

위상 최적 설계를 통한 CD-ROM 광 픽업 액추에이터의 진동 저감

^U왕세명*, 김용수**, 박기환*

Topology Optimization of Pick-up Actuator of CD-ROM for Vibration Reduction

^USe-Myung Wang*, Yong-Su Kim**, Ky-Hwan Park*

Abstract

The topology optimization of electromagnetic systems is investigated and the TOPEM (Topology Optimization for Electromagnetic Systems) is developed using the finite element method (FEM). The design sensitivity equation for topology optimization is derived using the adjoint variable method. The proposed method is validated by applying it to the topology optimizations of a C-core actuator and an optical pickup actuator.

1. 서 론

비교적 짧은 역사에도 불구하고 위상 최적 설계 (topology optimization)는 지금까지 많은 수학자와 공학자의 관심을 가져 왔다 [1-2]. 전자기 시스템의 경우에 기존의 형상 최적 설계(shape optimization)는 현재 설계의 개선에 중점을 두는 반면, 위상 최적 설계는 초기 개념 설계에 중점을 두고 있다.

전자기 시스템의 위상 최적 설계에 대한 연구는 수년 전에서야 비로소 시작하였는데, 그 방법은 구조 분야의 위상 최적 설계에 기초를 두고 있다. Dyck과 변진규 등이 밀도법(density method)을 이용하여 전자기 시스템의 위상 최적 설계에 대한 연구를 시작하였고, 그 가능성을 보였다 [3-5].

본 연구에서는 전자기 시스템의 위상 최적 설계의 이론 연구와 실제 문제로의 적용을 목표로 하였다. 연속체 방법(continuum method)을 이용한 위상 설계 민감도 방정식(topology sensitivity equation)이 유도되었으며 ANSYS와 연결되어 민감도 계산이 가능하도록 하였다. 전체적인 프로그램의 제어와 민감도 계산을 위해 TOPEM(topology optimization for electromagnetic systems)이 개발되었다. 최적 설계 알고리즘으로는 DOT의 SLP를 사용하였으며,

ANSYS를 목적함수나 구속조건을 위한 해석기로 사용하였다.

개발한 알고리즘과 프로그램을 증명하기 위해서, TOPEM에 의해 C-core 액추에이터와 CD롬에 사용되는 광픽업 액추에이터의 코어의 위상 최적 설계가 수행되었다.

2. 위상 최적 설계

2.1 위상 최적 설계

위상 최적 설계의 목적은 주어진 구속 조건 (constraint)내에서 어떤 목적 함수(objective function)를 최대 또는 최소로 하는 최적의 재료의 배치를 구하는 것이다.

다음 Fig. 1과 같이 외부로부터 자계(flux) ϕ 와 전류 J_s 가 작용하고 있는 전자기 시스템의 경우에 일반화된 위상 최적 설계 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{minimize(maximize)} f(A, \mu) \quad (1)$$

$$\text{subject to } a_{\Omega}(A, \bar{A}) = l_{\Omega}(\bar{A}) \text{ for all } \bar{A} \in \bar{A} \quad (2)$$

여기에서 $f(A, \mu)$ 는 자기 에너지(magnetic energy), 자기력(magnetic force), 자기 토크(magnetic torque)등과 같은 목적 함수이고, A 는

* 정회원, 광주과학기술원 기전공학과
** 삼성전자
*** 광주과학기술원 기전공학과

정전자계의 경우에는 벡터 포텐셜(vector potential), 시변 조화계의 경우에는 전계 밀도(electric field density)이고, \bar{A} 는 가상 벡터 포텐셜(정전자계의 경우)과 전계 밀도(시변 조화계의 경우)이다. 또한 투자율(permeability) μ 와 시스템 출력(system output) A 의 함수인 $a_\Omega(A, \bar{A})$ 는 에너지 쌍선형 형태(energy bilinear form)이고 $l_\Omega(\bar{A})$ 는 힘 선형 형태(load linear form)이다.

식 (1)과 (2)를 통해서 알 수 있는 것은 평형 조건 (2)을 만족시키면서 목적함수인 식 (1)을 최대 또는 최소로 하는 최적의 투자율 μ 를 구하는 것이다.

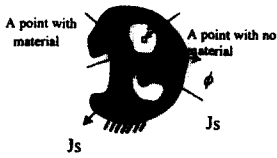


Fig. 1 Generalized topology optimization problem

2.2 밀도변

공기와 재료가 함께 있는 다공질의 재료(porous material)를 표현하기 위해서 투자율 μ 가 ρ 의 지수 형태로 표현되는 가상의 재료(fictitious material)를 이용한다.

$$\mu = (\mu_0\mu_r - \mu_0)\rho^P + \mu_0 \quad (3)$$

$$\int_\Omega \rho(x)d\Omega \leq V, \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, \quad x \in \Omega \quad (4)$$

여기에서 P 는 벌칙 상수(penalization factor), ρ 는 밀도 함수(density function)이고, μ_0 는 공기의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$)이다. 만약, 밀도 함수 ρ 가 1이면 재료의 투자율은 $\mu_0\mu_r$ 로 특정 재료가 되고, ρ 가 0이면 투자율은 μ_0 로 공기가 된다.

최적 설계에서의 설계 변수는 밀도 함수 ρ 로 ρ 가 0과 1 사이에서 변하면 목적 함수나 구속 조건 내의 설계 변수인 투자율 μ 는 공기의 투자율인 μ_0 에서 재료의 투자율인 $\mu_0\mu_r$ 로 변한다 (Fig. 2).

벌칙 상수 P 는 0이나 1이 아닌 중간 값을 가지는 밀도 함수를 벌칙하기 위해서 사용되었다. P 가 커지면 중간 값을 효과적으로 제거 하지만, 설계 공간(design space)을 줄이는 단점을 가지고 있다. 벌칙 상수 P 를 선택하는 것은 문제에 따라 결정되고, 식 (3)과는 다른 형태의 가상 재료를 선택할 수도 있다 [3].

밀도법을 사용하면 해를 구할 수 없는 경우도

있을 수 있지만, 밀도법은 적용이 쉽고 수렴 속도도 빠르며 벌칙 상수를 사용하여 중간 값을 효과적으로 제거 할 수 있기 때문에 널리 이용된다.

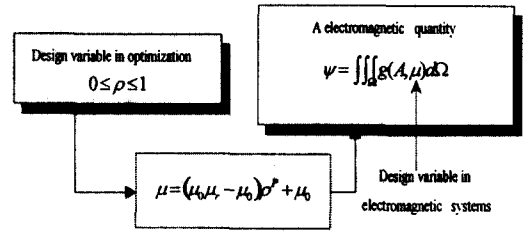


Fig. 2 The Parameterization of permeability

Fig. 3은 여러 벌칙 상수 P 에 대한 밀도 변수 ρ 와 투자율 μ 의 관계를 나타낸다.

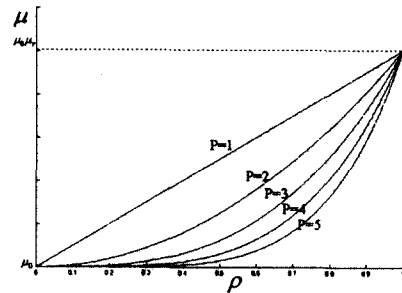


Fig. 3 The relationship between density function and permeability with penalization factor

3. 위상 설계 민감도

3.1 전자기 시스템의 설계 민감도 해석

설계 민감도 해석은 구조 분야에서 활발하게 사용되고 있으며 전자기 분야의 경우에는 제품의 형상과 관련되어 사용되고 있다 [7-8].

설계민감도 해석은 전자기 제품의 물성치(material property)와 같은 설계 변수에 대해서 자기 에너지, 자기력과 같은 전자기 시스템의 성능이 변화를 예측하기 위해서 사용된다. 이때 물성치에는 투자율(permeability), 도전율(conductivity), 유전률(permittivity), 그리고 전류 밀도(current density)들을 포함한다.

설계 민감도 해석에는 근사법(approximation method), 이산화 법(discrete method), 연속체 법(continuum method)의 3가지가 있다. 그 중에서 연속체 법이 가장 정확하고 효율적인 것으로 알려져 있으므로 [6] 본 연구에서도 연속체 법을 사용하였다.

다음과 같이 적분 형태로 표현되는 전자기 시스템의 목적 함수는 식(5)와 같다.

$$\Psi = \int \int \int_\Omega g(A, \nabla A, u) d\Omega \quad (5)$$

A 는 벡터 포텐셜, u 는 식(6)과 같이 투자율과 전류 밀도의 설계 벡터이다.

$$u = [u, J_s]^T \quad (6)$$

보조 변수에 대한 보조 방정식은 다음과 같다.

$$a_u(\lambda, \bar{\lambda}) = \int \int \int_{\Omega} [g_A \bar{\lambda} + g_{\nabla A} \nabla \bar{\lambda}] d\Omega \quad (7)$$

식 (5)의 목적함수의 변분식과 직접 미분 결과를 이용하면 설계 민감도는 식 (8)이 된다 [6].

$$\begin{aligned} \Psi' &= \int \int \int_{\Omega} [g_A A' + g_{\nabla A} \nabla A' + g_u \delta u] d\Omega \\ &= \int \int \int_{\Omega} g_u \delta u d\Omega + \int \int \int_{\Omega} [g_A A' + g_{\nabla A} \nabla A'] d\Omega \quad (8) \\ &= \int \int \int_{\Omega} g_u \delta u d\Omega + l'_{\lambda u}(\lambda) - a'_{\lambda u}(A, \lambda) \end{aligned}$$

3.2 전자기의 맥스웰 방정식과 변분식

정자기장(magnetostatic field)은 다음과 같은 맥스웰 방정식으로 표현된다.

$$\nabla \times H = J_s, \quad H = \frac{1}{\mu} (B - \mu_0 M), \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (9)$$

여기에서 H 는 자계 밀도(magnetic field intensity), J_s 는 입력 전류 밀도(current density), B 는 자속 밀도(magnetic flux density), μ 는 재료의 투자율, μ_0 는 공기의 투자율이다. 여기에서 $B = \nabla \times A$ 과 식 (9)에서 H 를 소거하면 벡터 포텐셜에 대한 하나의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_s + \nabla \times \left(\frac{\mu_0}{\mu} M \right) \quad (10)$$

이제 적분 형태로 표현된 변분식을 구하기 위해서 식 (10)의 양변에 가상 벡터 포텐셜을 곱한 후 전 영역에 대해 적분하고 경계 조건을 대입하면, 다음과 같은 변분식(variational equation)을 구할 수 있다 [7].

$$a_{\Omega}(A, \bar{A}) = l_{\Omega}(\bar{A}) \quad \text{for all } \bar{A} \in \bar{\mathcal{A}} \quad (11)$$

여기에서 $\bar{\mathcal{A}}$ 는 허용 벡터 포텐셜 공간(the space of admissible vector potential)이고, 에너지 쌍선형 형태 $a_{\Omega}(A, \bar{A})$ 는

$$a_{\Omega}(A, \bar{A}) = \int \int \int_{\Omega} (\nabla \times A) \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) d\Omega \quad (12)$$

이고, 힘 선형 형태 $l_{\Omega}(\bar{A})$ 는 식 (13)과 같다.

$$l_{\Omega}(\bar{A}) = \int \int \int_{\Omega} (J_s \cdot \bar{A} + \frac{\mu_0}{\mu} M \cdot (\nabla \times \bar{A})) d\Omega \quad (13)$$

3.3 전자기의 위상 설계 민감도

식 (7)의 보조 방정식은 이 경우에는 $\nabla \bar{\lambda} = 0$ 이므로,

$$a_u(\lambda, \bar{\lambda}) = \int \int \int_{\Omega} [g_A \bar{\lambda}] d\Omega \quad (14)$$

이 된다. 만약 등가의 전류 밀도가

$$J_{eq} = g_A \quad (15)$$

이면, 보조 변수 λ 는 식 (10)의 오른쪽 항을 식 (15)로 바꾸었을 때의 해이다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_{eq} = g_A \quad (16)$$

식 (8)의 설계 민감도 식과 식 (12)와 식 (13)의 에너지 변분식을 이용하면, 투자율에 대한 민감도 식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi}{\partial \mu} &= \int \int \int_{\Omega} [g_u + \frac{1}{\mu^2} (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times \lambda) \\ &\quad - \frac{\mu_0}{\mu^2} M \cdot (\nabla \times \lambda)] d\Omega \quad (17) \end{aligned}$$

이고, 전류 밀도에 대한 민감도 식은 식(18)이 된다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial J_s} = \int \int \int_{\Omega} [g_J + \lambda] d\Omega \quad (18)$$

3.4 시변 조화계의 위상 설계 민감도

시변 조화계는 다음과 같은 맥스웰 방정식에 의해서 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -j\omega B, \quad \nabla \times H = j\omega D + J, \quad B = \mu H, \\ D &= \epsilon E \quad (19) \end{aligned}$$

식 (19)의 모든 방정식을 하나로 합하여 전계 밀도 E 로 나타내면

$$-(j\omega\epsilon + \sigma)E - \nabla [(j\omega)^{-1} \frac{1}{\mu} (\nabla \times E)] = J_s \quad (20)$$

이 되고 마찬가지로 변분식을 구하기 위해서 식 (20)의 양변에 가상 전계 밀도를 곱한 후 전 영역에 대해 적분하면, 다음과 같은 변분식을 얻을 수 있다.

$$\text{subject to } g_1 = \frac{\int_{\Omega} \rho A t d\Omega_2}{V_r} - 1 \leq 0 \quad (32)$$

$$g_2 = 1 - \frac{NDV}{\sum_{k=1}^{NDV} (\rho_k - 0.5)^2} \leq 0 \quad (33)$$

bounded to $0 \leq \rho \leq 1$, for all $\rho \in \Omega_2$

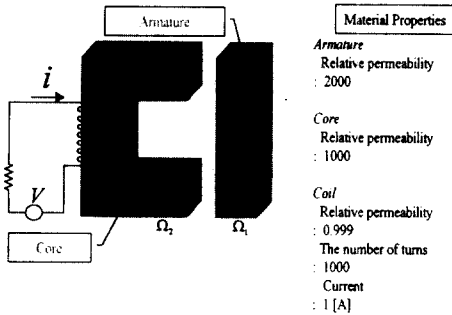


Fig. 5 A C-core actuator

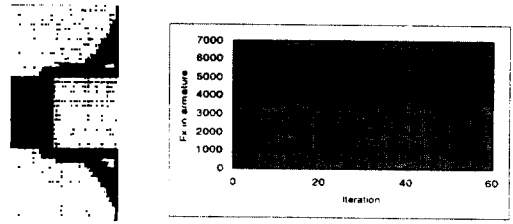
여기에서 V_r 은 최적화 후에 남아야만 하는 코어의 체적을 의미하고, GI 는 최적화 후에 코어가 가져야 하는 회색 표시 지수(gray level indicator)를 의미한다. 첫 번째 구속 조건은 체적 한계이고, 두 번째 구속 조건은 최적화 도중에 나타날 수 있는 회색 영역을 제거하기 위해 사용되었다 [10]. 회색 표시 지수 GI 는

$$GI = \frac{\sum_{k=1}^{NDV} (\rho_k - 0.5)^2}{NDV} \quad (34)$$

이고, 식 (34)에서도 알 수 있듯이 $GI=0.25$ 이 되면 설계 변수인 ρ 가 0과 1이 되어 회색 영역(gray area)이 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 최적화 후의 체적이 초기 체적의 20% 미만이도록 하고($V_r = 0.2V_{initial}$), 벌칙 상수 $P=2$ 일 때의 최적화 결과이다.

Fig. 6의 최적화된 코어를 사용했을 때 전자기에 유도되는 자기력은 원래의 코어를 사용했을 때 보다 약 5%정도 줄어들었지만 80%의 체적을 줄임으로써 재료를 절감할 수 있다. 전자기 시스템의 경우에 원하는 성능을 만족시키면서 체적을 줄이면 2가지의 장점이 있다. 즉, 재료를 절감과 경량화를 할 수 있고, 이력 현상에 의해 발생하는 이력 손실(hysteresis loss)은 식 (35)와 같이 체적에 비례하기 때문에 체적을 줄임으로써 이력 손실도 줄일 수 있다.



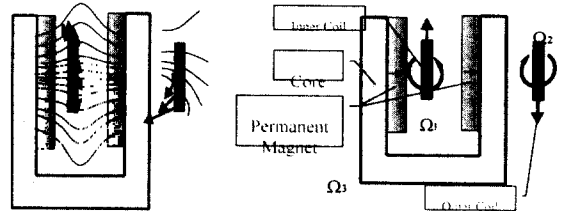
(a)The optimized topology (b)Objective function history
Fig. 6 The optimized topology and the history of objective

$$P_h = w_h f V \quad (35)$$

여기에서 w_h 는 B-H 루프의 면적이고, f 는 주파수, V 는 체적을 나타낸다.

4.3 광픽업 액추에이터의 위상 최적 설계

두 번째 예는 CD롬에 사용되는 광픽업 액추에이터(optical pick-up actuator)이다 [11].



(a) Flux & Force (b) Resultant force & torque
Fig. 7 Flux and force distribution, and resultant force & torque of an asymmetric actuator

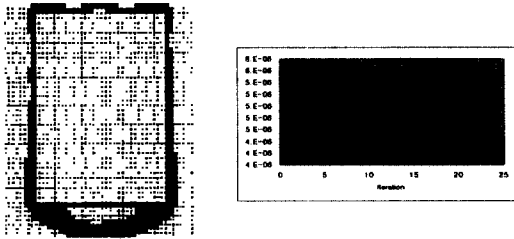
Fig. 7은 비대칭형 광픽업 액추에이터의 자속과 힘 분포를 나타낸다. Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 영구 자석과 전류에 의해서 내부 코일(Ω_1)에 수직 방향으로 자기력이 작용하여 액추에이터로 작동되고 있으며, 쇄교 자속(the leakage flux)에 의해 외부 코일(Ω_2)에 토크가 발생하고 있다. 그런데 외부 코일에 발생하는 토크는 액추에이터를 피칭 방향으로 움직이게 해서 광픽업 액추에이터의 포커싱(focusing) 성능을 저하시킨다. 따라서 고성능의 액추에이터를 설계하기 위해서는 주어진 전류에 대해서 최대의 작동력(actuating force)을 내면서, 외부 코일에서 발생하는 토크를 최소화 시켜야 된다. 따라서, 다음과 같이 내부 코일(Ω_1)에서 유도되는 작동력을 어떤 한계 값까지 유지시키면서, 외부 코일(Ω_2)에서 유도되는 토크를 최소화 하는 최적화 문제를 만들 수 있다.

$$\text{minimize torque on } \Omega_2 \quad (36)$$

$$\text{subject to } g_1 = 1 - \frac{f_y}{f_{yr}} \leq 0 \quad (37)$$

bounded to $0 \leq \rho \leq 1$, for all $\rho \in \Omega_3$

여기에서 f_{yr} 은 내부 코일에서 유도되어야 하는 최소의 y방향의 자기력을 의미한다. Fig. 8(a)는 최적화된 코어의 형상을 의미하고, Fig. 8(b)는 바깥 코일에 유도되는 토크의 수렴 상태를 나타낸다.



(a)The optimized topology (b)Objective function
Fig. 8 The optimized topology and torque for core of an optical-pickup actuator

Fig. 8(a)의 형상을 가지는 코어를 사용한 결과 같은 액추에이터 작동력을 유지하면서 약 25% 정도의 토크와 약 65%의 체적을 줄일 수 있었다. 또한, 생각지 못했던 윗판의 추가로 외부코일에 토크를 발생시키는 쇠교 자속을 현저히 줄일 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 전자기 시스템의 위상 최적 설계에 대한 연구가 수행되었다. 연속체 방법을 사용한 위상 설계 민감도식이 유도되었고, 위상 최적 설계를 수행 할 수 있는 프로그램(TOPEM)이 개발되었다. 최적화 알고리즘으로는 DOT의 SLP가 사용되었으며, 해석기로는 ANSYS가 사용되었다.

제안된 밀도법과 유도된 민감도식을 사용하여 개발된 프로그램(TOPEM)을 검증하기 위해서 두 가지 예제에 위상 최적 설계가 적용되었다. 먼저, 주어진 전류 입력에 대해서 최대의 자기력을 낼 수 있는 C-core 액추에이터의 코어의 최적의 위상을 구할 수 있었다. 다음으로, 비대칭형 광픽업 액추에이터의 경우에 필요한 액추에이터의 작동력을 유지시키면서 구조적으로 발생하는 토크를 최소화 하는 코어의 형상을 구하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 최적 설계 신기술 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

(1) Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method," Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224.

(2) HERSKOVITS, J., 1995, "Advances in Structural Optimization," KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp. 157.

(3) Dyck, D. N. and Lowther, D. A., 1996, "Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32. No. 3, May.

(4) Dyck, D. N. and Lowther, D. A., 1997, "Composite Microstructure of Permeable Material for the Optimized Material Distribution Method of Automated Design," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33. No. 2, March.

(5) Byun, J. K. and Hahn, S. Y., 1999, "Topology Optimization of Electrical Devices Using Mutual Energy and Sensitivity," INTERMAG 99, May, DF-02.

(6) Haug, E. J., Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, "Design Sensitivity Analysis of Structural Systems," ACADENIC PRESS INC.

(7) Wang, S. M. and Jeong, S. K., 1999, "Shape Optimization of BLDC Motor Using 3-D Finite Element Method, IEEE Transactions on Magnetics," Vol. 35, No. 3, pp. 1159-1162.

(8) Wang, S. M. and Kang, J. N., 1999, "Continuum Shape Design Sensitivity Analysis of Magnetostatic Field Using Finite Element Method," COMPUMAG 99, pp.788-789.

(9) Rong, R. and Lowther, D. A., 1997, "Applying Response Surface Methodology in the Design and Optimization of Electromagnetic Devices," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1916-1919.

(10) Wang, S. M., Moon, H. G. and Ki, S. H., 1999, "A Synthetic Procedure for Design of Reinforcement," 3rd WCSMO, Short Paper Proceedings, pp. 638-640.

(11) Wang, S. M., Kang, J. N., Seo, J. K. and Park, K. H., 1999, "Analysis and Design Optimization of an Asymmetric Actuator of an Optical Disk Drive," ISFE99, pp. 317-320.