

초소형 VCM 포커싱 액츄에이터 개발

Development of A Small VCM Focusing Actuator

신 영 철* · 이 승 엽** · 박 영 필***

Young-Chul Shin, Seung-Yop Lee and Young-Phil Park

Key Words : VCM(Voice Coil Motor), Actuator(구동기), Auto-focusing(자동 초점), LDM(리니어 DC 모터), Electromagnetic Circuit (자기회로), Lorentz force(로렌츠힘), Mobile Device(모바일 기기)

ABSTRACT

This paper proposes a small VCM (Voice coil motor) type actuator using curved suspensions for auto-focusing and zoom motions for mobile information devices. The proposed focusing actuator adopts a nontraditional type of suspension using curved beams in order to extend output displacement within small height restriction. The curved beam is similar to the leaf spring type which is usually used in optical disk drives. In addition, three different materials are considered for the curved suspension model, and Aluminum shows the best dynamic characteristics. The proposed zoom actuator does not use a suspension supporting bobbin but a moving rail and a stoper mechanism by generating rotational force at lens holder. The sensitivity of design parameters on output performance is studied using ANSYS (3D FEM tool). Experiments using a prototype of the proposed actuator model verified the analytical prediction and performance.

1. 서 론

최근 모바일 기기 사용자의 급증 및 소비자로부터 다기능, 고품질 제품 요구가 폭발적으로 증가하고 있어서 모바일 기기에 장착되는 카메라에서 디지털카메라 기능을 거의 수용하는 추세로 제품개발이 이루어지고 있고, 이에 따라 카메라의 화소 및 성능 경쟁이 지속되고 있다. 또한 여러 종류의 모바일 기기의 다기능화 추세에 따라 카메라 모듈의 수요 또한 급증할 것으로 예상되고 있다. 카메라 모듈 영역에서는 200만 화소는 자동초점 기능 구현이 가능해야하고, 300만 화소급 이상부터는 광학 줌 탑재 및 모듈 크기의 compact화가 필수적으로 요구되고 있어, 이들 기능을 탑재한 카메라 모듈에 대한 개발 경쟁 또한 더욱 치열해지는 상황이다.

개인용 모바일 기기의 imaging solution은 Mega pixel의 고해상도에 다기능이 부가된 compact한 구조로 발전하고 있어서 모바일 기기의 특성상 크기, 무게, 전력 소모 등 제약 사항을 감안하여 광학 모듈 자체의 크기 뿐 아니라, 탑재된 구동계를

제어하기 위한 구동 장치의 복잡성 및 소비 전력 등을 감안한 기술개발이 필요하다.

카메라폰이나 PDA 등에 장착되는 카메라 광학모듈은 렌즈의 전장을 최대한 줄임으로서 초소형 렌즈를 구현하고, 적절한 비구면계수를 갖도록 렌즈를 형성하여 렌즈에 입사하는 빛의 각도를 줄이고 해상도를 향상시킬 수 있는 활상소자용 카메라 렌즈의 개발이 모바일 기기 소형화에 핵심기술로 대두되었다.

자동초점 기능은 자동으로 렌즈를 일정량 이동시켜 줌으로써 초점을 맞추어주는 카메라의 기능으로, 촬영 물체와의 거리를 감지하여 정해진 위치로 자동 이동하거나 센서의 이미지 출력 신호를 이용한 Auto Focusing Algorithm으로 최상의 이미지가 맺히는 위치로 이동하여 초점을 맞춘다. Optical zoom은 렌즈의 광학적 원리를 이용하여 피사체를 확대 또는 축소하는 기능으로, 영위치를 움직이지 않고 초점거리 및 화각의 변화를 주어 상의 배율을 변화시킨다. 현재 일부 모델을 제외한 대부분의 모바일 기기용 카메라는 Digital zoom 방식을 채택하고 있으나, 이는 디지털 이미지를 구성하는 단위인 화소의 크기를 내장 CPU가 확대하는 방식으로 화질 저하가 매우 큰 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이런 세계적 트렌드에 따라 자동초점 기능과 Zoom 구동이 가능한 초소형 actuator를 개발하기 위한 연구로써 기존의 광피업 모듈의 VCM 타입을 응용하여 actuator를 설계하고 기계적, 전자기적 특성을 분석하여 다양한

* 서강대학교 대학원 기계공학과
E-mail : 101day@sogang.ac.kr
Tel: 02-706-8280, Fax: 02-712-0799

** 서강대학교 기계공학과, 정희원

*** 연세대학교 기계공학과, 정희원

정보를 얻기 위한 연구를 수행하고자 한다. 또한 prototype을 제작하여 실험에 의해 측정된 결과와 비교하여 각각의 계수의 변화와 영향을 추정하고자 한다.

2. AF & Zoom 구동부 설계

2.1 Auto Focusing Actuator의 기본형태

본 연구에서 제안한 소형 모바일 기기용 AF actuator는 Fig. 1과 같다. AF actuator는 구동방식에서 일반 optical pickup Actuator와 맥락을 같이 하지만, lens의 탑재와 공간적 제약으로 인한 lens holder가 차지하는 공간을 줄이기 위해 원통형으로 채택하였다. 또한 AF actuator는 상하방향의 운동만 요구되므로 일반적으로 optical pickup actuator에서 사용되는 leaf spring을 적용한다면 이에 합당한 거동을 보여줄 것이라 생각했다. 그러나 optical pickup actuator에서 일반적으로 사용되는 leaf spring suspension을 적용한다면 설계측면에서 공간적 제약이 있기 때문에 길이를 짧게 할 수밖에 없게 된다. 그러나 길이를 짧게 설계한다면 요구되는 module의 운동변위에 지대한 영향을 미치기 때문에 설계단계에서 원형 모양의 curved beam을 적용하였다. 또한 module의 상하운동을 배제한 다른 mode를 줄이기 위해 suspension의 배치를 lens holder 위 / 아랫부분에 열십자로 배치하였다.

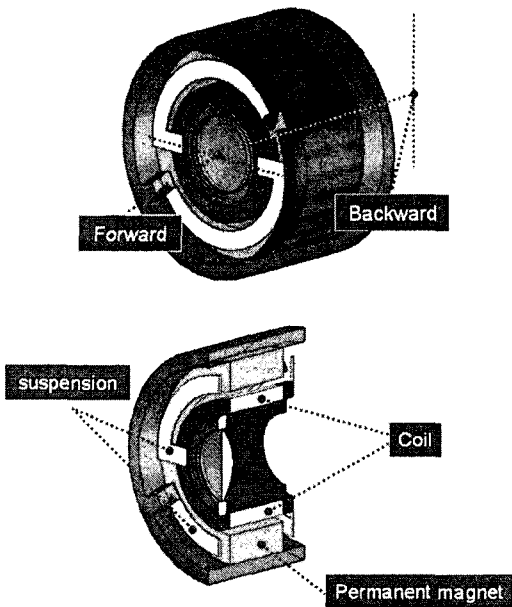


Fig.1 Schematic diagram of Auto Focusing Actuator

2.2 Optical Zoom Actuator의 기본형태

모바일 기기에 적용하기 위한 Optical Zoom Actuator는 기본적으로 LDM(Linear DC Motor)의 구동 방식을 따른다.

suspension으로 지탱되는 AF actuator의 구동은 개발 중인 optical zoom의 요구변위를 따르기에는 무리가 있다. 모바일 기기에서 쓰이는 모듈에서 zoom의 기능을 갖추기 위해서는 적어도 mm단위의 구동변위를 갖춰야 한다. 그러나 AF actuator에서는 suspension에 의해 구동 변위가 μm 단위로 제한된다. 따라서 suspension 구조를 배제한 상태에서 디자인을 하였다. 우선 쉽게 구할 수 있는 재료로 구동방향의 크기는 제외하고 10mm×10mm (prototype : 18mm×15mm)의 크기 내에서 설계를 하였다.

Optical Zoom Actuator는 AF actuator의 형태와 똑같은 자기회로를 가지지만, suspension이 없는 관계로 moving rail을 만들어서 guideline의 역할을 하도록 설계하였다. 이로써 구동변위는 자기회로에서 자석의 배열의 확장을 통하여 구동영역을 확장할 수 있는 구조로 되었다. 그러나 actuator가 상하 구동상태에서 정지를 해야 하므로, 이에 대해 설계된 것이 lens holder의 측면에 자기회로를 구성하여 Shaft type optical pickup actuator와 같이 actuator 자체에 회전을 가해주는 방식을 채택하였다. lens holder의 moving hole의 한쪽 단면에 마찰계수가 높은 물질을 부착하고, lens holder가 회전되어 moving rail 단면과 접촉이 일어나면 정지된다고 가정했다. 또는 lens holder 옆면에 step을 형성한다면 이 또한 정지 상태로 머무를 수가 있다.

상하의 구동측면에서는 lens holder에 coil이 충분히 감겨 있고, 자석 또한 크므로 자기회로의 특별한 설계 없이 구동에 필요한 Lorentz force가 유도된다. 그러나 회전방향의 구동에서는 coil을 위치시킬 수 있는 공간이 제한되어 있고, 자석 또한 작아질 수밖에 없다. 따라서 자기 회로를 설계하여 누설

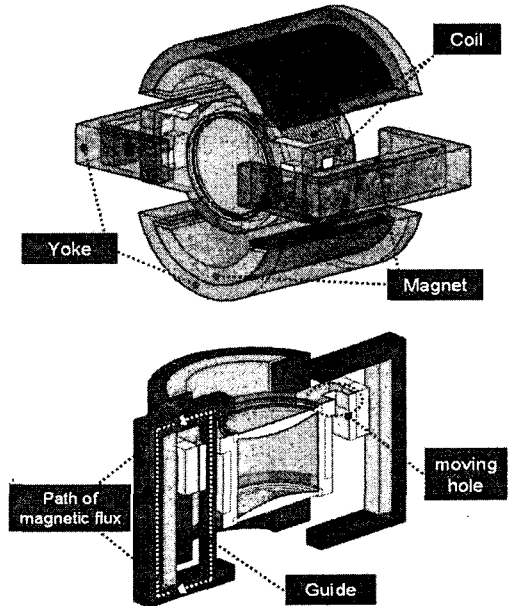


Fig.2 Schematic diagram of Zoom Actuator

자석을 줄이고 Lorentz force를 향상시켜 구동의 신뢰성을 높이고자 하였다.

2.3 Curved leaf spring suspension의 이론적 해석

곡선보(Curved beam)가 적용된 Actuator의 해석을 위해 곡선보의 자유진동을 지배하는 미분 방정식을 다음과 같은 가정 하에 해석한다.

- Assumption 1. 곡선보의 재질은 탄성력을 가지고 있다.
- Assumption 2. 곡선보의 단면의 길이에 비해 보의 원주방향 길이는 매우 크다.
- Assumption 3. 재질의 변화가 존재하지 않는다.
- Assumption 4. 변화곡률이 존재하지 않는다.
- Assumption 5. Curved beam의 단면에서 외평(warping)의 저항은 무시할 정도로 작다.

위에서 언급한 가정(1~5)하에 곡선보의 선형 미분 방정식(Vertical displacement, Torsional rotation)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$EI_y \left(u_z'''' - \frac{\theta_x''}{R} \right) - \frac{GJ}{R} \left(\theta_x'' - \frac{u_z''}{R} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{EI_y}{R} \left(u_z'' - \frac{\theta_x}{R^2} \right) + GJ \left(\theta_x'' + \frac{u_z''}{R} \right) = 0 \quad (2)$$

여기에서 I_x, I_y 는 각 축에 해당하는 inertia moment이고, E, G 는 각각 탄성, 강성계수이며 J 는 비틀림 상수이다. Lens holder에 부착된 수평보의 수직방향의 진동을 고려하여 다음과 같이 수평보의 inertia의 영향을 고려한 motion equation을 나타낼 수 있다.

$$m \ddot{u}_z + EI_y \left(u_z'''' - \frac{\theta_x''}{R} \right) - \frac{GJ}{R} \left(\theta_x'' - \frac{u_z''}{R} \right) = f \delta(x-L) \quad (3-a)$$

$$\rho J \ddot{\theta}_x + \frac{EI_y}{R} \left(u_z'' - \frac{\theta_x}{R^2} \right) + GJ \left(\theta_x'' + \frac{u_z''}{R} \right) = 0 \quad (3-b)$$

where $m = m_{beam} + \frac{M_{Bobbinpart}}{4} \delta(x-L)$

ρ : the density of the curved beam

δ : Dirac's delta function

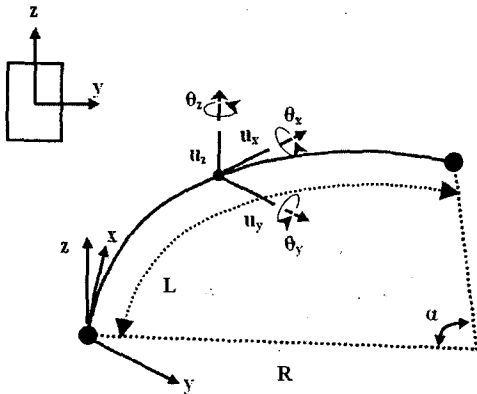


Fig.3 Co-ordinates of curved beam

제시된 equation에서 변위 u_z 는 boundary condition을 만족하는 sine function의 시리즈의 합으로 표현할 수 있고, 이를 식 (2)에 대입하면 θ_x 을 표현할 수 있다. 첫 번째 모드의 영향력을 고려하면 다음과 같이 전개된다.

$$u_z(x, t) = q_{z1}(t) \sin \frac{\pi x}{L}, \quad \theta_x(x, t) = q_{\theta 1} \sin \frac{\pi x}{L} \quad (5)$$

여기서 $q_{z1}, q_{\theta 1}$ 는 1번째 모드에서 일반 좌표계에 대한 상수로 설명할 수 있다. 식 (3)에서 제시된 미분 방정식을 풀기 위해 Galerkin's method를 사용할 수 있다. 첫 번째 식 (3-a)의 양변에 variation δu_z 를 곱하고, 같은 방법으로 식 (3-b)의 양변에 variation $\delta \theta_x$ 를 곱한다. 식 (5)에서 제시된 첫 번째 모드 근사치를 대입하고, 두 미분 방정식에서 0부터 L까지 x에 대한 적분을 시행하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\bar{q}_{z1} + a_1 q_{z1} + a_2 q_{\theta 1}) \delta q_{z1} = \frac{2f_y}{mL} \int_0^L \sin \frac{\pi x}{L} \delta(x-L) dx \delta q_{z1} \quad (6)$$

$$(\bar{q}_{\theta 1} + b_1 q_{\theta 1} + b_2 q_{z1}) \delta q_{\theta 1} = 0 \quad (7)$$

where

$$a_1 = \frac{1}{m} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left[EI_y \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 + \frac{GJ}{R^2} \right], \quad a_2 = \frac{1}{mR} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 [EI_y + GJ]$$

$$b_1 = -\frac{1}{\rho J} \left[\frac{EI_y}{R^2} + GJ \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right], \quad b_2 = -\frac{1}{\rho J} \frac{1}{R} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 [EI_y + GJ]$$

이를 균일해(Homogeneous solution)로 정리하고 외력 f_y 를 포함하는 term을 제거하면 다음과 같이 fundamental frequency(ω_1)를 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_1 - \omega_1^2 & a_2 \\ b_2 & b_1 - \omega_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{z1h} \\ q_{\theta 1h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1 + \sqrt{(a_1 + b_1)^2 + 4a_1 b_1}}{2}} \quad (9)$$

3. Actuator의 FEM 해석

3.1 AF Actuator의 동특성 분석 및 민감도 해석

(1) AF Actuator의 동특성 분석

AF Actuator 모델을 정립하기 위하여 유한요소 해석틀 (ANSYS)을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 현재 모바일 기기의 자동초점 구동방식은 DC input으로 구동된다. 그러나 한 예로 카메라폰의 진동모터가 200~250Hz로 구동되기 때문에 보편화되기 위한 모델을 설계하기 위해서 동특성 분석이 필요하다. 해석 결과 포커싱모드(강제모드)는 100Hz 내외에서 나타났고, 이후에 suspension에 의해 전체 시스템의 틸트모드가 발생되었다. 또한 20kHz까지 유원모드는 나타나지 않았다. Fig. 4와 Table. 1의 해석결과는 초기 설계된 모델의 결과값이 아니라, 전체 크기를 2배 정도로 크게 설계한 prototype 모델의 해석결과이다.

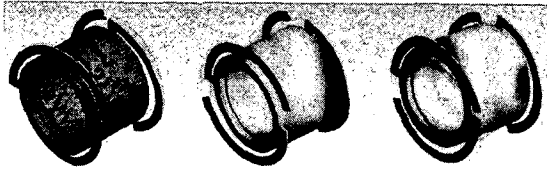


Fig.4 Focus / Tilt mode of actuator(1st~3rd mode)

Table. 1 The results of Modal Analysis

Material	SUS 301	Aluminium	Brass
1st mode	154 Hz	92.8 Hz	108.6 Hz
2nd mode	1060.9 Hz	648.1 Hz	753.03 Hz
3rd mode	1061.6 Hz	649.2 Hz	753.06 Hz
4th mode	2380.4 Hz	1483.6 Hz	1708.4 Hz
5th mode	2466.2 Hz	1576.9 Hz	1720.01 Hz
6th mode	2466.3 Hz	1577.5 Hz	1720.15 Hz

(2) AF Actuator의 민감도 해석

AF Actuator의 연구목표는 우수한 동특성과 큰 구동 변위를 갖는 것이다. 이러한 목표는 suspension의 튜닝을 통해 얻을 수 있다고 판단했고 해석틀을 이용하여 민감도 해석을 수행한 결과 suspension의 폭, 각도, 두께의 세 변수 중 두께에 가장 큰 민감도를 보였다. 그러나 큰 구동변위를 위해 두께를 얇게 설계하면 저조한 동특성을 보이기 때문에 suspension 크기의 변화 없이 조달이 가능한 재료의 변경으로 목표성과를 이루고자 하였다.

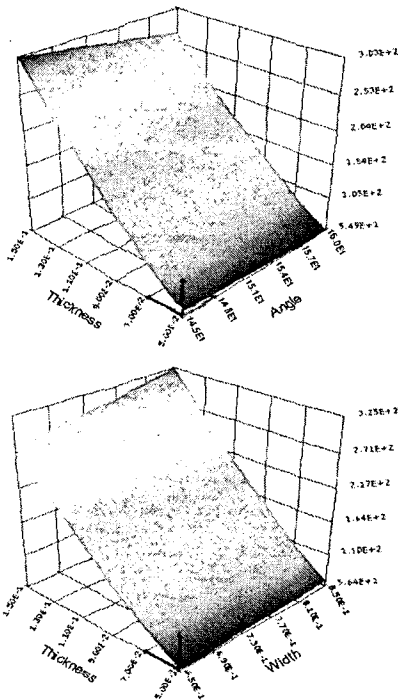


Fig.5 The results of Sensitivity Analysis

3.2 AF & Zoom Actuator의 전자기 해석

(1) Actuator의 전자기 해석

Actuator의 구동 확보여부를 알기 위해서는 자속밀도의 분포와 Lens holder에 감겨있는 coil을 통해 발생하는 Lorentz force를 알아야 하는데, 이를 위해 상용 유한요소 해석틀인 Ansys Workbench와 J-MAG을 이용하여 Fig. 6, 7과 같이 3D 해석을 수행하였다. 이를 통하여 초기 위치에서의 static 해석결과 Lens holder에 감겨있는 coil과 Zoom model의 Lens holder 측부 coil에 발생하는 자속밀도는 Table. 2에 나타내었다.

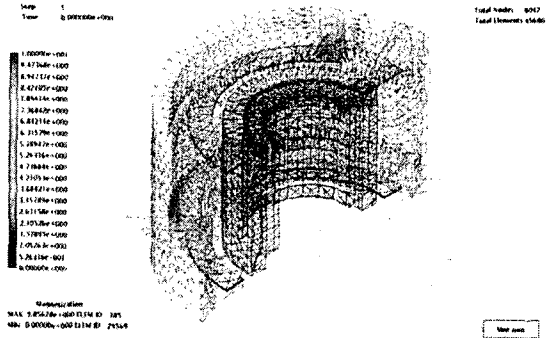


Fig.6 Magnetic flux line distribution of AF actuator

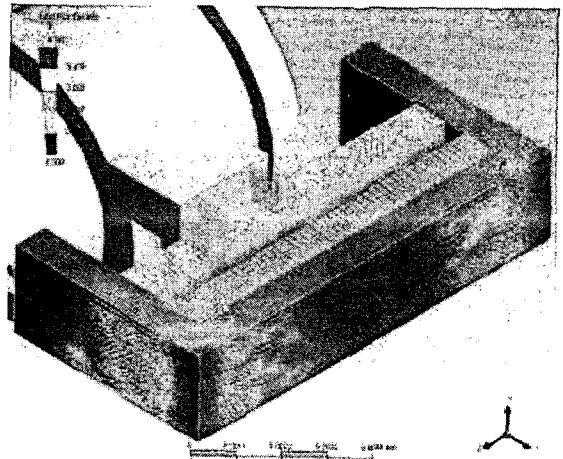


Fig.7 Flux density distribution of Zoom actuator

Table.2 The results of Electromagnetic Analysis

Section	Focus coil (AF model)	Focus coil (Zoom model)	Rotational coil (Zoom model)
Magnet	N-35		
measurement result(surface)	0.2 T	0.2 T	0.27 T
Flux density	0.124 T	0.084 T	0.26 T
Shift(± 0.2mm)	± 0.01 T	± 0.009 T	± 0.02 T

(2) 퍼미언스 모델을 이용한 자기 해석

Zoom actuator의 rotation 구동은 lens holder의 상하운동 이후 안정적인 정지 상태를 구현하기 위해 큰 Lorentz force를 갖는 것이 바람직하다. actuator의 소형화에 따라 시스템에서 유도되어 발생되는 추력의 감소는 피할 수 없다. 이러한 약점을 극복하기 위해 rotation part에 대해 permeance method를 사용하여 자기회로에 대한 전자기 해석을 수행하고 유한요소 해석틀을 이용하여 검증하였다.

Fig. 8은 Zoom actuator의 rotation part의 coil에서의 Flux density를 유한요소 해석틀과 permeance method를 이용하여 계산한 결과값으로 큰 오차가 발생하지 않음을 확인하였다.

Table. 3 Specification of magnetic part

Specification of magnetic part			
Magnet length	10 mm	Magnet	N-35
Magnet thickness	1 mm	Remanence	1.21 T
Magnet width	2.5 mm	Cercivity	868 KA/m
Air gap	3.33 mm	Yoke permeability	1000
Yoke thickness	1 mm	Recoil permeability	1

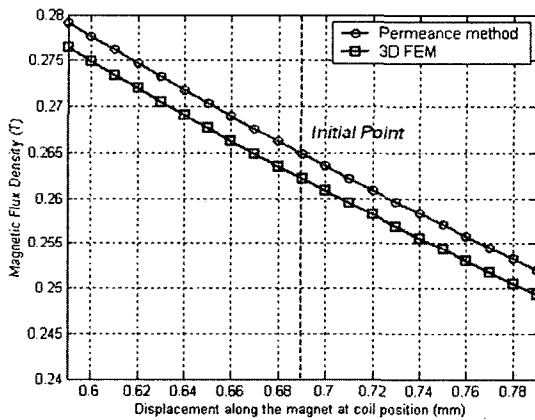


Fig.8 Comparison on FEM with permeance method

또한 Rotation part에서 Flux density에 영향을 미치는 지배적인 변수를 자석의 두께(l_{m2}), 코일이 지나게 되는 공극의 크기(l_g), Yoke의 너비(w)로 설정하고 반응표면법(Response surface model)을 이용하여 설정변수의 민감도 해석을 통해 설계크기의 변경 한도 내에서 우수한 구동을 가지게 할 수 있는 결과를 도출하였다. 각 감도해석에서의 변수들의 변화 range는 전체 system이 소형으로 설계되었기 때문에, $\pm 0.2\text{mm}$ 의 range내에서 해석하였다. 전체 시스템의 크기라는 제약조건에 의하여 가장 큰 자속 밀도를 갖는 자석의 두께와 공극의 크기를 감도해석을 통하여 결정할 수 있다. 이 공극의 크기에 따라 공극을 지나게 되는 구동부의 두께와 코일의 크기 등이 결정될 수 있다. 그러나 lens holder가 제한된 공극 내에서 회전을 해야 하기 때문에, 회전시 영구자석과

coil의 간섭이 발생할 수 있다. 이런 제한사항 때문에 공극을 자석과 coil간 간섭이 발생하지 않는 범위 내에서 결정해야 한다. Fig. 9와 10을 살펴보면 공극을 줄일수록, 자석의 두께는 늘릴수록 더욱 큰 자속 밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

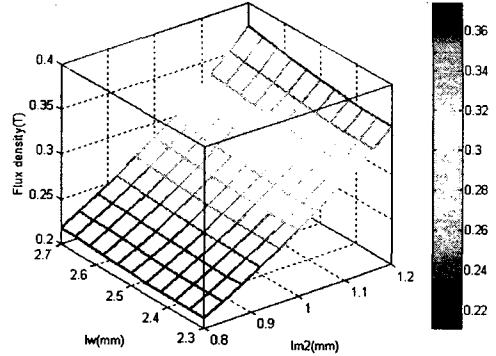


Fig.9 Sensitivity on l_w and l_{m2}

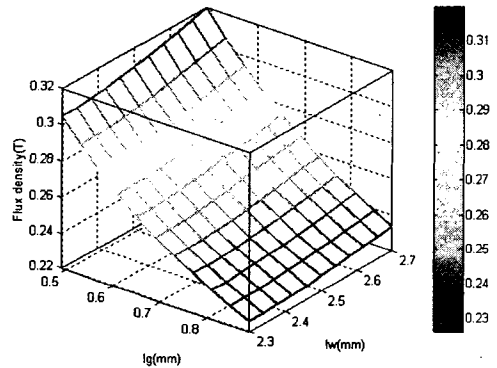


Fig.10 Sensitivity on l_g and l_w

4. 검증 실험

4.1 Actuator의 동특성 및 구동변위 측정

모델의 적합성을 검토하기 위해 prototype 모델을 직접 제작해 실험을 수행하였다. 입력신호는 데이터 측정 및 처리 장비인 시그랩(SigLab)로 전압을 입력하였고, actuator의 주 관심지점인 lens holder의 중앙부에 반사지를 붙여 비접촉 변위센서인 MTI-2000 Fotonic sensor를 통해 출력신호를 측정하였다.

유한요소 해석과 실험결과를 함께 도시한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 차례대로 suspension을 SUS310, Aluminium, Brass로 제작한 모델로 공진주파수를 보면 비슷한 양상을 보이지만, prototype 모델의 조립공차로 인해 1kHz 이후에서 티트모드가 나타남을 알 수 있었다.

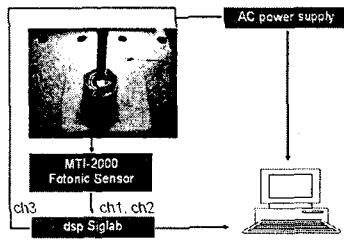


Fig. 11 Experimental Setup

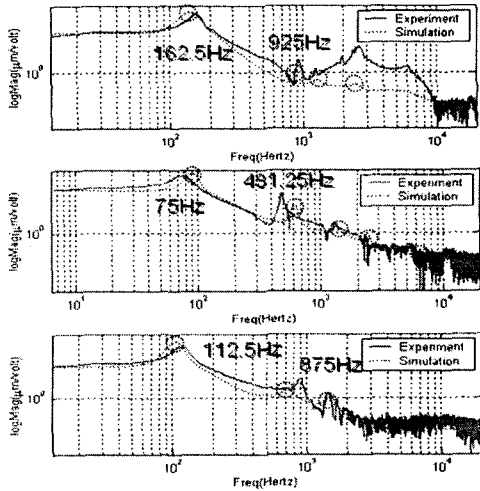


Fig. 12 Comparison with Simulation and Experiment of FRF in focus direction

또한 실험을 통해 측정된 구동변위 결과는 유한요소 해석 틀을 이용하여 해석 결과와 크지는 않지만, 8~15% 오차를 보였다. Fig. 13에 도시된 것과 같이 변위의 크기는 Aluminium, Brass, SUS 301 순으로 결과가 나왔고, Brass는 다른 재료에 비해 잔류진동이 지속적으로 검출되어 suspension에 Aluminium이 가장 적합하다는 결론을 얻었다.

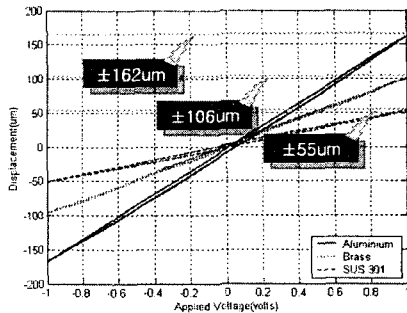


Fig. 13 Experimental result of Displacement

4.2 Zoom Actuator의 동특성

모델의 적합성을 검토하기 위해 prototype 모델을 직접 제작해서 AF actuator와 같은 조건에서 실험을 수행하였다.

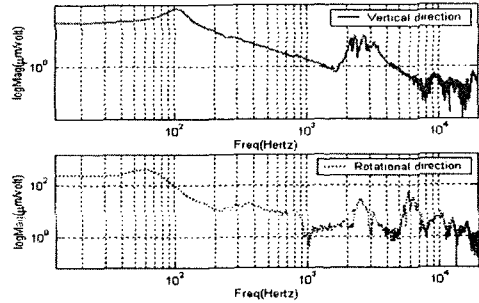


Fig. 14 The FRF of zoom actuator

Fig. 14는 각각 렌즈의 수직방향과 회전방향에서 측정된 결과이다. 유한요소해석 결과와는 약간의 오차를 보이는데, 지역에서 마찰의 효과 등의 비선형적 영향에 기인한 것으로 판단된다. 또한 수직방향 및 회전방향의 2kHz 부근과 9kHz에서 반 공진점이 나타나게 되는데 이것은 유연모드가 가이드의 비선형적 영향에 의한 것으로 예상된다. 위의 주파수 특성 실험을 통해 구동 영역인 저주파수대역에서는 안정된 구동을 갖출 것이라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 전자기장을 이용하여 모바일 기기에 장착이 가능한 자동초점 및 줌 actuator를 제안하였고, 적용 타당성을 위한 힘특성과 동특성을 살펴보기 위해 자기해석과 구조해석을 행하였다. 실제 모델을 제작하여 실험을 수행하였으며, 구동측면에서 유한요소 해석결과와 유사한 결과를 보여주었다. 본 연구에서 제시한 actuator로 전자기장을 이용하여 작은 공간상에서 구성할 수 있고 틸트를 배제하면서 위치제어가 가능한 선형구동 actuator의 참고자료가 될 것이라 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 과학재단 지원에 의한 (R11-1997-042-11001-0) 정보 저장기기연구센터(CISD) 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Y. B. Yang and S. R. Kuo, 1987, "Effect of curvature on stability of curved beams", Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers 113, 1185~1202.
- (2) Y. B. Yang and S. R. Kuo, 1994, "Theory and Analysis of Nonlinear Framed Structures", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Chapter 7.
- (3) 장석명 등, 2000, "불평형 자기회로를 고려한 가동코일형 리니어 진동 액츄에이터의 설계 및 특성 해석", KIEE, Vol. 49B, No. 6, 403~410
- (4) D. K. Lieu, 2001, "Design of Basic Electro-mechanical Device", PREM Research Consortium, 10~118
- (5) L. Huang, et al, 2002, "Movement interferences analysis for objective lens actuator in optical disc system", Sensors and Actuators A : Physical, Vol. 102