

가동 자석형 3축 구동 액츄에이터 개발

Development of 3-axis Moving Magnet Type Actuator

송명규[†], 허영준*, 박노철**, 유정훈*, 박영필*

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

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 be equipped with 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 a tilt mechanism to the 2-axis moving magnet actuator which is designed in previous research. Addition of the tilt mechanism cuts down the focus 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.

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

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, 고배

속화는 동일 규격 내에서 이루어지는 데이터 전송률 향상이다. 고배속화는 데이터 전송률을 높이기 위해보다 빠른 속도로 디스크를 회전시키는 것으로 회전속도가 증가할수록 데이터 전송률도 높아지지만 디스크의 진동도 커지기 때문에 이를 추종할 수 있는 고성능 서보 및 액츄에이터가 요구된다.

한편 광학 시스템의 개구수가 높아지고 광원의 파장이 짧아지면서 여러 수차가 증가하게 되는데 이중에서 광학 디스크와 대물렌즈의 직각도 편차로 인한 코마 수차가 문제가 되고 있다. 이에 따라 광학 디스크와 대물렌즈 사이의 상대적인 기울기를 보상하는 3축 구동 액츄에이터에 대한 연구도 진행되어 왔다. [1] [2]

김윤기 등은 가동 자석형 액츄에이터를 설계하였는데 이 액츄에이터는 100kHz 보다 높은 2차공진주파수를 갖고 있는 것이 특징이다.[3],[4] 그러나 해당 액츄에이터는 포커싱과 트랙킹 구동만이 가능하며, 코마 수차를 발생시키는 광학 디스크와 대물렌즈 사이의 상대적인 기울기를 보상하기 위한 기울기 구동을 할 수 없다. 이에

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

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 정보저장기기연구센터

본 논문에서는 포커싱과 트래킹 2 축 방향을 제어하던 기존 액추에이터의 자기 회로를 개선하여 롤링 구동이 가능하도록 하는 3 축 구동 액추에이터를 제안하였다. 3 축 구동을 위해 기존 자기회로의 포커싱 코일의 길이를 줄이고 그 공간에 롤링 구동을 위한 코일을 추가하였다. 그러나 이와 같은 변화는 포커싱 코일의 길이 감소로 인한 포커싱 구동 감도 저하가 불가피하다. 따라서 포커싱 구동감도 저하를 최소화하면서 롤링 구동감도를 확보하는 설계가 필요하다. 이를 위해 포커싱 코일과 틸팅 코일을 중심으로 6 개의 설계 변수를 선정하여 DOE 과정을 통해 각 변수들의 민감도 및 변화 경향을 살펴보았으며, 다시 2 개의 설계변수를 선정하여 최적화 과정을 거쳐 포커싱 구동감도를 최대한 확보하면서 롤링 구동성능을 얻도록 자기 회로를 개선하였다. 마지막으로 Ansys의 연성해석을 통해 개선된 자기회로를 적용한 액추에이터가 충분한 구동성능을 가지는 것을 확인하였다.

2. 롤링 구동용 자기회로 설계

Figure 1은 기존 자기회로의 모습과 롤링 구동 기능이 추가된 새로운 개념들을 보여준다. 제안 1은 양쪽의 포커싱 코일을 차동으로 구동하여 롤링 구동을 하는 방식이며, 제안 2는 포커싱 코일 안쪽에 롤링 구동을 위한 틸팅 코일 2 개를 추가한 것이다. 제안 3은 제안 1과 제안 2와는 다른 자기회로를 갖는다. 제안 3은 분극 자석을 이용하여 트래킹 코일 양면을 모두 이용하는 설계로 이에 따라 포커싱 코일의 좌우에 롤링 구동을 위한 틸팅 코일이 추가되었다. 제안 1과 제안 2는 기존의 자기회로에서 포커싱 코일 부분만을 변경하면 적용할 수 있지만 제안 3은 전반적인 수정이 불가피하다. 하지만 롤링 구동 기능 추가와 동시에 트랙 감도 향상을 꾀할 수 있기도 하다. 본 논문에서는 트랙 감도 향상까지 꾀할 수 있는 제안 3을 선택하였으며, 다만 기존의 자기회로와의 호환을 위해 분극자석을 이용한 트랙 감도 개선을 제외하고 틸트 원리만을 적용시켰다.

Figure 2는 제안 3의 틸트 구동원리를 보여준다. 4개의 틸팅 코일은 모두 포커싱 방향의 구동력을 발생시키는데 Fig. 2와 같은 구동력 차이를

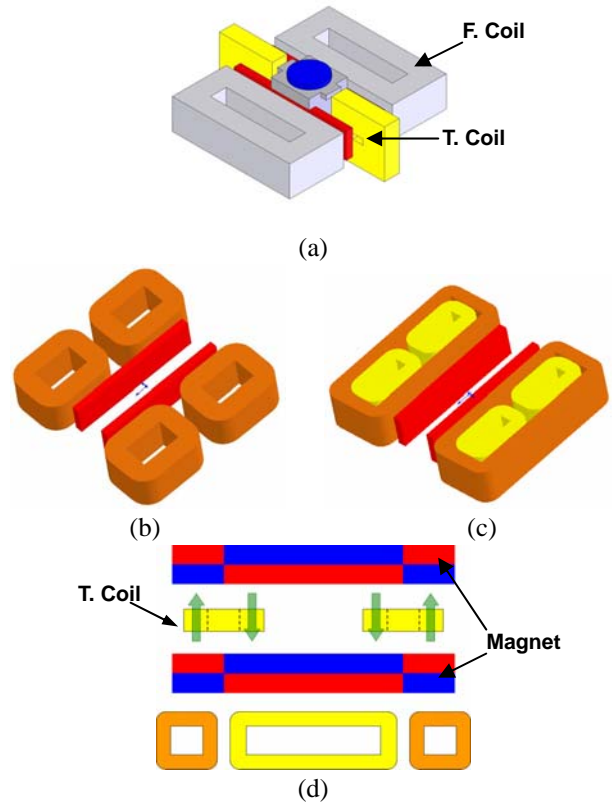


Fig. 1 Magnetic Circuit (a) Previous Model (b) Concept Model1 (c) Concept Model2 (d) Concept Model3

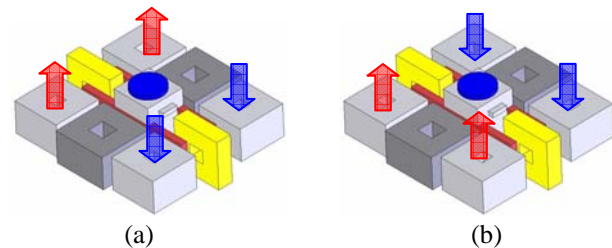


Fig. 2 Tilting Mechanism (a) Rolling (b) Pitching

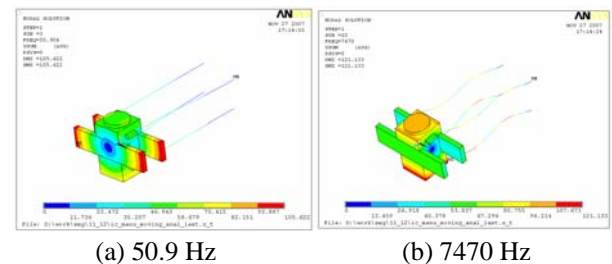


Fig. 3 Natural Frequencies of Rolling and Pitching

통해 롤링 구동과 피칭 구동을 발생시키는 회전 모멘트를 만들어낸다. 하지만 피칭 방향의 와이어 강성이 매우 크기 때문에 피칭 구동을 구현하

기 힘들다. Figure 3 은 모드해석 결과로 얻어진 롤링 및 피칭 방향의 고유주파수를 보여준다. 피칭 방향의 고유주파수가 롤링방향의 그것보다 월등히 큰 것을 알 수 있다. 액츄에이터의 피칭 방향 능동구동이 가능하게 하기 위해서는 와이어 스프링의 회전강성을 낮춰야 하는데 이는 현실적으로 매우 어렵다.

코일에서 발생하는 전자기력은 코일의 유효길이에 비례한다. 새로 제안된 자기회로는 기존 자기회로와 비교하여 포커싱 코일의 길이가 감소하였기 때문에 포커싱 구동감도의 저하를 피할 수 없다. 하지만 롤링 구동을 위한 코일에서도 포커싱 방향의 힘이 발생하므로 이를 포커싱 구동에 이용하는 것이 가능하다. 따라서 포커싱 구동력은 식 (1)과 식 (2)와 같이 포커싱 코일에서 발생하는 구동력과 좌우 틸팅 코일에서 발생하는 구동력 및 틸팅 모멘트 크기에 의해 결정된다.

$$\vec{F}_{focus} = \vec{F}_f + \vec{F}_r(1 + \alpha), \quad (-1 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

$$\vec{M}_{roll} = \vec{F}_r(1 - \alpha)z_d \quad (2)$$

Figure 4 는 위 식들의 각 변수를 보여준다. F_f 는 중앙에 자리한 포커싱 코일에서 발생하는 구동력이며, F_r , αF_r 는 양쪽에 위치한 틸팅 코일의 구동력이며, z_d 는 중심부터 F_f 까지의 거리를 나타낸다. α 는 양쪽 틸팅 코일끼리의 구동력 차이를 나타내는 계수로 이 계수에 따라 포커싱 구동력과 롤링 모멘트의 크기가 크게 영향을 받게 된다.

3. 자기회로 최적화

3.1 실험계획법을 이용한 자기회로의 개선

자기회로를 개선하기 위해 먼저 Fig. 5 와 같이 6 개의 설계변수를 선정하였다. l_1 , t_1 , d_1 은 포커싱 코일을 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 7 개의 설계변수만이 도출되었으며, 전술한대로 이중에서 l_2 는 종속변수이므로 총 6 개의 독립변수가 존재한다. 각 변수가 포커싱 및

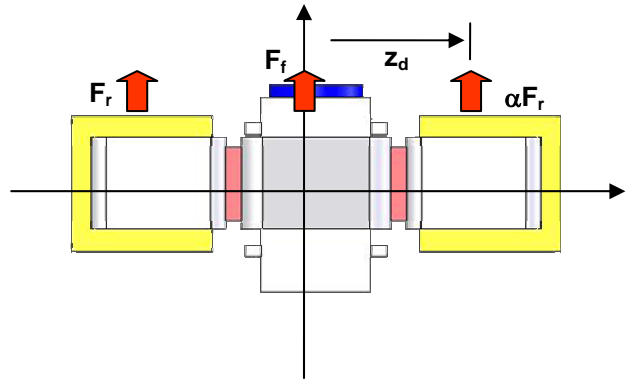


Fig. 4 Driving Forces of Focusing and Tilting Coil

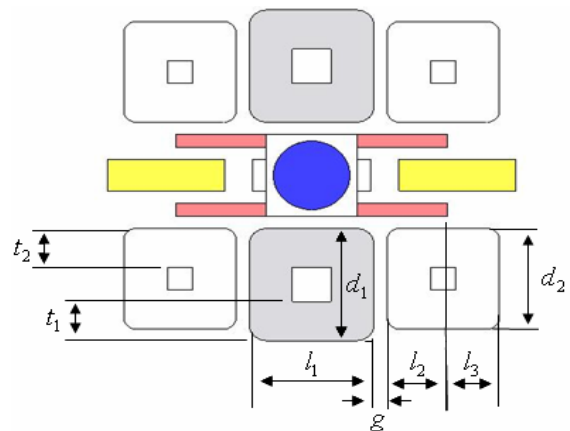


Fig. 5 Design Variables

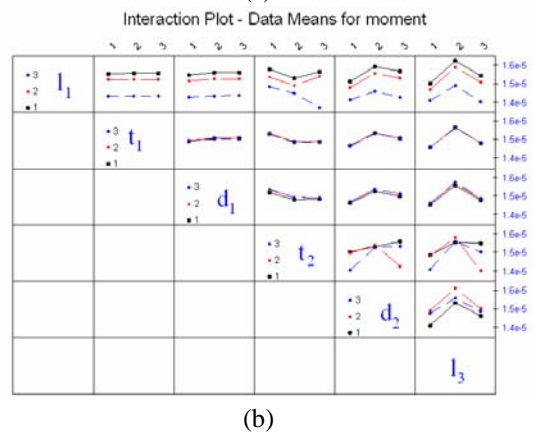
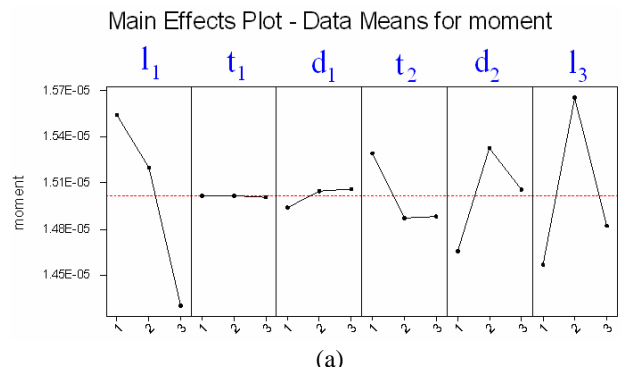


Fig. 6 Design of Experiment (a) Main Effect Plot (b) Interaction Plot

롤링 구동감도에 끼치는 영향을 알아보기 위해 DOE (Design of Experiments)를 수행하였다. 3 수준 완전배치법을 사용하여 각 변수의 주효과와 변수 사이의 교호작용효과를 보았다. DOE 를 수행한 결과 Fig. 6 처럼 I_1 과 I_3 가 포커스 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.

3.2 자기회로 최적화

앞서 DOE 과정을 통해 선정한 설계변수 I_1 과 I_3 를 설계변수로 하여 최적설계 과정을 수행하였다. 자기회로의 설계 목적은 일정 수준의 롤링 구동감도를 확보하면서 포커스 구동감도를 최대화하는 것이다. 따라서 목적함수는 포커스 구동감도를 최대화하기 위한 함수로 정의되어야 하며, 제약조건은 롤링 구동감도의 최소치를 정의하는 방식으로 하였다. 식 (3)과 식 (4)는 최적화를 위해 정의된 목적함수와 제약조건이다.

$$\text{Minimize: } f(x) = \frac{\vec{F}_{i,\text{focus}}}{\vec{F}_{\text{focus}}} \quad (3)$$

$$S_{\text{roll,DC}} \geq 1.5 \text{ deg/V} \quad (4)$$

F_{focus} 는 앞서 식 (1)에서 정의한 포커싱 코일 및 틸팅 코일에서 발생하는 포커스 구동력을 나타내며, $F_{i,\text{focus}}$ 는 최적설계 초기단계의 포커스 구동력이다. $S_{\text{roll,DC}}$ 는 롤링 구동감도를 나타내며 1.5 deg/V 는 기준에 발표된 3 축 구동 액츄에이터들의 값을 참조하였다.[1][2] 최적화 방법으로는 Sequential Quadratic Programming 을 사용하였으며 각 설계변수들의 초기값은 앞선 실험계획법 과정에서 얻은 가장 좋은 조합으로 설정하였다. 그림 7 은 목적함수의 수렴과정을 보여주며, 그 결과 얻어진 각 설계변수들의 최적값은 Table 1 과 같다. I_1 과 I_3 가 최적화 과정을 통해 얻어진 값이며, 나머지 변수들의 값은 앞서 행해진 실험계획법 과정에서 얻어진 최적 조합의 값들이다.

4. 최종모델의 구동성능

완성된 자기회로를 적용한 액츄에이터의 구동성능을 해석하였다. 설계된 자기회로가 발생시킬 수 있는 회전모멘트는 $9.8463 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m/V}$ 이며, 포커스

Table 1 Optimized Values of Design Variables

Variables	I_1	t_1	d_1	t_2	d_2	I_3
Values	8	1.65	6	0.2	2.2	0.5

(Unit: mm)

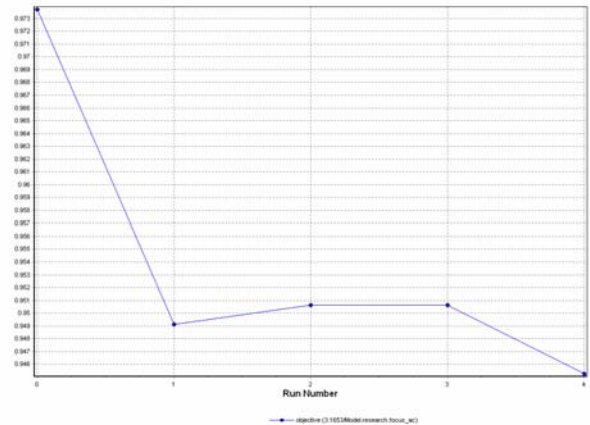


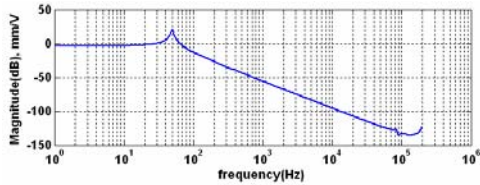
Fig. 7 Optimization Procedure using Feasible Direction Method

구동력은 포커싱 코일에서 16.384 mN, 틸팅 코일에서 3.291 mN 이다. 이를 와이어 스프링에 의해 지지되는 가동부에 적용하여 ANSYS 시뮬레이션을 이용하여 액츄에이터의 주파수응답을 구해보았다. Figure 8 은 ANSYS 시뮬레이션의 결과로 액츄에이터 최종모델의 주파수응답을 나타내며, Table 2 와 Table 3 은 각각 기존모델과 최종모델의 주요 동특성들을 정리한 것이다. 최종모델은 매우 높은 2 차공진주파수를 가지며 목표했던 롤링 방향의 구동감도였던 1.5 deg/V 보다 높은 2.06 deg/V 를 달성하고 있음을 확인할 수 있다. 포커스 구동감도의 경우 틸팅 코일의 도움 여부에 따라 최소값과 최대값을 가지게 된다. 포커스 구동감도를 크게 하는 것이 최적화의 목표였기에 롤링 구동감도가 제약조건인 1.5 deg/V 가 되는 지점이 결과로 나올 것으로 예상하였지만 그와 달리 2.06 deg/V 가 나왔다. 이는 목적함수에 쓰인 변수 F_{focus} 가 포커싱 코일의 구동력과 틸팅 코일 구동력의 합이어서 틸팅 코일의 구동력도 어느 정도 확보할 수 있는 지점이 결과로 나온 것으로 보인다.

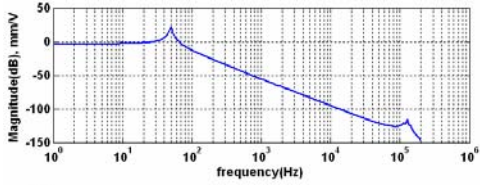
5. 결론

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 가동

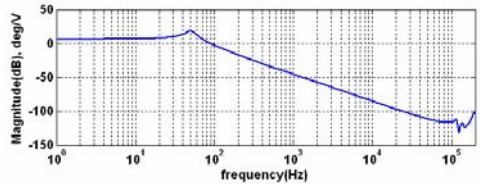
자석형 2 축 구동 액츄에이터의 자기회로에 단순히 킬팅 코일을 추가하는 것만으로 3 축 구동을 가능하게 하였다. 변경된 자기회로는 포커스 구동감도 저하를 야기했지만 DOE 와 최적설계과정을 통해 포커스 구동감도 저하를 일정 수준 이하로 억제하면서 충분한 롤링 구동감도를 얻을 수 있었다. 가동자석형 액츄에이터로서 구동감도가 약간 낮은 경향이 있지만 분극자석의 적용을 통해 트랙 방향의 구동감도를 향상시킬 수 있고, 자석의 두께 및 종류 변경 등을 통해 전반적으로 구동감도를 끌어올릴 수 있는 가능성이 남아있다. 차후 이러한 점을 고려해 감도를 더 개선할 것이며 또한 이 과정에서 가동부도 재설계하여 2 차 공진 주파수도 높일 예정이다.



(a) Focusing Direction



(b) Tracking Direction



(c) Rolling Direction

Fig. 8 Frequency Response Function of the Final Model

Table 2 Dynamic Characteristics of the Previous Model

	DC Sen.	AC Sen.
Focusing	0.788 mm/V	7.9 G/V
Tracking	0.692 mm/V	6.9 G/V

Table 3 Dynamic Characteristics of the Final Model

	Focusing	Tracking	Rolling
Resistance	4.7 Ω	4.1 Ω	4.8 Ω
1 st Res. Frq.	50 Hz	50 Hz	50 Hz
2 nd Res. Frq.	85.9 kHz	130 kHz	116 kHz
DC Sen. (at 5Hz)	0.56 ~ 0.67 mm/V	0.69 mm/V	2.06 deg/V
AC Sen. (at 200Hz)	6.1 ~ 7.3 G/V	7.5 G/V	0.14 deg/V

후 기

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

참고문헌

- [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. et al, 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] Song, M. G., Kim, Y. G., Park, N. C., Park, Y. P., Yoo, J. H. et al, 2007, "Design of Moving Magnet Type Optical Pickup Actuator with High Frequencies of the Flexible Modes", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol.17, No.11, pp.1043~1049.
- [4] Kim, Y. G., Song, M. G., Park, N. C., Yoo, J. H., Park, Y. P. et al, 2007, "Design of Moving Magnet Type Pickup Actuator Using Inserted Coil", ASME Information Storage and Processing Systems Conference, pp. 188~190.