

휴대폰 카메라를 위한 OIS 액추에이터 개발

Development of OIS actuator for Mobile Phone Camera

송명규[†], 백현우*, 허영준*, 박노철*, 박영필*, 박경수*, 임수철**, 박재혁**

Hyun-Woo Baek, Young-Jun Hur, Myeong-Gyu Song, No-Cheol Park, Young-Pil Park,
Kyoung-Su Park, Soo-Cheol Lim and Jae-Hyuk Park

(2009년 3월 2일 접수; 2009년 3월 19일 심사완료; 2009년 3월 24일 게재확정)

Abstract

In this study, to compensate trembling of camera caused by vibration of user's hand, 2-axis voice coil actuator of optical image stabilizer (OIS) is suggested. In consideration of actuating performance, volume of OIS and application of hall sensor, one of concept models is selected and it is optimized to maximize the actuating performance. Two types of mechanisms that have the feasibility of moving in 2-axis and the capability of including the optimized EM circuit are proposed. Finally both types are fabricated and then actuating performance of OIS actuator and behavior of hall sensor are verified through the experiment.

Key Words : Actuator(액추에이터), OIS(Optical Image Stabilizer, 광학적 이미지 보정), Electromagnetic Analysis(전자기 해석)

1. 서론

휴대폰에 내장되는 카메라는 즉시성을 장점으로 내세우며 포변화되어 현재는 대부분의 휴대폰이 카메라를 내장하기에 이르렀다. 또한 이동통신 기술 발달로 영상통신이 가능해지면서 카메라는 더 이상 휴대폰의 부가기능이 아닌 필수기능으로 자리 잡았다. 카메라의 핵심 성능인 화질은 여러 요소가 종합적으로 작용하는데 그동안 휴대폰 카메라는 자동초점기능의 내장, 고화소 이미지 센서의 내장 등으로 화질 개선을 꾀해왔다. 이미지 센서의 화소수를 높이는 방법에는 두 가지가 있는데, 첫째는 더 넓은 이미지 센서를 사용하는 방법이고 다른 하나는 센서의 넓이를 그대로 유지한 채 화소의 크기를 줄여 센서의 고밀도화를 통해 화소수를 증가시키는 방법이다. 부피제

약 및 단가 문제로 인하여 화소수 증가는 후자의 방식으로 이루어져왔다. 다만 화소의 크기가 줄어들수록 초점 불일치나 손떨림에 의한 화질 저하가 심해지는 문제가 생긴다. 한편 빛의 세기가 약한 저조도 환경에서는 센서에 충분한 양의 빛이 가해지도록 하기 위해 노출시간이 길어지는데, 부피제약으로 인해 소형 광학계를 사용하는 휴대폰 카메라는 들어오는 빛의 양이 매우 작기 때문에 노출시간을 길게 확보해야 한다. 그러나 긴 노출시간은 손떨림과 같은 진동에 의한 화질저하를 야기하기 때문에 무작정 길게 하지 못하므로 결국 저조도 환경에서의 화질저하를 감수해야 한다. 이런 문제들로 인하여 저조도 같은 특정 환경에서는 오히려 고화소 카메라가 저화소 카메라보다 좋지 않은 화질을 갖게 되기도 하며, 이를 해결하기 위해서 자동초점기능, 손떨림보정기능, 램프 기능이 장착되어야 한다. 이미 고화소 휴대폰 카메라에는 자동초점기능이 기본적으로 내장되고 있는 추세이며, 현재 손떨림보정 및 램프 기능의 추가가 검토 또는 진행되고 있다. 이처럼 카메라의 화질 개선을 위해 고화소 이미지 센서를 적용하고, 이로 인해 불거진 문제점을 해결하기 위해 자동초점기능과

[†] 연세대학교 정보저장공학협동과정
E-mail : netmang@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-4677

* 연세대학교 기계공학과

** (주)삼성전기

손떨림보정기능, 램프 기능 등이 추가되는 것은 이미 디지털 콤팩트 카메라가 밟아왔던 과정으로 휴대폰 카메라는 부피와 가격 제약이 심하여 한 발 늦게 그 발전과정을 따라가는 것으로 분석할 수 있다.

손떨림을 비롯한 외부 진동에 의한 화질 저하를 막기 위해 전통적으로 삼각대 같은 도구를 이용하여 카메라를 단단히 고정시켜왔다. 하지만 이러한 도구는 휴대성과 편의성이 매우 떨어지며, 움직이는 대상을 촬영하기에 적합하지 않다. 따라서 이러한 외부진동을 카메라 내부에서 해결하기 위한 Image Stabilization (IS) 기술이 개발돼 실제 제품에 적용되어 왔다. 특히, 즉시성, 휴대성이 주된 장점인 휴대폰 카메라에서는 외부 진동이 많이 가해지는 환경인 동시에 진동에 대한 화질저하가 민감한 편이기에 IS 기능 내장이 필요하다. 손떨림보정기능은 크게 Digital Image Stabilization (DIS)와 Electronic Image Stabilization (EIS), Optical Image Stabilization 으로 나뉘는데, 카메라의 흔들림을 감지하는 방법과 이미지를 보정하는 방법으로 구분된다. DIS 는 이미지 센서로 얻은 화상 정보만으로 흔들림을 감지하고 이미지를 보정하며, EIS 는 이미지보정에 있어서 DIS 와 비슷하지만 자이로센서로 흔들림을 감지한다는 점에서 다르다. OIS 도 EIS 와 마찬가지로 자이로센서로 흔들림을 감지하지만, 광학계의 일부를 기계적으로 구동하여 광 경로를 변경시켜서 흔들림에 의한 화질저하를 방지한다. 가격은 DIS<EIS<OIS 순서로 저렴하며, 보정성능은 OIS>EIS>DIS 순서로 우수하다. 그 동안 OIS 는 디지털 카메라와 캠코더의 일부 제품에 적용되어 왔으며, 휴대폰 카메라에는 아직 적용된 제품이 없지만 이를 위한 연구들이 진행되고 있다. Piezoelectric Bimorph Bending Actuator 를 이용한 초소형 OIS 에 대한 연구가 이루어졌고[1] Genetic Algorithm 을 이용한 OIS 최적 설계 및 시뮬레이션[2] 그리고 최적화된 설계를 제작하여 실험한 연구도 이루어졌다[3]. 본 논문에서는 휴대폰에 탑재가 가능한 초소형 Image Sensor Module(ISM)을 위한 OIS 구동기가 연구되었다. OIS 구동기에 적용할 수 있는 다양한 구동 방식 중에서 Voice Coil Actuator(VCA) 방식을 선택하였으며, 이에 알맞은 전자기회로를 설계하였다. 또한 OIS 구현을 위한 2 축 선형운동 메커니즘을 연구하여 prismatic joint 기반의 운동 메커니즘 2 종류를 설계하였다. 마지막으로 설계된 운동메커니즘과 전자기회로를 합쳐

2 개의 최종 설계를 완성하였으며 이에 대한 시제품을 제작한 후 실험을 통해 실제 구동성능을 평가하였다.

2. OIS 구현 원리 및 요구사항

2.1 OIS 구현원리 및 시스템 구성

OIS 는 광학 부품의 일부를 기계적으로 움직여서 광 경로를 바꾸어 흔들림을 보정하는 기능이다. OIS 구현 원리 중 렌즈 일부를 움직여 보정하는 방식과 이미지 센서를 움직여 보정하는 방식, 그리고 가변프리즘을 이용하는 방식이 있다. 프리즘방식은 화질이 다른 두 방식보다 좋지 않고 가격도 비싸기 때문에 잘 쓰이지 않는다. 이미지 센서를 움직이는 방식은 이미지 센서에 기계적 진동과 코일 발열이 지속적으로 가해지고, 센서 배선이 움직임을 방해하는 문제가 있어서 휴대폰 카메라에는 렌즈 구동방식이 적합하다. 또한 이미 휴대폰 카메라에는 자동초점(AF) 기능이 포함되어 있으며, 한정된 부피에 AF 와 OIS 기능을 함께 구현하기 위해서 렌즈의 일부가 아니라 기존의 AF 모듈 전체를 움직여 OIS 기능을 구현하였다.

OIS 는 외부진동을 감지하는 진동감지부분과 광 경로 변경을 위해 기계적 움직임을 만들어내는 구동기 부분, 그리고 이를 제어하는 제어부분으로 구성된다. 카메라에 가해지는 진동은 3 차원 6 축 성분으로 구성되지만, 이 중에서 화질에 큰 영향을 주는 것은 pitching 과 yawing 성분이므로 진동감지부분은 이 두 가지 진동 성분만을 감지한다. 보통 2 축 자이로센서가 사용된다. 구동기 부분은 광학부품을 이동시켜 광 경로를 바꿔주는 구동기와 전체 광학계에 대한 광학부품의 상대위치를 감지하는 위치감지센서로 구성된다. OIS 의 제어기는 진동감지부분에서 감지한 진동을 기준신호로 삼아 구동기 부분의 구동기를 구동하여 광학부품의 위치를 제어한다. 정확한 위치제어를 위해 구동기 부분의 위치감지센서의 출력을 피드백 받는다. 본 논문에서는 OIS 구성요소들 중에서 구동기 부분의 구동기 및 위치감지센서 설계만을 다룬다.

2.2 OIS 구동기의 요구사항

구동기 설계를 위해서는 설계에 앞서 최소요구사항을 정해야 한다. 구동기 주요 요구사항으로는 최대변위, 구동감도, 가동부 질량, 최대가속도 등이 있다. 촬영 중 카메라에 가해질 수

있는 외부진동은 다양하지만 가장 주요한 것은 사람의 손떨림이다. Golik (2006)은 레이저 포인터를 이용하여 손떨림 최대 각도를 측정하였는데, 이는 일반 카메라로 수행한 실험이었다 [1]. 이 방식과 더불어 가속도계 및 소형 자이로센서를 이용하여 손떨림을 측정해보았다. 총 6 명의 실험자가 참여하였으며, 휴대폰 카메라 촬영을 가정하기 위해 실제 휴대폰에 센서들을 부착하여 실험을 수행하였다. 대부분의 경우 1° 도 내외의 흔들림 각도가 감지되었으며, 진동주파수는 대부분 16 Hz 이하인 것으로 나타났다. Kauhanen, Rouvinen (2006)은 손떨림을 최대 1.7°, 0~30 Hz 의 대역이라고 언급하였으며 [2], 기존 제품들을 검토한 결과 대부분 최대 1°, 최대 10~20 Hz 의 진동을 보정하기 위해 설계되었음을 확인하였다.

OIS 구동기에 요구되는 최대변위는 최대 손떨림 각도와 카메라 광학계 설계에 의해 결정되는데 [3], 본 논문에서는 현재 판매되는 5 백만 화소 카메라 모듈을 기준으로 하였다. 손떨림으로 인한 최대 흔들림 각이 1.2° 라 가정하였을 때, 이를 보정하기 위해 $\pm 100\mu m$ 의 구동변위가 요구되었다. 또한 16 Hz, $\pm 100\mu m$ 진폭의 구동이 가능해야 한다고 가정할 경우 이는 $1.01m/s^2$ 로 이것이 구동기가 갖춰야 할 최대 가속도이다. 단, 구동기에는 중력가속도 $9.81m/s^2$ 도 가해지므로 이를 극복하기 위해 $10.82m/s^2$ 의 구동가속도가 요구된다. 실제로 기계적 요인이나 제어기, 센서 등에서 발생할 수 있는 위상지연을 고려하면 16 Hz 보다 더 높은 주파수로 구동해야 할 필요성이 있다. 그러나 기계적 요인에 의한 위상지연은 실제 제작하여 실험하기 전까지는 예측하기 어려워 설계단계에서 고려하는 것은 부적절하며, 일반적으로 사용되는 제어기 및 센서의 대역폭은 충분히 높으므로, 제어기 및 센서에서의 위상지연은 무시할만하다. 따라서 구동기에 요구되는 변위 및 가속도성능은 $\pm 100\mu m$, $10.82m/s^2$ 로 설정되었다.

3. VCA 를 이용한 OIS Actuator

3.1 구동 방식 선정

휴대폰 카메라 모듈로서 요구되는 주요 조건은 작은 크기, 적은 에너지 소비, 저렴한 단가 등이다. 이 조건을 만족시키는 구동기 방식에는 Linear Motor,

Piezo Motor 그리고 VCA 세 종류가 있다. 하지만 Linear Motor 는 구조적으로 대변위 구동기에 적합하며, Piezo Motor 는 구동성능이 질량이나 마찰조건에 따라 크게 변하여 신뢰성이 떨어지고, 진동체와 가동부 사이의 마찰을 적절하게 유지시켜주는 기구가 필요하다는 단점이 있다. 또한 VCA 에 비해 고가이고 높은 구동 전압이 필요하다. 반면에 VCA 는 다른 구동 방식에 비해 구동전압이 낮고 구동성능이 좋으며 단가가 저렴하다는 장점이 있다. 또한 전술한 대로 VCA 는 위치감지센서로 사용되는 자기센서를 적용하기에 매우 용이하다. 따라서 본 논문에서는 VCA 를 구동방식으로 선택하였다. VCA 에 전력을 공급하는 Driver IC 의 최대전압과 최대전류가 2.8V, 100mA 이므로 이에 맞게 전자회로를 설계하여야 한다. Driver IC 의 출력전력을 모두 사용하기 위해서 VCA 의 코일 저항은 최대출력전압을 최대출력전류로 나눈 값인 28Ω 이 되도록 설계해야 한다. 또한 앞서 구한 구동사양에 2.8 V 를 적용하여 다음과 같이 구동감도를 구할 수 있다.

$$100\mu m / 2.8V = 35.71\mu m \quad (1)$$

$$10.82(m/s^2) / 2.8V = 3.86m/s^2[V] = 0.39G/V \quad (2)$$

3.2 운동 메커니즘 설계

이미 휴대폰 카메라 모듈은 자동초점(AF) 기능을 갖고 있으며, OIS 를 추가하기 위해 AF 기능을 배제할 수 없다. 한정된 부피에 AF 와 OIS 기능을 함께 구현하기 위해서 기존 AF 모듈 전체를 움직여 OIS 기능을 구현하는 방식을 선택했다. 따라서 AF 모듈이 OIS 구동기의 목표 가동부가 된다. OIS 는 광학계 부품을 광축에 수직인 평면에서 2 축 선형으로 움직여 구현되므로 2 축 선형자유도를 허용하고 나머지 움직임은 제약하는 운동 메커니즘을 설계할 필요가 있다.

2 축 선형 운동을 위해 다양한 운동 메커니즘이 고려되었지만 그 중에서 제작성, 신뢰성, 크기 등을 고려하여 Fig. 1 과 같은 두 가지 방식을 선정하였다. 두 가지 방식 모두 prismatic joint 를 기본으로 구성되며, 축과 가동부 사이에 마찰이 존재한다. Fig. 1(a)의 직렬 메커니즘은 1 축 선형 운동 메커니즘 두 개를 순차적으로 결합하여 2 축 선형 운동을 가능하게 하는 방식이다. 그림과 같이 한 축으로 움직이는 가동부 위에 그에 수직으로 움직이는 운동 메커니즘을 구성하면 최종적으로 2 축 운동이 가능하게 된다.

직렬 메커니즘은 비교적 설계가 간단하며 운동범위를 확장하거나 자유도를 추가하는데 용이하다. 반면 각각의 메커니즘에서 발생하는 동작 오차가 누적되고, 목표 구동부 이외에 메커니즘을 구성하는 부품의 일부도 함께 움직여야 하기 때문에 구동부 질량에 메커니즘 질량이 추가되는 단점이 있다. 동작오차 누적은 전체 시스템의 정밀도를 제약하며, 가동부 질량 누적은 질량 증가로 인해 반응속도가 저하되고, 각 운동방향에 따라 가동질량이 달라 구동특성이 달라지는 문제가 야기된다. Fig. 1(b)의 병렬 메커니즘은 2 개의 1 축 선형 운동 메커니즘이 가동부에 동시에 연결되어 2 축 선형 운동을 가능하게 하는 방식이다. 여기서 각각의 1 축 선형 운동 메커니즘은 서로 영향을 주지 않도록 설계되어야 한다. 그림과 같이 가동부가 x 축으로 운동할 때 y 축 슬라이더는 가동부 움직임에 제약을 주지 않고 미끄러지며, 같은 방식으로 y 축 운동에서 x 축 슬라이더는 가동부에 제약을 주지 않는다. 병렬 메커니즘은 직렬 방식의 단점인 오차와 가동부 질량누적 문제에서 장점을 갖지만, 운동범위를 늘리기 위해 다소 제약이 따르며 자유도를 추가하는 것은 매우 어렵다.

Prismatic Joint 는 축과 가동부 사이에 마찰이 있다. 이 마찰력은 구동력의 크기를 제한하고 위상지연을 발생시킨다. 특히 저역 구간에서의 위상지연이 크다. 마찰은 접촉면의 수직항력과 마찰계수에 의해 결정되는데 잘 가공된 축과 가동부 사이의 마찰계수는 0.1 이하이다. 안전을 고려하여 마찰계수를 0.2 로 가정할 경우 필요한 구동력은 다음 식(3)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} (F_d - F_f) / m &= (F_d - \mu mg) / m > 10.82 (m / s^2) \\ F_d / m &> 12.782 (m / s^2) \end{aligned} \quad (3)$$

F_d 는 구동력, F_f 는 마찰력이며, μ 는 마찰계수, m 은 가동부 질량, g 는 중력가속도이다. 가동부 질량을 500 mg 으로 가정할 경우 요구되는 구동력은 6.391 mN 이다.

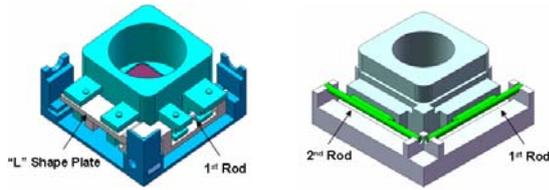
3.3 전자기회로 설계 및 성능해석

본 논문의 OIS 는 자동초점 모듈을 광축에 대해 수직인 평면에서 움직이게 하여 광 경로를 보정한다. 광축을 z 축이라 할 경우 구동력은 xy 평면에 평행하게 발생해야 하는데 이를 만족시키는 전자기회로를 Fig. 2 와 같이 4 개를 고안하였다. 그

다음 고안된 4 개의 설계 중에서 적절한 것을 고르기 위해 Fig. 3 과 같이 구동력, 선형성 그리고 센서의 적용성 여부 등 총 7 가지 기준으로 평가하였다. Figure 3. (a)는 구동력을 의미하며 클수록 좋으며, Fig. 3. (b)는 구동력에 의해 발생하는 회전토크를 나타낸다. 구동력의 작용점과 질량 및 지지중심이 일치하지 않으면 발생한다. Area 와 Height 는 모듈의 크기를 결정하며, Linearity 는 선형성으로 위치에 따라 구동기 성능이 크게 바뀌지 않는 성질을 말한다. Simplicity 는 단순함을 나타내며 부품 개수 및 부품 형상의 복잡성을 바탕으로 평가하였다. Sensor 는 위치센서로 사용되는 홀 센서의 적용 가능성 및 성능 등으로 평가하였다. 평가 결과 4 개의 초기설계 중에서 Fig. 2. (b)의 설계가 가장 적합하다는 결론을 내렸다. Table 1 은 전자기회로의 평가결과를 요약한 것이다.

AF 장치 및 OIS Actuator 전체 크기 등을 고려하여 전자기회로 초기모델을 Fig. 4 와 같이 설계하였다. 홀 센서에 필요한 전압을 공급하기 위해 필요한 배선이 구동성능에 영향을 미치지 않도록 홀 센서를 구동부가 아닌 고정부에 부착하였고 자석을 구동부에 부착하였다. 만약 자석이 아닌, 코일이 움직이는 방식을 사용할 경우 2 개의 코일을 위한 배선 4 개와 2 개의 홀 센서를 위한 배선 8 개가 가동부에 연결되어야 한다. 양산을 위해서 보통 배선은 Flexible PCB 로 처리하게 되는데 총 12 개의 배선을 갖는 Flexible PCB 는 상당한 넓이를 갖게 되어 구동기의 움직임에 지대한 영향을 끼칠 수 있다. Flexible PCB 는 굽힘 강성이 낮아서 보통 구동기의 동작방향을 굽힘 방향에 맞추어 Flexible PCB 의 영향을 최소화하는데 OIS 구동기는 2 축 선형 운동을 하므로 적어도 한쪽 방향에 대해서는 큰 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 배선 문제를 고려할 경우 자석이 움직이는 방식을 사용하는 것이 바람직하다. 부피 제약 조건과 요구코일저항 등을 고려하여 전자기회로를 설계하였다. Figure 5 는 설계변수를 나타내며, Table 2 는 최종 설계된 전자기회로의 요약이다. 자기해석 프로그램인 Maxwell 을 사용하여 설계된 최종전자기회로의 성능을 평가한 결과 구동감도는 9.9132mN/V, 최대전류 100mA 인가했을 때 구동력 27.431mN 인 것을 확인하였다. 가동부 질량이 500 mg 일 때 요구되는 구동력이 6.391 mN 이었던 것을

감안하면 설계된 전자기회로는 충분한 구동력을 확보하였다고 판단할 수 있다.



(a) 직렬 메커니즘 (b) 병렬 메커니즘
Fig. 1 선정된 운동 메커니즘

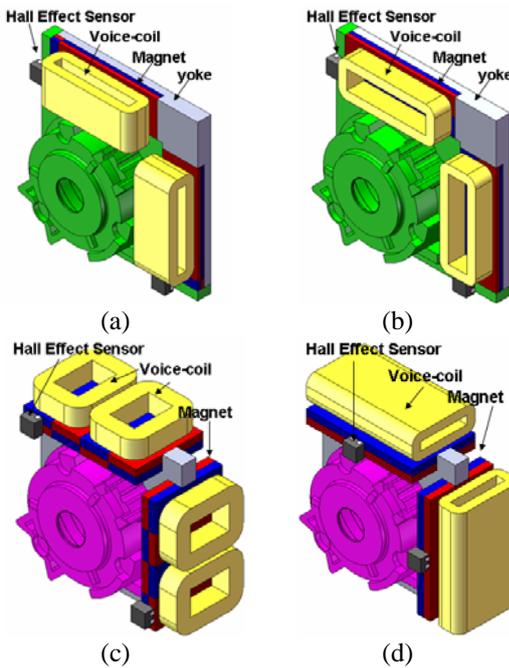
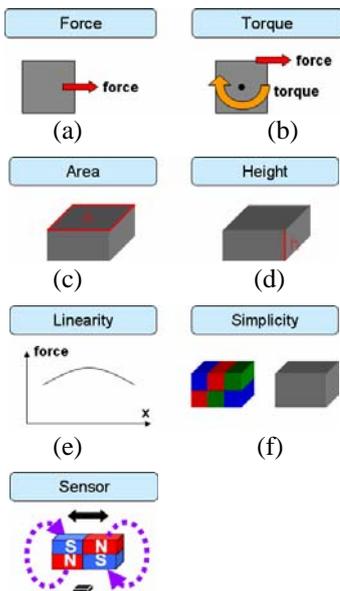


Fig. 2 고안된 4 개의 전자기회로



(g) Fig. 3 전자기회로 평가 기준

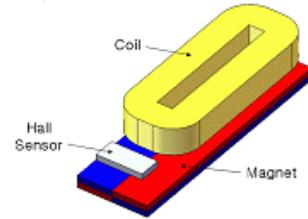


Fig. 4 전자기회로 개념 모델

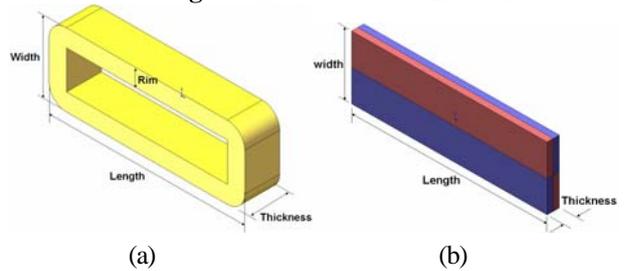


Fig. 5 전자기회로 설계변수

Table 1 전자기회로 평가 결과

Design	(a)	(b)	(c)	(d)
Force (x5)	1	3	2	1
Torque (x2)	3	3	2	1
Area	3	2	2	1
Height	1	1	2	1
Linear (x3)	3	3	2	1
Simple	1	2	3	3
Sensor (x3)	1	3	1	1
Total	28	44	30	18

* 1:bad, 2:medium, 3:good

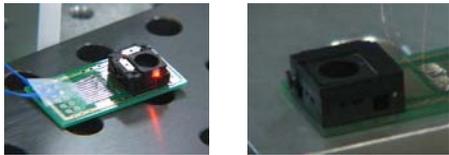
Table 2 최종 선정된 코일의 설계 변수

		Length	Width	Thickness	Rim
Value	Coil	6	2.3	1.14	0.9
(mm)	Magnet	7.5	2.3	0.4	-

4. 시제품 제작 및 실험

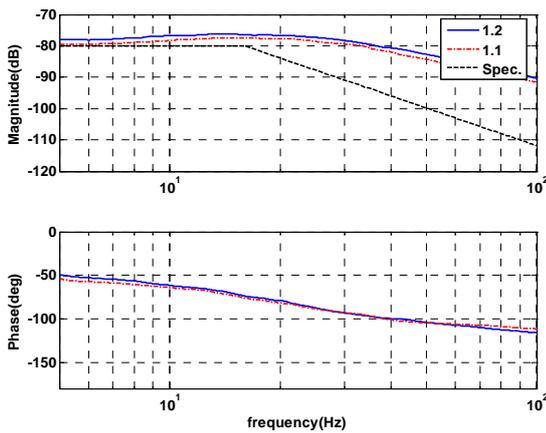
Figure 6 은 제작된 시제품의 사진이며 Fig. 7.(a)는 실험을 통해 얻은 시제품의 주파수응답함수를 구동사양과 비교한 것이다. 그래프에 표시된 요구사양을 정리하면 0~16 Hz 영역에서 $100 \mu\text{m}$ 의 진폭을 가져야 하므로 등변위직선이며, 16 Hz 이상에서는 최대가속도 1.01 m/s^2 를 가져야 하므로 등가속도직선이다. 실험 결과 그래프가 사양보다 전체적으로 큰 값을 갖는다는 것을 확인하였다. Figure 7.(b)는 병렬 메커니즘 방식의 설계를 가진 시제품의 주파수응답함수이다. 직렬과 병렬 방식의 주파수응답함수를 비교해 보았을 때, 16Hz 내에서

병렬 방식의 주파수응답함수 그래프가 위에 있음을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로 같은 전압이 주어질 때 병렬 방식의 이동거리가 직렬 방식보다 크다는 사실을 알 수 있다. 직렬 방식과 병렬 방식에 공급된 최소 전압은 각각 1.5V와 400mV이다. 이 전압은 두 메커니즘의 가동부가 움직이기 시작하는 최소 전압을 뜻한다. 양 방식이 동일한 구동전자기회로를 갖추고 있고 병렬 방식의 전압이 직렬 방식의 그것보다 현저히 낮으므로 병렬 방식 쪽의 마찰력이 훨씬 작다고 추정할 수 있다.

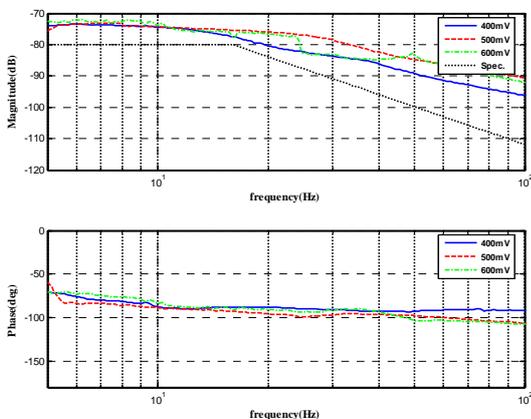


(a) 직렬 메커니즘 (b) 병렬 메커니즘

Fig. 6 제작된 시제품



(a) 직렬 메커니즘



(b) 병렬 메커니즘

Fig. 7 시제품의 주파수응답함수

5. 결론

본 논문에서는 VCA 를 사용한 휴대폰 카메라 모듈에 적용 가능한 초소형 OIS Actuator 를 설계하였으며 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 설계된 두 시제품은 휴대폰 카메라 모듈에 적용 가능한 크기이며, 기존의 AF 장치와의 호환성을 염두에 두고 설계하여 AF 와 OIS 기능 모두를 구현하는데 무리가 없다. 제작된 시제품의 구동성능은 휴대폰에서 발생할 수 있는 손떨림에 충분히 대응할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 (주)삼성전기의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Golik, 2006. Development of a Test Method for Image Stabilizing Systems, Diploma Thesis at the Cologne University of Applied Sciences.
- [2] H. Choi, J.-P. Kim, M. G. Song, W. C. Kim, N. C. Park, Y. P. Park, K. S. Park, 2008. "Effects of motion of an imaging system and optical image stabilizer on the modulation transfer function," Optics Express, Vol. 16, No.25, pp.21132-21141
- [3] P. Kauhanen, J. Rouvinen, 2006. "Actuator for Miniature Optical Image Stabilizer", 10th International Conference on New Actuators.
- [4] C. W. Chiu, C. P. Chao, D. Y. Wu, 2007. "Optimal Design of Magnetically Actuated Optical Image Stabilizer Mechanism for Cameras in Mobile Phones via Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No.6, pp.2582 - 2584
- [5] C. W. Chiu, C. P. Chao, Y. Y. Kao, F. K. Young, 2008. "Optimal Design and Experimental Verification of a Magnetically Actuated Optical Image Stabilization System for Cameras in Mobile Phones", Journal of Applied Physics 103