구동력 감도는 16.65 mN/V가 나왔으며 홀효과센서의 거동을 예상하기 위한 자속분포는 Fig. 11과 같다. Fig. 11(b)의 그래프는 Fig. 12(a)의 3개의 점선에서의 z축 방향 자속밀도를 나타낸다. 3개의 점선의 x축 방향 상대위치는 각각 -0.1, 0, 0.1 mm이다. Fig. 11에서 홀효과센서는 y축 방향 상대위치를 측정하지만 가동자석은 x축과 y축 2축 평면운동을 하므로 그림처럼 세 곳의 자속밀도분포를 구해서 x축 상대위치의 영향도 확인해야 한다. 구동범위인 [-0.1, 0.1(mm)]에 대해서 Fig. 11(b)와 같이 해당 구간의 자속밀도의 분포가 비교적 선형임을 확인할 수 있다. 또한 x축 상대위치에 따라 자속밀도 분포 곡선이 미세하게 다른 것도 볼 수 있다.

보통 제어계에서는 완벽하게 선형이 아닌 장치를 선형으로 간주한다. Fig. 12는 홀효과센서의 선형화 방법 중 하나를 보여준다. 그래프처럼 실제 곡선의 양끝지점의 값을 기준으로 직선을 그려 대체하며, 선형화로 인한 오차는 식 (2)과 같이 표현한다.

$$\epsilon = \delta B / (B_2 - B_1) \tag{2}$$

선형화는 x축 상대위치가 0일 때의 데이터를 기준으로 한다. Table 1은 선형화시켰을 때 자속밀도/거리의 기울기값과 x축 상대위치에 따른 선형화 오차 등이 요약되어 있다. 오차는 작을수록 좋으며 허용하는 최대오차는 제어계 설계에 따라 다르다.

3.3 광축회전운동에 대한 고찰

OIS 구동기는 2축 선형운동을 발생시켜야 하지만 제한된 구동기의 지지 메커니즘은 광축방향 회전운동까지 포함된 3축 평면운동을 허용한다. 따라서 광축 방향 회전운동이 OIS 시스템에 어떤 영향을 주는지 고찰해야 한다. OIS 시스템은 렌즈경통의 x, y 선형위치를 제어하므로 광축방향 회전각  $\theta$ 는 일종의 노이즈로 간주할 수 있다. 따라서 OIS 구동기가 회전각  $\theta_2$ 에 대해서 영향을 받지 않고 강건해야 하며, x, y 선형위치를 측정하는 홀효과센

서 역시 선형위치만 측정할 뿐  $\theta_2$ 에 대해서 영향을 받지 않아야 한다. 첫째 경우는 회전각  $\theta_2$ 에 대한 음성코일의 구동력 변화로 확인할 수 있으며 Table 2에 요약되어 있다. 회전각이 0일 때의 구동력감도를 기준값 100%라고 했을 때 회전각  $\theta_2$ 가 클수록 구동력감도가 작아진다. 하지만 제한된 구동기의 기구적 간섭을 고려하면 가동부는 최대 약 0.5도 정도의  $\theta_2$ 를 가질 수 있으므로  $\theta_2$ 가 구동기의 구동성능에 끼치는 영향은 무시할 만한 수준이다.

둘째 홀효과센서의 경우는 회전각  $\theta_2$ 와 홀효과센서의 연관성으로 확인할 수 있다. Fig. 13은 광축을 기준으로 회전시켰을 때 자석과 홀효과센서의 상대위치 변화를 보여준다. Fig. 13처럼 회전각이 발생

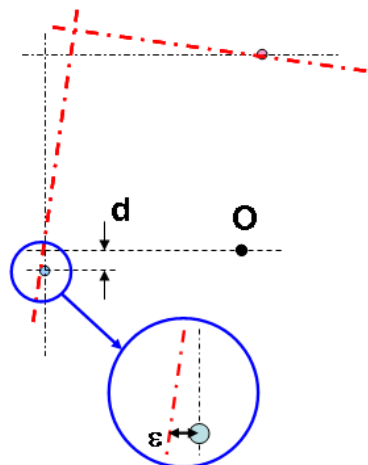
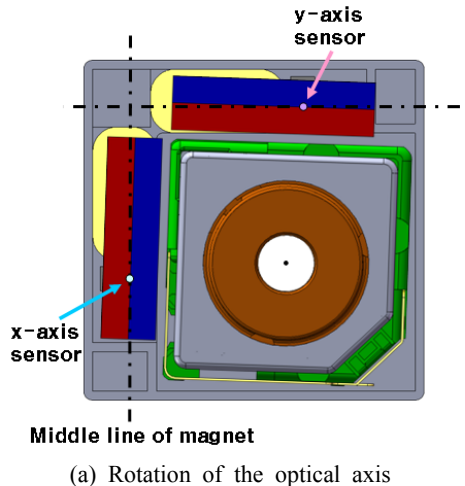


Fig. 13 Sensing error caused by rotation

Table 2 Driving sensitivity of voice coil

$\theta_z$ (deg)	-3	-2	-1	0	1	2	3
Sensitivity (%)	98.5	99.3	99.8	100	99.8	99.3	98.2

하더라도 렌즈경통의  $x, y$  선형위치는 그대로이므로 홀효과센서의 출력 역시 변화가 없어야 한다. 그러나 실제로는 회전각이 자석과 홀효과센서의 상대위치에 변화를 주는 것을 볼 수 있다. 센서에서 감지되는 오차는 회전각  $\theta_z$ 와 거리  $d$ 에 큰 영향을 받는다. 초기 설계안에서  $d$ 는  $0.6\text{ mm}$ 이므로 회전각  $\theta_z$ 에 의한 최대오차는 약  $5.2\text{ }\mu\text{m}$ 이다. 다시 말해 Fig. 13에서 렌즈경통의 위치좌표 ( $x, y, \theta_z$ )가 (0, 0,  $0.5^\circ$ )라고 할 때, 홀효과센서의 출력좌표가 (0, 0)이 아닌 ( $-5.2\text{ }\mu\text{m}, -5.2\text{ }\mu\text{m}$ )인 것이다. 이 오차는 최대 회전각  $0.5^\circ$ 에 대한 것일 뿐 실제 OIS 시스템에서 회전각이 얼마나 발생하고 어느 정도의 영향을 끼치는지에 대해서는 정확히 예측할 수 없다. 하지만 이 이미지 관점에서 봤을 때 5백만화소 이미지 센서에서 픽셀 3개 정도의 길이에 해당되므로 허용 가능한 수준의 오차로 생각할 수 있다.

**3.4 마찰력 측정**

구동력과 마찰력은 구동기의 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 하지만 마찰력은 예측하는 것이

거의 불가능하여 주어진 조건에서 실험을 통해 실제로 측정된 값이 필요하다. 마찰력 측정을 위해 Fig. 14와 같이 초기 설계안을 제작하여 실험하였다. 마찰력을 측정하기 위해서는 다양한 방법들이 동원될 수 있지만 이 논문에서는 조화 운동 상태에서의 이력 곡선(hysteresis loop)을 통해 측정하였다. 쿨롱 마찰(Coulomb friction)에서 마찰력은 속도에 무관하므로 구동기의 운동방정식은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

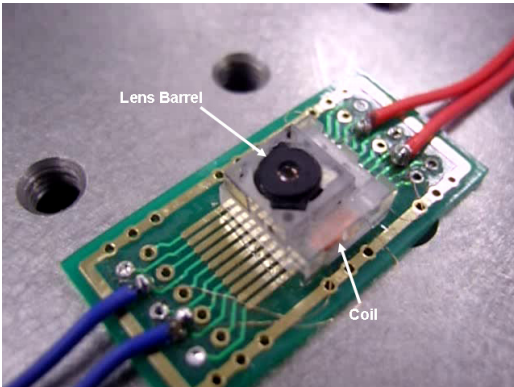
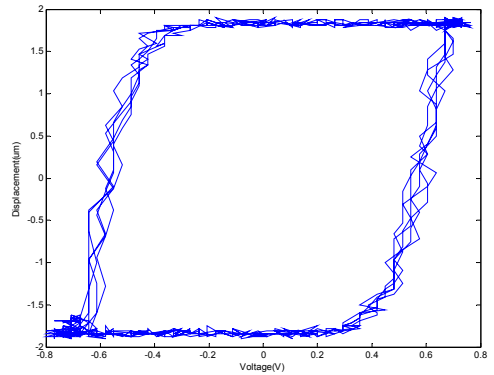
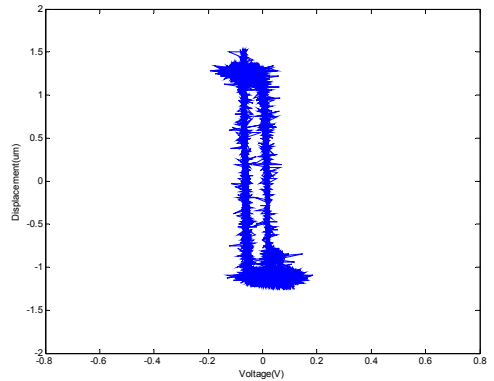


Fig. 14 Fabricated actuator



(a) Hysteresis loop with coil yoke



(b) Hysteresis loop without coil yoke

Fig. 16 Hysteresis loops

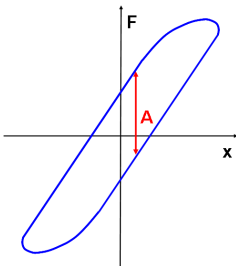


Fig. 15 Hysteresis loop with Coulomb friction

Table 3 Summary of friction measurement

Item	With yoke	Without yoke
A (V)	1.1250	0.0813
Sensitivity (mN/V)	16.650	13.707
Max. $F_d$ (mN)	37.130	30.567
Friction, $F_f$ (mN)	9.366	0.557
Preload, $F_n$ (mN)	151.286	4.570



$$m\ddot{x} + h\dot{x}/\omega + kx = F(t) \tag{3}$$

식 (3)에 조화운동 조건인  $x = X \sin \omega t$ 를 대입하고 정리하면 식 (4)를 얻을 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$F = kx \pm h\sqrt{X^2 - x^2} - m\omega^2 x \tag{4}$$

경우에 따라 식 (4)의 셋째항 관성력은 저주파에서 그 크기가 매우 작아 무시될 수도 있다. 식 (4)를 변위-힘 그래프로 표현한 것이 Fig. 16의 이력곡선이며, 두 직선 사이의 폭인 A가 2hX로 마찰력의 2배라 할 수 있다. 이처럼 조화운동을 하는 계의 이력현상 곡선을 통해 마찰력을 측정할 수 있다.

Fig. 16은 각각 코일 요크가 있을 때와 없을 때의 이력 곡선을 나타낸다. Fig. 15가 변위-힘 관계 그래프였던 것과 달리 전압-변위 그래프이다. 전압을 힘으로 바꾸기 위해서는 입력전압 대비 출력구동력을 뜻하는 구동력감도(mN/V)를 구해야 하는데 이 논문에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여 구동력감도를 구했다. 코일요크가 없으면 가동자석과 코일요크 사이에서 작용하던 인력이 없어지므로 마찰면에 작용하는 수직항력의 크기가 훨씬 작아진다. 또한 자성스프링 효과도 사라져 스프링이 없는 계가 된다. Table 3은 Fig. 16의 실험결과를 정리한 것이다. 마찰력은 A와 구동력감도를 곱한 다음 2로 나누면 얻을 수 있으며, 최대 구동력은 driver IC의 최대출력 상태에서의 구동력을 의미한다. 수직항력은 유한요소해석 시뮬레이션으로 구한 자석과 요크 사이의 인력이다. 실험결과를 바탕으로 식 (5)와 같이 마찰력과 수직항력 사이의 선형 관계식을 도출할 수 있었다.

$$F_f = \alpha F_n + \beta \text{ (mN)}, \tag{5}$$

$$\alpha = 0.06, \beta = 0.283$$

식 (5)과 같이 수직항력을 통해 마찰력을 예측할 수 있게 되었는데, 기존 연구와 비교했을 때 이와 같은 마찰력 모델링 과정은 많은 문제점들을 가지고 있다. 과거 구름마찰의 마이크로스케일 진동현상에 대해 연구된 바가 있는데<sup>(11)</sup>, 가진기를 통해 가동부를 가진하고, 힘 변환기(force transducer)를 통해 가진력을 실험적으로 측정한다. 또한 가진력과 가진주파수를 변경하며 실험하여 구름마찰의 마이

크로스케일 진동현상의 다양한 특성들을 측정하였다. 하지만 이 논문의 실험 장치에서 가동부에 가해지는 외력은 코일에서 발생하는 전자기력인데 상기 과정에서는 이 힘을 실험적으로 측정하지 않았다. 오직 코일에 입력되는 전압만을 실험적으로 측정하고 유한요소해석 시뮬레이션의 결과로 얻은 구동력 감도를 통해 전자기력을 추정하는 방식이다. 두 번째로 상기 과정에서는 마찰 모델을 전통적인 쿨롱 마찰 모델로 단순화하였다. 실제 마찰은 보다 더 복잡한 현상을 보여주며, 특히 미세구동영역에서 그런 경향이 강하다. OIS의 요구정밀도가 수 마이크로미터 수준임을 고려할 때 전통적인 마찰 모델로는 이와 같은 미세구동영역에서의 움직임을 제대로 표현할 수 없다.

그러나 이 논문의 주제는 구동기 개발일 뿐 볼베어링의 구름마찰 현상을 규명하는 것이 아니다. 이 논문의 마찰력 규명 과정이 기존 마찰 연구들과 비교하였을 때 문제점들을 지니고 있지만, 구동기 개발 단계에서 참고할 만한 수준의 간단한 마찰력 규명이 목적이며, 식 (5)의 마찰력 모델은 목적했던 바를 충분히 충족시켜 준다.

### 3.5 구동기 검증

Fig. 17은 제작된 구동기의 주파수응답이다. 구동기에 입력된 전압은 1.2 V이다. 기구 제약으로 인해 가동부와 고정부 사이에 충돌이 일어났기 때문에 저역 구간 데이터는 신뢰할 수 없지만 진폭이 작은 고주파 대역에서는 충돌이 발생하지 않았기 때문에 제대로 측정이 되었다. 400.9 Hz에서 -111.3 dB인 데 이는 식 (6)과 같이 2.72  $\mu\text{m/V}$ 이며 가속도로 환산할 경우 17.3  $\text{m/s}^2$ 이다.

$$X = 10^{(-111.3/20)} = 2.722 \text{ (}\mu\text{m/V)} \tag{6}$$

$$|\ddot{x}| = X\omega^2 = X(2\pi f)^2 = 17.27 \text{ (m/s}^2)$$

또한 가속도는 가동부에 가해지는 힘의 합력과 질량에 의해 결정되므로 Table 3의 값들을 이용하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$a = (F_d - F_f)/m \tag{7}$$

$$= (16.65 \cdot 1.2 - 9.366)/0.466$$

$$= 18.98 \text{ (m/s}^2)$$

실험으로 측정한 구동기의 가속도성능과 전자기

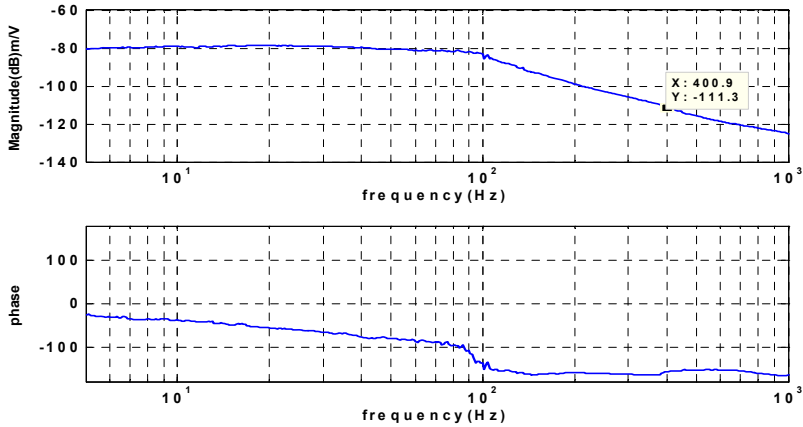


Fig. 17 Frequency response of fabricated actuator

해석 시뮬레이션과 마찰력 측정 실험으로 얻은 값들을 통해 계산된 가속도 성능이 크게 차이 나지 않는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 앞서 수행한 전자기해석 시뮬레이션 결과 및 측정된 마찰력 값이 크게 잘못되지 않았음을 실험적으로 입증하였다.

#### 4. 구동기 개선

구동기의 구동성능을 최대화하기 위해서는 구동력을 증가시키고 마찰력을 감소시켜야 한다. 마찰력은 마찰계수와 수직항력에 의해 결정되는데 마찰계수는 재료 특성이므로 결국 마찰력을 줄이기 위해서는 수직항력을 감소시켜야 한다. 수직항력은 가동 자석과 코일요크 사이의 인력에 의해 발생하는데 자석의 부피를 줄이거나 자석과 요크 사이의 간격을 늘리면 인력을 감소시킬 수 있다. 그러나 이 경우 구동력도 함께 감소하게 된다. 따라서 마찰력과 구동력을 적절히 조화시키는 설계를 찾는 것이 필요하다.

구동력감도가 작으면 구동기는 요구되는 가속도 성능을 만족시키기 위해 더 많은 전력을 소비하게 된다. 구동기에 요구되는 가속도 성능은 외란의 크기에 영향 받게 되는데 휴대폰의 손떨림을 측정하여 정리한 결과  $10.83 \text{ m/s}^2$ 가 필요하였다<sup>(8)</sup>. 그러나 실제로는 외란뿐만 아니라 목표제어성능, 센서와 구동기의 위상지연 등도 고려해야 하므로 구동기는 이보다 더 큰 가속도 성능을 갖춰야 한다. 구동기에서 발생하는 위상지연은 마찰력에 의해 변화하기

때문에 설계 단계에서 정확한 가속도 성능을 정의하는 것은 불가능하다. 따라서 이 논문에서는 요구 가속도 성능  $10.83 \text{ m/s}^2$ 에 임의적으로 50%의 여유를 붙여  $16.25 \text{ m/s}^2$ 로 정의하였다. 가동부의 무게는 자석에 따라 바뀌지만 약 466 mg이므로 구동기의 구동력은 7.573 mN 이상이 되어야 한다. Table 3에서 최대구동력이 37.130 mN인 것을 고려하면 구동력은 충분히 확보된 상태라고 볼 수 있다.

두 번째로 고려되어야 할 사항은 예압력의 최소값이다. 마찰력을 줄이기 위해서 수직항력으로 작용하는 예압력을 줄여야 하지만 예압력이 너무 작을 경우 볼베어링 구조가 유지되지 않는다. 예압력은 최소한 가동부의 무게보다 커야 하며 외부에 충격이 가해져도 어느 정도 유지가 되어야 한다. 모바일 카메라 모듈은 내부 공간이 매우 협소하여 외부 충격에 의해 순간적으로 볼베어링 구조가 풀려도 볼이 완전히 이탈하지는 않는다. 적절한 예압력의 최소값은 경험적으로 정해지는 것이기에 선행개발단계에서 완벽히 정의하기는 어렵다. 이 논문에서는 가동부 무게의 5배인 22.857 mN을 예압력 최소값으로 정의하였다.

상기와 같은 판단들을 종합하여 구동기의 종합적인 성능을 식 (8)과 같은 목적함수를 통해 결정하기로 하였다.

$$\begin{aligned} \min f \\ f = F_f / F_{f,i} \\ \text{const. : } F_n > 22.857 \text{ (mN)} \\ F_d > 15.146 \text{ (mN)} \end{aligned} \quad (8)$$

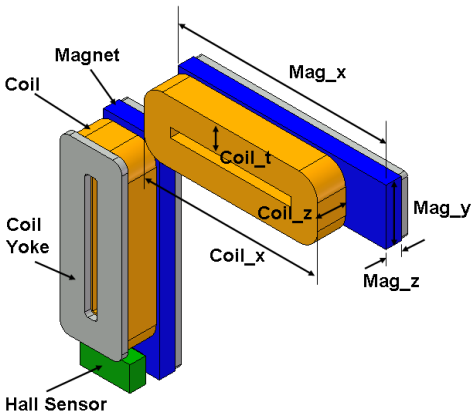


Fig. 18 Design variables

Table 4 Range and level of design variable

Variable	Range	Level
Mag_x	6.3 - 6.7 (mm)	3
Mag_y	1.7 - 1.8 (mm)	2
Mag_z	0.4 - 0.5 (mm)	2
Coil_x	5 - 5.5 (mm)	2
Coil_z	1 - 1.5 (mm)	6
Coil_t	0.55 - 0.75 (mm)	3

$F_d$ 는 구동기의 마찰력이고,  $F_{f,i}$ 는 초기 설계안의 마찰력이다.  $F_f$ 가 작을수록  $f$ 가 작아지므로 목적함수는 오직 마찰력을 감소시키는 것에 목적으로 한다. 제약조건으로서 예압력의 최소값 22.857 mN을 적용하였으며, 구동력은 앞서 구한 7.573 mN의 두 배인 15.146 mN보다 크도록 하였다. 이처럼 정의한 이유는 구동력이 충분히 확보된 상황이므로 구동력을 확보하는 것은 크게 의미가 없으며 구동기의 비선형성분인 마찰력을 최소화시키는 것이 더 중요하기 때문이다. 만약 구동력 부족이 염려되는 상황이라면 식 (9)과 같은 목적함수를 고려해볼 수 있다.

$$f = (F_{d,i} - F_{f,i}) / (F_d - F_f) \quad (9)$$

구동기 개선을 위해서 실험계획법을 이용하였다. Fig. 18은 고려된 전자기부 설계변수들이며 Table 4에 각 변수의 범위와 수준이 요약되어 있다. 초기 설계안은 coil\_t가 0.85 mm였는데 이것은 자석의 폭에 비해 약간 큰 수치였기에 실험계획법에서는 최대값을 0.75로 조정하였다. 또한 설계변수 사이에 상호작용 유무를 모르기 때문에 full factorial array를 사용했다.

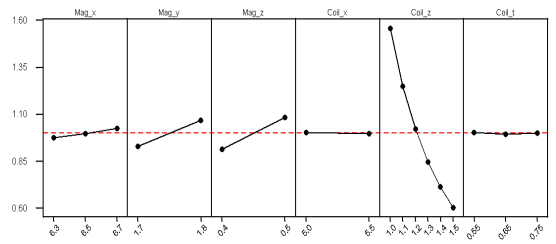


Fig. 19 Main effect plot

Table 5 Selected case by DOE

Item	Previous	Improved
Mag_x	6.7	6.7
Mag_y	1.8	1.8
Mag_z	0.5	0.4
Coil_x	5.6	5
Coil_z	0.9	1.5
Coil_t	0.85	0.75
Sensitivity (mN/V)	16.650	7.852
Max. $F_d$ (mN)	38.295	25.137
Friction, $F_f$ (mN)	9.366	1.668
Preload, $F_n$ (mN)	151.286	23.080

Fig. 19는 실험계획법 수행결과 얻은 각 변수들의 주효과를 나타낸 그래프이다. 자석의 부피가 작을수록, 코일의 두께가 두꺼워져 자석-요크 사이 간격이 멀수록 수직항력이 작아져 마찰력이 감소하는 것을 볼 수 있다. Table 5는 최종적으로 선택된 설계변수들과 그에 따른 성능지수들을 요약한 것이다. 마찰력을 고려하지 않은 초기설계와 비교하면 구동력은 감소했지만 마찰력을 크게 줄인 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 모바일 카메라 모듈을 위한 볼베어링 방식의 OIS 구동기를 설계하였다. 구동기에 응용된 볼베어링은 3개의 볼이 가동부를 지지하여 xy 운동이 가능하게 하는 평면베어링으로 기존에 사용되었던 프리즈매틱 조인트보다 훨씬 작은 마찰력을 가지는 것은 물론 구조도 단순하다는 장점을 지니고 있다. 상용전자기해석 툴인 Maxwell 3D를 이용하여 초기설계안의 구동력과 자기스프링, 홀효과센서의 성능을 예측했고, 실제 구동기를 제작하고 실험하여 마찰력을 측정하고 구동기의 성능을 검증하였다. 마지막으로 실험계획법을 통해 마찰력을 고

려하지 않은 초기설계안을 재설계하여 마찰력과 구동력이 모두 고려된 최종 설계안을 완성하였다.

## 후 기

이 논문은 (주)삼성전기 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2008-0060616)이며, 이에 관계자님들께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Hader, O., Robbins, M., Novogrozky, Y. and Kaplan, D., 1996, "Image Motion Restoration from a Sequence of Images," *Opt. Eng.*, Vol. 35, pp. 2898-2904.

(2) Stern, A. and Kopeika, N. S., 1998, "General Restoration Filter for Vibrated-image Restoration," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. A15, pp. 1512-1519.

(3) Golik, B., 2006, "Development of a Test Method for Image Stabilizing Systems," Diploma Thesis, the Cologne University of Applied Science.

(4) Kauhanen, P. and Rouvinen, J., 2006, "Actuator for Miniature Optical Image Stabilizer," 10th International Conference on New Actuators, pp. 549-552.

(5) Chiu, C. W., Chao, P. C.-P. and Wu, D. Y., 2007, "Optimal Design of Magnetically Actuated Optical Image Stabilizer Mechanism for Cameras in

Mobile Phones via Genetic Algorithm," *IEEE T. Magn.*, Vol. 43, pp. 2582-2584.

(6) Song, M. G., Hur, Y. J., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., Lim, S. C. and Park, J. H., 2009, "Design of a Voice-coil Actuator for Optical Image Stabilization Based on genetic Algorithm," *IEEE T. Magn.*, Vol. 45, No. 10, pp. 4558-4561.

(7) Baek, H. W., Hur, Y. J., Song, M. G., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., Lim, S. C. and Park, J. H., 2008, "Development of OIS Actuator to Compensate for Trembling," *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 509-511.

(8) Song, M. G., Hur, Y. J., Park, N. C., Park, Y. P., Park, K. S., Lim, S. C. and Park, J. H., 2009, "Development of Small Sized Actuator for Optical Image Stabilization," *International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT)*, pp. 152-157.

(9) Lee, G. J., 2007, "Optical Image Stabilizer for Camera Lens Assembly," *Korea Patent Publication No. 2007-0070145*.

(10) Rao, S. S., 2004, "Mechanical Vibration 4th Edition," *Pearson Prentice Hall*, New Jersey, pp. 164-170.

(11) Yi, Y. S., Kim, Y. Y., Choi, J. S., Yoo, J., Lee, D. J. and Lee, S. W., 2004, "Micro-scale Vibration Phenomena in a Linear Motion Guide Having Rolling Elements," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 1029-1034.