

반응표면법을 이용한 초소형 광디스크 드라이브 구동기의 최적화 및 디자인

Design And Optimization Of Actuator For Micro Optical Disk Drive Using Response Surface Methodology

우 기 석*· 이 동 주*· 박 노 철*· 박 영 필**
Ki-Suk Woo, Dong-Ju Lee, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : Micro actuator(초소형 구동기), Response surface methodology(반응표면법), Design(설계)

ABSTRACT

Recently, the development of mobile devices demands information storage systems to use micro drive devices and cheap media. These should have several characteristics, for example, the subminiature of size, the robustness of shock, the minimum of cost and power consumption, and the removability of multiple applications. A conventional optical disk drive is more suitable for these specifications than the others. The optical storage system of the new generation to use a blue laser and a high numerical aperture (NA) is the perfect candidate for micro optical disk drives. In this paper, the micro actuator that can be applied to a micro optical disk drive is designed by response surface methodology to use a structural analysis and an electro-magnetic analysis. Based on above results, the coarse actuator and fine actuator are designed and improved from the point of view of the size and the power. Consequently, the designs of a micro actuator are proposed through these courses.

1. 서 론

현대 사회는 고도의 정보화 사회로 기업은 물론 개인이 다루고 있는 정보의 양이 급속히 증가하고 있다. 이에 따라 막대한 양의 정보를 쉽게 휴대하고 교환이 가능하도록 하는 정보저장 기기의 필요성이 대두되고 있다. 특히 휴대용 장치들의 개발은 초소형 드라이브 장치와 저가의 미디어를 사용할 수 있는 저장시스템을 요구하고 있다. 이러한 장치들의 저장기기는 초소형이어야 하고 외부의 충격에 강해야 하며 낮은 비용으로 제작 가능해야 한다[1]. 또한 데이터를 디지털 카메라나 휴대폰, 음악 재생기, PDA, 다양한 목적의 기기에 호환 가능하도록 하게 하여야 한다. IBM의 Microdrive 같은 HDD와 Compact Flash나 SmartMedia 같은 solid state storage는 현재 PDA나 캠코더, 그리고 디지털 카메라에 사용되고 있다. 이러한 저장 솔루션의 단점은 상대적으로 Mbyte 당 저장 미디어의 비용이 크다는 것과 ROM 미디어가 없다는 것이다. 상용 광 저장기기의 가장 큰 장점은 본래부터 낮은 미디어 가격과 복제되어진 ROM 미디어의 제조상의 편리함이다

[2]. 블루레이저와 고개구율의 렌즈를 사용할 차세대 광 저장기기는 small form factor 광 드라이브를 위한 완벽한 기술 후보이다[2].

차세대 광 저장 기술을 사용해서 12cm의 광디스크에 27Gbyte의 기록이 가능하다. small form factor 광 드라이브에 이러한 데이터 저장 밀도를 사용해서 1Gbyte의 저장 용량을 동전 사이즈의 크기에 기록하는 것이 실현되었다. 이러한 디스크 사이즈에 맞춰 구동기의 사이즈를 소형화하는 연구들도 진행되고 있다[3,4,5].

조동구동기에 관한 연구는 크게 두 부류로 나누어 있는데 크게 로터리 방식[1]과 선형구동기 방식[6]이다. 전자의 경우의 장점은 팽팽함과 스피들 모터와의 거리를 가깝게 할 수 있어 디스크의 저장용량을 키울 수 있는 점과 seeking과 tracking을 단일한 구동기로 할 수 있다는 점이다. 또한 전력의 소비도 후자의 경우에 비해 적고 마찰에 대한 문제로 인한 제어의 불안정성도 적다. 반면 회전에 의해 tracking과 seeking을 하므로 현재의 모터방식과 달리 디스크의 트랙 안에서 점선방향과 접선에 수직인 방향으로 구동하는 것이 아니라 사선으로 움직임으로써 제어에 문제가 발생할 수 있고 현재의 에러신호의 검출 방법을 적용하는데도 문제가 있다. 그리고 focusing 구동을 위해 새로운 메커니즘을 도입해야 하고 이로 인해 구동기의 끝부분의 무게가 늘어나는 것 또한 광픽업의 부상의 문제점과 끝단의 편성의 증가를

* 연세대학교 정보저장기기연구센터
E-mail : wks5677@hotmail.com
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

** 연세대학교 기계공학부

초래하게 된다. 후자의 경우는 현재의 방식을 유지하면서 회전 모터를 리니어 모터로 바꾸어주는 경우이다. 따라서 구동에 의한 제어는 문제가 없으나 사이즈가 소형화 됨에 따라 마찰에 의한 제어의 불안정성, 이로 인한 전류의 과잉 소비가 문제점으로 들고 있다. 또한 소형화에 의해 현재의 정밀 구동기의 새로운 형태의 구동 방식이 요구되어진다. 그러나 access time 이 빠르고 전자의 경우는 디스크의 진동으로 인해 현재의 미디어를 gap controller 없이 사용할 수 없으나 지금과 구동방식이 유사한 후자는 현재의 미디어에도 적용이 가능하다.

미세구동기는 전체적으로 사이즈가 초소형화됨에 따라 현재의 4-와이어 지지방식은 이에 대응하는 데 한계가 있다. 따라서 새로운 방식의 구동기가 필요하고 현재는 MEMS 기술에 의한 구동기에 관한 연구[7]와, 상용 구동기를 초소형화 하는 방안[2] 등이 제시되고 있다. 전자의 경우는 제작의 단가가 아직까지 높고 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다. 후자의 경우는 현재의 구동 방식에서 사이즈를 줄이려는 접근이 시도됨에 따라 생산성과 이에의한 신뢰성이 저하된다. 또한 사이즈를 줄이는데 한계가 있다.

이와 같이 초소형 구동기는 전반적으로 사이즈에 대한 문제를 안고 있고 사이즈가 줄어들며 따라 생기는 성능의 저하 또한 관심에 대상이 되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 구동기 치수의 최적화 작업이 필요하고 사이즈를 줄일 수 있는 구조의 제시가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 조동구동기의 두 방식 중 선형구동기방식을 선정하여 이를 seeking 과 tracking 에 이용하고 미세구동기는 focusing 만 하는 새로운 1 축 구동기 구조를 제시하고자 한다. 세부적으로는, 초기모델을 초소형화 하고 반응표면법으로 최적화를 수행한다. 이를 바탕으로 조동구동기를 설계하고 이에 적용할 수 있는 미세구동기를 제시한 후 이를 유한요소해석 프로그램을 사용하여 검증하려고 한다.

2. 본 론

2.1 조동구동기의 설계

조동 구동기는 크게 자기회로부와 구조부로 나누어진다. 자기회로부의 경우는 자기효율을 높여 가능한 큰 힘을 내도록 설계가 이루어지고, 구조부는 구동감도를 고려하여 슬레드의 무게를 줄이는 반면 강성을 키워 목표로 하는 디스크의 주파

수 응답영역보다 높은 응답 특성을 가지도록 설계한다.

이 절에서는 초기모델의 장점을 유지하면서 구동기 목표사이즈인 26x19.6x3mm 로 소형화 작업을 수행하고 자기회로를 개선한다.

2.1.1 초기모델

초기의 모델은 Fig. 1 과 같은 속도 형상을 목표로 삼고, 자기와 구조의 유한요소해석 프로그램을 사용하여 Fig. 2 와 같은 구조를 디자인하고 제작하였다. 구동부 전체사이즈는 39x21.2x4.5 mm 이고 소형화를 위하여 가이드와 요크를 함께 사용하였으며 이로 인하여 별도의 지지를 위한 가이드 시스템이 불필요하게 되므로 폭을 줄일 수 있었다. 또한 슬레드의 형상이 H 자 형태의 구조를 취하고 있음으로 스핀들 모터에 가까이 접근할 수 있고 구조적으로 강성을 유지하면서 불필요한 부분을 제거하여 무게를 줄일 수 있었다.

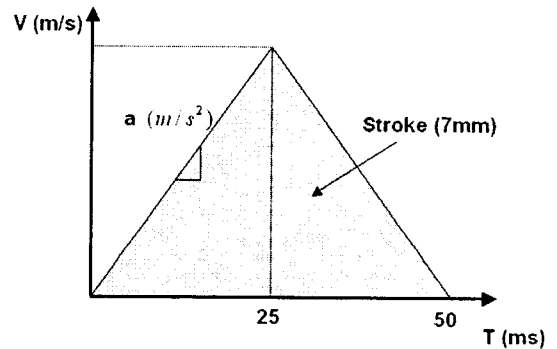


Fig. 1 슬레드의 속도 형상

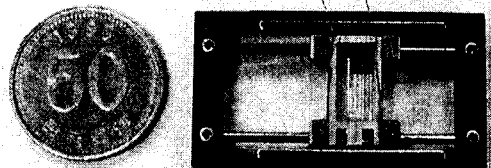


Fig. 2 제작된 선형 구동기

Fig. 3 은 슬레드의 동특성 실험을 수행한 그래프이고 유연모드(flexible mode)가 10kHz 근방에서 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

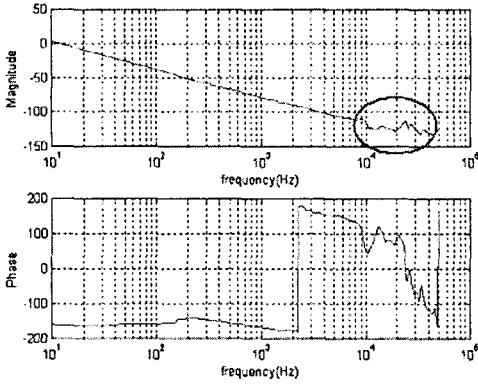


Fig. 3 제작된 조동구동기의 동특성 그래프

2.1.2 실험계획법을 사용한 디자인변수 추출

실험계획법 중 직교배열법을 사용하여 민감도 해석을 수행하고 S/N 비를 구하여 각각의 변수에 대한 연성도 확인한다. 3 개의 디자인 변수와 3 수준으로 9 번의 실험을 하도록 table 1 과 같이 배열표를 구성하고 목적변수로는 구동기의 구동력을 선택한다. 설계 변수는 기구적으로 치수의 변화가 제한된 부분과 당위성이 있는 변수는 제외한다. 이에 합당한 변수로 Fig. 4 와 같이 자석의 두께 (x1), 자석의 높이 (x2), 자석이 고정되는 요크의 높이 (x3)를 선정하고 수준의 범위는 기구적으로 제한된 목표 치수 값에 맞도록 지정한다.

Table 1 직교배열구성

실험번호	x1(자석의두께)		x2(자석의높이)		x3(요크의높이)		결과 Force
	수준	치수	수준	치수	수준	치수	
1	-1	0.5	-1	2	-1	2	32.456
2	-1	0.5	0	2.5	0	2.5	35.02
3	-1	0.5	1	3	1	3	35.216
4	0	1	-1	2	0	2.5	35.808
5	0	1	0	2.5	1	3	38.062
6	0	1	1	3	-1	2	36.453
7	1	1.5	-1	2	1	3	36.907
8	1	1.5	0	2.5	-1	2	37.827
9	1	1.5	1	3	0	2.5	40.422

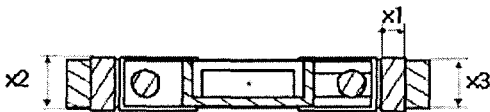
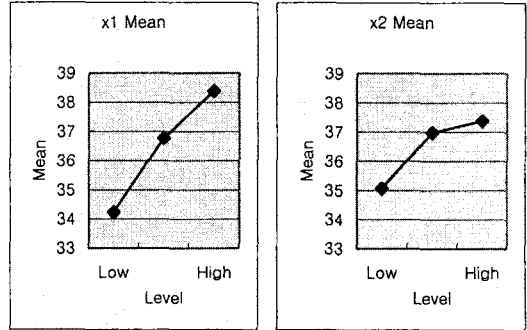


Fig. 4 디자인 변수

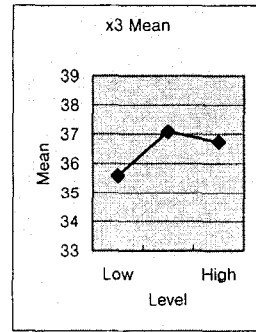
구성한 각 실험은 유한요소해석프로그램인

Maxwell 을 통하여 실행한다. 이를 바탕으로 평균분석(ANOM)방법에 따라 각 변수의 치수별 결과를 Fig. 5 와 같이 그래프로 나타낸다. 그래프에서 알 수 있듯이 x1 은 1 수준, x2 는 1 수준, x3 는 0 수준 근방에서 감도가 높은 것으로 판단된다.



(a) x1 의 평균

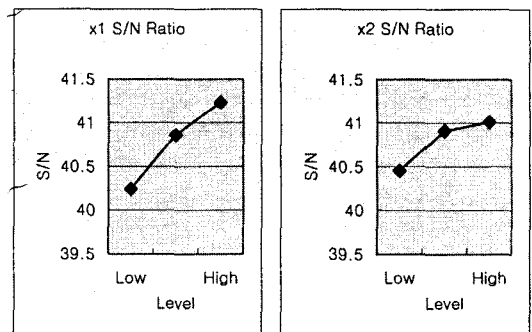
(b) x2 의 평균



(c) x3 의 평균

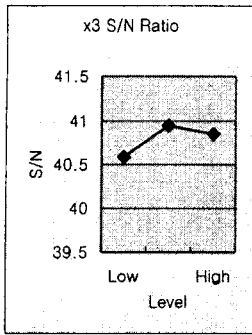
Fig. 5 각 변수에 대한 평균분석 그래프

각 변수에 대한 S/N 비가 극대 값을 찾는 실험이기 때문에 Larger The Better 로 연산한다. Fig. 6 과 같이 전체적으로 감도가 높은 수준에서 S/N 비도 높아 다른 변수의 영향이 적은 것으로 판단되어 강건성이 확보된다.



(a) x1 의 S/N 비

(b) x2 의 S/N 비



(c) x3의 S/N 비

Fig. 6 각 변수의 S/N 비

Fig. 5 와 Fig. 6 에서 보는 것과 같이 디자인 변수로 선정된 x_1 , x_2 , x_3 의 사용이 목적변수인 구동력에 밀접한 연관성을 가지고 있고 각각의 변수의 강건성이 높은 것으로 사료되어 이러한 3 개의 디자인 변수를 최적화에 사용한다.

2.1.3 반응표면법을 이용한 치수최적화

최적의 치수를 얻기 위한 방법으로 많은 경우 반응표면법이 사용된다. 반응표면법은 국부적인 설계영역의 목적함수를 근사화 하기 위한 방법으로 실험계획을 통한 실험점을 채택하여 통계적인 분석방법으로 근사식을 구성한다[8]. 실험계획의 방법은 근사식의 정확도를 높이고, 실험 횟수를 줄이기 위한 많은 방법들이 연구되었으며, 설계 변수가 적은 문제에서는 곡면의 특성을 잘 반영할 수 있는 중심합성계획을 사용한다[9,10].

아래의 Table 2 는 직교배열법으로 도출한 3 개의 설계변수를 중심합성계획법으로 구성한 배열표이다.

Table 2 중심합성계획법

실험번호	x1(자석의 두께)		x2(자석의 높이)		x3(오크의 높이)		결과
	수준	치수	수준	치수	수준	치수	
1	-1	0.5	-1	2	-1	2	32.456
2	-1	0.5	-1	2	1	3	32.367
3	-1	0.5	1	3	-1	2	33.773
4	-1	0.5	1	3	1	3	35.216
5	1	1	-1	2	-1	2	37.287
6	1	1	-1	2	1	3	36.907
7	1	1	1	3	-1	2	36.453
8	1	1	1	3	1	3	39.13
9	-k	1.85	0	2.5	0	2.5	40.502
10	k	0.15	0	2.5	0	2.5	19.148
11	0	1.5	-k	1.634	0	2.5	36.971
12	0	1.5	k	3.366	0	2.5	40.894
13	0	1.5	0	2.5	-k	1.634	36.738
14	0	1.5	0	2.5	k	3.366	41.42
15	0	1.5	0	2.5	0	2.5	39.639

이러한 배열의 결과를 유한요소해석프로그램인 Maxwell 을 사용하여 구하고 그에 맞는 목적 함수식을 구성한다. 대체로 목적함수의 형태가 선형적인 특성에 가까울 경우 1 차 다항식으로 표현하며 비선형적인 특성을 표현하고자 할 때는 2 차 다항식을 사용하는 것이 일반적이다 [11]. 여기에선 상용 통계 프로그램인 SAS 를 이용하여, 교호항과 3 차항을 추가하여 정확성과 신뢰성을 높였다. 결과적으로 신뢰도가 높은 항을 추출하여 최종적으로 다음과 같은 목적함수 식을 구성하였다.

$$F = -4.0982 \times x_1^3 + 0.2205 \times x_2^3 + 0.45268 \times x_3^3 - 3.13394 \times x_1^2 + 6.09382 \times x_1 + 0.47387 \times x_2 + 38.84878$$

본식의 R-square 값과 Adjust-R-Square 값은 0.99 와 0.98 로 신뢰할 수 있는 근사식이 된다.

이러한 목적 함수식을 유전자 알고리즘에 적용하여 극대값을 산출해내는 인자들을 구한다. 결국 주어진 범위 내에서 자석이 0.49 수준, 자석의 높이가 1 수준, 자석의 두께가 1 수준일 때가 최적의 조건이고 이때, 41.75mN 의 힘의 발생이 예측된다. 이 치수를 대입하여 Maxwell 을 통하여 해석을 수행한 결과 41.2mN 의 힘이 발생함을 확인 할 수 있고 반응표면법 결과와 약 1.34% 차이가 난다. 따라서, 반응표면법으로 구한 목적함수 식이 실제 실험의 경향과 유사함을 볼 수 있다.

2.1.4 구조부의 설계

전체 구동기 사이즈 목표(26x19.6x3mm) 를 바탕으로 앞 절에서 구한 각 디자인 변수의 값들을 사용하여 조동구동기의 자기회로부를 설계하고, 여기에 맞는 슬레드를 초기모델과 유사한 H 자 형태로 디자인한다. 이를 통해 Fig. 7 과 같은 구조를 제시한다. 아래의 Fig. 8 은 새로 설계한 슬레드를 유한요소해석프로그램을 사용하여 모드해석을 수행한 결과이다. 7.5kHz 에서 연성모드 (flexible mode)가 발생한다.

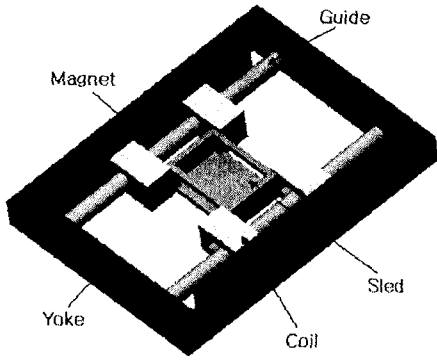


Fig. 7 조동구동기의 전체 구조

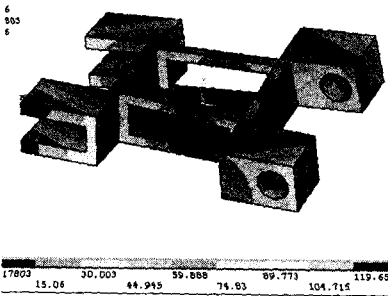


Fig.8 슬레드의 모드해석(7.5kHz)

2.2 미세구동기의 설계

현재의 Fig. 9 와 같은 슬림형 미세구동기는 대부분 와이어 지지방식이 사용된다. 2 축구동을 위해 4 개의 와이어를 사용하고, 이를 통해 병진운동을 하게 된다. 그러나 이러한 구조로는 목표로 잡은 구동부 두께(3t)로 제작하는데 한계가 있고 제작이 이루어진다 하더라도 와이어 강성으로 인해 감도의 저하가 발생하게 되는 문제점이 발생하게 된다.

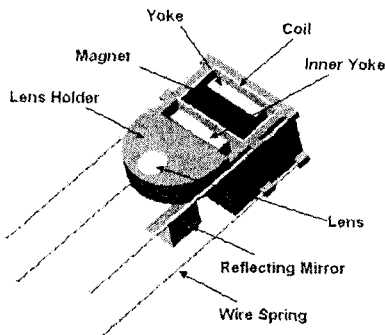


Fig. 9 상용 슬림미세구동기 구조

따라서 이 절에서는 앞 절에서 설계했던 조동구동기에 맞는 1 축 미세구동기를 설계한다. 설계 목표에 맞게 두께를 줄이기 위해 와이어 4 개에서 2 개로 줄이고 이로 인한 구동부의 회전을 무게 중심과 힘 중심, 지지 중심을 이용하여 보정하려 한다. 또한, 이로 인하여 와이어 강성의 증가로 인한 감도의 저하도 개선한다.

2.2.1 미세구동기의 수식

2 와이어의 구동기의 구동 모션을 간략화된 Fig. 10 과 같은 빔으로 치환하고 아래와 같은 수식을 유도 할 수 있다. 무게중심과 힘 중심은 일치한다는 가정 하에 두 힘의 합력 중심과 지지중심을 변수로 사용한다.

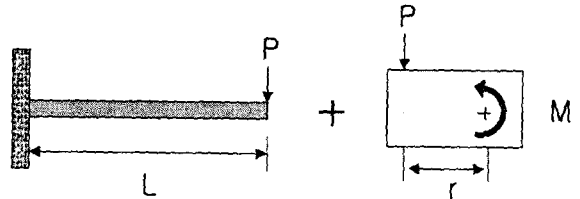


Fig. 10 간략화된 2 와이어 모델

2 와이어 모델을 좌측과 같이 외팔보의 자유단에 힘이 작용하는 경우와 우측과 같이 구동기의 힘중심과 지지점에 의하여 모멘트가 발생하는 두 경우를 중첩하여 지지점에서의 회전각과 처짐량을 구하면 다음과 같다.

$$\theta_{\max} = -\frac{PL^2}{3EI} + \frac{ML}{EI} = \frac{PL(2r-L)}{2EI}$$

$$\delta_{\max} = -\frac{PL^3}{3EI} + \frac{ML^2}{2EI} = \frac{PL^2(3r-2L)}{6EI}$$

이때 포커스 방향의 강성계수를 구해보면

$$K_f = \frac{6EI}{L^2(3r-2L)}$$

을 얻을 수 있다.

회전각의 식에서 알 수 있듯이 지지중심과 힘 중심과의 거리 r 이 와이어 길이 L 에 0.5 배일때 힘의 크기와 상관없이 회전각은 0 이 됨을 알 수

있다.

2.2.2 간략모델을 통한 수식의 검증

앞 절에서 구한 결과를 Fig. 11 와 같은 간략모델을 통하여 검증해본다. 우선 미세구동기의 예상되는 가동부 질량은 0.04g 이고 자중이 가해질 때를 초기 상태로 한다. Table 3 은 간략모델에 결과를 바탕으로 focusing 방향으로 양과 음의 힘을 주고 구동부의 앞단과 끝단의 회전각도를 구한 것이다.

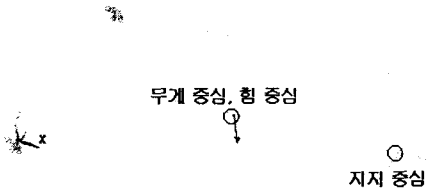


Fig.11 간략모델

Table 3 간략모델을 통한 수식의 검증

힘(mN)	앞단의변위(mm)	뒷단의 변위(mm)	변위차(mm)	각도(degree)
-10	-0.19652	-0.19651	0.00001	0.00012
-5	-0.09417	-0.09416	0.00001	0.00010
0	0.00819	0.00819	0.00000	-0.00001
5	0.11054	0.11053	-0.00001	-0.00012
10	0.21290	0.21288	-0.00002	-0.00024

위의 표에서 볼 수 있듯이 회전량이 0 에 가깝기 때문에 가정한 수식에 의한 힘중심과 지지중심의 선정이 타당함을 알 수 있고 이를 바탕으로 미세구동기를 디자인한다.

2.2.3 미세구동기의 디자인

힘 중심과 무게중심을 일치하고 이와 지지중심과의 거리를 와이어 길이의 반이 되게 설계를 한다. 상용 프로그램을 이용하여 유한요소 해석을 한 결과는 Fig.12(a)에서와 같이 회전이 발생하지 않는 거동을 보임을 확인 할 수 있다.



(a) 정적인 하중에서의 처짐



(b) Focusing mode(179.9 Hz)
Fig.12 미세구동기의 유한요소 해석

3D 모델링을 통하여 예측되는 가동부의 질량은 0.034g 이고 앞에서 구한 k_r 를 이용하여 포커스 방향의 고유진동수를 구하면 181Hz 를 구할 수 있다. 유한요소 해석을 통하여 구한 포커스 방향의 고유진동수는 179.9 Hz 로 식의 타당성을 확인 할 수 있다.

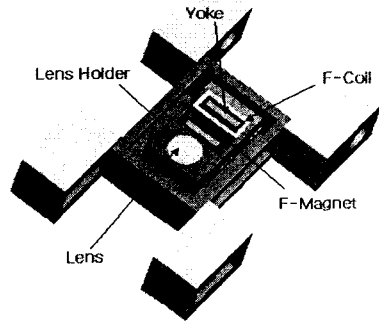


Fig.13 미세구동기의 구조

2.2.4 기구적인 미세구동기의 제안

앞 절에서 제시한 미세구동기의 모델은 제작상의 공차로 인하여 실제 목적에 맞는 동특성을 보장 받을 수 없다. 이에 같은 방식에 구동부에 축을 삽입하여 회전량을 경감할 수 있는 Fig. 14 와 같은 구조 또한 제시한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터의 지원(R11-1997-042-11001-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Bernard W. Bell Jr., 2001, "DataPlay's Mobile Recording Technology", ODS Topical Meeting 2001.
- (2) M.A.H. van der Aa et al., 2002, "Small Form Factor Optical Disk Drive: Miniaturized Plastic High-NA Objective and Optical Drive", ODS Topical Meeting 2002, pp. 251~253.
- (3) I. Ichimura et al., 2002, Proceedings ODS 2001, Proc. SPIE 4342, pp.168.
- (4) M. Kuijper et al., 2002, Proceedings ODS 2001, Proc. SPIE 4342, pp.178.
- (5) S. Furumiya et al., 2002, Proceedings ODS 2001, Proc. SPIE 4342, pp.186.
- (6) D. W. Kang et al., 2002, "Miniaturized Inch Dual Servo Pick-up Actuator", ODS Topical Meeting 2002, pp. 51~53
- (7) 이영주, 부종욱, 김수경, 2000, "미세 트랙킹을 위한 마이크로미터 액츄에이터의 구동 특성", 창립 10주년소음진동공학회, pp. 1521~1527.
- (8) Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery, 1995, "Response Surface Methodology: Process and product optimization using designed experiments", Wiley
- (9) Kyung-Jin Hong et al., 2000, "A study on the construction of Response surface for Design Optimization", KSME Journal Vol. 24 No. 6, pp. 1408~1418.
- (10) 박성현, 1995, 현대실형계획법, 민영사
- (11) 소현준, 유정훈, 2003, "반응표면법을 이용한 슬레노이드형 자기액추에이터의 치수 최적화 설계", 춘계기계학회.

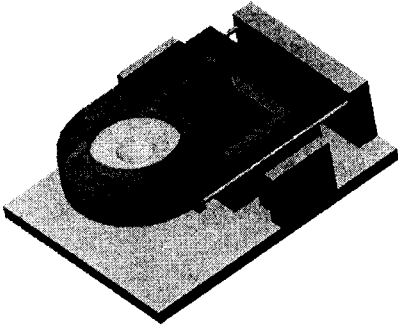


Fig. 14 2 와이어에 축 삽입 구조

3. 결 론

초소형 광디스크 드라이브의 구동기를 제안하였으며 반응 표면법을 사용하여 초기모델의 크기를 줄이고 구동력을 최적화 하였다. 이를 바탕으로 초소형화된 조동구동기의 구조를 제시하였고 이러한 구동기에 적합한 1 축 구동기의 구조를 수식과 유한요소프로그램을 사용하여 디자인하였다. 또한 가공상의 공차로 인한 문제점을 보완하기 위하여 1 축 구동기에 축을 삽입한 구조도 제안하였다.