

구동력을 고려한 자기장치의 레벨셋기반 위상최적설계

박상인* · 민승재 †

Level Set Based Topology Optimization of Magnetic Device Considering Actuating Force

Sang-in Park and Seungjae Min

Key Words : Actuating Force(구동력), Magnetic Device(자기장치), Topology Optimization(위상최적설계), Level Set(레벨셋)

Abstract

To obtain weight reduction and high performance, level set based topology optimization in magnetic fields is promising for the design of magnetic devices where the precise boundary shape and topological changes are required. Level set function is introduced to represent ferromagnetic material boundaries and material properties of the magnetic reluctivity are determined. The optimization problem is formulated for maximizing the actuating force in a prescribed direction under limited usage of ferromagnetic material.

1. 서론

자기액추에이터(magnetic actuator)는 전자기에너지를 기계에너지로 변환하는 장치로 정밀한 제어가 가능하기 때문에 광학장치, 의료기기, 소형기계장치 등에 많이 사용되고 있다. 이러한 자기액추에이터의 설계와 응용에 있어서 구동력은 중요한 설계요구 사항이다. 이를 위하여 최적설계 기법을 적용하여 자기액추에이터의 구동력을 최적화하는 연구가 진행되어 왔다.^(1,2)

자기액추에이터의 설계는 자석(magnet), 요크(yoke), 코일(coil)과 같은 전자기 회로를 구성하는 요소들의 크기와 배치를 결정하는 최적화 문제로 정식화할 수 있다. 이러한 문제는 재료의 분포를 설계변수로 이용하는 위상최적설계 기법의 적용이 가능하고 이를 이용하여 기존 설계에 의존하지 않는 새로운 형상의 설계가 가능하다. 현재까지 자기장내에서의 위상최적설계는 균질화 설계법⁽³⁾ 또는 밀도법⁽⁴⁾과 같은 요소기반 위상최적설계 기법을 이용하여 수행되었다. 그러나 최종 형상이 이

산화된 요소망에 의존하거나 0 과 1 사이의 중간밀도를 갖는 요소가 존재하는 단점이 있다.

본 논문에서는 요소기반 위상최적설계 기법의 단점을 해결하고 명확한 형상을 갖는 자기액추에이터를 설계하기 위하여 레벨셋법을 이용한 위상최적설계 기법⁽⁵⁾을 자기액추에이터의 설계에 적용한다.

2. 레벨셋기반 위상최적설계

레벨셋법은 Osher 와 Sethian 에 의하여 제안된 방법으로 변화하는 경계 또는 형상을 표현하기 위하여 사용된다. 레벨셋법에서는 경계의 표현을 위하여 다음과 같이 영역 내의 각 점에서 경계까지의 부호화된 거리(signed distance)로 정의되는 레벨셋 함수(level set function)를 이용한다.

$$\phi(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\min(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c|) & \mathbf{x} \in \Omega^- \\ 0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ \min(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c|) & \mathbf{x} \in \Omega^+ \end{cases} \quad (1)$$

여기서 x_c 는 경계 위에 존재하는 점을 나타낸다.

경계의 변화는 경계에서의 주어진 법선 속도를 이용하여 다음과 같이 해밀턴-야코비 방정식(Hamilton-Jacobi's equation) 형태의 레벨셋 방정식으로 표현된다.

* 한양대학교 대학원 자동차공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : seungjae@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0457 FAX : (02)2298-4634

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{x}(t), t)}{\partial t} + \mathbf{v}_n = 0 \quad (2)$$

자기장내의 물리량을 계산하기 위하여 유한요소법을 적용하였다. 이를 위하여 각 요소의 자기저항률은 식 (1)에서 정의된 레벨셋 함수와 히비스사이드 함수(Heaviside function)를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$v(\phi(\mathbf{x})) = v_0 (v_{air} + (v_{mat} - v_{air})H(\phi(\mathbf{x}))) \quad (3)$$

여기서, v_0 는 절대 자기저항률, v_{mat} , v_{air} 는 자성 재료와 공기의 상대 자기저항률을 나타낸다.

액추에이터의 구동력은 아마추어(armature)에 인가되는 자기력으로 표현된다. 아마추어에 인가되는 자기력 \mathbf{F} 는 맥스웰 응력텐서(Maxwell stress tensor) \mathbf{T} 를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{T} = v \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{B}_x^2 - \mathbf{B}_y^2)}{2} & \mathbf{B}_x \mathbf{B}_y \\ \mathbf{B}_y \mathbf{B}_x & \frac{(\mathbf{B}_y^2 - \mathbf{B}_x^2)}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F} = \int_{S_{arm}} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dS \quad (5)$$

여기서, S_{arm} 은 아마추어 외곽의 시계방향 적분 경로, \mathbf{n} 은 법선방향 단위벡터, \mathbf{B}_x , \mathbf{B}_y 는 2차원 직교 좌표계에서 x, y 방향으로의 자속밀도를 나타낸다.

구동력을 고려한 위상최적설계 문제의 정식화를 위하여 목적함수는 식 (5)로부터 계산되는 자기력 중 x 축 방향 성분으로 설정하고, 경량화 설계를 위하여 설계영역내의 자성 재료의 양을 제한 조건으로 설정하여 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \phi(\mathbf{x}) \\ & \text{Maximize} && F_x \\ & \text{Subject to} && \int_{\Omega} H(\phi(\mathbf{x})) d\Omega \leq V_c \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 정식화된 위상최적설계 문제의 경계의 변화를 위하여 최적 조건과 수렴 조건을 이용하면 식 (2)의 법선 속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{v}_n = - \left(\frac{df}{d\phi} + \lambda \frac{dg}{d\phi} \right) \quad (7)$$

여기서, λ 는 라그랑지 승수이다. 식 (7)에서 법선 속도를 계산하기 위하여 목적함수와 제한조건함수의 민감도 계산이 필요하다. 제한조건함수의 민감도는 직접 미분법을 사용하여 계산이 가능하지만 목적함수의 민감도는 레벨셋 함수에 대하여 비명시적 종속항이 존재하므로 보조 변수법을 적용하였다.

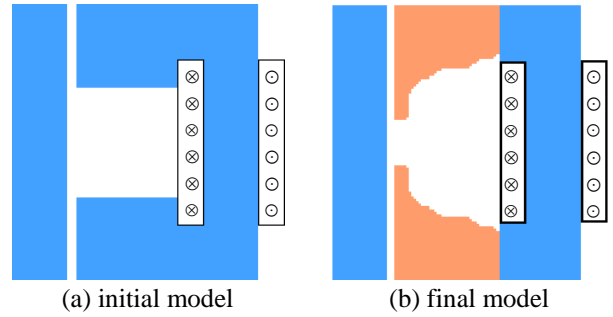


Fig. 1 C-core actuator

Table 1 Comparison of volume and magnetic force

	Initial model	Optimal model
Volume(mm ²)	44.00	36.67(16.7% ↓)
Magnetic force(N/m)	2.68	3.45(28.7% ↑)

3. 설계예제

본 논문에서 제안한 방법을 C-cor 액추에이터 설계에 적용하였다. C-core 액추에이터는 코일에 인가된 전류에 의하여 생성된 자기력을 이용하여 아마추어를 끌어당기는 장치로 아마추어에 인가되는 자기력을 증가시키는 것이 설계 최적화의 목적이다.

Fig. 1 (a)는 초기 모델을 나타내고, (b)는 최적화를 수행한 결과를 나타낸다. Table 1은 초기 모델 및 최적화된 모델의 부피와 아마추어에 인가되는 자기력을 나타낸다. 이를 통하여 최적화된 모델은 초기 모델보다 부피는 16.7% 감소하였지만 자기력은 28.7% 향상된 것을 확인하였다.

4. 결론

자기액추에이터의 성능을 최적화하기 위하여 레벨셋 기반 위상최적설계를 제안하였다. 아마추어에 인가되는 자기력을 목적함수로 설정하고 자성 재료의 양을 제한 조건으로 설정하여 최적화를 수행하였다. 최적화의 결과로써 구동력이 향상되고 명확한 형상을 갖는 자기액추에이터의 설계가 가능함을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 국제협력연구(F01-2008-000-10146-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Wang, H.T., Liu, Z.J., Low, T.S., Ge, S.S., Bi, C., 2000, "A genetic algorithm combined with finite element method for robust design of actuators," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No.4, pp. 1128-1131.
- (2) Wang, S., Kang, J., 2002, "Topology optimization of nonlinear magnetostatics," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, No.2, pp. 1029-1032
- (3) Yoo, J. and Kikuchi, N., 2000, "Topology optimization in magnetic fields using the homogenization design method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No.10, pp. 1463-1479.
- (4) 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 pt.1, pp. 1188-1193.
- (5) Sethian, J.A. and Wiegmann, A., 2000, "Structural Boundary Design via Level Set and Immersed Interface Methods," *Journal of Computational Physics*, Vol. 163, No.2, pp. 489-528.