

진동 특성을 고려한 마이크로 액추에이터 판 스프링의 최적설계 Optimal Design of Micro Actuator Plate Spring Considering Vibration Characteristic

이종진 * · 이호철** · 유정훈***

Jongjin Lee, Hocheul Lee and Jeonghoon Yoo

Key Words : Optical Pick-Up Actuator(광픽업 구동기), Fine Pattern Coil(미세 형상 코일), Magnetic Flux Distribution(자속 분포), Plate Spring(판 스프링), Topology Optimization(위상 최적화), Parameter Optimization(치수 최적화), Design Of Experiment(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법), Modal analysis(모드해석)

ABSTRACT

Recent issue of optical actuator is applying to mobile device. It leads actuator to become smaller than conventional type. This paper proposes the design of micro actuator plate spring and analysis of its vibration characteristic. Considering natural frequency of spindle motor, 1st and 2nd eigenfrequency of micro actuator must avoid its natural frequency. First, magnetic circuit is designed by using fine pattern coil and magnetic force is acquired by simulation program. Then, concept design is achieved by topology optimization. From concept design, micro actuator plate spring is embodied through DOE(design of experiment). Finally, considering vibration characteristic simultaneously, optimal plate spring design is determined by RSM(response surface method).

1. 서 론

광 정보저장기기의 기록 밀도의 증가는 현재 그 물리적인 한계에 다다른 모습을 보이고 있다. 또한 경쟁상대인 플래시 메모리의 꾸준한 기록량의 증가와 가격의 하락은 기존의 광 정보저장기기의 영역을 침범해 오고 있다. 하지만 저렴한 가격의 미디어와 BD개발에 의한 기록밀도의 증가로 인해 플래시 메모리의 주요 활용분야인 PDA, 휴대용 카메라 등으로 사용범위를 넓히려 하고 있다. 광 정보저장기기를 컴퓨터에서 휴대용 기기로 적용 범위를 넓히기 위해서는 소형화가 필수적이며, 여기에 적합한 초소형 광 픽업 액추에이터의 개발이 현재 가장 큰 연구 과제가 되었다.

본 논문에서는 FP코일을 이용한 자기회로를 바탕으로, 판스프링의 위상 최적화 결과를 이용하여 개념설계를 하였다. 판스프링의 위상설계로부터 얻은 개념설계의 결과물을 상세설계 하기위한 치수설계의 방법으로 반응표면법을 사용할 수 있다. 반응표면법은 국부적인 설계영역의 목적함수

를 근사화 하기 위한 방법으로 실험계획법을 통한 실험점을 채택하여 통계적인 분석 방법으로 근사식을 구성하는 방법이다. 실험계획법의 방법은 근사식의 정확도를 높이고, 실험 횟수를 줄이기 위한 많은 방법들이 연구되었으며, 설계 변수가 적은 문제에서는 곡면의 특성을 잘 반영할 수 있는 중심합성계획법을 사용한다.^(1,2)

설계의 목적으로 스피들 모터의 공진 주파수를 피하여 액추에이터의 1,2차 공진 주파수 대역을 선정 하였고, 기존의 와이어 타입에 비해 1,2차 공진과 3차 부공진 사이의 폭을 넓히는 설계에 주안점을 두었다. 이러한 마이크로 액추에이터에서 판스프링을 사용한 이유는, 크기가 작아지므로 인해서 발생하는 제작공차와 조립공차를 줄이고 제작의 용이성을 증가시키기 위함이다. 또한 기존의 판 스프링과는 달리 굴절되는 부분을 두지 않아서 협소한 공간에 여러 구조물을 배치해야 하는 마이크로 액추에이터의 특성상 공간상의 여유를 가질 수 있도록 한다.

2. 자기 해석

2.1 자기 회로 구성

자기회로는 공간상의 문제 때문에 기존에 사용하던 코일을 배제하고 PCB판에 코일 패턴을 새긴 FP방식의 코일을 사용하여 구성하였다. FPC의 사

* 연세대학교 대학원 기계공학과
E-mail : iloveonlyu@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-2833, Fax : (02) 332-2736

** 삼성전기 중앙연구소
*** 연세대학교 기계공학부

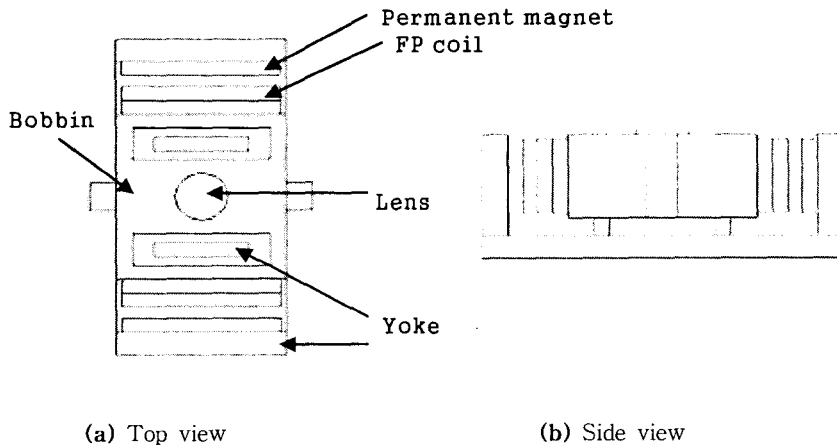


Fig. 1 Micro Actuator Model

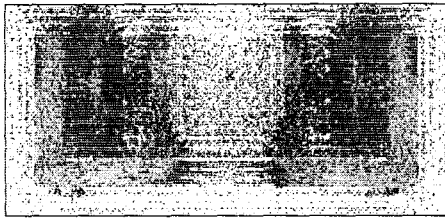


Fig. 2 Magnetic flux vector of Micro Actuator simulation by ANSYS

용은 기존 액추에이터에 비해 코일 와인딩부가 없어지는 대신 FPC 패턴판을 삽입하기 때문에 보빈 형상 설계가 유연해지며 FPC 패턴의 양산시 단가는 코일 와인딩을 하는 수준을 고려할 때 가격 측면에서도 장점을 가진다.⁽³⁾ 또한 이동특성을 고려하며 동시에 요크의 두께, 에어갭의 간격을 고려한 최적설계를 하였다.

2.2 자기 해석

Fig. 2는 자기해석 결과로서, 자석과 코일, 요크 사이의 자속(magnetic flux)을 벡터로 보여주는 것으로, 자속 누설(flux leakage)이 거의 없이 모델이 구성됨을 알 수 있다. 이를 바탕으로 자기력(magnetic force)의 결과를 보면 설계된 마이크로 액추에이터를 구동하기에 충분한 구동력을 발생하고, 이동특성 또한 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 판스프링 설계

3.1 위상 최적화 설계

기존의 판스프링 설계 시 사용하던 여러 가지 초기 설계기법들과는 달리 위상최적화설계를 바탕으로 하여 개념설계를 하였다. 위상최적화설계란 주어진 영역을 유한개의 요소로 분할하여 이산된 각 요소의 밀도 또는 기타 특성을 설계변수로 하여 목적함수와 제한조건에 따른 각 요소의 유무를 판정하여 최종적인 설계위상을 도출하는 방법이다. 구조설계 관점에서 이는 크게 밀도법(density method)과 균질화법(homogenization design method)으로 나누어진다. 균질화법이란 밀도법이 연속체 문제를 이산화 하여 계산한 것과는 달리 연속체의 특성상 요구되는 복합재의 개념과 영역의 완화(relaxation)라는 수학적인 요구조건을 만족시키는 위상최적설계이다.⁽⁴⁾ 여기서는 균질화법을 바탕으로 위상최적화설계를 수행하는 상용 프로그램인 Optistruct를 사용하였다. 모든 최적설계가 주어진 설계영역 내에서 제한조건을 고려하여 목적함수의 최대 또는 최소값을 가지는 설계변수를 찾는 것이므로 위상최적화를 하기위한 최적화 문제를 다음의 식(1)과 같이 나타냈다.

Minimize Frequency

Subject to

$$Total Volume < Maximum Volume \quad (1)$$

식(1)에서 주파수를 최소화 하는 것을 목적함수로 잡았다. 이는 액추에이터의 1,2차 공진주파수를 낮추고 3차 공진 주파수를 높이는 설계에 주안점을 두었기 때문이다. 해석 시 경계조건을 1,2차 공진 주파수는 최소화할 3차 공진 주파수는 경계치

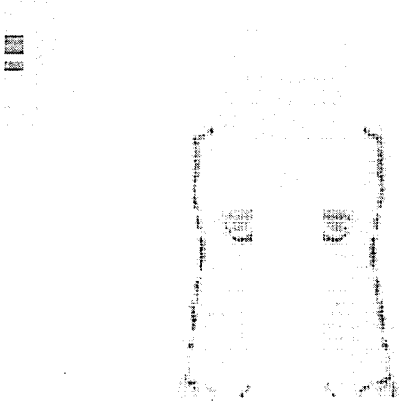


Fig. 3 Result of Topology

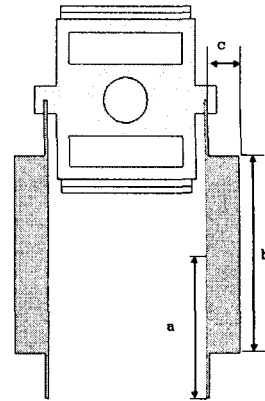


Fig. 5 Design variables

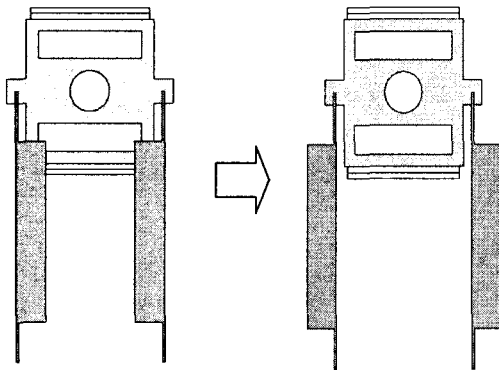


Fig. 4 Smoothing and Modify

	Factor A		Factor B		Factor C	
1	1	1.75mm	1	1mm	1	0.1mm
2	1	1.75mm	2	2mm	2	0.2mm
3	1	1.75mm	3	3mm	3	0.3mm
4	2	3.25mm	1	1mm	2	0.2mm
5	2	3.25mm	2	2mm	3	0.3mm
6	2	3.25mm	3	3mm	1	0.1mm
7	3	4.75mm	1	1mm	3	0.3mm
8	3	4.75mm	2	2mm	1	0.1mm
9	3	4.75mm	3	3mm	2	0.2mm

Fig. 5 Design variables

로 잡은 주파수 이내로 내려오지 못하게 하였다.

Fig. 3은 Optistruct를 이용한 위상 최적화를 수행한 결과이다. 위상최적화는 큰 설계 자유도를 갖기 위하여 넓은 설계 영역에서부터 요구되는 체적을 만족할 때 까지 설계 변수의 값을 반복 조정하여 결과를 얻는다. Fig. 4는 smoothing을 하여 얻어낸 결과이다. Fig. 3에서 보면 안쪽으로 요소가 존재하고 바깥쪽으로는 없어지는 위상을 볼 수 있다. 컴퓨터 모사를 통해 남아있는 요소의 위상이 안쪽으로 들어가거나 바깥쪽으로 나가는 것에 따라 구조해석 결과는 영향을 받지 않는다. 따라서 보빈 양쪽 끝에 위치하는 요크와 영구자석을 그리고 보빈과 증첩되는 부분을 피하기 위해 Fig. 4와 같이 바깥쪽으로 판을 붙이는 모델로 수정이 가능하다.

3.2. Taguchi 방법

Smoothing 결과로부터 치수 최적화를 하기 위

하여 여러 설계변수 중 민감도 해석을 통해 가장 민감한 설계변수를 설정 하였다. 이를 바탕으로 Taguchi 방법을 실행하였다. 실험의 구성은 a, b, c 세 개의 설계 변수로 구성하였고 각각은 3 수준으로 치수를 정한 후 표의 직교 배열구성에 따라 9번의 실험을 하도록 구성하였다.^(5,6) 구성된 실험은 다시 평균분석(ANOM)방법에 따라 각 변수의 치수별 결과를 분석하였다. 분석 결과에 따라 최적 수준을 선정하여 반응표면 근사식 구성을 위한 실험을 새롭게 구성할 것이다.

3.3. 반응표면법

반응 표면식을 구성하기 위하여 반응치를 구하기 위한 설계공간의 실험점을 선택하는 실험계획법중 하나인 중심합성계획법 (CCD; Central Composition Design)을 사용한다. 중심합성계획법은 비교적 적은 실험 횟수로 곡면적 특성을 잘 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있지만, 다분야 통합 최적화 설계와 같이 설계 변수가 많은 복잡한 문제에 대해서는 부적합한 단점이 있다. 그러나 본 논문의 액추에이터 판 스프링은 적은 설계변수를 가지지만 정확한 곡면 특성을 요구하므로 중심합

	Factor A		Factor B		Factor C	
	Level	mm	Level	mm	Level	mm
1	-1	2.50	-1	2.00	-1	0.100
2	-1	2.50	-1	2.00	1	0.200
3	-1	2.50	1	3.00	-1	0.100
4	-1	2.50	1	3.00	1	0.200
5	1	4.00	-1	2.00	-1	0.100
6	1	4.00	-1	2.00	1	0.200
7	1	4.00	1	3.00	-1	0.100
8	1	4.00	1	3.00	1	0.200
9	$-\sqrt{3}$	1.95	0	2.50	0	0.150
10	$+\sqrt{3}$	4.65	0	2.50	0	0.150
11	0	3.25	$-\sqrt{3}$	1.63	0	0.150
12	0	3.25	$+\sqrt{3}$	3.37	0	0.150
13	0	3.25	0	2.50	$-\sqrt{3}$	0.063
14	0	3.25	0	2.50	$+\sqrt{3}$	0.237
15	0	3.25	0	2.50	0	0.150

Frequency		
1st	2nd	3rd
174.59	177.78	406.36
175.70	178.13	410.01
180.66	190.72	430.21
183.88	192.22	439.19
173.97	176.35	403.67
174.63	176.39	404.67
179.24	187.20	424.97
181.69	188.19	429.93
190.11	207.29	441.22
187.08	200.91	429.39
170.43	170.69	396.10
177.28	180.85	432.61
172.35	173.52	404.78
171.84	172.59	410.70
172.84	173.65	411.03

Fig. 6 Central Composition Design and Result value

성계획법을 이용한 반응표면 식을 구성한다. 중심합성계획법은 설계 영역의 중심인 0 수준의 실험점을 중심으로 일정한 크기의 반경을 갖는 위치에 존재하는 실험점들을 선택하는 실험계획법이라고 할 수 있다. 중심점은 설계 수준의 중심으로 예상되는 최적점 부근의 위치를 지정하는 것이 일반적이다. 변수 a, b, c의 수준별 치수와 반응표면 식을 얻기 위한 실험 구성 및 결과는 Fig. 6과 같다.

4. 치수 최적화 결과

4.1 반응표면 근사식 도출

실험의 결과로 나온 1,2,3차 공진 주파수를 가지고 1,2차 공진 주파수는 최소화 3차 공진은 최대화 할 수 있는 수준을 찾기 위한 반응표면 식을 도출하기 위해 1,2차 공진주파수와 3차 공진주파수 결과를 가지고 다음의 식(2)를 이용하여 가중치를 조절하면서 응답을 구하였다.

$$Y = w_1 \frac{y_1}{y_{01}} + w_2 \frac{y_2}{y_{02}} + w_3 \frac{y_3}{y_3} \quad (2)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

y_1, y_2, y_3 : 1,2,3차 공진 주파수

y_{01}, y_{02}, y_{03} : 중심점에서의 각 공진주파수

w_1, w_2, w_3 : 각 항의 가중치

각 수준별로 가중치를 변화해 가면서 가장 최적 값에 근사한 수준을 결정하고 이를 가지고 식(3)과 같은 반응표면 식을 도출하였다.

$$F = 1 - 0.00205x_1 + 0.00075364x_2 - 0.00057422x_3 - 0.00004362x_1x_2x_3 + 0.02267x_1^2 + 0.00095225x_2^2 - 0.00027647x_3^2 + 0.00747x_1^2x_2 \quad (3)$$

x_1, x_2, x_3 : 각 설계변수의 수준

본 논문에서 반응표면 식은 2차식만으로도 만족스러운 결과를 낼 수 있었고, 두개 이상의 변수가 상호작용을 일으키는 것을 막기 위해 교호항을 추가하였다. 통계적 분석을 위해서는 상용 통계분석 프로그램인 SAS를 이용하였고, 식(3)의 신뢰도는 R-square값과 Adjust R-square값이 각각 0.9924, 0.9822로서 충분히 신뢰할 수 있는 반응표면 식이다.

4.2 최적 결과 및 검증

식(3)의 반응표면 식은 가중치를 각각 $w_1=0.33$, $w_2=0.33$, $w_3=0.34$ 일 때 구한 식으로 극대점은 x_1 의 수준이 0.05, x_2 의 수준이 -0.41, x_3 의 수준이 1.74인 지점에 존재하며, 이것을 치수로 계산하면 치수a의 값이 3.29, 치수b의 값이 2.21, 치수c의 값이 0.24가 된다. 이 결과를 가지고 ANSYS를 통해 검증할 경우 오차는 1%이내이며 각각의 공진주파수 결과는 Fig. 7과 같고, 그때의 모델은 Fig. 8과 같다. 성능 개선의 효과를 보여주기 위해 동일한 모델에 지지구조를 와이어 타입으로 바꾸어 모사한 결과와 비교해 보았다. Fig. 7에서 보면 와이어 타입에 비해 본 논문에서 제시한 판 스프링을 사용한 모델의 경우 1,2차 공진 주파수는 1% 내외로 증가한 반면 3차 공진주파수는 24.8Hz, 약 6.06% 증가함을 알 수 있다. 또한 1,2차 공진 주파수의 차이가 와이어 형태보다 더 작아짐을 알 수 있다. 이런 결과의 원인은 포커싱 방향과 트랙킹 방향 모드해석을 하였을 때 지지구조의 변형이 생기지 않는 부분 즉 스프링 역할을 하지 못하는

	1st	2nd	3rd
Wire type	169.50 Hz	170.25 Hz	383.57 Hz
Plate spring type	171.72 Hz	171.88 Hz	408.37 Hz
Percentage of frequency increasing	1.29%	0.95%	6.06%

Fig. 7 Final Result by Optimization

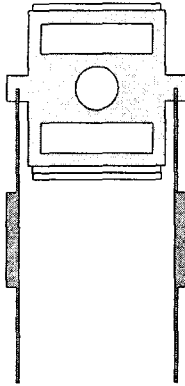
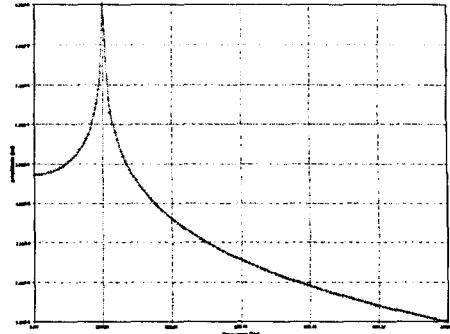


Fig. 8 Optimal Model

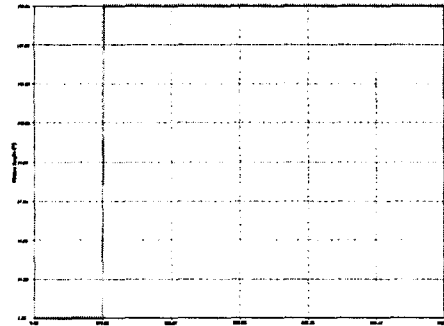
부분에 판이 위치하기 때문이다. 이는 1,2차 공진 주파수에는 거의 영향을 주지 않으나 3차 공진 주파수, 즉 롤링 모드에서는 비틀림을 억제하는 역할을 하게 된다. 따라서 1,2차 공진주파수의 증가량은 최소화 하면서 3차 공진주파수만을 향상시키는 효과를 얻을 수 있었다. 또한 트래킹 방향과 포커싱 방향의 조화 가진 해석을 0Hz에서 1000Hz 까지 200단계로 나누어 수행한 결과 Fig. 9와 같이 다른 모드의 발생이 없는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

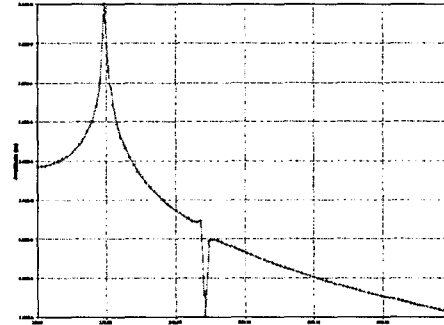
FP코일 타입의 판스프링 지지구조를 가진 마이크로 액추에이터의 1,2차 공진 주파수와 3차 공진 주파수 사이를 멀리하기 위한 방법으로 위상 최적 설계 방법과 반응표면식을 이용한 치수 설계 방법을 이용하여 설계 하였다. 설계된 액추에이터에 대해 유한요소 해석을 이용하여 같은 모델에 와이어지지 구조를 가진 형태보다 더 높은 3차 공진 주파수를 얻을 수 있었다. 또한 해석 결과를 분석해 보면 포커싱과 트래킹 모드 발생시 변형이 생기지 않는 부분에 판 부재를 붙임으로서 1,2차 공진 주파수에 변화를 주지 않으면서 3차 공진이 발생하는 주파수를 높일 수 있었다.



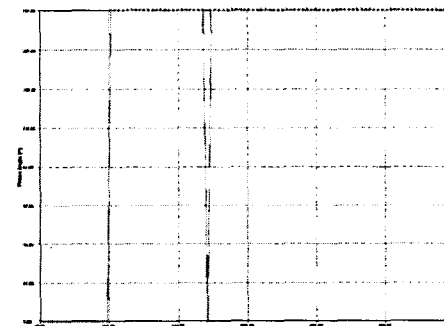
(a) The FRF of Focusing



(b) The Phase Angle of Focusing



(c) The FRF of Tracking



(d) The Phase Angle of Tracking

Fig. 8 FRF and Phase angle of Final Model Actuator

참 고 문 헌

- (1) Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery , 1995, "Response Surface Methodology : Process and product optimization using design experiments", Wiley
- (2) William Y. Fowlkes and Clyde M. Creveling, 1995, "Engineering Methods for Robust Product Design", Addison Wesley
- (3) 정호섭 등, 1998, "FP 코일형 광픽업 액추에이터의 설계 및 부공진의 진동저감 대책", 한국소음진동공학회지, 제 8권, 제 4호, pp. 643~653.
- (4) 유정훈, 2003, "구조물의 위상 최적설계에 대한 고찰", 전산조공학회지, 제16권, 제 1호, pp. 77~85
- (5) Ranjit K. Roy, 2001, "Desing of Experiments Using the Taguchi Approach", Wiley
- (6) Hirotsugu Fusayasu and Yssuo Yokota, 1998, "Optimization of a Magnetic Actuator with Taguchi Method and Multivariate Analysis Method", IEEE TRANSCCTIONS ON MAGNETICS, Vol. 34, No.4