

## 근접장 광기록 장치용 조동 구동기의 최적 설계

### Optimal Design of NFR Coarse Actuator

°정재화\* · 이성규\*\* · 김기현\*\*\* · 권대갑\*\*\*\*

Jae-Hwa Jeong, Sung-Q Lee, Ki-Hyun Kim and Dae-Gab Gweon

**Key Words** : NFR actuator, Optimal design, Permeance model

#### ABSTRACT

Near field technology makes it possible to overcome the diffraction limit of laser beam and create the small spot. Because of the small spot size, the pit size and track pitch can be decreased. So the high performance actuator is needed for near field recording system. And the light mass and the small form factor are also important properties of the NFR actuator in order to be used for hand held device. The purpose of this paper is the optimal design of the NFR coarse actuator to maximize actuating force. The structure of NFR coarse actuator is the same as HDD VCM actuator. The permeance method is used for modeling of the coarse actuator. The optimal result and the FEM simulation result are presented.

#### 1. 서론

현재 정보저장과 재생장치에 이용되는 기술은 CD(Compact Disk), DVD(Digital Versatile Disk)등으로 대표되는 광 픽업 기술과 하드디스크드라이브(Hard Disk Drive)로 대표되는 자기기억 저장기술로 나눌 수 있다. 정보 통신 기술의 발달로 개인의 취급 정보량이 해마다 증가하면서 두 분야의 주요 관심사는 소형화, 정보전송속도 증가 및 기록밀도 증가에 집중되어 있다. 광 픽업 기술의 경우 CD, DVD를 거치면서 기록 밀도의 증가가 되고 있으나, 광학적인 회절한계에 의해 저장밀도 증가가 한계에 부딪힐 것으로 예상된다. 이러한 광 정보저장 기기의 기록밀도 한계 극복을 위하여 제안된 것이 새로운 방식의 광 기록 기술인 근접장 광기록 장치(Near Field Recording)이다.[1]

NFR은 굴절률이 큰 SIL(Solid Immersion Lens)를 이

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

E-mail : capjih@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3265, Fax : (042) 869-5225

\*\* 한국전자통신연구원

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과

용하여 광학적 회절한계치보다 작은 크기의 광 스폿을 만들어 정보저장 기기에 응용한 것이다. 광 스폿의 크기가 작아짐으로써 디스크 면의 피트(Pit)와 트랙 피치(Track Pitch)도 크게 줄어들게 된다. 이에 따라 NFR 구동기는 기존의 광 픽업 구동기에 비해 정밀도 향상이 필수적이며 디스크의 진동이나 외란이 주어지는 상황에서도 디스크에서 정보가 저장된 트랙을 찾고, 그 트랙을 추종하여 사용자가 원하는 정보가 정확히 읽혀질 수 있도록 설계, 제작되어야 한다. 더불어 노트북이나 휴대용 개인 단말기 등에서의 응용을 위해 경량화, 소형화, 정밀화의 요구된다. 이에 따라 현재 HDD에서 주로 사용되는 스윙-암 방식을 응용하고, 제어 속도, 정밀도 등 향상된 요구 사항을 만족 시키기 위하여 미세 구동기를 두어 이중 서보 구동기 구조를 채택하였다.[2][3] 본 논문에서 제시하는 구동기의 경우 HDD와는 달리 광학 부품들이 구동기에 포함되므로 질량 및 관성 모멘트의 증가하여 공진 주파수가 낮아지는 구조적인 문제점을 가진다. 따라서 구동기의 구조적 고강성화 설계와 구동력을 최대화 설치가 필요하다. 본 논문에서는 구동력 최대화에 중점을 두고 NFR 구동기의 조동 구동기를 설계하고자 한다.

#### 2. NFR 구동기

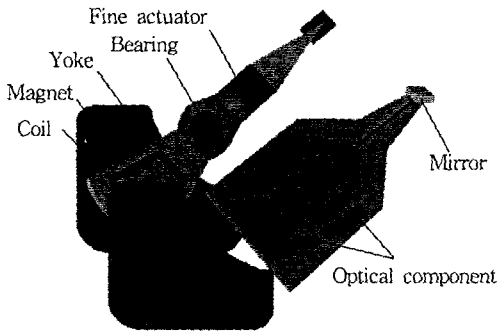


Fig. 1 Schematics of NFR actuator

NFR 구동기의 구조는 Fig. 1과 같다. CD와 DVD의 트랙 간격이  $1.6\mu\text{m}$ ,  $0.74\mu\text{m}$ 인데 비해, 근접장 광기록 장치는  $0.4\mu\text{m}$ 이하이므로 단일 구동기로는 제어 주파수 대역폭의 제한에 의해 제어 정밀도가 부족하게 된다. 따라서 정밀도 향상을 위해 현재 하드디스크 기술에서 많은 연구가 이루어지고 있는 이중 구동기 구조를 이용하였다. 미세 구동기 앞에는 서스펜션과 SIL 렌즈가 장착된 슬라이더가 있어 디스크 면에서 일정한 높이로 부상하는 역할을 한다. 그리고 디스크에 읽기, 쓰기를 위한 광학 부품들이 구동기 위에 위치하고, 구동기 끝단의 거울에 의해 SIL 렌즈로 레이저 빔이 안내되게 된다.

조동 구동기는 Fig. 2와 같이 기존의 HDD의 VCM(Voice coil motor) 구동기와 같은 구조로써 자석, 요크, 코일로 구성되어 있다. 구동원리는 자석과 요크에 의해 코일이 위치하게 되는 상부 요크와 하부 요크의 사이 공간에 자속이 분포하고 코일을 따라 전류가 흐름으로써 플레밍의 법칙에 의해 식 (1)과 같은 힘이 코일에 주어지게 된다.

$$F = nI_{eff}(I \times B_g) \quad (1)$$

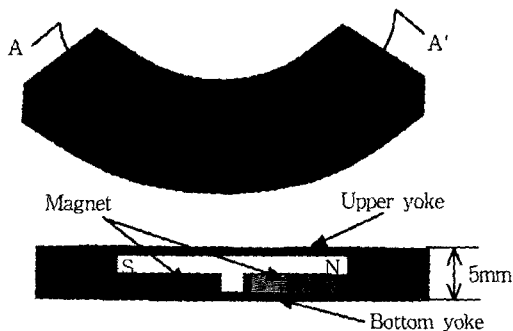


Fig. 2 NFR coarse actuator(VCM)

즉, 조동 구동기의 힘은 코일의 감은 수  $n$ , 코일에 흐르는 전류  $I$ , 자속 밀도  $B_g$ 의 곱에 비례하게 된다. 본 논문의 목적은 크기와 높이(5mm)가 제한된 상황에서 힘이 최대화되도록 조동 구동기를 설계하는 것이다.

### 3. 전자기 회로 모델링

조동 구동기의 전자기적 모델링을 위하여 퍼미언스 방법(Permeance method)을 이용하였다. 퍼미언스 방법이란 자속 분포에 대하여 전기 저항 회로와의 유사성을 이용하여 자기 회로의 원하는 위치에서의 자속을 구하는 방법이다.[4][5] 전압( $V$ )은 전자기 힘( $F$ ), 전류( $I$ )는 자속( $\Phi$ ), 저항( $R$ )은 자기저항( $R$ )과 유사성을 가진다. 퍼미언스는 자기저항의 역수에 해당한다.

일반적으로 자기 저항  $R$ 은 식 (3)과 같이 자속이 지나는 길이( $l$ )에 비례하고, 비투자율( $\mu$ )와 단면적( $A$ )에 반비례한다.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (2)$$

즉, 자기 저항은 재료의 전자기적 물성과 형상의 함수이다. Fig. 3은 NFR 조동 구동기의 전자기 회로를 모델링 한 것으로 Fig. 2의 A-A'의 단면을 본 그림이다. 아래의 모델을 통해 구한 공기 중 자속 밀도는 식 (2)와 같다. 본 모델링은 요크를 따라 흐르는 자속은 누설이 없고, 자속 밀도는 시간에 따라 변화가 없다는 가정 하에 이루어 졌다.

$$B_g = \frac{R_n R_g (R_{y3} + R_n)}{2R_{y3}R_g + R_n R_g + R_{y3}R_n + R_{y3}R_2 + R_n R_2} \times \frac{1}{(R_n + R_g)} B_m \quad (3)$$

- $B_g$  = 공기중 자속 밀도
- $B_m$  = 자석 표면의 자속 밀도
- $R_g$  = 공기의 자기 저항
- $R_n$  = 누설 자기 저항1
- $R_n, R_{y3}$  = 요크의 자기 저항
- $R_g$  = 자석의 자기 저항 // 누설 자기 저항2

식 (2)와 (3)을 종합하여 보면 공기 중의 자속 밀도  $B_g$ 는 자석, 요크의 전자기적 물성치는 고정되어 있더라도 크기와 상대 위치를 변화로 인하여 그 값이 변하게 된다. 일반적으로 자속 밀도를 높이기 위해서 자석의 크기를 증가시키거나 자석과 요크의 간격을 줄이게 된다.

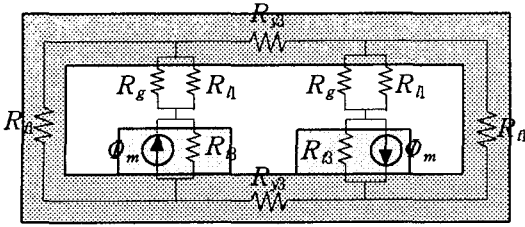


Fig. 3 Permeance model

#### 4. 최적 설계

조동 구동기의 전체 크기와 높이가 주어진 상태에서 구동력을 최대화하기 위해서는 다음과 같은 최적 설계 문제로 정의할 수 있다.

##### 4.1 목적 함수(Cost function)

조동 구동기의 구동력을 최대화 하는 것이 목적이므로 목적함수는 VCM에 의해서 얻어지는 힘을 목적함수로 잡는다.

$$\text{minimize } J = \frac{1}{(nB_g H_{eff})^2} \quad (4)$$

##### 4.2 제약조건(Constraints)

본 설계는 구동기의 전체 크기가 제한이 있는 상태에서 이루어지므로 조동 구동기의 전체 높이 제한이 첫 번째 제약 조건이 된다.  $l_m$ 은 자석의 두께,  $l_g$ 는 코일이 위치하는 부분인 공극 길이,  $l_y$ 는 요크의 두께이다. 여기서 상부 요크와 하부 요크의 두께는 동일하다.

$$g(1) : l_m + l_g + 2l_y - 5 \leq 0 \quad (mm) \quad (5)$$

두 번째 제약 조건은 전류의 제한이다. 코일에 인가되는 전류가 전원으로 부터 제한될 뿐만 아니라, 이 조건은 코일의 지름과 코일의 감은 수에 영향을 미치게 된다.

$$g(2) : I - 0.5 \leq 0 \quad (A) \quad (6)$$

세 번째 제약 조건은 요크의 포화 제한이다. 퍼미언스 법으로 구한 전자기 모델은 요크의 비투자율을 상수로 가정한다. 그러나 요크가 포화될 경우 비투자율이 비선형적인 뿐만 아니라 실제 자기 분포와 많은 차이를 보이게 된다.

$$g(3) : B_{yoke} - 1.8 \leq 0 \quad (7)$$

네 번째 제약 조건은 열 발산에 관한 것이다. 코일에 흐르는 전류는 코일의 저항에 의해 열이 발생하게 된다. 발생된 열은 공기 증으로의 대류와 코일 고정부를 통한 전도로 발산된다. 이 조건은 코일의 온도 상승을 방지하기 위한 것이다.

$$g(4) : \frac{Q_{in}}{Q_{out}} - 1.0 \leq 0$$

##### 4.3 설계 변수

조동 구동기의 전체 높이는 5mm로 제한 하였다. Table. 1은 최적 설계에 사용된 설계 변수와 시스템 파라미터를 나타낸다.

Table. 1 Design variables and system parameters

설계 변수	설계 범위
$l_m$ (자석의 두께)	0.01~3.0 mm
$l_g$ (공극 길이)	0.01~2.5 mm
$l_y$ (요크의 두께)	0.01~2.0 mm
$d_c$ (코일 지름)	0.01~0.2 mm
시스템 파라미터	값
자석	NdFeB 42
$A_m$ (자석 면적)	83.77 mm <sup>2</sup>
$w_c$ (코일 폭)	2.4 mm
$l_c$ (코일 길이)	41.45 mm
$\mu_0$ (투자율 상수)	$4\pi \times 10^{-7}$
$\rho$ (저항 상수)	$1.72 \times 10^{-8} \Omega m$
$w_y$ (요크 폭)	10 mm

##### 4.4 설계 결과

최적 설계는 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법으로 이루어졌으며 MATLAB을 이용하였다.[6][7] Fig. 4는 목적 함수와 설계 변수의 수렴 과정을 나타낸다. 설계변수의 세로축은 설계범위 최대값으로 나누어져 무차원화 상수이며, 가로축은 반복 계산 회수를 나타낸다. 그리고 SQP 방법이 전역 최소해(global minimum)으로의 수렴을 보장하지는 않으므로 수렴된 결과가 전역적 최소해 여부를 판단하기 위하여 16개의 시작점(starting point)에서 수렴 결과 확인하였다. Fig. 5가 그 결과로써 시작점에 관계없이 같은 해로 수렴됨을 확인할 수 있다. 제약 조건의 수렴 값을 살펴보면 첫 번째 전체 높이 제한, 세 번째 요크의 포화 제한, 네 번째 열 발산 제한 조건이 0으로 수렴하여 활성 제한 조건이 되었다.

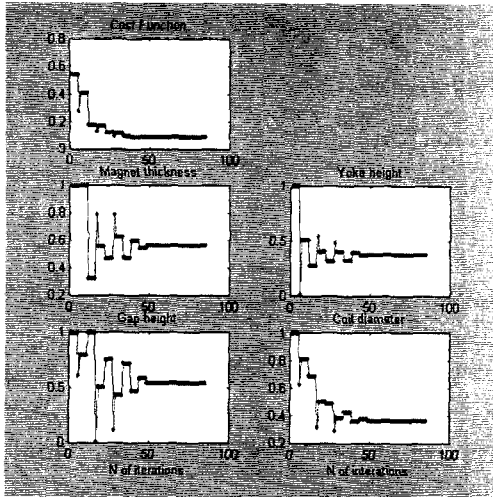


Fig. 4 Converting progress of cost function and design variable

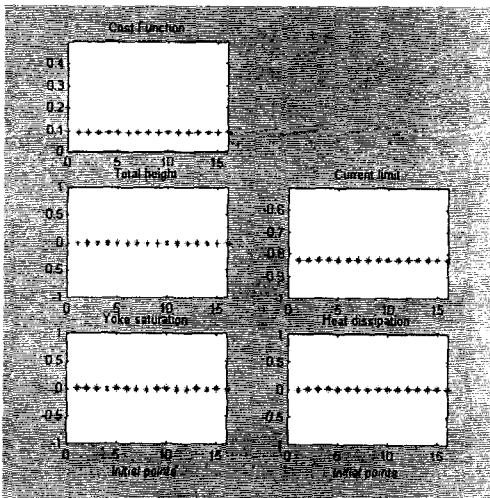


Fig. 5 Global minimum verification

Table 2. Optimal design result

설계 변수	설계 범위
$l_m$ (자석의 두께)	1.69 mm
$l_g$ (공극 길이)	1.75 mm
$l_y$ (요크의 두께)	0.78 mm
$d_c$ (코일 지름)	0.0735 mm
시스템 파라미터	값
$B_g$ (공기 중 자속 밀도)	0.373 T
$n$ (코일 감은 수)	570 turns

Table. 2는 본 최적 설계 결과로 얻어진 설계 변수 값과 이 값을 바탕으로 계산한 시스템 파라미터들이다.

최적 설계를 위해 사용한 이론적인 퍼미언스 모델을 검증하고 보다 정확한 시스템 파라미터 값을 얻기 위하여 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하였다. 유한요소 해석을 위해 전자기 해석 상용 프로그램인 MAXWELL을 사용하였다. 총 19761개의 선형 사면체 메쉬(Mesh)가 이용되었으며, Fig. 6은 해석에 사용된 메쉬를 나타낸 그림이다. Fig. 7은 Fig. 6의 B-B' 단면에서 공기 층 중심선에서의 자속 밀도를 그린 것이다. 양 끝의 요크 부분에서는 약 1.7 T로써 포화 상태에 다다랐음을 알 수 있다. 그리고 자석의 끝단으로 갈수록 자속 밀도는 줄어드나 코일이 존재하는 부분은 자석의 중심부이므로  $B_z$ 는 0.42 T이다. 퍼미언스 모델과 FEM의 결과를 비교하면 약 10%의 오차를 보이고 있다. 이는 퍼미언스 모델의 누설 자속 모델링의 한계점으로 생각된다. Fig. 8은 B-B' 단면의 자속 벡터 방향과 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 자속 밀도가 높은 요크 부분은 대부분 포화 되었으며 이는 최적 설계 결과와 일치하는 것이다.

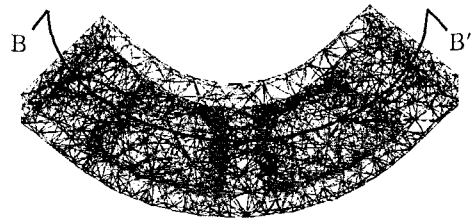


Fig. 6 Mesh model for FEM

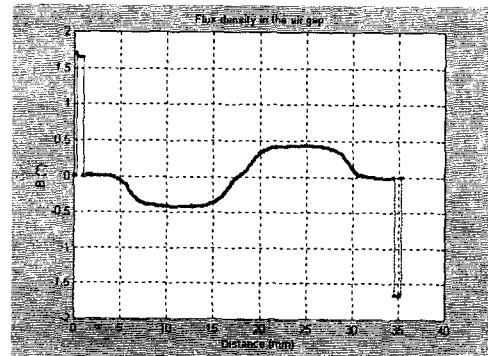


Fig. 7 The result of flux density simulation

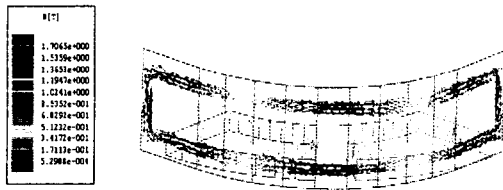


Fig. 8 Flux distribution

### 5. 결론

NFR 구동기의 소형화, 경량화의 요구를 만족시키기 위하여 크기 제한과 5mm의 높이 제한이 있는 조동 구동기의 구동력을 최대화하기 위한 최적 설계를 수행하였다.

코일이 위치하는 자석과 상부 요크 사이 부분의 자속 밀도를 계산하기 위하여 퍼미언스법을 이용한 전자기 모델링을 수행하였다. 이를 바탕으로 자석의 두께  $l_m$ , 공극의 길이  $l_g$ , 요크의 두께  $l_y$ , 코일의 지름  $d_c$ 을 설계 변수로 잡았으며, 전체 두께 제한 조건, 전류 제한 조건, 요크 포화 제한 조건, 열 발산 제한 조건의 네 가지 제한 조건 아래 최적 설계를 수행하였다. 그 결과 자석의 두께 1.69mm, 공극의 길이 1.75mm, 요크의 두께 0.78mm, 코일 지름 0.0735mm의 설계치를 얻었다.

또한 최적 설계를 위해 사용한 이론적인 퍼미언스 모델을 검증하고 보다 정확한 시스템 파라미터 값을 얻기 위하여 MAXWELL을 이용한 유한 요소 해석을 실시하였다. 유한 요소 해석을 통하여 공기 중심부의 자속 밀도  $B_g=0.42$  T의 결과 값을 얻었다.

그리고 이제까지 실시한 모델링, 최적설계, 유한 요소 해석은 NFR 조동 구동기 뿐만 아니라 HDD을 비롯한 VCM이 사용되는 구동기의 설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구는 산업자원부의 차세대 대용량 정보저장장치 개발사업 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

[1] Tom. D. Milster, 2000, "Near-Field Optics: A New Tool for Data Storage", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 9, pp. 1480~1490.

[2] R.B. Evans, J.S. Griesbach, and W.C. Messner, Mar. 1999, "Piezoelectric microactuator for dual stage control", IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2.

[3] Y.Soeno, S.Ichikawa, T.Tsuna, Y.Sato, and I.Sato, Mar. 1999, "Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive", IEEE Trans. on Mag., Vol.35, No.2

[4] 이성규, 2001, "평면 3축 초정밀 스테이지의 설계와 연속이득계획법을 이용한 제어", 한국과학기술원 박사 학위 논문

[5] Herbert A. Leupold, Nov. 1993, "Approaches to Permanent Magnet Circuit Design", IEEE Trans. on Mag., Vol.29, No.6. pp. 2341~2346.

[6] Ashok D. Belegundu and Tirupathi R. Chandrupatla, 1999, "Optimization concepts and applications in engineering", Prentice-Hall, Inc.

[7] A. Grace, 1990, "Optimization Toolbox User's Guide", The Math Works, Inc.