

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.821

재료의 비선형을 고려한 수직기록장치의 위상최적화

박순옥* · 유정훈*† · 민승재**

* 연세대학교 기계공학과, ** 한양대학교 기계공학부

Topology Optimization of Perpendicular Magnetic Recording System by Considering Magnetic Nonlinearity

Soonok Park*, Jeonghoon Yoo*† and Seungjae Min**

* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.,

** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received October 29, 2009 ; Revised May 3, 2010 ; Accepted May 9, 2010)

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Sensitivity Analysis(민감도 해석), Adjoint Variable Method(보조변수법), Magnetic Saturation Effect(자기포화효과), Finite Element Method(유한요소법), Density Method(밀도법)

초록: 본 논문은 밀도법을 기반으로 한 자기포화 효과를 고려한 수직자기 기록장치의 위상최적 설계 방법을 제안한다. 자기장 내의 위상최적화 과정에서 자기 저항률의 값은 민감도 해석 결과에 따른 요소의 밀도값 변화에 의거하여 결정된다. B-H 곡선에 따른 자기 저항률의 값은 물성치의 비선형성을 나타낸다. 일반화된 응답 함수의 민감도는 자기장의 비선형 특성을 고려하여 보조 변수법에 의해 표현되고, 설계의 목적 함수는 기록 영역의 자기에너지를 최대화하는 것으로 설정된다. 선형과 비선형의 최적화의 수치 연구의 결과는 비선형의 효과를 나타내고 있다.

Abstract: This paper proposes a density method based topology optimization of a perpendicular magnetic recording system design in which the saturation effect is taken into account. During the topology optimization process in magnetic fields, the magnetic reluctivity is updated in accordance with the changes in element density determined by a sensitivity analysis. The magnetic reluctivity is determined from a B-H curve and is used to represent nonlinear material property, i.e., the saturation effect. The sensitivity for a generalized response functional is formulated using the adjoint variable method in which the nonlinear property is taken into account and the objective function is set such that the magnetic energy in the media is maximized. Effects due to the nonlinear property can be observed from a numerical study in which the linear and the nonlinear topology optimization results are compared.

1. 서 론

위상최적설계는 설계자의 개념을 최종 설계로 구체화 시키는 데에 효과적인 방법으로 전자기 시스템의 경우 초기 개념 설계에 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 정자기장의 위상최적설계를 위해서는 목적 함수에 대한 설계 변수의 변화를 수식화 해야 하고 변분식을 미분함으로써 민감도를 계산하는 복잡한 과정이 요구된다. 이러한 과정을 단순화, 자동화 하기 위하여 다양한 프로그램과 알고리즘이 이용되어 왔다.⁽¹⁾

민감도 계산의 복잡함과 어려움으로 인하여 정자기장의 위상최적설계에 관한 많은 연구에서는 자성재료의 특성을 선형재료라고 가정하여 자기포화를 고려하지 않고 민감도를 계산하고 위상최적화 과정을 수행하였다. 일부 연구에서는 자기포화 효과를 고려한 비선형성을 해석 과정에서만 고려하고 있으나,⁽²⁾ 민감도의 계산 및 최적화 과정에서 비선형성이 고려된 연구 결과는 일반화되어 있지 않다.⁽³⁻⁷⁾ 그러나 실제 자기 시스템은 대부분이 자기 포화가 발생하는 재료 특성을 갖기 때문에 선형 재료로 가정하고 위상최적설계를 수행한 결과는 그 목적함수의 최적 값을 보장하지 못한다.

따라서 본 연구에서는 선형과 비선형의 경우를

† Corresponding Author, yoojh@snuyonsei.ac.kr

고려한 민감도 계산이 위상최적화의 결과에 미치는 영향을 확인하고자 자기 헤드의 일부분인 수직 기록장치(perpendicular magnetic recording system)의 자성재료의 특성을 선형(linear)과 비선형(nonlinear)으로 나누어 적용함으로써 위상 최적화된 형상과 목적함수 값을 비교하고자 하였다.

2. 밀도법 기반의 위상최적화

위상 최적설계는 설계 영역을 이산화하고 이산화된 각 요소들의 밀도에 따른 물성치의 변화를 계산하고 목적함수(objective function)와 제한조건에 따른 각 요소들의 재료 상태를 결정하여 최종 설계 형상을 도출하는 방법으로 본 연구에서는 밀도법(density method) 기반의 위상최적설계를 수행하였다.⁽⁸⁾

2.1 밀도법에 따른 물성치의 정의

위상최적설계 방법에서 많이 사용되고 있는 밀도법을 정자기(magnetostatic) 문제에 적용하면 이산화한 각 요소의 밀도가 설계변수가 되고 그 결과가 0 또는 1 사이의 값으로 나타난다. 또한 설계 영역 내에 전류가 가해지고 노이만(Neumann)이나 디리클레(Dirichlet) 경계조건이 적용된다. 따라서 밀도법을 이용한 정자기 문제에서 강자성체(ferromagnetic material)의 물질 특성(material property)을 나타내는 자기투과율(magnetic permeability)과 자기저항률(magnetic reluctivity)은 식 (1), (2)와 같이 나타낸다.⁽⁹⁾

$$\mu_r^e(\rho) = \rho^p (\mu_r - 1) + 1 \quad (1)$$

$$v_r^e(\rho) = \rho^p (v_r - 1) + 1 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 요소의 밀도, μ_r^e 는 상대 자기투과율(relative magnetic permeability), v_r^e 는 상대 자기저항률(relative magnetic reluctivity)이고 $v = 1/\mu$ 관계를 갖고 있다. p 는 벌칙인자(penalization parameter)로 (2)식의 경우 2와 4 사이의 값을 선택한다. 자기저항률 기반의 위상최적화의 경우는 체적 제한조건에 관계없이 수렴된 결과를 얻을 수 있으므로⁽⁹⁾ 본 연구에서도 자기저항률을 물질특성으로 고려하여 설계를 수행하였다.

2.2 최적화 문제의 정식화

자기장 위상최적화 문제에서 설계의 목적함수 g 와 최대 부피 제한조건으로 구성된 최적화 문제는 식 (3)과 같이 표현된다.

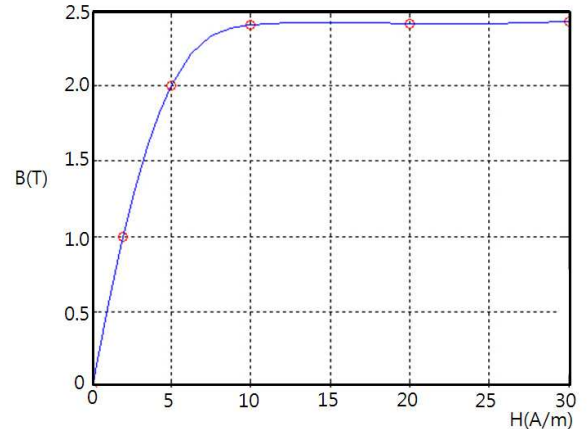


Fig. 1 B-H curve of Fe-Pt

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } E_{\text{magnetic}} \equiv g(\mathbf{A}(\rho), \rho) \\ & \text{Subject to } \int_{\Omega} \rho \Omega \leq \text{Vol}, \quad 0 \leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{A} 는 자기벡터포텐셜(magnetic vector potential)을 나타낸다.

목적함수가 자기에너지를 최대화하거나 자속밀도(magnetic flux density)를 최대화하는 경우에 재료물성값은 민감도 계산에 중요한 역할을 한다. 밀도법은 재료의 특성을 밀도의 영향을 받는 함수로 가정하여 나타내므로 정자기 문제에서는 자기포화효과(magnetic saturation effect)를 고려하지 않고 선형재료로 가정하여 식 (2)와 같이 표현하는 경우와 자기포화효과를 고려하여 비선형 재료의 특성을 밀도에 대한 함수로 가정하여 나타내는 식 (4)의 경우로 나누어질 수 있다.

$$\begin{aligned} v(\mathbf{B}) &= v_{\text{steel}}(\mathbf{B})\rho^p + v_{\text{air}}(1 - \rho^p) \\ \text{where } v_{\text{steel}}(\mathbf{B}) &= k_1 e^{k_2 \mathbf{B}^2} + k_3 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 비선형 재료 물성치를 나타내는 상수값을 나타낸다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 철-백금(Fe-Pt) 혼합물의 자기포화 효과를 보여주는 BH 곡선이며⁽¹⁰⁾ 이를 식 (4)의 보간 함수(interpolation function)로 나타내어 k_1, k_2, k_3 값을 구할 수 있다.

3. 민감도의 계산

민감도(sensitivity)는 목적함수 또는 제한조건에 대한 설계변수의 변화의 영향을 나타내며, 최적화 과정에서는 이를 기반으로 하여 설계 변수의 값을 지속적으로 변화시킨다. 자기장의 유한 요소 해석

에서는 다음의 이산화된 상태 방정식이 사용되며 이를 이용하여 목적함수의 값을 계산한다.

$$\mathbf{KA} = \mathbf{J} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{K} 는 강성행렬(stiffness matrix), \mathbf{A} 는 자기벡터포텐셜 (magnetic vector potential), \mathbf{J} 는 구동벡터 (excitation vector) 전류 밀도(current density)를 나타낸다.

3.1 선형재료의 민감도 계산

목적함수 g 의 민감도를 수학적으로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$\frac{dg}{d\rho} = \frac{\partial g}{\partial \rho} + \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{A}} \right)^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \rho} \quad (6)$$

식 (5)에서 $\partial g/\partial \rho$ 항은 설계 변수 ρ 의 변화에 대한 목적함수의 변화율을 나타낸 것으로 식 (2)와 (3)의 관계를 이용하여 계산되고 $(\partial g/\partial \mathbf{A})^T$ 는 식 (3)에 표시된 바와 같이 목적함수가 설계변수 ρ 와 벡터포텐셜 \mathbf{A} 의 양함수(explicit function)이므로 쉽게 계산될 수 있다.

$\partial \mathbf{A}/\partial \rho$ 항의 \mathbf{A} 는 ρ 에 대해 음함수(implicit function)형태로 표현되며 이는 식 (5)를 미분하여 얻을 수 있다.

$$\frac{d\mathbf{A}}{d\rho} = \mathbf{K}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \rho} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho} \mathbf{A} \right) \quad (7)$$

식 (6)에 식 (7)을 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dg}{d\rho} = \frac{\partial g}{\partial \rho} + \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{A}} \right)^T \mathbf{K}^{-1} \left(\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \rho} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho} \mathbf{A} \right) \quad (8)$$

ρ 에 대한 A 의 변화를 계산하고 식 (8)에 의거하여 민감도를 계산하면 설계변수 ρ 의 수 만큼 방정식을 풀어야 하기 때문에 계산량이 증가한다. 계산량의 감소를 위해 다음의 식 (9)와 같이 보조 변수 λ 를 이용하여 민감도를 계산하며 이를 보조 변수법(adjoint variable method, AVM)이라고 한다.

$$\mathbf{K}^T \lambda = \frac{dg}{d\mathbf{A}} \quad (9)$$

이를 이용하여 민감도 식을 정리하고 전류밀도 \mathbf{J} 가 고정된 값을 고려하면 다음의 식 (10)이 도출될 수 있다.

$$\frac{dg}{d\rho} = \frac{\partial g}{\partial \rho} - \lambda^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho} \mathbf{A} \quad (10)$$

3.2 비선형재료의 민감도 계산

비선형재료인 경우에 민감도 식은 밀도법에서의 설계변수 ρ 가 자기저항률 $\nu(\rho)$ 에 대한 함수의 형태로 변환되어 다음과 같이 나타내어 진다.⁽³⁾

$$\frac{dg}{d\nu(\rho)} = \frac{\partial g}{\partial \nu(\rho)} + \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{A}} \right)^T \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \nu(\rho)} \quad (11)$$

선형재료의 경우와 같이 식 (11)에서 $\partial g/\partial \nu(\rho)$ 는 식 (2)와 (3)을 이용하여 계산된다. $(\partial g/\partial \mathbf{A})^T$ 의 경우도 선형의 경우와 같이 쉽게 계산될 수 있다.

비선형 재료의 경우에 $\partial \mathbf{A}/\partial \nu(\rho)$ 항은 식 (12)로 표현된 잔여벡터(residual vector) \mathbf{r} 의 미분을 이용하여 유도한다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{KA} - \mathbf{J} \quad (12)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\nu(\rho)} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \nu(\rho)} \mathbf{A} + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \nu(\rho)} - \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \nu(\rho)} = 0 \quad (13)$$

여기서 전류밀도 \mathbf{J} 는 \mathbf{A} 에 대한 함수가 아니므로 식 (13)의 $\partial \mathbf{J}/\partial \nu(\rho)$ 항은 0이 된다. 재료의 비선형 특성에 의해 강성행렬은 변화하게 되고 이를 고려하여 다음의 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{d\mathbf{r}}{d\nu(\rho)} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \nu(\rho)} \mathbf{A} + (\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K}) \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \nu(\rho)} = 0 \quad (14)$$

식 (12)를 \mathbf{A} 에 대해 미분하고 식 (4)의 관계를 고려하면 다음의 식 (15)가 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{r}}{d\mathbf{A}} &= \mathbf{K} + \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \mathbf{A}} \mathbf{A} - \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{A}} \\ &= \mathbf{K} + \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \nu(\rho)} \frac{\partial \nu(\rho)}{\partial \mathbf{B}^2} \frac{\partial \mathbf{B}^2}{\partial \mathbf{A}} \mathbf{A} - \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{B}^2} \frac{\partial \mathbf{B}^2}{\partial \mathbf{A}} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

앞에서와 같이 전류밀도 \mathbf{J} 는 \mathbf{B}^2 에 대한 함수가 아니므로 식 (15)의 $\partial \mathbf{J}/\partial \mathbf{B}^2$ 항은 0이 된다. 이를 이용하여 $\Delta \mathbf{K}$ 는 뉴턴-랩슨 방법(Newton-Raphson method)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta \mathbf{K} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \nu(\rho)} \frac{\partial \nu(\rho)}{\partial \mathbf{B}^2} \frac{\partial \mathbf{B}^2}{\partial \mathbf{A}} \Delta \mathbf{A} \quad (16)$$

식 (14)에서 $\partial \mathbf{A}/\partial \nu(\rho)$ 를 구해 식 (11)에 대입하면

다음의 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{dg}{dv(\rho)} = \frac{\partial g}{\partial v(\rho)} - \left(\frac{\partial g}{\partial \mathbf{A}} \right)^T \left\{ (\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K})^{-1} \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial v(\rho)} \mathbf{A} \right\} \quad (17)$$

여기서 목적함수 g 는 비선형 자성재료를 나타내는 물질 특성 $v(\rho)$ 에 대해 음함수 형태로 표현된다. 선형재료의 경우와 마찬가지로 다음의 보조변수식 (18)을 이용하여 식 (19)와 같이 민감도를 계산함으로써 계산 시간을 감소시킬 수 있다.

$$(\mathbf{K} + \Delta \mathbf{K})^T \lambda = \frac{dg}{d\mathbf{A}} \quad (18)$$

$$\frac{dg}{dv(\rho)} = \frac{\partial g}{\partial v(\rho)} - \lambda^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial v(\rho)} \mathbf{A} \quad (19)$$

Fig. 2는 위상최적화의 과정에서 선형과 비선형 재료인 경우에 대한 민감도 계산의 차이를 나타내고 있다. 비선형 해석의 경우 해석과정에서의 반복과정(iteration)이 요구되나, 민감도의 계산은 반복계산의 수렴된 결과를 바탕으로 이루어진다.⁽¹¹⁾

Fig. 3은 최적화 과정의 마지막 반복과정에서의 민

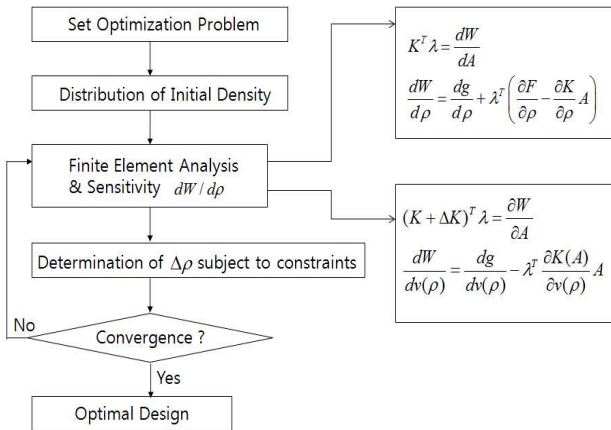


Fig. 2 Subroutine of the topology optimization process

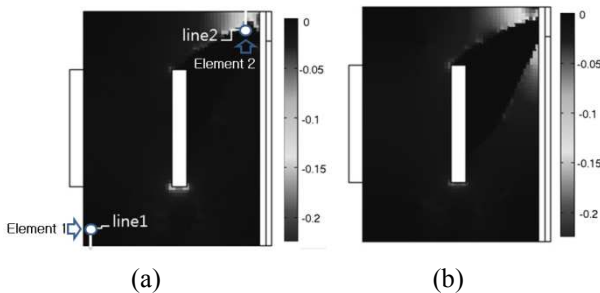


Fig. 3 The sensitivity contour of the perpendicular magnetic recording system based on (a) linear material property and (b) nonlinear material property

감도 계산 결과의 나타낸다. Fig. 3(a)의 자성 재료의 물성에 자기 포화효과를 고려하지 않는 경우와 Fig. 3(b)의 자기 포화효과를 고려하는 경우의 민감도 계산 결과의 차이를 확인할 수 있다. Table 1에 나타낸 바와 같이, 요소 1번의 민감도 값을 수치적으로 비교해 보면 포화효과를 고려한 경우의 민감도 값은 -0.0002, 포화효과를 고려하지 않은 경우 값은 -0.22로 차이가 크다는 것을 알 수 있고, 요소 2의 경우도 다른 값을 가짐을 확인할 수 있다. Table 2에서는 자기 포화효과를 고려하는 경우에 본 연구에서 사용된 보조변수법을 이용한 민감도 계산 값과 유한차분법(finite difference method, FDM)을 이용한 값을 비교하였으며, 이를 통해 보조변수법의 정확성을 확인하였다.

Table 1 Validation of design sensitivity analysis between linear and non-linear case

	linear case	non-linear case
element 1	-0.22	-0.0002
element 2	-0.028	-0.077

Table 2 Verification of design sensitivity analysis by comparison of AVM with FDM

	AVM	FDM	FDM/AVM
element 1	-0.0002	-0.000197	0.985
element 2	0.077	0.0765	0.9935

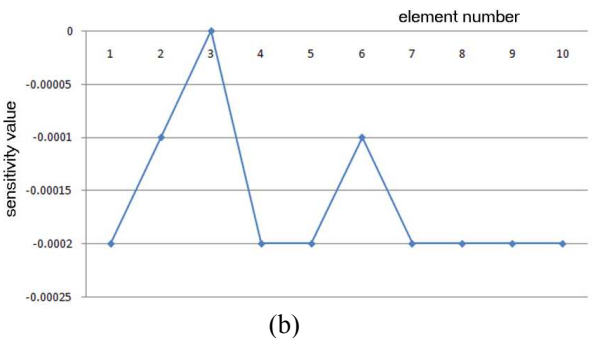
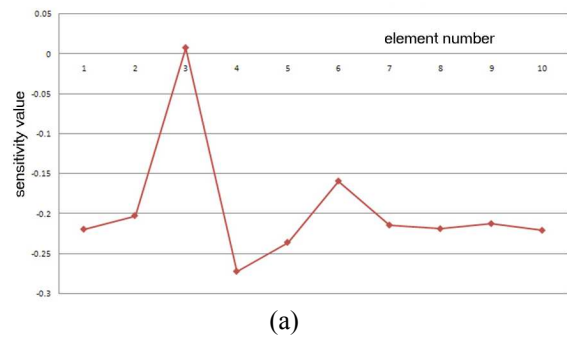


Fig. 4 Comparison of sensitivity value along line 1 based on (a) linear material property and (b) nonlinear material property

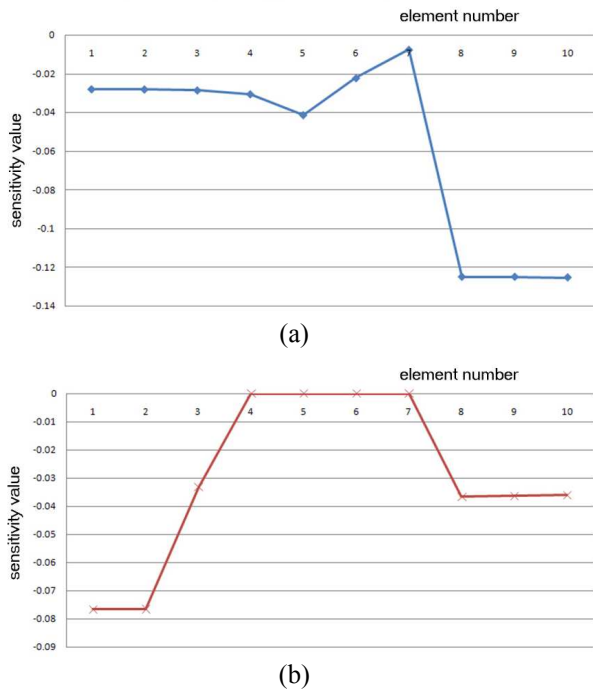


Fig. 5 Comparison of sensitivity value along line 2 based on (a) linear material property and (b) nonlinear material property

Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 3(a)의 선 1과 선 2의 요소들의 민감도의 차이를 보여주고 있다. Fig. 4(a)의 자성재료가 선형인 경우의 민감도 값의 흐름과 (b)의 비선형인 경우의 민감도의 흐름은 절대값은 다르지만 전체적으로 비슷한 양상을 보이나, Fig. 5(a)와 (b)를 비교하면 민감도 차이가 확실히 나타난다. 이는 재료의 비선형성을 고려하는 경우 재료의 포화가 생기는 영역에서 민감도의 값이 차이가 발생함을 의미한다.

4. 적용

본 연구에서 제안한 방법을 Fig. 6(a)에 나타난 수직기록장치 설계에 적용하였다.⁽¹²⁾ 설계의 목적 함수를 기록영역(recording region)의 자속밀도를 높이는 것으로 설정하면 최적화 문제는 다음의 식 (20)과 같이 정의될 수 있다.⁽¹³⁾

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & g(\rho) = \int_{\Gamma_{\text{recording}}} B_x^2 dl \\ \text{Subject to } & 0 \leq \rho_i \leq 1, (1 \leq i \leq N_e) \\ & \sum_{i=1}^{N_e} \rho_i \leq Vol_{\text{spec}} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 B_x 는 x 방향의 자속밀도, $\Gamma_{\text{recording}}$ 은 미디어의 기록영역, N_e 는 설계영역의 요소의 수,

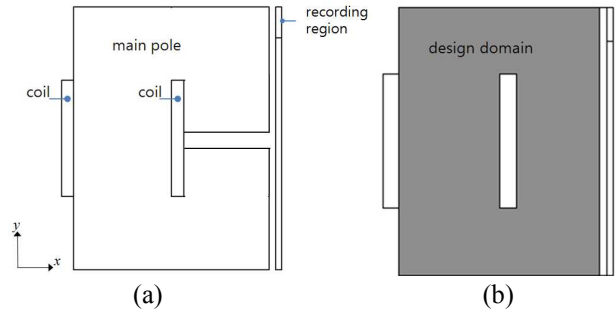


Fig. 6 Schematic figures of the perpendicular magnetic recording system; (a) initial model and (b) design domain

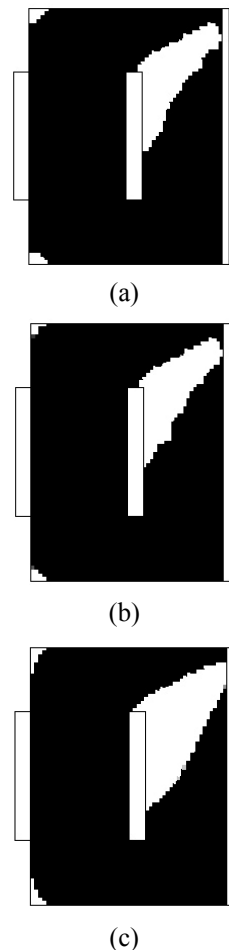


Fig. 7 Optimization results based on the magnetic reluctivity for (a) low current density-linear case, (b) high current density-linear case and (c) high current density-nonlinear case

V_{spec} 는 체적제한 조건의 상한값을 나타낸다. 최적화 과정에서 설계영역을 Fig. 6(b)와 같이 확장하고 부피 제한조건은 전체부피의 90%로 제한하였다.

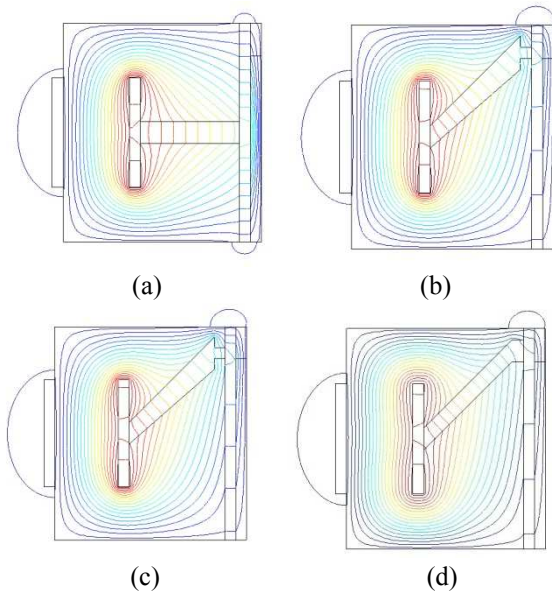
Fig. 7(a)는 코일에 0.1A의 전류를 인가하여 자기포화가 일어나지 않는 경우, 즉 재료의 물성값이 선형인 경우의 위상최적결과를 나타낸 것이고 Fig.

Table 3 Magnetic flux comparison

	Low current density (0.1A) - linear	High current density(1.0A) - linear	High current density(1.0A) - nonlinear
Magnetic flux density of initial models (T)	0.2	1.4	0.76
Magnetic flux density of optimal models (T)	0.81	7.99	1.94

Table 4 Magnetic flux comparison for the simplified model by COMSOL

	Low current density (0.1A) - linear	High current density(1.0A) - linear	High current density(1.0A) - nonlinear
Magnetic flux density of initial models (T)	0.2	1.4	0.76
Magnetic flux density of optimal models (T)	0.82	6.95	1.97

**Fig. 8** Contours of the magnetic vector potential for (a) initial model for linear case (b) low current density-linear case, (c) high current density-linear case and (d) high current density-non-linear case

7(b)는 1A의 전류를 인가하였으나 자기포화 효과를 고려하지 않은 선형해석 및 위상최적설계의 결과이다. Fig. 7(c)는 1A의 전류를 인가하여 설계 영역 부분에 자기포화가 일어나는 경우의 위상최적설계 결과 형상을 나타낸 것이다. Fig. 7의 형상들을 비교하면 자성 재료의 물성에 자기포화효과를 고려하는 경우 자기 저항에 의한 자속의 흐름에 영향을

주기 때문에 위상최적화에 따른 최종 형상이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 초기 모델과 Fig. 7에 나타난 최적화된 형상에서 기록 영역에서의 자속밀도 값을 나타내고 있다. 0.1A 전류 인가 시 최적화된 모델은 자기포화 현상 없이 자속 밀도 0.81T에서 수렴되었고, 1.0A의 높은 전류 인가 시 자기포화 효과가 고려된 경우 자속밀도는 1.94T에서 수렴된다. 그러나 1.0A의 전류 인가 시 자기포화가 고려되지 않으면 자속 밀도는 높은 7.99T에서 수렴되며 이는 실제적인 현상을 반영하지 못하는 결과이다. 낮은 전류를 인가 시 나타난 최적형상은 Fig. 6(a)의 초기형상보다 4배 정도 증가된 자기밀도 값을 보였고, 높은 전류를 인가하고 비선형성을 고려하는 경우에는 2.5배 정도 향상된 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8은 유한요소해석 상용 패키지인 COMSOL을 이용하여 초기모델과 Fig. 7의 결과를 고려한 간략화된 개선 모델에 대하여 자기포화 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우, 높은 전류 값과 낮은 전류 값을 인가했을 때의 자기포텐셜(magnetic potential)의 분포를 보여주고 있다. 최적화된 모델에서 기록영역에서 자기포텐셜이 초기 모델보다 밀집되는 것을 확인할 수 있고, 이는 목적함수 값의 향상으로 나타난다. Table 4에서 나타낸 바와 같이 모든 경우에서 최적형상이 초기 형상보다 향상된 결과값을 나타낸다.

5. 결론

자성재료를 이용한 시스템에서 비선형 자기포화효과를 고려한 밀도법 기반의 위상최적설계를 위해 민감도를 계산하고 이를 이용하여 최적화된 형상을 얻는 방법을 제안하였다. 선형과 비선형의 경우에 민감도 값이 다른 것을 확인하고 이를 이용한 최적화 결과를 상용 패키지를 이용하여 검증하였다. 비선형 특성을 고려하여 위상최적설계를 수행할 경우, 보다 실질적인 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 자기포화 영역에서는 비선형 특성에 의해 선형인 경우보다 부피가 줄어드는 현상이 발생한다. 본 연구에서 제안된 방법을 수직자기기록 장치의 설계에 적용한 결과 기존의 방법에 의한 형상의 차이와 성능 향상의 결과를 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00026).

참고문헌

- (1) Haftka, R. T. and Gürdal, Z., 1992, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic, Dordrech.
- (2) Yoo, J., Kikuchi, N. and Volakis, J. L., "Structural Optimization in Magnetic Fields Using the Homogenization Design Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.36, No.3, pp.574~580.
- (3) Wang, S., 2002, "Topology Optimization of Nonlinear Magnetostatics," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 38, No. 2, pp. 1029~1032.
- (4) Lee, J. and Kikuchi, N., 2009, "3D Topology Optimization of Switched Reluctance Motors using Edge Elements", *Abstracts of 10th US National Congress on Computational Mechanics*, 160502.
- (5) Park, S. and Min, S., 2009, "Design of Magnetic Actuator with Nonlinear Ferromagnetic Materials Using Level-set Based Topology Optimization", *IEEE Trans. on Magn.*, accepted.
- (6) Park, S., Kwon, K. H. and Min, S., 2009, "Level Set Based Topology Optimization of Magnetic Actuator Considering Magnetic Saturation Effect," *Trans. of the KSME*, pp. 236~238.
- (7) Yoo, J., 2004, "A Study on the Topology Optimization in Magnetic Fields Comparisons between the Density Method and the Homogenization Design Method," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No.4, pp.370~377.
- (8) Bendsoe, M. P. and Sigmund O., 2003, *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*. Springer-Verlag: New York.
- (9) Yoo, J., Yang, S. and Choi, J. S., 2008, "Optimal Design of an Electromagnetic Coupler to Maximize Force to a Specific Direction," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 7, pp. 1737~1742.
- (10) Yoshifumi, O., 2005, "Magnetic Shield Design of Perpendicular Magnetic Recording Head by Using Topology Optimization Technique," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1788~1791.
- (11) Micaleris, P., Tortorelli, D. A. and Vidal, C. A., 1994, "Tangent Operators and Design Sensitivity Formulations for Transient Non-Linear Coupled Problems with Applications to Elastoplasticity," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37, No. 9, pp. 2471~2499.
- (12) Okamoto, Y., Akiyama, K. and Takahashi, N., 2006, "3-D Topology Optimization of Single-Pole-Type Head by using Design Sensitivity Analysis," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 42, No. 4, pp. 1087~1090.
- (13) Park, S., Yoo, J. and Choi, J. S., 2009, "Optimal Shape of the Perpendicular Magnetic Recording Head," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 45, No. 5, pp. 2272~2275.