

자기기록장치의 위상최적설계

박순옥[†] · 최재석^{*} · 유정훈^{**}

Topology optimal design of magnetic recording system

Soonok Park, Jae Seok Choi and Jeonghoon Yoo

Key Words : Magnetic recording system(자기기록시스템), Magnetic field(자기장), Simultaneous topology optimal design(위상최적설계)

Abstract

The magnetic recording system shows the difference of the magnetic recording density according to the direction of the magnetic field. The yoke shape of the recording system affects the magnetic field direction; therefore, the recording density may be raised by changing the shape. This paper intends not only to increase the magnetic flux density of the record region but also to reduce the recording loss of a specific region through the simultaneous design of the yoke and the magnet. The recording loss can be reduced by minimizing the magnetic flux of the adjacent area to the recording region. The topology optimization method is used to obtain the optimal shape both of the yoke and the magnet. And the commercial package, Maxwell is used to verify the result.

1. 서론

자기장을 이용하여 자성체를 자화시키고, 기록 후 재생하는 자기 메모리 기술은 계속적으로 발전하고 있다. 현재는 하드 디스크의 기록 밀도가 다른 기록장치들에 비해 높은 밀도를 기록할 수 있는 것으로 알려져 있고, 모바일 장치의 경우에는 특히 크기의 제한과 이동 휴대성의 요구에 의해 고정식에 비해 대용량화 하지는 않지만 응용분야가 더욱 다양해지고 있는 추세다. 그로 인해 하드 디스크의 기록 밀도를 더욱 높이기 위한 여러 방식들이 제안되고 있고, 과거에 하드 디스크 기록 방식인 수평기록장치(longitudinal magnetic recording)에서 수직기록방식(perpendicular magnetic recording)으로 기록 비트의 크기를 감소시켜서 기록 밀도를 획기적으로 증가시켰다.⁽¹⁾ 자기 기록 시스템은 자기 기록 밀도를 높일 수 있는 시스템의 형태나 구

조를 요구하고 있다. 예를 들어 자기 기록 밀도가 높아지려면 기록 할 수 있는 하나의 비트 사이즈가 작아져야 하고, 작아진 비트를 보존하기 위해 자기 이력을 기억하는 미디어의 보자력이 충분히 높아야만 한다. 이렇게 높아진 보자력을 가진 기록 미디어를 재기록을 하기 위해서는 미디어 보자력을 이길 수 있는 충분한 세기의 외부 필드가 가해져야 한다. 따라서 충분한 세기의 자기 기록 필드의 발생이 가능한 자기 기록 헤드가 필요하다.⁽²⁾

본 논문에서는 기록 영역의 기록 밀도를 높일 수 있고, 기록이 손실 되는 영역은 기록 밀도를 최소화 하는 자기장의 방향을 제시하였다. 또한 전류의 흐름과 요크의 형태를 알기 위해서 동시 위상 최적 설계를 수행하여 헤드에서 요크와 자석의 형태를 확인하였고, 이 형태를 이용하여 상용 패키지 프로그램, Maxwell 로 결과 값을 확인하였다.

2. 동시위상최적설계

2.1 해석모델

앞서 언급했듯이 수직기록장치에서 자기 기록

[†] 논문발표자, 연세대학교 기계공학과 대학원

E-mail : yonseiqueen@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-2859, Fax : (02) 362-2736

^{*} 연세대학교 기계공학부 대학원

^{**} 연세대학교 기계공학부

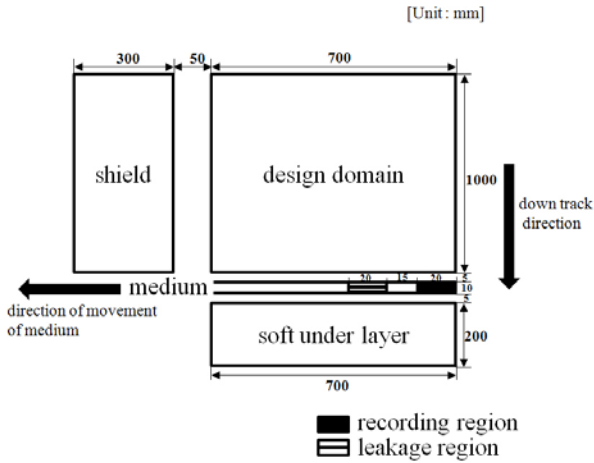


Fig. 1 Initial model of a magnetic recording

밀도는 크게 증가하고 있다. 이러한 시스템에서 자속밀도(magnetic flux density)를 높일 수 있는 자기장의 방향을 알아내고, 요크과 자석의 형태를 찾기 위해서 본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 가상 수직기록 시스템 모델을 선정했다. 이 해석 모델의 shield, soft under layer, design domain 은 모두 강자성체로 되어 있다. (3)(4)

본 연구에서 목적함수(objective function)는 미디어(medium)에서 기록 영역의 자속밀도를 최대화하고, 손실 영역의 자속밀도를 최소화하기 위해 아래와 같이 정식화된다. 기록 영역에서의 자속밀도 최대화를 위해 식(1)과 같이 정식화하였고, 기록밀도의 최대화뿐만 아니라 손실 영역의 자속밀도를 최소화 하기 위하여 식(2)를 채택하였다. $\tau_{r,x}, \tau_{l,r}$ 은 기록 영역과 손실 되는 부분의 특정영역이고, B_x, B_y 는 각각 x 방향과 y 방향의 전속밀도를 말한다. N_e 는 분할된 메쉬의 전체개수를 의미하고, ρ_i 는 i 번째 요소(element)의 밀도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Max. } \phi(\rho) &= \iint_{\Gamma_{r,x}} B_y^2 dl \\ \text{Subject to } &0 \leq \rho_i \leq 1, (1 \leq i \leq N_e) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\iint_{\Omega} \rho d\Omega \leq \text{Vol.} \\ \text{Min. } \phi(\rho) &= \iint_{\Gamma_{l,r}} (B_x^2 + B_y^2) dl - \iint_{\Gamma_{r,x}} B_y^2 dl \\ \text{Subject to } &0 \leq \rho_i \leq 1, (1 \leq i \leq N_e) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 자기장 해석

2.2.1 유한 요소 해석

시변 전계 혹은 자계의 경우, 맥스웰 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

여기서, H, D, J, B 는 자기장(magnetic field), 전속밀도(electric flux density), 전류밀도(current density), 자속밀도(magnetic flux density)를 각각 나타낸다. 영구자석이 있는 자기 시스템을 계산할 때에는 B 와 H 사이에 식 (5)와 같은 구성방정식을 이룬다.

$$B = \mu_0[(1 + \chi_m)H + M] = \mu H + B_r \quad (5)$$

χ_m, B_r, M 자화율(magnetic susceptibility)과 잔류전속밀도(remanent flux density), 그리고 자화벡터(magnetization vector)를 나타내고, μ_0, μ 는 자유공간에서의 투자율(permeability)과 특정매질의 투자율을 각각 일컫는다. 본 논문의 문제와 같은 정적(static)인 경우, 식 (6)의 거버닝 방정식(governing equation)을 따른다.

$$\nabla \times \nu(\nabla \times A) = J + \nabla \times \nu B_r \quad (6)$$

A 는 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)이고, ν 는 자기 저항률(magnetic reluctivity)이다. 이때 전류가 2 차원 영역에서 수직한 방향으로 흘러서 영역을 통과한다고 가정할 경우 ($A_x, A_y = 0, J_x, J_y = 0$) 갤러킨방법(Galerkin's method)에 근거하여 식(8)을 세울 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial B} = \nu = \frac{1}{\mu_0(1 + \chi_m)} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &\iint_{\Omega} \nu \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \iint_{\Omega} \nu \left(B_{r,x} \frac{\partial N}{\partial y} - B_{r,y} \frac{\partial N}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{\Omega} j_z N dx dy \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 A_z 는 Z 방향의 벡터 포텐셜(vector potential)이고, N 은 유한요소법의 형상함수(shape function), $B_{r,x}, B_{r,y}$ 는 x 방향과 y 방향의 잔류전속밀도(remanent flux density)가 된다.

2.2.2 재료 물성치

일반적으로 위상 최적 설계는 설계 영역을 유한개

의 많은 요소들로 나누어 계산하기 때문에 밀도에 대한 다항함수(polynominal function)로 표현된다. 자석과 요크를 동시 설계하기 위해 상대저항률(relative reluctivity)과 잔류전속밀도(remanent flux density)를 각각 ρ_1, ρ_2 에 대한 식으로 (9)와 같이 나타낸다. 본 논문에서는 투자율이 4000 인 자성체를 해석하여 ν_r 은 1/4000 이 되고, 밀도법에 기인한 벌칙 변수값(penalization parameter value)은 1, 네오디뮴계 자석을 이용하여 ($B_r = 1.5, \mu_r = 1.054$) 해석하였다. (5)

$$\begin{aligned} \nu_r^e(\rho_1) &= \rho_1(\nu_{r, \text{yoke}} - 1) + 1 \\ B_r^e(\rho_2) &= \rho_2 B_r \\ 0 &\leq \rho_1, \rho_2 \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 위상최적설계

2.3.1 위상최적설계 문제정의

자기장의 위상최적설계 문제는 일반적으로 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Min. } \Phi(\rho_1, A_2) \\ \text{Subject to. } \sum_{i=1}^n \rho_{i,j} \leq \text{Vol}_i, \sum_{i=1}^{N_e} \rho_{i,j} \leq \text{Vol}_i \\ 0 \leq \rho_{i,j} \leq 1 \quad ; i=1 \text{ to } n, j=1 \text{ to } N_e \end{aligned} \quad (10)$$

N_e 는 설계영역 내의 유한개로 나뉘어진 요소들의 개수이고, n 은 밀도함수의 수, Vol_i 는 설계 영역에 대해 i 번째 요소의 부피를 나타낸다. 해결 순서는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 초기 밀도값과 요소의 개수를 설정하면 유한요소해석(FEA)에 의해 목적함수의 최적값을 계산하고, 각각의 요소들의 민감도는 보조 변수법(adjoint variable method)에 의해 결정된다. 순차적 선형 프로그램(sequential linear program)을 이용하여 최적값을 찾아내고 설계변수의 이동간격은 0.05 로 설정하였다.

2.3.2 민감도 해석

각 요소들의 밀도가 목적함수에 미치는 영향의 정도를 나타내는 민감도는 저항률(reluctivity)에 대한 목적함수의 미분 형태로 나타낼 수 있다. (6)

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{d\rho_{1,j}} &= -\lambda^T \frac{dK}{d\rho_{1,j}} A_2, \\ \frac{d\Phi}{d\rho_{2,j}} &= \lambda^T \frac{dF}{d\rho_{2,j}}, \frac{d\Phi}{d\rho_{3,j}} = \lambda^T \frac{dF}{d\rho_{3,j}}, \dots, \frac{d\Phi}{d\rho_{n,j}} = \lambda^T \frac{dF}{d\rho_{n,j}} \end{aligned} \quad (11)$$

$\rho_{1,j}, \rho_{2,j}, \rho_{3,j}, \dots, \rho_{n,j}$ 는 영구자석과 요크의 밀도에 대한 각각의 변수이고, 강성행렬 K 와 하중벡터 F

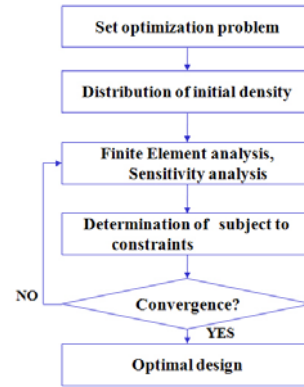


Fig. 2 Flowchart of optimization procedure

는 각 요소들이 밀도에 대한 함수로 표현되어 민감도는 식 (11)과 같이 나타내게 된다.

3. 위상최적설계

3.1 위상최적설계 해석

위의 방법들을 이용하여 영구자석을 +x 방향으로 자화를 시켰을 경우 Fig. 3 과 같은 결과를 보인다. 요크는 기록 자속 밀도를 이끌어낼 수 있는 방향으로 형상화되었고, Fig. 5 (a)에서는 Fig. 3 모델의 전류 방향이다. Fig.4 는 +y 방향으로 자화시킨 경우에 형상을 나타내는데, x 방향과는 다르게 하나의 요크로 최적 형상이 나타났다. Fig. 5 (b)는 y 방향으로 자화를 시킨 경우의 전류흐름이다.

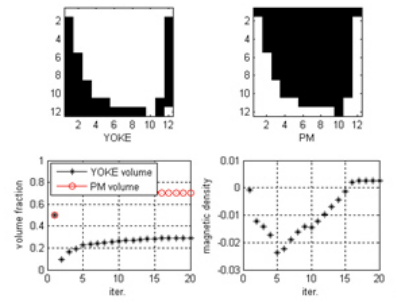


Fig. 3 Optimization result of a magnetic recording using PM with x-directional magnetization

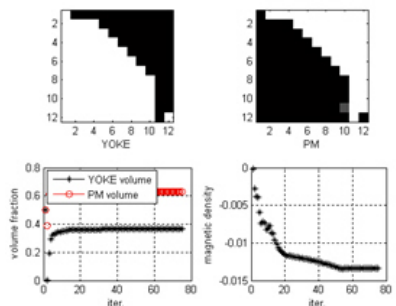


Fig. 4 Optimization result of a magnetic recording using PM with y-directional magnetization

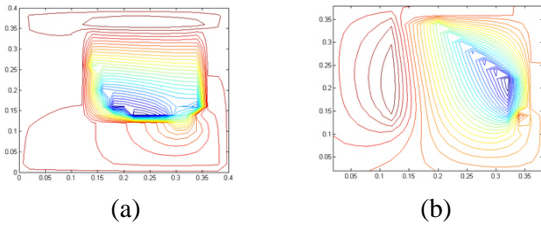


Fig. 5 Magnetic flux line plot for optimization results of a magnetic recording system using yokes and (a) x-directional magnetization (b) y-directional magnetization

-x 와 -y 으로 자화 방향을 바꾼 경우에 각각 +x 와 +y 의 결과와 동일하게 생성되어 본 논문에서는 언급하지 않았다. Table 1 과 2 에서 확인할 수 있듯이 기록 영역의 자속 밀도 값을 확인한 결과는 +y 방향보다 +x 방향으로 자화 할 경우 0.00514[T]에서 0.01354[T]로 약 2.6 배의 기록향상을 보였다.

Table 1 The optimization results of a magnetic recording system using yokes and x- directional magnetization

| | Recording | Recording+ Leakage |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Volume fraction | PM : 0.7 Yoke: 0.3 | PM : 0.7 Yoke: 0.3 |
| Magnetic density[T] | 1.3542e-002 | 2.5959e-003 |
| Iteration number | 119 | 20 |

Table 2 The optimization results of a magnetic recording system using yokes and y- directional magnetization

| | Recording | Recording+ Leakage |
|---------------------|------------------------|------------------------|
| Volume fraction | PM : 0.6 Yoke: 0.35 | PM : 0.6 Yoke: 0.39 |
| Magnetic density[T] | 5.1439e-003 | -1.3383e-002 |
| Iteration number | 64 | 75 |

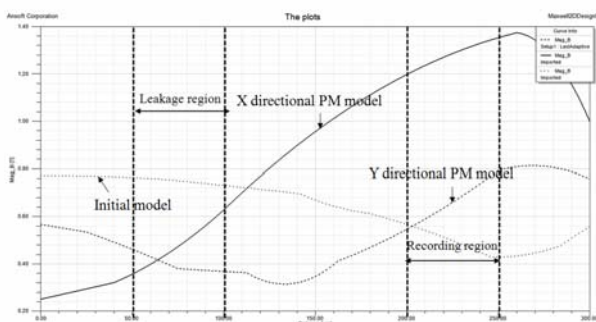


Fig. 6 The plots of optimization result of a magnetic recording system using Maxwell

3. 결론

본 연구는 자기기록장치에서 자기기록밀도를 높이기 위한 자기 흐름의 방향을 동시위상설계를 통해서 구현하였다. 즉 자기기록장치의 헤드부분을 구성하는 요크와 자석의 형상을 도출한 것으로, 유한요소해석을 통한 요크와 자석의 형상(shape)을 보였고, Maxwell 을 통하여 위의 결과값을 비교하였다. 이를 통해 x 방향으로 자화방향이 결정되면 y 방향일 때보다 3 배에 가까운 기록 밀도의 향상을 보였음을 확인하였고, 손실되는 부분의 영역에서도 기록밀도가 현저하게 감소되었음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10074-0)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Park, M. C., Kang, K. Y., 2006, "Technical Review of Terabit Data Storage," *ETRI journal*, Vol. 21, No. 12, pp. 139~141.
- (2) Roger, W., Yimin, H., Marilee, S., 2007, "Perpendicular magnetic recording technology," Hitachi Global Storage Technologies.
- (3) Yoshifumi, O., Masaya, O., Norio, T., 2005, "Magnetic shield design of perpendicular magnetic recording head by using topology optimization technique," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 5, 1788-1791.
- (4) Yoshifumi, O., Koji, A., Norio, T., 2006, "3-D topology optimization of single-pole-type head by using design sensitivity analysis," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No.4, 1087-1090.
- (5) Koji, A., Daisuke, M., Norio, T., 2006, "Design of CF-SPT head having large recording field and small stray field using 3-d on/off method," *IEEE Trans. Magn.*, 10, 2431-2433.
- (6) Choi, J. S., Yoo, J. h., 2008, "Structural optimization of ferromagnetic materials based in the magnetic reluctivity for magnetic field problems," in press. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*