

위상최적설계를 이용한 리니어 모터의 설계

이 헌, 강제남, 왕세명, 홍언표, 박경배
 광주과학기술원 기전공학과, LG전자 디지털 어플라이언스 연구소

Linear Motor Design by using Topology Optimization

Heon Lee, Jenam Kang, Semyung Wang, Eon-pyo Hong, Kyeongbae Park
 K-JIST(Kwangju Institute of Science & Technology), Digital Appliance Research Laboratory, LG Electronics Inc

Abstract - In this paper, the design of the outer core which is one part of the linear motor is investigated by using the topology optimization and FEM. The object functions are to reduce the outer core area of the linear motor with the maximum magnetic energy in airgap. For topology optimization, the finite element model is made through the result of ANSYS, and the sensitivity calculation is done using ANSTOP(developed general software for topology optimization of electromagnetics). In ANSTOP, the optimization routine is impelmented using SLP in DOT and the ANSYS is used as a function solver.

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

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

여기에서 $f(A, \mu)$ 는 자기 에너지(magnetic energy), 자기력, 자기 토크(magnetic torque)등과 같은 목적 함수이고, A 는 벡터 포텐셜(vector potential), \bar{A} 는 가상 벡터 포텐셜이다. 또한 투자율(permeability) μ 와 시스템 출력(system output) A 의 함수인 $a_{\alpha}(A, \bar{A})$ 는 에너지 쌍선형 형태(energy bilinear form)이고 $l_{\alpha}(\bar{A})$ 는 힘 선형 형태(load linear form)이다.

식 (1)과 (2)를 통해 알 수 있는 것은 평형 조건을 만족시키면서 목적함수를 최대 또는 최소로 하는 최적의 투자율 μ 를 구하는 것이다.

1. 서 론

비교적 짧은 역사에도 불구하고 위상최적설계(topology optimization)는 지금까지 많은 수학자와 공학자의 관심을 가져 왔다[1]. 구조분야의 위상최적설계에 기초를 두고 있는 전자기 시스템에 대한 위상최적설계 연구는 수년 전에서야 비로소 시작되었지만 그 가능성이 점점 보여지고 있다[2-3].

전자기 시스템의 경우에 기존의 형상 최적설계(shape optimization)는 현재 설계의 개선에 중점을 두는 반면, 위상최적설계는 초기 개념 설계에 중점을 두고 있다.

본 논문에서는 위상최적설계 기법을 리니어 모터의 Outer Core의 형상설계에 적용하였으며, 위상최적설계를 통해 재료를 절감하면서 현재의 모터의 성능을 유지할 수 있는 방법을 찾아낼 수 있었다.

정자기장의 변분식을 해석적으로 미분함으로써 (연속체 방법, continuum method) 설계 민감도 해석을 위한 수식을 얻어내었으며 이 때 밀도법이 이용되었으며 ANSYS와 연결되어 민감도 계산이 가능하도록 하였다. 전체적인 프로그램의 제어와 민감도 계산을 위해 설계 프로그램이 개발되었다. 최적 설계 알고리즘으로는 DOT의 SLP를 사용하였으며, ANSYS를 목적함수나 구속조건을 위한 해석기로 사용하였다.

2. 위상최적설계

2.1 위상최적설계

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

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

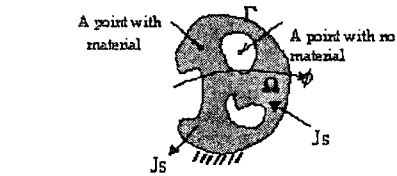


그림 1. 일반화된 위상최적설계 문제

2.2 위상최적설계 문제 정의

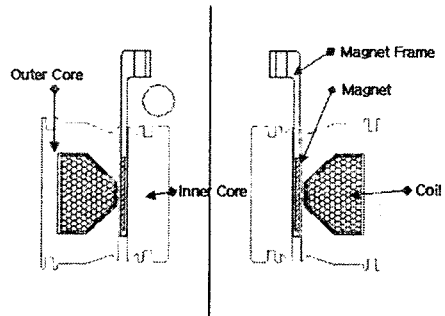


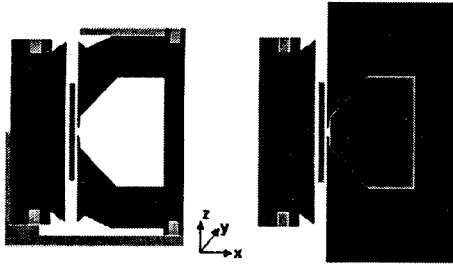
그림 2. 리니어 모터의 단면 구조 및 명칭

리니어 컴프레서용 리니어 모터는 그림 2와 같이 바깥쪽으로부터 Outer Core, Coil, Magnet, Magnet Frame, Inner Core 등으로 구성되어져 있다.

본 논문에서는 리니어 모터의 Outer Core에 대한 위상최적설계를 수행한다.

그림 3.(a)는 현재 생산 중인 리니어 모터의 유한요

소모델이며, 그림 3.(b)는 위상최적설계를 위해 만들어진 유한요소모델이다. Outer Core에 대한 위상최적설계를 수행하기 위해 넓이를 초기 모델의 것 ($0.9666e-3(m^2)$)보다 2배 넓게 하였다. 여기서 사용된 Outer Core의 넓이는 $1.863e-3(m^2)$ 이다.



(a) 현재 생산 중인 리니어 모터 (b) 위상최적설계를 위한 모델
그림 3. 위상최적설계를 위한 유한요소모델

Outer Core에 대한 위상최적설계의 목적 함수는 자기 에너지(Magnetic Energy)이다. 모터의 힘은 결국 에너지의 직선 방향으로 미분 한 값과 같기 때문에 공극에서의 자기 에너지를 최대화하는 것으로 목적 함수를 잡았다. 그리고, 구속 조건은 Outer Core의 부피를 선택하였는데 현재의 부피의 60%이하로 만드는 것으로 정의하였다. 다시 말해서, 전체 부피의 60%는 위상최적설계 후 제거가 된다.

이를 정리하면 아래의 식 (3), (4)와 같다.

$$\text{Maximize } f = \text{Magnetic Energy in Airgap}$$

$$\text{Subject to } g = \text{Volume of Stator}(60\% \text{ 제거})$$

ANSYS에서 사용한 물성치들을 표 1에 나타내었다. 또한 위상최적설계 수행시 수렴 속도를 빠르게 하기 위하여 Outer Core와 Inner Core에 선형 비투자율의 물성치를 사용하였다.

Name	ID	Relative Permeability [μ_r]	Electrical Resistivity [$\Omega \cdot m$]
Outer Core	1	4000	
Inner Core	2	4000	
Coil	3	0.98	$1.724e-8$
Air	4	1	

표 1. 물성치

그림 3.(b)의 선형 물성치를 사용한 위상최적설계 모델이 나타내는 힘은 그림 3.(b)의 비선형 물성치를 가지는 모델이 가지는 힘을 기준으로 비교를 하였을 때 대략 +0.2%정도의 오차를 가진다.

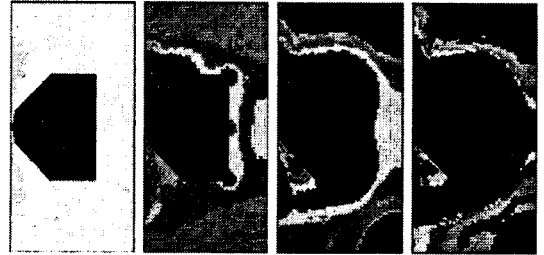
결과적으로, 선형 물성치와 비선형 물성치를 고려한 두 개의 유한요소해석 결과의 비교를 통하여 위상최적설계를 위한 그림 3.(b)의 유한요소모델의 타당성을 검증하였다.

2.3 위상최적설계 결과

리니어 모터의 위상최적설계는 Coil에 1[A]의 전류를 인가해 준 상태에서 자석을 축방향으로 -10mm부터 +10mm까지 5mm간격으로 5가지 경우로 정의하여 수

행되었는데, 자석의 축방향으로의 위치 변화에 따른 5가지 경우를 CASE A ($\Delta z=0$ 일 때), CASE B ($\Delta z=5$ 일 때), CASE C ($\Delta z=10$ 일 때), CASE D ($\Delta z=-5$ 일 때), CASE E ($\Delta z=-10$ 일 때)로 정의한다. 이는 자석의 위치의 변화에 따라 최적의 Core의 형상이 다르기 때문이다.

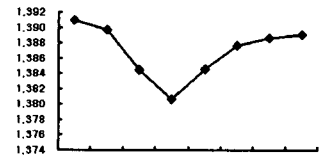
2.3.1 자석의 위치 변화에 따른 위상최적설계 결과



1 iteration 4 iteration 6 iteration 8 iteration
(a). 위상최적설계 결과



(b) 자속선



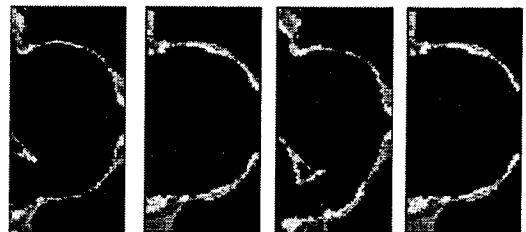
(c). 목적함수의 추이

그림 4. CASE A의 위상최적설계 결과

그림 4.(a)는 CASE A에 대한 위상최적설계의 결과이며, 최종 8 iteration까지 수렴하는 동안의 중간 과정들을 나타낸 것이다. 최종적으로 나타나는 최적화된 Outer Core의 형상이 상하가 비대칭인 것은 그림 4.(b)에서의 자속선의 분포가 비대칭인 것에 기인한다.

그림 4.(c)는 위상최적설계가 진행되는 동안의 목적 함수(자기 에너지)의 변화 추이를 나타낸다. 여기서 자기 에너지의 초기값은 $1.391[J/m]$ 이고, 최종적으로 얻은 자기 에너지의 값은 $1.389[J/m]$ 로 대략 0.14%정도 초기값보다 감소되었다. 하지만, 최종적으로 부피는 초기 부피의 40%로 감소되었다.

그림 5는 CASE A를 제외한 나머지 경우의 각각의 최종 iteration에서의 위상최적설계 결과를 보여주고 있다.

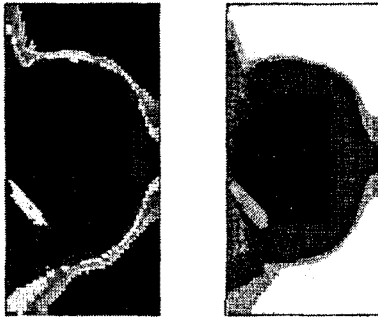


(a) CASE B (b) CASE C (c) CASE D (d) CASE E
그림 5. CASE B-E의 최종 위상최적설계 결과

2.3.2 최종 결과

CASE A ($\Delta z=0mm$)부터 CASE E ($\Delta z=-10mm$)까지의 위상최적설계 결과들을 종합하여 그림 6의 최종 결

과를 얻어낼 수 있다. 그림 6은 각각의 결과에서 얻은 각 요소의 밀도값들을 평균을 내서 나타낸 것이다. 그리고 그림 6.(b)는 물질들의 경계를 명확하게 보기 위해 Grey 스케일로 나타낸 그림이다.



(a). Color (b). Grey Scale Contou
그림 6. 최종 결과

2.3.3 최종 결과의 검증

그림 6의 최종결과의 검증을 위해 ANSYS로 재해석을 수행하였다. 그림 7은 재해석을 위해 만들어진 유한요소모델이다. 그림 6의 결과를 이용하여 Outer Core의 60%정도를 공기로 대체하였다. 결국, 그림 3.(a)의 현재 생산 중인 리니어 모터의 Outer Core보다는 10%정도 이상의 부피를 줄인 것과 같다.

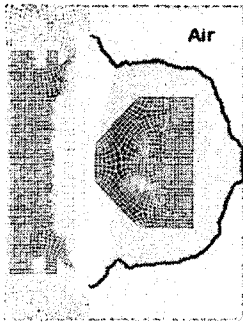
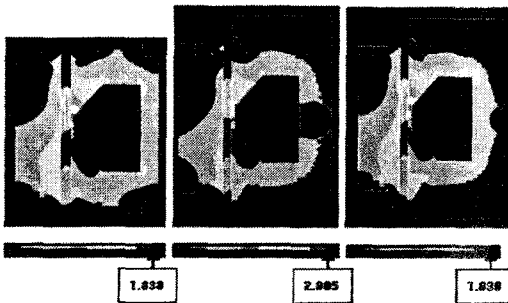


그림 7. 재해석을 위한 유한요소모델

그림 8은 수정된 모델의 자속 밀도의 분포도이고, 그림 7의 유한요소모델의 축방향으로 나타나는 힘이 그림 3.(a) 모델이 같은 힘과 1%정도의 차이를 가지는 사실로부터 두 힘이 거의 비슷함을 알 수 있다.



(a)초기 모델 (b)재해석 모델 (c)재해석 모델
(Linear) (Nonlinear)

그림 8. 초기 모델과 수정된 모델의 자속 비교

2.3.4 초기 모델과 최적화된 모델의 비교

표 2와 그림 9를 통하여 초기 모델과 위상최적설계를 통해 얻은 최적화된 모델을 비교 분석하였다. 결국, Outer Core의 최종 위상을 기준으로 모터를 제작하면 모터의 성능을 현 수준과 비슷하게 유지하면서 부피를 14% 줄여 재료비를 절감시킬 수 있다. 한편 현재의 부피를 유지하며 더 큰 힘을 내는 최적화도 가능하다.

표 2. 초기 모델과 최적화된 모델의 결과 비교

	Outer Core 넓이 [mm ²]	%	축 방향 힘 [%]
초기 모델	966.6	100	100
재해석 모델 (Linear)	828	85.66	100.12
재해석 모델 (Nonlinear)	828	85.66	99.87

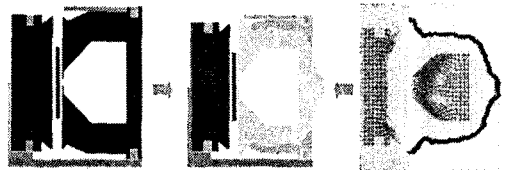


그림 9. 초기 모델과 최적화된 모델의 비교

3. 결 론

본 논문에서는 리니어 모터의 Outer Core에 대한 위상최적설계에 대한 연구가 수행되었다.

Outer Core의 위상최적설계를 통해 현재의 모터가 가지는 축방향으로 발생하는 힘을 최대한 유지하면서 부피를 최소화하였다. 또한, 위상최적설계를 수행할 때 물성치를 선형으로 주었기 때문에 최종 결과에 대해서 비선형 물성치를 사용하여 모델을 비교 검증하였다.

위상최적설계를 수행하기 위하여 자체 개발된 프로그램을 사용하였으며, 최적 설계 알고리즘으로는 DOT의 SLP를 사용하였다. 그리고 ANSYS를 목적함수나 구속조건을 위한 해석기로 사용하였다.

4. 후 기

이 연구는 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소와 한국 과학재단 지정 한양대학교 최적설계신기술연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] M.P. Bendsoe, and N. Kikuchi, Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224, 1988
- [2] D. N. Dyck, and D. A. Lowther, Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution, IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 32, NO. 3, MAY 1996
- [3] 왕세명, 김용수, "전자기 시스템의 위상 최적설계", 대한전기학회 춘계 연합 학술대회 논문집, pp. 65-69, 2000