

가동 자석형 3축 구동 액츄에이터

3-axis Moving Magnet Type Actuator

허영준† · 송명규* · 박노철* · 유정훈** · 박영필**

Young-Jun Hur, Myeong-Gyu Song, No-Cheol Park, Jeong-Hoon Yoo and Young-Pil Park

Key Words: 3-axis actuator(3축구동액츄에이터), design of experiment(실험계획법), moving magnet type actuator(가동자석형액츄에이터)

ABSTRACT

The optical disc drive has used a high NA objective lens and a shorter wavelength laser diode for high recording density. But high NA and shorter wavelength cause several margins to become short. Focusing and tracking servo has to be more accurate and active tilt compensation mechanism is also needed for coma aberration compensation. In this paper, we proposed 3-axis moving magnet type actuator. For 3-DOF motion, moving coil actuator has to equip 6 wires for supplying 3 independent signals. However, moving magnet type actuator doesn't need to change the configuration of wires because coils are in stator. So, we added tilting mechanism to 2-axis moving magnet actuator which is designed in previous research. Addition of the tilting mechanism cuts down the focusing sensitivity. So, maximization the tilting sensitivity and securing the focusing sensitivity are objectivities of this research. DOE (design of experiments) procedures of electromagnetic circuit are performed for parameter study and the optimization is also performed to maximize the tilt sensitivity. And then the final design is suggested and its performance is verified by FE simulation.

1. 서론

광학 디스크 드라이브는 최초 등장한 이래로 두 가지 측면을 발전시키고자 노력해왔다. 하나는 기록 밀도이고, 다른 하나는 데이터 전송률이다. 최초의 Compact Disc 규격에서 최근의 Blu-ray Disc, HD DVD 규격에 이르기까지 광학 디스크 드라이브 규격은 기록밀도의 향상을 위해 더 짧은 파장의 레이저와 높은 개구수를 사용하도록 변화해왔다. 하지만 이러한 광학시스템은 높은 정밀도의 위치제어 시스템을 요구하므로 제어기 및 액츄에이터의 성능 또한 함께 향상되어야 한다. 디스크의 고배속화는 기록밀도 향상과 함께 광학 디스크 드라이브의 성능 향상의 주된 방향이었다. 기록밀도 향상이 광학 디스크 규격 변경 과정에서 얻어지는 향상인 것에 반해, 고배속화는 동일 규격 내에서 이루어지는 데이터 전송률 향상이다. 고배속화는 데이터 전송률을 높이기 위해 보다 빠른 속도로 디스크를 회전시키는 것으로 회전 속도가 증가할수록 데이터 전송률도 높아지지만 디스크의 진동도 커지기 때문에 이를 추종할 수 있는 고성능 서보 및 액츄에이터가 요구된다. 또한 광학 시스템의 개구수가 높아지고 광원의 파장이 짧아지면서 여러 수차가 증가하게 되는데 이 중에서 광학 디스크와 대물렌즈의 직각도 편차로 인한 코마 수차

가 문제가 되고 있다. 이에 따라 광학 디스크와 대물렌즈 사이의 상대적인 기울기를 능동적으로 보상하는 3축 구동 액츄에이터에 대한 연구도 진행되어 왔다. [1], [2]

김상룡 등은 가동 자석형 액츄에이터를 설계하였는데 이 액츄에이터는 100kHz 보다 높은 2 차공진주파수를 갖고 있으며 삽입형 트래킹 코일을 사용하여 가동 자석형 액츄에이터의 단점인 낮은 구동감도를 어느 정도 보완하여, 고배속 광학 디스크 드라이브에도 대응할 수 있는 것이 특징이다.[3],[4] 그러나 해당 액츄에이터는 포커싱과 트래킹 구동만이 가능하며, 코마 수차를 발생시키는 광학 디스크와 대물렌즈 사이의 상대적인 기울기를 능동적으로 소방할 수 없다. 이에 본 논문에서는 기존에 포커싱과 트래킹 2축 방향을 제어하던 기존 액츄에이터의 자기회로를 개선하여 롤링 구동이 가능하도록 하는 3축 구동 액츄에이터를 제안하였다. 3축 구동을 위해 기존 자기회로의 포커싱 코일의 길이를 줄이고 그 공간에 롤링 구동을 위한 코일을 추가하였는데 포커싱 코일의 길이 감소로 인한 포커싱 구동 감도 저하가 불가피했다. 따라서 포커싱 구동감도 저하를 일정 수준 이하로 유지하면서 롤링 구동감도를 확보하는 연구가 필요했다. 이를 위해 포커싱 코일과 틸팅 코일을 중심으로 6개의 설계 변수를 선정하여 DOE 과정을 통해 각 변수들의 민감도 및 변화 경향을 살펴 보았으며, 다시 2개의 설계변수를 선정하여 최적화 과정을 거쳐 포커싱 구동감도를 확보하면서 최대한의 롤링 구동성능을 얻도록 자기 회로를 개선하였다. 마지막으로 Ansys의 연성해석을 통해 개선된 자기회로를 적용한 액츄에이터가 충분한 구동성능을

† 허영준; 연세대학교 기계공학과

E-mail : schezar@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-3847, Fax : (02) 365-8460

* 연세대학교 정보저장기기연구센터

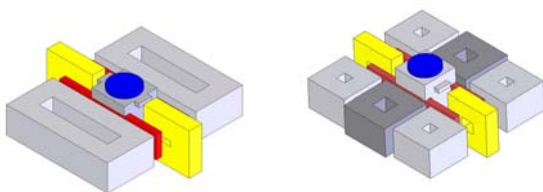
** 연세대학교 기계공학과

가지는 것을 확인하였다.

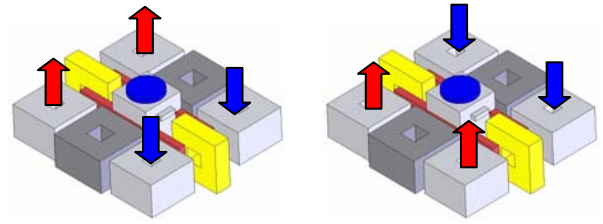
2. 롤링 구동용 자기회로 설계

기존의 액츄에이터에 롤링 구동을 추가하여 그림 1 과 같은 자기회로를 고안하였다. 기존의 자기회로에서 포커싱 코일의 길이를 줄이고, 양 옆에 롤링 구동을 위한 틸팅 코일을 추가하였다. 기존 액츄에이터의 자기회로가 높은 구동감도를 갖도록 최적화된 상태였기에 자석의 크기 및 트랙킹 코일은 그대로 유지하였다. 4 개의 틸팅 코일은 모두 포커싱 방향의 구동력을 발생시키며 그림 2 와 같이 구동력 차이를 통해 롤링 구동과 피칭 구동을 발생시키는 회전모멘트를 만들어낸다. 하지만 모드해석 결과 그림 3 과 같이 액츄에이터를 지지하는 와이어 스프링의 회전강성이 매우 큰 차이를 나타내고 있음을 발견하였다. 모드해석 결과를 토대로 계산된 회전강성은 각각 $3.585 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, $2.35255 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 으로 피칭 방향의 회전강성이 롤링 방향의 그것에 비해 6500 배 이상 크므로 피칭 구동의 저역감도가 매우 낮을 것으로 예상할 수 있다. 피칭 구동의 저역감도를 사용 가능한 수준까지 높이기 위해서는 와이어 스프링의 회전강성을 낮춰야 하는데 이를 위해서 와이어의 두께 및 부착 위치 등을 변경해야 한다. 하지만 이러한 변경은 액츄에이터의 전반적인 설계 변경을 요구할 뿐만 아니라 포커싱과 트랙킹 구동방향의 선형강성 및 롤링 방향의 회전강성에도 영향을 끼치기 때문에 다른 강성은 그대로 유지한 채 피칭 방향의 회전강성만 낮추기가 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 롤링 구동만 추가하여 3 축 구동 액츄에이터를 설계하는데 초점을 맞추었다.

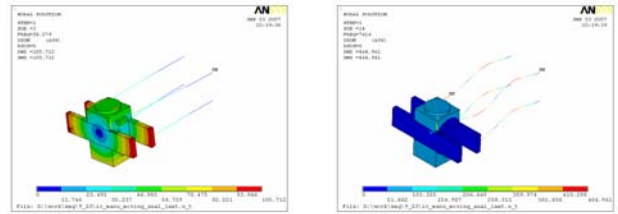
코일에서 발생하는 전자기력은 코일의 유효길이에 비례한다. 새로 제안된 자기회로는 기존 자기회로와 비교하여 포커싱 코일의 길이가 감소하였기 때문에 포커싱 구동감도 저하를 피할 수 없다. 따라서 포커싱 구동감도 저하를 일정 수준 이하로 유지하면서 롤링 구동감도를 확보하는 것이 제안된 자기회로 설계의 핵심 중 하나이다.



(a) 기존모델 (b) 새로운 모델
그림 1. 롤링 구동이 추가된 자기회로



(a) 롤링 구동 모멘트 (b) 피칭 구동 모멘트
그림 2. 틸팅 코일



(a) 58.3 Hz (b) 7616 Hz
그림 3. 롤링 및 피칭 구동의 고유주파수

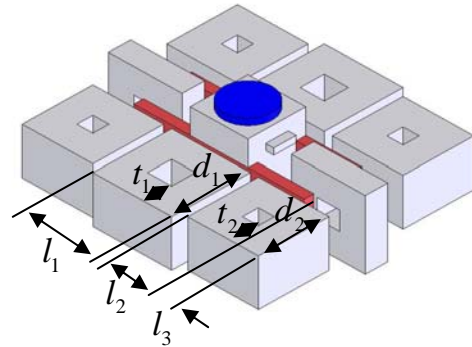


그림 4. 설계변수

3. 자기회로 최적화

3.1 실험 계획법을 이용한 자기회로의 개선

자기회로를 개선하기 위해 먼저 그림 4 와 같이 6 개의 설계변수를 선정하였다. l_1 , t_1 , d_1 은 포커싱코일을 결정하는 변수들이며, l_3 , t_2 , d_2 는 틸팅 코일의 크기를 결정하는 변수들이다. l_2 는 l_1 과 l_3 에 의해 결정되는 종속변수이다. 조립공차를 고려하여 포커싱 코일과 틸팅 코일 사이에 0.2 mm 의 간격을 넣었다. 보통 코일 하나의 크기를 완전하게 결정하기 위해서는 4 개의 설계변수가 필요하므로, 두 종류의 코일의 형상을 결정하기 위해서는 8 개의 설계변수가 필요하다. 그러나 기존의 자기회로에서 쓰인 자석을 변경하지 않기로 하였기에 자석 높이와 관련된 변수가 고정되어 각각 3 개씩, 총 6 개의 설계변수만이 도출되었다. 각 변수가 포커싱 및 롤링 구동감도에 끼치는 영향을 알아보기 위해 DOE (Design of

Experiments)를 수행하였다. 3 수준 완전배치법을 사용하여 각 변수의 주효과와 변수 사이의 교호작용 효과를 보았다. DOE 를 수행한 결과 I_1 과 I_3 가 포커싱 및 롤링 구동감도에 크게 영향을 주는 반면 다른 변수들의 효과는 무시할만한 수준임을 알 수 있었으며, 주효과가 큰 I_1 과 I_3 사이에 교호작용효과가 없다는 사실도 확인하였다. 보다 정확한 분석을 위하여 I_1 과 I_3 만의 6 수준 완전배치법을 이용한 DOE 과정을 추가로 수행하였다. 그림 5 는 그 결과로 얻은 I_1 과 I_3 의 주효과 및 교호작용효과로 둘 사이에 교호작용이 존재하지 않는 것을 다시 확인하였다. 그림 5 를 보면 I_1 의 주효과가 I_3 의 그것보다 작은 것처럼 보이지만 변수 I_1 의 범위가 I_3 의 그것보다 짧기 때문에 실질적으로 I_1 과 I_3 의 주효과는 거의 동등하다.

3.2 자기회로 최적화

앞서 DOE 과정을 통해 선정된 설계변수 I_1 과 I_3 를 설계변수로 하여 최적설계 과정을 수행하였다. 자기회로의 설계 목적이 포커싱 구동감도의 저하를 일정 수준 이하로 유지하면서 롤링 구동감도를 최대화하는 것이었다. 따라서 목적함수는 롤링 구동감도를 최대화하기 위한 함수로 정의되어야 하며, 구속조건은 포커싱 구동감도의 최소치를 정의하는 방식으로 하였다. 식(1)과 식(2)은 최적화를 위해 정의된 목적함수와 구속조건이다.

$$\text{Minimize: } f(x) = \frac{M_{i,tilt}}{M_{tilt}} \quad (1)$$

$$S_{focus,DC} \geq 0.191 \text{ mm/V} \quad (2)$$

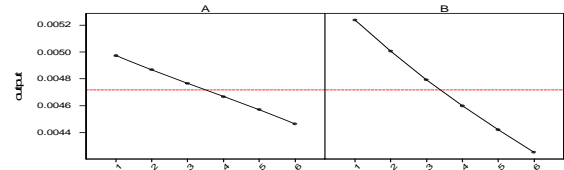
$$S_{focus,AC} \geq 2.637 \text{ G/V}$$

M_{tilt} 는 톨팅 코일에서 발생하는 모멘트를 나타내며 $M_{i,tilt}$ 는 최적화 과정 첫 단계에서의 모멘트를 나타낸다. $S_{focus,DC}$ 와 $S_{focus,AC}$ 는 각각 저역 및 고역 포커싱 구동감도를 나타내며 0.191 mm/V 와 2.637 G/V 는 기존 액츄에이터 구동감도의 33.3%에 해당되는 값이다. 최적화 방법으로는 Sequential Quadratic Programming 을 사용하였으며 각 설계변수들의 초기 값은 앞서 DOE 과정에서 얻은 가장 좋은 조합으로 설정하였다. 그림 6 는 목적함수의 수렴과정을 보여주며, 그 결과 얻어진 각 설계변수들의 최적값은 표 1 과 같다. I_1 , I_3 는 최적화 과정을 통해 얻어진 값이며, 나머지 변수들의 값은 앞서 행해진 DOE 과정에서 얻어졌다.

표 1. 도출된 설계 변수의 최적값

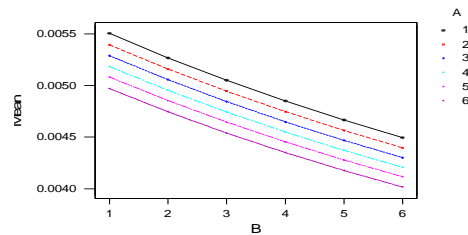
변수	I_1	t_1	d_1	I_2	t_2	d_2	I_3
값	4	0.5	5.2	3.2	0.825	3.5	0

Main Effects Plot - Data Means for output



(a) I_1 과 I_3 의 주효과

Interaction Plot - Data Means for output



(b) I_1 과 I_3 의 교호작용효과

그림 5. I_1 과 I_3 의 DOE 결과

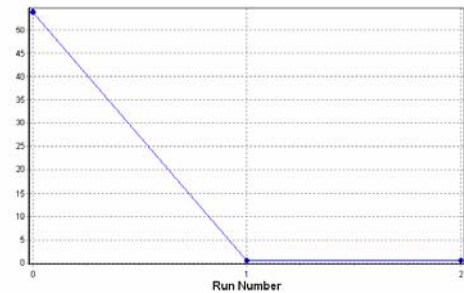


그림 6. SQP 를 이용한 자기회로 최적화 과정

4. 최종모델의 구동성능

완성된 자기회로를 적용한 액츄에이터의 구동성능을 해석하였다. 설계된 자기회로가 발생시킬 수 있는 회전모멘트는 $2.407 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m/V}$ 이며, 와이어 스프링의 회전강성과 액츄에이터의 관성모멘트는 각각 $3.585 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, $2.674 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 이다. 이 값들을 식(3)에 대입하면 간단하게 액츄에이터의 저역 감도와 고역감도를 계산할 수 있다.

$$S_{DC} = \frac{M}{K_{\theta}} = 3.847 \text{ }^{\circ}/\text{V} \quad (3)$$

$$S_{AC} = \frac{M}{I_{\theta}} = 5.157 \times 10^5 \text{ }^{\circ}/\text{s}^2 \cdot \text{V}$$

또한 설계된 자기회로를 적용한 ANSYS 연성해석모델을 구축하여 위 계산결과를 검증하였다. 그림 7 은 ANSYS 해석을 통해 구한 액츄에이터의 주파수 응답을 보여주며, 표 2 는 새로 제안된 액츄에이터의

구동특성을 이전의 모델과 비교한 것이다. 식(3)을 통해 구한 값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 액츄에이터의 가동부와 트래킹 구동을 위한 자기회로는 기존의 모델과 동일하지만 와이어 구성에 변화가 있었기 때문에 트래킹 방향의 저역감도가 약간 다르다.

5. 결론

가동자석형 액츄에이터는 가동코일형과 달리 가동부에 전류를 공급할 필요가 없기 때문에 구동 자유도가 증가하더라도 와이어 스프링의 구성을 바꿔야 할 필요가 없다. 본 논문에서는 이러한 가동자석형 액츄에이터의 장점을 살려 기존의 가동자석형 2축 구동 액츄에이터의 자기회로에 단순히 톨링 코일을 추가하는 것만으로 3축 구동을 가능하게 하였다. 변경된 자기회로는 포커싱 구동감도 저하를 야기했지만 DOE 와 최적설계과정을 통해 포커싱 구동감도 저하를 일정 수준 이하로 억제하면서 충분한 톨링 구동감도를 얻을 수 있었다.

표 2. 설계된 액츄에이터의 구동성능

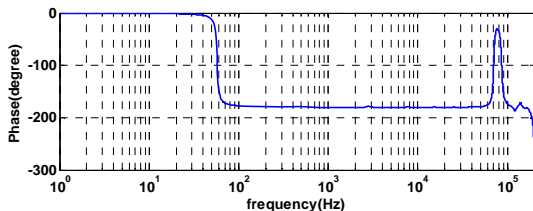
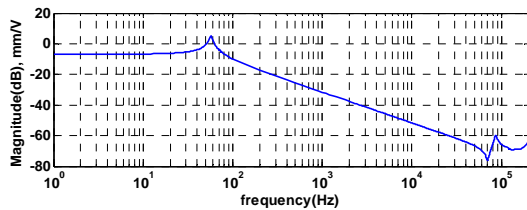
		이전 모델	새 모델
트래킹	저역(mm/V)	0.502	0.514
	고역(G/V)	6.9	6.9
포커싱	저역(mm/V)	0.572	0.210
	고역(G/V)	7.9	2.8
롤링	저역($^{\circ}/V$)	-	3.811
	고역($^{\circ}/s^2 \cdot V$)	-	5.1×10^5

후기

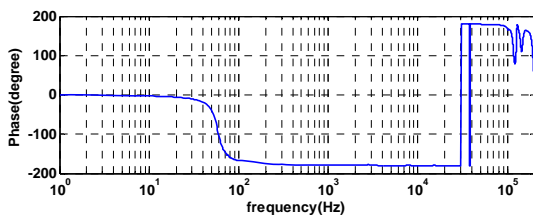
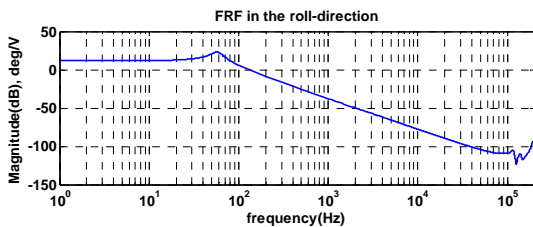
본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(과제 번호:R01-2006-000-10074-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Yoon, Y. B., Shin, K. S., Nam, D. S. and Yang, Y. T., 2005, "Development of 3-Axis Slim Actuator Using Moving Magnet and PCB", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.15, No.2, pp.156~160.
- (2) Park, K. W., Suh, M. S., Hong, S. N., Kim, Y. J., Choi, I. H., Kim, J. Y., 2002, "A Study on Dynamic Characteristics of 3-axis Actuator for the Slim Type Pick-Up", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 373~377.
- (3) Kim, S. R., Kim, Y. G., Song, M. G., Woo, J. H., Park, N. C., Yoo, J. H. and Park, Y. P., 2007, "Design of Moving Magnet Type Optical Pickup Actuator", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, KSNVE07S-24-04.
- (4) Kim, Y. G., Song, M. G., Park, N. C., Yoo, J. H., Park, Y. P., Onagi, N. and Akanuma, G., 2007, "Design of Moving Magnet Type Pickup Actuator Using Inserted Coil", ASME Information Storage and Processing Systems Conference, pp. 188~190.



(a) 포커싱 방향 주파수 응답



(b) 롤링 방향 주파수 응답

그림 7. 설계된 액츄에이터의 주파수 응답 특성