

영구자석과 요크를 포함한 자기 시스템의 위상최적설계 및 자기 변형 센서의 바이어스 자석 설계에의 응용

조승현* · 김윤영† · 유정훈**

(2004년 5월 17일 접수, 2004년 8월 26일 심사완료)

Topology Design Optimization of a Magnetic System Consisting of Permanent Magnets and Yokes and its Application to the Bias Magnet System of a Magnetostrictive Sensor

Seung Hyun Cho, Yoon Young Kim and Jeonghoon Yoo

Key Words : Topology Optimization(위상최적설계), Permanent Magnet(영구자석), Yoke(요크), Magnetostrictive Sensor(자기변형 센서)

Abstract

The objective of this investigation is to formulate and carry out the topology optimization of a magnetic system consisting of permanent magnets and yokes. Earlier investigations on magnetic field topology optimization have been limited on the design optimization of yokes or permanent magnets alone. After giving the motivation for the simultaneous design of permanent magnets and yokes, we develop the topology optimization formulation of the coupled system by extending the technique used in structural problems. In the present development, we will also examine the effects of the functional form for permeability penalization on the optimized topology.

1. 서 론

최근 자기력(Magnetic Force) 및 자기-역학 연성 효과(Magneto-Mechanical Coupling System)를 이용한 시스템에 관심이 증대되고 있다. 특히 기존의 페라이트 자석(Ferrite Magnet)에 비해 훨씬 세기가 강한 희토류계 자석(Rare-Earth Magnet)의 출현으로 자기 기기의 응용 범위가 매우 다양해졌다.^(1,2) 전형적인 자기 기기는 영구자석, 요크 및 코일 등으로 이루어져있고 이 요소들의 배치는 기기의 성능에 매우 큰 영향을 미친다. 일반적으로 이러한 구성요소의 적절한 배치를 설계하는 것은 문제의 성격에 따라 크기(Size), 형상(Shape), 위상(Topology)

등을 최적화하는 문제로 정식화 할 수 있다.

현재 자기 기기의 설계에 크기 또는 형상 최적화 기법을 이용한 연구가 수 차례 보고된 바가 있고, 위상 최적화 기법을 적용한 경우도 증가하고 있다. 적용 사례로는 전자석에서 철심(Iron Core) 텀,⁽³⁾ 변압기의 철심,⁽⁴⁾ 자기공명영상(MRI) 기기에서 코일의 분포,⁽⁵⁾ 선형모터에서 요크,⁽⁶⁾ 자기변형 센서의 바이어스 자기장^(7,8) 설계 등이 있다. 그러나, 앞서 소개된 연구들은 모두 요크나 영구자석만을 독립적으로 설계한 경우이다. 최근 Park 등⁽⁹⁾에 의해 C형 코어 설계를 위해 영구자석과 요크의 동시 최적화가 시도된 바 있다.

Cho 등⁽⁷⁾은 위상최적설계 기법을 영구자석의 설계 문제에 적용한 바 있지만, 중간 밀도 값을 가지는 설계변수의 존재를 피할 수 없었다. 보통 구조 설계 문제에서 중간 밀도 변수는 벌칙화(Penalization) 등으로 해결이 가능하지만, 자기장 관련 문제의 경우 계가 자기 회로(Magnetic Circuit)를 이루려는 성질로 인해서 중간 밀도 변수가 존

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail: yykim@snu.ac.kr
TEL: (02)880-7154 FAX: (02)872-5431

* 서울대학교 대학원

** 회원, 연세대학교 기계공학부

제 할 수 밖에 없다. 따라서 Cho 등⁽⁷⁾은 최적화 수행 후에 중간 밀도 변수 영역을 요크로 해석하였고 실험을 통해 그 타당성을 검증한 바 있다. 하지만, 이러한 해석은 어디까지나 직관에 의한 것이어서, 좀 더 좋은 설계를 위해서는 최적화 단계에서부터 영구자석과 요크를 동시에 고려한 연구를 수행 할 필요가 있다.

영구자석과 요크의 동시 최적설계는 이중 물질(Two-Material) 위상 최적설계 문제로 볼 수 있고, 기존의 다물질 위상 최적설계는 탄성 재료,⁽¹⁰⁻¹²⁾ 열팽창 재료,⁽¹³⁻¹⁵⁾ 전자-열 연성 재료,^(15,16) 자성 재료⁽⁹⁾ 등 여러 재료에 대해서 수행된 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구에서 사용된 보간법(Interpolation Method)을 확장하고, 두 가지 종류의 설계변수를 이용하여 재료의 물성치를 정의하고 이를 정자기장(Magnetostatic Field) 문제로 정식화하였다. 설계영역을 이루는 유한 요소는 투자율(Permeability)과 보자력(Coercive Magnetic Force)의 값에 따라 각각 공기, 영구자석, 요크로 분류된다. 일반적으로 최적화 결과의 중간 밀도 변수를 제거하기 위해 벌칙화를 도입하는데, 투자율에 벌칙화를 한 경우보다, 투자율의 역에 벌칙화를 한 경우에 더 만족스러운 결과를 얻었다.

본 논문에서는 선형연구⁽⁷⁾와 같이 굽힘과 측정용 자기변형센서(Magnetostrictive Sensor)의 바이어스 자석 설계 문제에 이중 물질 위상 최적설계 기법을 적용하여 개선된 결과를 얻었다. 비파괴검사시에 유도초음파(Guided Wave) 발생 및 측정 장비로 주로 이용되는 자기변형 센서는 코일과 바이어스 자기장으로 이루어져있는데, 특히 바이어스 자기장은 센서의 특성과 성능에 많은 영향을 미친다.^(17,18) 적용된 최적화 문제는 정한 굽힘과가 진행하는 보에서 센서의 출력을 최대화 하는 것이다. 기존의 연구에서와는 달리, 본 연구에서는 자기변형센서의 바이어스 자석 설계시에 영구자석과 요크를 동시에 설계할 수 있는 위상최적설계 정식화를 함으로서 기존의 연구의 한계점을 보완하였다.

2. 자기변형센서

일반적으로 철, 니켈, 코발트 등과 같은 강자성 물질(Ferromagnetic Material)이 기계적인 변형을 하면 주위에 자기장이 발생하는데, 이러한 현상을 빌라리현상(Villari Effect) 또는 역자기변형현상(Inverse Magnetostriction Effect)이라고 한다. 이 때 재료주위에 코일을 설치하면, 자기장의 변화를 감지하여 전파하는 탄성파를 측정할 수 있고, 이러

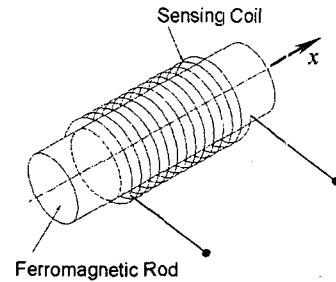


Fig. 1 A schematic diagram of the magnetostrictive sensor applied to a ferromagnetic beam

한 장치를 자기변형센서라고 한다. 현재 이 센서는 축이나 배관의 건전성 평가나 실시간 감시 분야에서, 부재에 전달되는 유도초음파를 측정하는데 주로 응용되고 있다. Fig. 1은 부재에 자기변형센서가 설치된 모습이다.

자기변형센서는 크게 코일과 바이어스 자석으로 구성되어있다. 코일은 자기변형효과에 의해 유도되는 자기장을 측정하는 역할을 하고, 바이어스 자기장은 발생하는 자기장을 증폭하고 역할을 한다. 특히 바이어스 자석의 분포를 어떻게 하느냐에 따라서 측정할 모드와 탄성파를 선택적으로 측정할 수 있다.^(17,18)

역자기변형현상은 재료에 존재하는 응력(σ)이 적고, 바이어스 자기장의 크기(H)가 크지 않다면 다음과 같은 선형화된 식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁹⁾

$$B = q\sigma + \mu^\sigma H \quad (1)$$

여기서 B 는 유도된 자속밀도, q 는 자기-탄성 연성 계수(Magneto-Elastic Coupling Coefficient), μ^σ 는 정응력(Constant Stress) 상태에서의 투자율을 각각 나타낸다.

2 차원 정자기장 해석 모델에서 부재에 설치된 자기변형센서의 전압출력(V)은 다음과 같이 코일의 단면에서 바이어스 자기장과 탄성파의 응력 성분의 내적 형태로 표현된다.

$$V = \sum B_x \sigma_x \Big|_{\text{at coil cross section}} \quad (2)$$

Cho 등⁽⁷⁾은 다중 해상도(Multi-Resolution) 위상 최적설계 기법을 이용하여 굽힘파(Bending Wave) 측정을 위한 최적의 바이어스 자석의 분포를 제시한 바 있고, 결과는 Fig. 2 과 같다. 여기서는 설계영역을 극방향으로 고정된 영구자석으로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최적화 결과에서 중간밀도 영역을 피할 수 없었는데, 이는 폐회로를 이루려는 자속(Magnetic Flux) 고유의 특성으로 인한 것이다. 이 결과에서 중간밀도 영역은 자속을 통과시

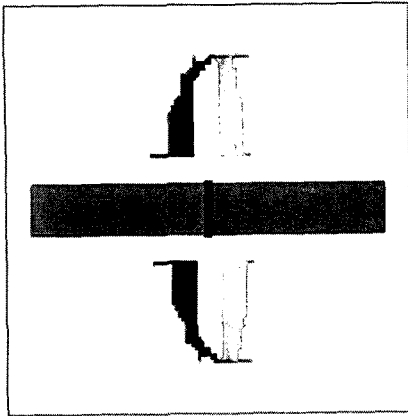


Fig. 2 Optimized result of the bias magnet using multi-resolution topology optimization method

키는 역할만을 하기 때문에 요크로 간주하였고, 실험을 통해 성능이 개선 되었음을 확인한 바 있다. 하지만, 중간 밀도 영역을 요크로 해석한 것은 어디까지 직관에 의한 것이어서 설계 정식화 과정에서 영구자석뿐 만 아니라 요크 또한 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 설계영역의 요소가 영구자석과 요크를 모두 표현할 수 있도록 재료를 정의하여 최적화를 수행하였다.

3. 위상최적화

3.1 자기장 유한요소 정식화

정자기장 조건에서 암페어 법칙은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{H} 는 자기장도(Magnetic Strength) 벡터장을, \mathbf{J} 는 전류밀도를 나타낸다. 또한 재료의 자기장도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} - \mathbf{H}_c \quad (4)$$

여기서 \mathbf{H}_c 는 보자력 벡터를 나타낸다. 위 식을 (4)에 대입하고 마그네틱 벡터포텐셜(A)을 적용하면, 암페어 법칙을 포아송 방정식(Poisson's Equation) 형태로 유도할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = \nabla \times \mathbf{H}_c + \mathbf{J} \quad (5)$$

위 식을 2 차원 카티시안 좌표계에서 표현하면 다음과 같다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A_z = \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} + J_z \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 2 차원 유한요소 정식화⁽²⁰⁾를 수행하면 행렬 방정식을 얻는데, 이를 단순히 기호로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{K} \mathbf{A}_z = \mathbf{F} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{K} 와 \mathbf{F} 는 강성행렬, 힘행렬을 나타내는데, 사용하는 유한요소의 형상함수를 N 으로 놓으면 다음의 식으로 표현된다.

$$\mathbf{K} = -\frac{1}{\mu} \iint \left(\frac{\partial N^T}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N^T}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) dx dy \quad (8)$$

$$\mathbf{F} = \iint \left(-H_{cx} \frac{\partial N^T}{\partial y} + H_{cy} \frac{\partial N^T}{\partial x} + J_z N^T \right) dx dy \quad (9)$$

유한요소법에서는 x, y 방향의 자속밀도 B_x, B_y 는 다음과 같이 마그네틱 벡터포텐셜 A_z 와 형상함수 N 으로 표현할 수 있다.

$$B_x = \frac{\partial N^T}{\partial y} A_z \quad (10)$$

$$B_y = -\frac{\partial N^T}{\partial x} A_z \quad (11)$$

3.2 위상최적화 정식화

본 연구에서는 요소를 이루는 재료의 정의를 위해 SIMP(Simple Isotropic Material Penalization)⁽²¹⁾를 이용한 밀도법을 도입하였다. 설계영역의 요소들은 설계변수의 값에 따라서 각각 공기, 영구자석, 요크로 표현된다. 한 요소를 3 가지 상태로 나타내기 위해 이종의 설계변수, 즉 밀도변수(ρ)와 할당변수(ζ)를 도입하였다. 여기서, 밀도변수는 재료(영구자석 또는 요크)가 있는지 없는지를 표현하고, 할당변수는 재료가 영구자석인지 요크인지를 표현한다. 따라서, 설계변수의 값에 따른 요소의 상태는 다음과 같다.

No Material (Air)	for $\rho = 0$	
Yoke	for $\rho = 1, \zeta = 0$	(12)
Magnet	for $\rho = 1, \zeta = 1$	

Table 1 은 공기, 영구자석, 요크의 물성치를 보여주고 있다. 식 (12)와 Table 1 에 근거하여 설계영역을 영구자석과 요크로 나타내기 위해, 각 유한 요소의 투자율과 보자력을 설계변수의 함수로 표현하였다. 먼저 보자력은 다음과 같이 정의하였다.

$$H_c = H_{cm} \zeta^m \rho^n \quad (13)$$

여기서 m 과 n 은 벌칙지수(Penalty Exponent)를 말하고 H_{cm} 은 영구자석의 보자력을 말한다. 벌칙지수는 0 과 1 사이의 연속하는 값을 갖는 설계변수

Table 1 The material properties of air, a yoke, and a permanent magnet

	H_c Coercive Force	μ Permeability
Air (No Material)	0	μ_0
Yoke	0	$\mu_0\mu_s$
Magnet	H_{cm}	$\mu_0\mu_m$

가 최적화 수행후 정수 0 또는 1 의 값을 갖도록 하는 역할을 한다. 주로 1 이상의 값이 사용되지만, 너무 큰 값을 가질 때는 설계변수가 잘 변하지 않는 단점이 있다.

본 연구에서 설계 영역내의 자석의 극은 한 방향으로 고정되어있다고 가정한다. 투자율의 정의를 위해 본 논문에서는 두 가지 기법을 도입하였다. 첫째는 투자율 자체에 그리고 둘째는 투자율의 역에 벌칙화를 적용하여 투자율을 정의하였고, 다음과 같이 표현된다.

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \left\{ (1-\zeta)^m \mu_s + \zeta^m \mu_m - 1 \right\} \rho^n \right) \quad (14)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \left\{ \left[1 - \frac{(1-\zeta)^m}{\mu_s} - \frac{\zeta^m}{\mu_m} \right] \left\{ (1-\rho)^n - 1 \right\} + 1 \right\} \quad (15)$$

여기서, μ_0 는 자유공간에서의 투자율, μ_s 와 μ_m 는 각각 요크와 영구자석의 상대투자율을 말한다. 식 (14)와 (15)에 식 (12)에 기술된 설계변수의 값을 대입하면 Table 1 의 재료 물성치를 잘 만족함을 알 수 있다. 위 식들에 기초하여, 설계변수의 값에 따른 투자율은 각각 Fig. 3, 4 와 같이 거동한다.

3.3 해석 모델 및 최적화 문제의 정의

본 연구의 목적은 붐에 굽힘과가 진행할 때, 센서 코일에서의 전압출력이 최대화되도록 바이어스 자석과 요크의 형상과 배치를 최적화하는 것이다. 본 논문에서는 자성 재료로 이루어진 붐과 자기변형 센서 및 설계영역을 포함하여 그림 5 와 같이 2 차원 해석 모델을 적용하였다. 설계영역은 최적화 결과에 따라서 영구자석 또는 요크 및 공기로 구성된다. 단, 영구자석의 극 방향은 한 방향으로 고정되어있다고 가정되었으며, 각각 x 와 y 방향에 관해서 최적화가 수행되었다.

해석 모델에서 설계영역은 두 부분으로 나누어져 있고 대칭 조건을 적용하였다. 각 설계영역은 64×32 개의 유한 요소로 구성되었고, 각 요소는 2 개의 설계변수를 가지므로 총 설계변수의 개수는

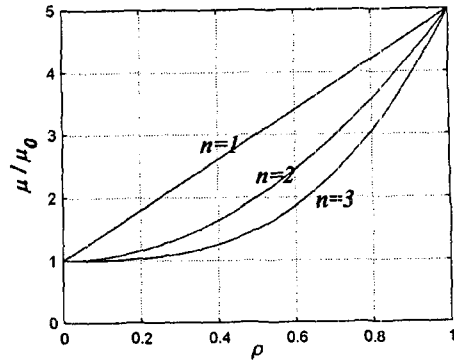


Fig. 3 The relative permeability of the design element as a function of ρ when equation (14) is applied. ($\zeta=1$ and $\mu_m=5$)

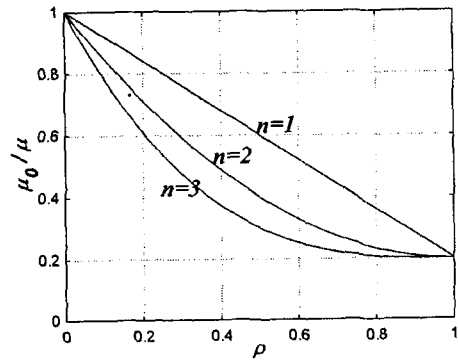


Fig. 4 The relative permeability of the design element as a function of ρ when equation (15) is applied. ($\zeta=1$ and $\mu_m=5$)

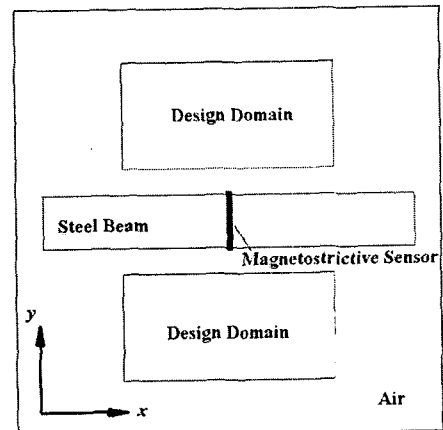


Fig. 5 The model for optimization problem

4096 개 이다.

식 (2)의 센서의 전압출력을 기반으로, 본 최적화 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

Find ρ, ζ
 to minimize

$$f = -\sum_e^{n_e} B_z(\rho_e, \zeta_e) \sigma_e \quad \text{the cross section of the sensor coil} \quad (16)$$

subject to

$$h_i(\rho, \zeta) \leq 0 \quad i=1, \dots, l$$

$$0 \leq \rho, \zeta \leq 1$$

여기서, n_e 는 코일 단면에 위치한 절점의 개수를, e 는 요소의 번호를, l 은 구속조건의 개수를 말한다. 위 식에서 응력은 봉 내부에서 굽힘파의 응력 분포를 따른다.

일반적인 구조 최적화 문제에서는 질량 구속조건(Mass Constraint)을 광범위하게 사용한다. 질량 구속조건이란 설계영역을 이루는 물질의 총 질량의 합이 정해진 값을 넘지 않도록 하는 것이다. 단, 본 문제에서는 설계영역을 구성하는 물질이 2종이므로, 다양한 질량 구속조건을 설정할 수 있다. 첫째, 영구자석과 요크의 질량의 합을 구속조건으로 하는 것이고, 두번째 방법으로 영구자석과 요크 각각에 구속조건을 부여할 수 있다. 마지막으로 영구자석의 질량만을 구속조건에 적용하고 요크의 질량은 제외시키는 방법이다. 각각의 구속조건들은 차례로 아래의 식들과 같이 기술할 수 있다.

Case I: $l=1, h_1 = \frac{\sum_e \rho_e v_e}{M_s + M_m} - 1 \quad (17)$

Case II: $l=2, h_1 = \frac{\sum_e (1-\zeta_e) \rho_e v_e}{M_s} - 1, h_2 = \frac{\sum_e \zeta_e \rho_e v_e}{M_m} - 1 \quad (18)$

Case III: $l=1, h_1 = \frac{\sum_e \zeta_e \rho_e v_e}{M_m} - 1 \quad (19)$

여기서, v_e 는 요소의 부피를, M_m 과 M_s 는 각각 영구자석과 요크의 구속질량의 값을 나타낸다. 설계문제와 설계자의 의도에 따라 위 구속조건들 중 하나를 선택하여 최적화 문제에 적용하면 된다. 본 문제에서는 각각의 경우를 모두 적용하여 결과를 비교해 보았다.

3.4 민감도 해석

본 연구에서는 민감도 해석을 위해 AVM(Adjoint Variable Method)⁽²²⁾을 사용하였다. AVM에 따라 목적함수 민감도는 다음과 같이 표

현하였다.

$$\frac{df}{d\rho_e} = \lambda^T \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_e} - \frac{\partial K}{\partial \rho_e} A_z \right) \quad (20)$$

여기서, λ 는 다음 식에 의해서 정의된다.

$$K\lambda = \frac{\partial f}{\partial A_z} \quad (21)$$

위 식의 우변을 식 (16)으로부터 구하면 다음과 같다.

$$\frac{df}{dA_z} = \sum_e^n \frac{\partial B_z}{\partial A_z} \sigma_e \quad (22)$$

4. 해석 결과

4.1 위상최적화 수행

앞서 기술한 문제 정의에 기초하여, 그림 5의 설계 모델에 관하여 최적화를 수행하였다. 별첨지수 m 과 n 은 각각 2를 적용하였으며, 설계변수의 초기값으로 밀도변수, ρ 는 0.15, 할당변수 ζ 는 0.5를 주었다. 또한 적용된 재료 상수의 값은 표 2에 열거하였다. 본 연구에서는 민감도 기반 최적화 알고리즘인 MMFD(Modified Method of Feasible Direction)⁽²³⁾를 적용하였다.

일단 최적화의 수행이 끝난 후에는 식 (12)에 근거하여 설계변수 값에 따라서 설계영역의 요소가 공기, 영구자석, 또는 요크 중의 하나로 결정이 되어야 한다. 그러나, 민감도 기반 최적화 알고리즘의 특성상 최적화의 수행이 끝났을 때 모든 변수들이 정확하게 0 또는 1의 값을 가지기는 힘들다. 따라서, 적절한 재료의 선택을 위해 다음에 근거하여 요소의 재료를 결정하는, 후처리 과정(Post Processing)을 수행하였다.

Yoke	for $\rho > 0.6, \zeta < 0.3$
Magnet	for $\rho > 0.6, \zeta > 0.7$
Air	otherwise

(23)

본 논문에서 대문자 F 는 후처리를 거친 결과의 목적함수 값을 나타낸다.

Table 2 The value of the material properties applied to the bias magnet configuration problem

Material Property	Value
μ_s	3000
μ_m	1.025
H_{cm}	582000 A/m

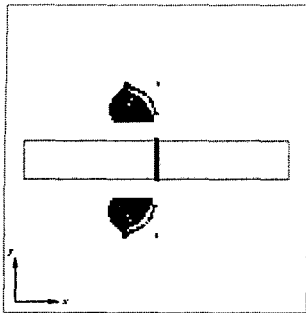


Fig. 6 The post-processed optimization result based on equation (14). (Black area: permanent magnet. Gray area: yoke) The constraint scheme equation (17) is used. The mass fraction $M_m + M_s$ is 15% of the total mass. ($f = -105000$, $h_1 = 0.003$, $F = -447000$)

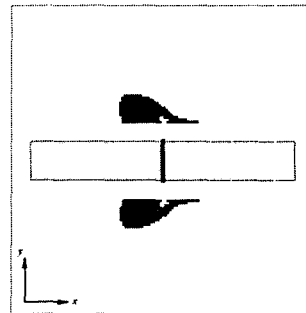


Fig. 8 The post-processed optimization result based on equation (15). (Black area: permanent magnet. Gray area: yoke.) The constraint scheme equation (18) is used. Each of the mass fraction M_m and M_s is 7.5% of the total mass. ($f = -691000$, $h_1 = -0.432$, $h_2 = -0.023$, $F = -691000$)

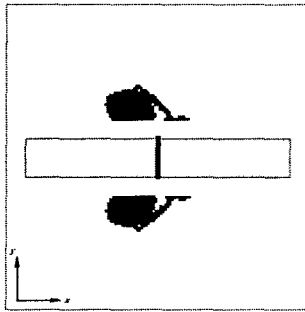


Fig. 7 The post-processed optimization result based on equation (15). (Black area: permanent magnet. Gray area: yoke) The constraint scheme equation (17) is used. The mass fraction $M_m + M_s$ is 15% of the total mass. ($f = -798000$, $h_1 = 0.003$, $F = -799000$)

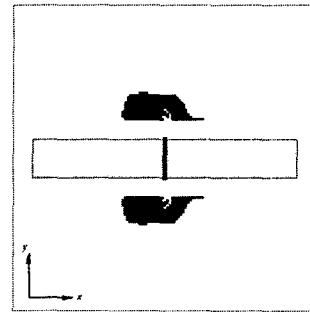


Fig. 9 The post-processed optimization result based on equation (15). (Black area: permanent magnet. Gray area: yoke) The constraint scheme equation (19) is used. The mass fraction M_m is 7.5% of the total mass. ($f = -722000$, $h_1 = 0.003$, $F = -722000$)

4.2 최적화 결과

앞서 기술한 바와 같이, 서로 다른 두 방식의 투자율의 정의를 각각 적용하여 최적화를 수행해 보았고 그 결과는 Fig. 6, 7 과 같다. 결과에서 모든 요소의 자석의 극 방향은 y 를 향하고 있다. Fig. 6 은 식 (14)의 정의를, Fig. 7 은 식 (15)의 정의를 적용한 결과이다. 결과를 통해, 식 (15)와 같이 투자율의 역에 벌칙화를 적용하여 재료 물성을 정의한 경우가 더욱 좋은 결과를 보였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 비단 그림에 나타난 경우뿐 만 아니라, 구속 조건과 벌칙 지수 및 자석의 극 방향을 다양하게 적용하였을 때도 일관된 경향을 가짐을 확인하였다. 따라서, 본 자기 변형 센서의

바이어스 자석 설계 문제에서는 식 (15)와 같이 투자율을 정의하는 방식이 적합하다고 생각되며, 이후의 결과들은 모두 이 방법을 적용한 것들이다.

다음으로 식 (17)~(19)에서 언급한 다양한 질량 구속조건을 적용하여 최적화를 수행해 보았다. 각각의 결과는 Fig. 7~9 에 나타난 바와 같다. 각 질량 구속조건에 대해 잘 수렴된 결과를 보임을 확인할 수 있다. 위의 결과들은 어느 것이 더 좋은 결과라고 할 수 없고, 설계 문제와 설계자의 의도에 알맞게 위 구속조건들 중 하나를 선택하여 최적화 문제에 적용하면 될 것이다.

마지막으로 자석의 극 방향을 바꿔서 적용했을 때의 영향을 검토해 보았다. Fig. 10 에서는 Fig. 8 과 동일한 조건의 문제를 자석의 극 방향을 센

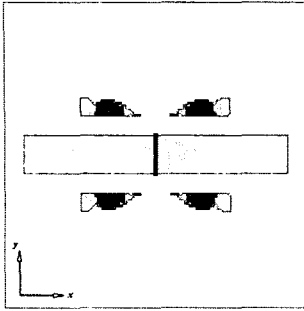


Fig. 10 The post-processed optimization result based on equation (15). (Black area: permanent magnet. Gray area: yoke.) The constraint scheme equation (18) is used. Each of the mass fraction M_m and M_s is 7.5% of the total mass. ($f = -331000$, $h_1 = 0.003$, $h_2 = 0.002$, $F = -331000$)

서의 위쪽 설계영역에서는 $+x$, 아래쪽 영역에서는 $-x$ 를 향하도록 가정한 결과이다. 자석의 극을 바꿔주면 전혀 다른 바이어스 자석의 분포를 가질 뿐만 아니라, 성능 또한 크게 변함을 확인 할 수 있다.

이상 다양한 설계조건하에서 최적화 수행 결과를 검토해 보았다. 특히 선행연구(Fig. 2)와 같은 영구자석의 극 방향을 적용한 경우(Fig. 7~9), 영구자석과 요크의 배치가 동일한 위상을 지니지만, 각각의 형상이 매우 다르다는 것을 알 수 있다. 따라서, 선행연구에서 중간 밀도 설계영역을 직관에 의하여 요크로 가정한 것은 타당하다고 볼 수 있을 것이다. 하지만, 최적의 설계를 위해서는 영구자석과 요크를 동시에 설계하는 것이 좀 더 나은 해를 주는 것은 자명하다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 2종 재료 위상 최적화를 자기장 관련 설계문제에 적용하였다. 특히 일반적으로 자기기기의 핵심 부분을 이루는 영구자석과 요크의 설계를 다루었다. 2차원 자기장 위상 최적화 문제를 두 종류의 변수를 이용하여 정식화 하였고, 특히 투자율의 역에 벌칙화를 하는 새로운 방식을 제시하여 그 타당성을 검증하였다. 정식화된 최적화 방법을 자기변형 센서의 바이어스 자석 설계문제에 적용하였다. 다양한 질량 구속조건과 자석의 극 방향을 적용한 결과를 살펴보았다. 본 연구에서 제시한 영구자석 요크 동시 설계 방법은 다른 자기기기의 설계 문제에서도 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Petrie, R., 1993, "Permanent magnets in review," *Proceedings of Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, 4-7 Oct 1993, Chicago, USA
- (2) Howe, D., 2000, "Magnetic actuators," *Sensors and Actuators*, Vol. 81, pp. 268~274.
- (3) Yoo, J., Kikuchi, N., and Volakis, J. L., 2000, "Structural Optimization in Magnetic Devices by the Homogenization Design Method," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 36, No. 3, pp. 574~580.
- (4) Byun, J., Hahn, S., and Park, I., 1999, "Topology Optimization of Electrical Devices Using Mutual Energy and Sensitivity," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 35, No. 5, pp. 3718~3720.
- (5) Lowther, D. A., Mai, W., and Dyck, D. N., 1998, "A Comparison of MRI Magnet Design Using a Hopfield Network and the Optimized Material Distribution Method," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 34, No. 5, pp. 2885~2888.
- (6) Dyck, D. N. and Lowther, D. A., 1997, "Composite Microstructure of Permeable Material for the Optimized Material Distribution Method of Automated Design," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 33, No. 2, pp. 1828~1831.
- (7) Cho, S. H., Kim, Y., and Kim, Y. Y., 2003, "The Optimal Design and Experimental Verification of the Bias Magnet Configuration of a Magnetostrictive Sensor for Bending Wave Measurement," *Sensors and Actuators A. Physical*, Vol. 107, No. 3, pp. 225~235.
- (8) Kim, Y. Y. and Kim, W., 2004, "Yoke Topology Optimization of the Bias Magnetic System in a Magnetostrictive Sensor," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 7, pp. 923~929.
- (9) Park, S., Kang, J., and Wang, S., 2003, "Multi-Domain Topology Optimization of Electromagnetic Systems," *Proceeding of EMF 2003*, Aachen, Germany, October 6~9, pp. 409~412.
- (10) Thomsen, J., 1992, "Topology Optimization of Structures Composed of One or Two Materials," *Journal of Structural Optimization*, Vol. 5, pp. 108~115.
- (11) Gibiansky, L. V. and Sigmund, O., 2000, "Multiphase Elastic Composites with Extremal Bulk Modulus," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, No. 3, pp. 461~498.
- (12) Yin, L. and Ananthasuresh, G. K., 2001, "Topology Optimization of Compliant Mechanisms with Multiple Materials Using a Peak Function Material Interpolation Scheme," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 23, pp. 49~62.
- (13) Sigmund, O. and Torquato, S., 1996, "Composites with Extremal Thermal Expansion Coefficients," *Applied Physics Letters*, Vol. 69, No. 21, pp. 3203~3205.
- (14) Sigmund, O. and Torquato, S., 1997, "Design of Materials with Extreme Thermal Expansion Using a Three-Phase Topology Optimization Method," *Journal*

- of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, No. 6, pp. 1037~1067.
- (15) Sigmund, O., 2001, "Design of Multiphysics Actuators Using Topology Optimization – Part II: Two-Material Structures," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 6605~6627.
- (16) Yin, L. and Ananthasuresh, G. K., 2002, "A Novel Topology Design Scheme for the Multi-Physics Problems of Electro-Thermally Actuated Compliant Micromechanisms," *Sensors and Actuators A. Physical*, Vol. 97-98, pp. 599~609.
- (17) Kwun, H. and Teller, C. M., 1994, "Magnetostrictive Generation and Detection of Longitudinal, Torsional, and Flexural Waves in a Rod," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 96, pp. 1202~1204.
- (18) Lee, H. C. and Kim, Y. Y., 2002, "Wave Selection Using a Magnetomechanical Sensor in a Solid Cylinder," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 112, pp. 953~960.
- (19) Dapino, M. J., Smith, R. C. and Flatau, A. B., 2000, "Structural Magnetic Strain Model for Magnetostrictive Transducer," *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 36, pp. 545~556.
- (20) Salon, S. J., 1995, Finite Element Analysis of Electrical Mechanics, *Kluwer Academic Publishers*, Boston
- (21) Yang, R. J. and Chuang, C. H., 1994, "Optimal Topology Design Using Linear Programming," *Computers and Structures*, Vol. 52, pp. 265~275.
- (22) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, Design Sensitivity Analysis of Structural Systems, *Academic Press*
- (23) Vanderplaats, G. N., 1999, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, *Vanderplaats Research & Development, INC.*