



최적설계의 개념 및 응용

왕 세 명

1. 머리말

본 글에서는 최적 설계의 개략적인 개념 및 적용 분야를 응용사례를 중심으로 살펴 보고자 한다.

2. 최적 설계란

일반적으로 공학적인 문제 그 중에서도 구조계에 적용되는 최적 설계방법은 크게 크기 최적 설계, 형상 최적 설계, 그리고 위상 최적 설계로 나눌 수 있다. 각각을 개념적으로 설명하면 다음과 같다

2.1 크기 최적 설계

크기(sizing) 최적 설계란 구조물의 형상 변화 없이 판의 두께나 보의 단면 특성, 즉 단면적, 관성모멘트, 뒤틀림 강성과 같은 치수를 설계 변수로 하여 최적 설계를 수행하는 것을 의미한다. 보의 종단면 형상이 변화하는 경우에는 보의 형상 최적설계라고 볼 수도 있으나, 보를 모델하기 위하여 일반적으로 2차원 선분을 사용하고, 단면적이나 관성 모멘트 등을 주어진 보의 특성치로 사용한다는 점을 감안한다면 보의 종단면 형상이 변화하는 경우에도 해석 방법

상 크기 최적 설계에 해당된다고 할 수 있겠다.

2.2 형상 최적 설계

형상(shape) 최적 설계란 구조물의 형상을 설계 변수로 하여 최적 설계를 수행하는 것을 의미한다. 예를 들면, 보의 길이 변화, 평판의 형상 변화 등이 이에 속한다. 좌표계의 변화 없이 형상만 변하는 경우를 형상 최적 설계라 하고, 좌표계의 회전에 대한 변화를 다루는 것을 킨피규레이션(configuration) 최적 설계¹⁾라 하는데, 본 글에서는 이 둘을 통틀어 형상 최적 설계라 하였다.

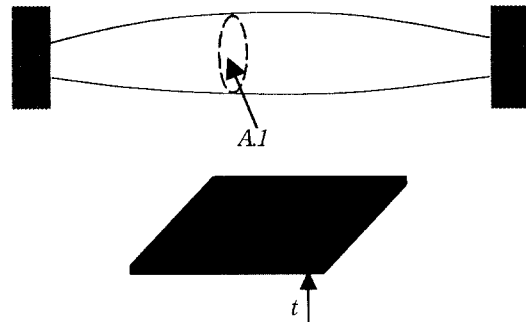


그림 1 보와 평판의 크기 설계 변수

* 정희원 · 광주과학기술원 기전공학과, 교수

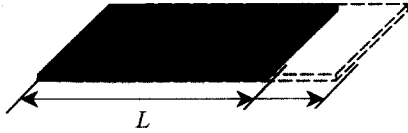


그림 2 평판의 형상 설계 변수

형상 최적 설계는 모델의 형상이 변하기 때문에 크기 설계 변경과는 달리 고유 주파수 뿐 아니라 고유 모드 형상이 바뀌게 된다. 그러나, 크기 최적 설계에 비해 보다 효과적인 반면에 어렵고, 시간과 비용이 많이 든다.²⁾ 그래서, 최근의 연구는 효율적인 형상 설계 변수를 선택하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

형상 최적 설계에서 효율적인 설계 변수를 선택하기 위한 연구로 모델의 경계를 급수(polynomial) 형태로 표현하거나 스플라인, 베이지어, B-스플라인 함수를 형상 설계 변수로 선택하여 최적 설계에 이용하였다.

2.3 위상 최적설계

위상(topology) 최적 설계³⁾를 수행할 때는 일반적으로 대상체를 유한요소로 모델링한 다음 각각의 유한요소에 대한 인위적인 밀도(compactness) 함수를 도입하여 설계변수로 취한다. 이때 밀도 값이 0이면 공백을, 1이면 물질을 나타낸다.

그림 3에서와 같이 위상 최적 설계는 구조물의 외형 및 내부 형상(구멍의 개수 등) 등을 동시에 구할 수 있는 장점이 있는 반면 유한요소 개수만큼의 설계변수가 필요하기 때문에 계산 시간이 오래 걸린다. 따라서 최근에는 위상 최적 설계를 통해 개략

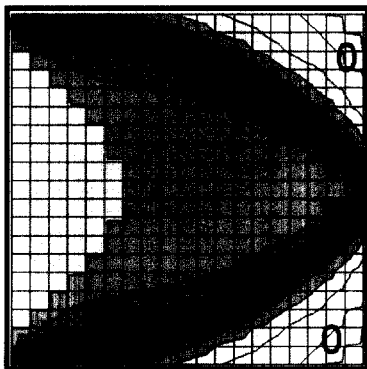


그림 3 평판에 대한 위상 최적 설계

적인 초기 형상을 구하고, 이것을 바탕으로 형상 최적 설계를 하는 복합적인 방법이 시도되고 있다.³⁾

3. 응용 사례

3.1 자동차 진동 저감⁴⁾

자동차 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 모델의 진동 해석을 하고, 그 결과를 이용하여 문제가 되는 주파수를 선정한 후 해당 주파수에서의 진동을 줄이기 위한 민감도 해석을 수행한다. 그 결과로부터 민감도가 높은 부위를 선택하여 디자인을 개선함으로써 가장 효과적으로 진동을 줄이려고 하였다. 민감도 해석과 그에 따른 모델의 변화는 모두 두 차례에 걸쳐 시행 되었으며, 그 결과 문제의 주파수 영역에서의 진동을 효과적으로 줄일 수 있었다.

그림 4에 보여진 자동차의 유한 요소 모델은 모두 9244개의 절점과 10871개의 유한 요소로 이루어져 있으며 595개의 각기 다른 물성치를 가지는 요소로 구성되어 있다.

이 모델을 이용하여 차량의 엔진이 차체에 고정되는 네 지점에 각각 가진을 주어 그때의 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 구하였다. 이때 가진점은 실제로 엔진이 차체에 고정되는 지점에 가장 인접해있는 절점으로 선택 하였으며 전방부, 좌측, 우측, 그리고 후방의 네 곳으로 이루어져 있다. 응답점은 운전석이 위치하게 될 절점으로 하였다.

해석 결과, 25.1Hz에서 최고치를 가짐을 알 수

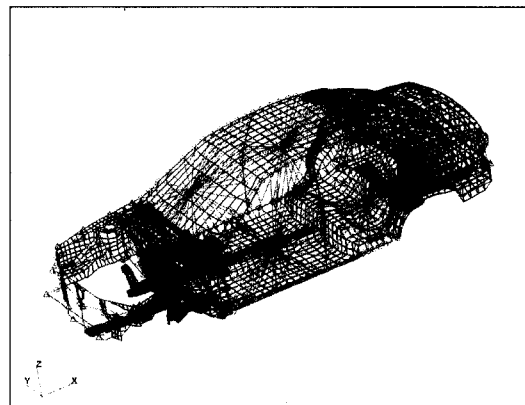


그림 4 Vehicle NVH full model

있었다. 따라서 전방부 엔진 고정점에 가진을 주었을 때 25.1Hz에 대한 진동을 줄이는 것을 목표로 한다.

그런데 진동/소음 문제의 경우에는 진동이 줄어드는 것이 아니라 단지 주파수만 변화되는 경우가 있을 수 있으므로, 문제가 되는 주파수에 대해서만 민감도 해석을 하지않고 그 주위의 주파수 24Hz, 26Hz에 대해서 동시에 민감도 해석을 수행하도록 한다.

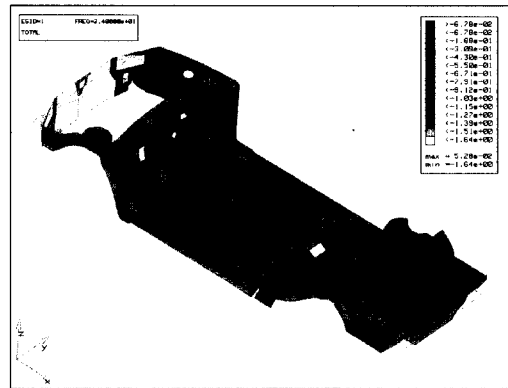
일반적으로 차체의 상판은 외관등의 요인으로 인하여 쉽게 바꿀 수 없다는 점을 고려하여, 설계 민감도 해석의 대상으로는 그림 3.2와 같이 하부 골격을 포함한 차체 바닥으로 하였으며, 이때의 설계 변수는 바닥판의 두께와 골격을 이루는 보의 단면적, 관성 모멘트 등으로 하였다.

민감도 계산은 목표 함수가 운전석의 진동 하나인데 비해, 설계 변수는 차체 바닥과 골조를 이루는 전체 유한 요소로서 그 수가 3427개에 달하기 때문에 보조변수법²⁾을 사용하였다.

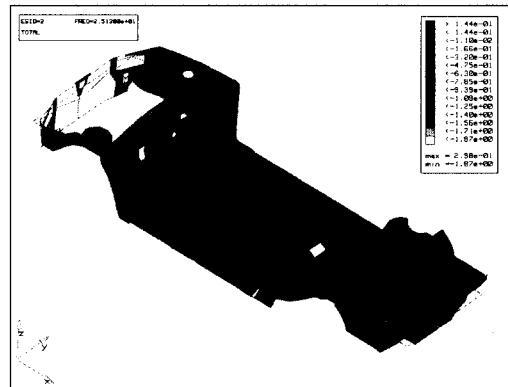
첫번째 민감도 해석을 토대로 모델 수정을 한 결과 2dB의 진동을 줄일 수 있었다. 여기에서 다시 한번 민감도 해석을 수행 하였는데, 2차 설계 민감도 해석은 이미 한번 개선된 모델에 대해서 행해지는 것이므로 좀 더 자세하고 신중하게 행해졌다. 또한 최고점의 위치도 한번의 모델 수정을 통하여 25.1Hz에서 25.13Hz로 약간의 변화가 있었으므로 2차 해석에서는 25.13Hz에 대하여 설계 민감도 해석을 수행하였다.

각 요소별 민감도 해석 결과는 그림 6에 보였다.

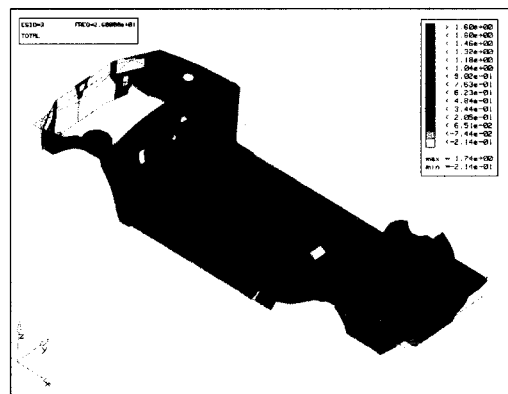
2차 민감도 해석 결과를 이용하여 모델을 다시 수정한 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 약 1dB의 진동을 추가로 줄일 수 있었다.



(a) 24HZ



(b) 25.13HZ



(c) 26HZ

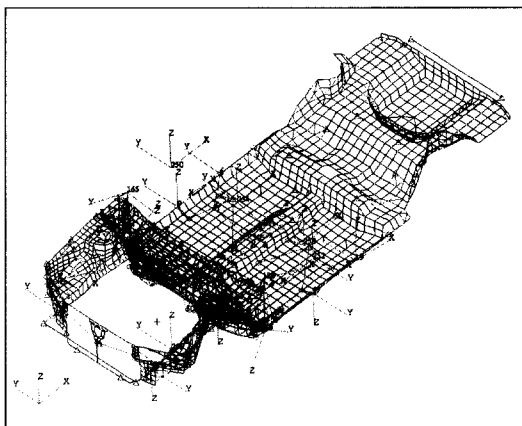


그림 5 Floor model

그림 6 Element sensitivity plot(2nd)

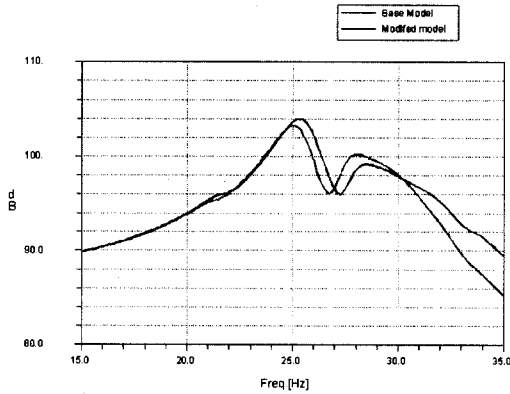


그림 7 FRF of Original and Modified Mo (2nd)

3.2 하드디스크 드라이브(HDD) 모터의 최적 설계^{5),6)}

하드 디스크 드라이브(Hard Disk Drive, HDD)는 정보 기록용 디스크에 헤드가 작은 간격을 유지하면서 정보를 읽고 기록하는 장치이다. HDD는 크게 두 부분으로 구성되어 있는데, 반도체 칩, 마이크로 프로세서, 기타 전기적 부품이 조립되어 있는 프린터 기판과 주로 기계 장치로 구성되어 있는 헤드와 디스크, 스피들 모터의 조립동체가 그것이다.

HDD에 있어 진동의 주된 진원지는 BLDC(Brushless DC) 스피들 모터와 VCM(voice coil motor)이다. 특히 스피들 모터의 성능은 HDD의 읽기/쓰기 작동에 있어 신뢰도를 결정적으로 좌우한다. 스피들 모터에 진동 문제가 발생하면 디스크가 떨리기 때문에 디스크의 정보를 읽고 기록하지 못하는 헤드 input/output error가 발생하게 되는데, 이 현상이 HDD의 비정상 작동의 가장 대표적인 예이다. 따라서 HDD 설계 시 구동 스피들 모터의 진동특성을 예측하고 이를 설계에 반영하는 것이 안정된 시스템을 구현하기 위해 필수적이다.

3.2.1 BLDC 모터의 고유 진동수에 대한 크기/형상 설계 민감도 해석⁵⁾

본 절에서는 현재 양산되는 BLDC 스피들 모터의 고유치 설계 민감도 해석을 수행하고 실제 설계 변경하여 제작한 스피들 모터의 실험 결과와

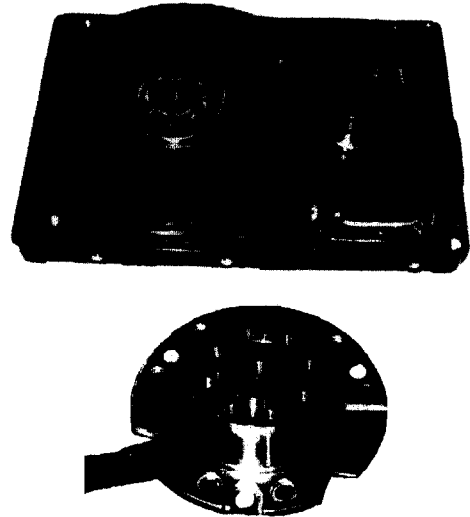


그림 8 HDD와 BLDC 스피들 모터

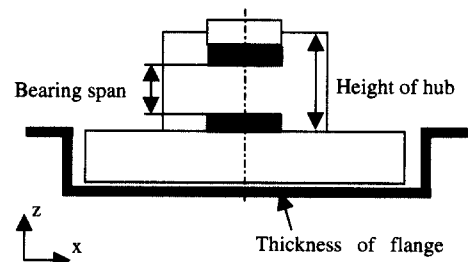


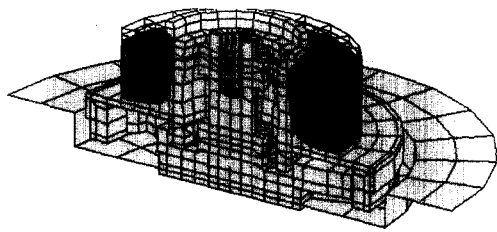
그림 9 BLDC 스피들 모터의 설계 변수

비교함으로써 CAE에 의한 설계 방법을 CAT를 통하여 검증하였다.

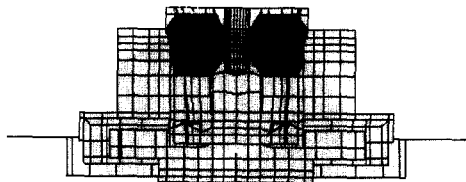
BLDC 스피들 모터에서는 그림 9와 같이 2개의 형상 설계 변수와 1개의 크기 설계 변수를 선택하였다. 플랜지의 두께는 크기 설계 변수이고, 허브의 높이와 베어링의 간격은 형상 설계 변수로 생각할 수 있다.

설계 민감도는 범용 유한요소 프로그램인 MSC/NASTRAN에서 중간 유한 차분법(central finite difference method)을 사용하여 구하였다.

그림 10은 형상 설계 민감도 계산을 위한 설계 속도장이다. 설계 속도장을 구하는 방법에는 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 CAD 모델과 연결성이 우수한 경계변위법(boundary displacement method)을 사용하였다.

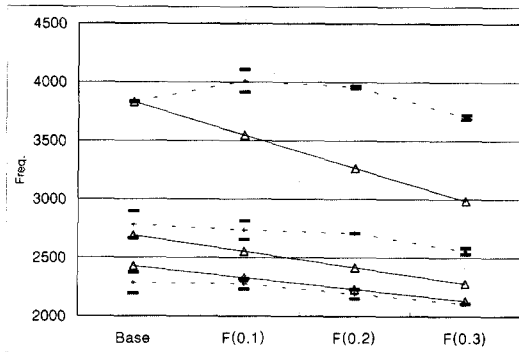


(a) 허브의 높이

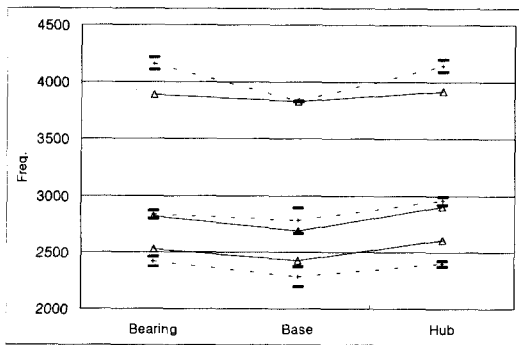


(b) 베어링의 간격

그림 10 형상 설계 속도장



(a) 플랜지부



(b) 허브와 베어링부

그림 11 설계 민감도 해석을 통한 예측치와 실제 변경 제작한 모터의 실험 결과 비교

그림 11은 설계 민감도 해석을 통해서 예측된 고유 진동수와 실제 설계 변경 후 제작된 모터의 실험치의 비교를 보여준다. '-'는 각각의 설계 변경 후 제작된 스피들 모터의 실험치이고, '+'를 갖는 점선은 평균치이다. 그리고, 삼각형으로 표시된 실선은 민감도에 의해 예측된 값이다. 설계 변경에 따른 기울기 즉, 설계 민감도는 거의 비슷하게 나옴을 알 수 있다.

3.2.2 BLDC 모터의 코깅 토크 저감을 위한 형상 최적화⁶⁾

모터의 단면적과 각 부분의 명칭을 그림 5에 나타내었다. 그림 12에서 보여지듯이 모터의 기하학적인 특성과 전기적인 성질로 인하여 매 90°마다 같은 자기장 분포를 보인다. 따라서 1/4 모델만을 해석하여도 전체 자기장의 분포를 알아낼 수 있다.

동시공학 (Concurrent Engineering)적인 측면에서 볼 때 CAD 모델과 해석 모델이 서로 연결되어 있으면 유리한 면이 상당히 많다. 그림 13과 같이 Pro/ENGINEER를 이용하여 모터의 CAD 모델을 만들고, 설계변수로 설정한 치형(齒形)은 5개의 제어점(control point)을 가진 NURBS로 모델링하였고, 범용 유한 요소 해석 프로그램 중의 하나인 ANSYS를 이용하여 그림 13과 같은 유한 요소 모델을 만든 후, 정자기 해석을 하였다.

영구자석 모터의 회전자의 위치에 대한 자기 에너지의 변화를 줄이면 코깅 토크를 줄일 수 있다. 따라서 최적설계를 위한 목적함수를 다음과 같이 정한다.

$$f = \sum_i^{NR} (W_i - W_m)^2 \quad (1)$$

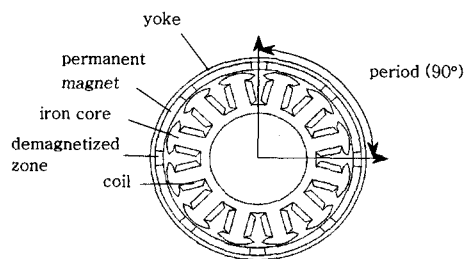


그림 12 8P12S BLDC 모터의 단면도

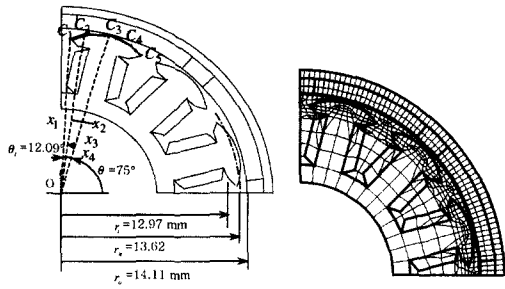


그림 13 BLDC 모터의 CAD 모델과 유한요소 모델

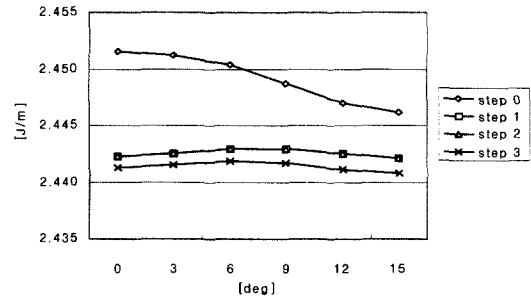


그림 15 시스템 에너지의 변화

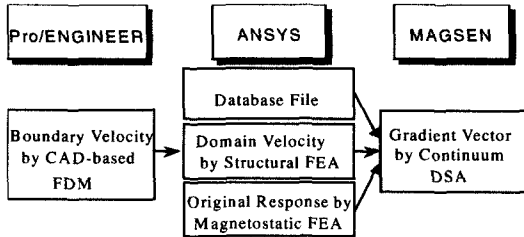


그림 14 정자기 설계 민감도 해석의 순서도

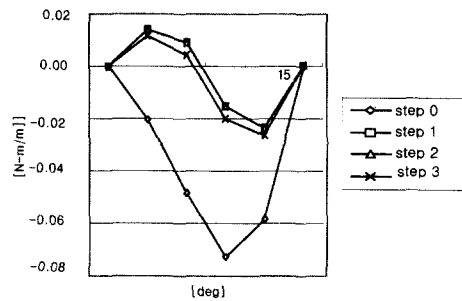


그림 16 코깅 토크의 변화

$$W = \iiint_{\Omega} \frac{1}{2} \mathbf{B}^T(\mathbf{A}) \mathbf{H}^T(\mathbf{A}) d\Omega \quad (2)$$

목적함수의 구배를 구하는 전체적인 과정을 그림 14에 나타내었다.

최적화 알고리즘은 근사 선형 탐색(inexact line search)을 이용한 최대 경사법(steepest descent method)을 이용하였다.

최적화 알고리즘은 근사 선형 탐색을 이용한 최대 경사법을 이용하였다.

그림 15와 16에서 볼 수 있듯이 시스템 에너지 변화와 코깅 토크가 최초보다 약 80% 가량 줄었다. 그림 17에 초기와 최종 치형을 나타내었다.

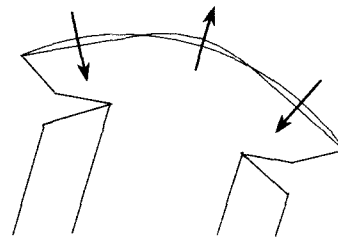


그림 17 초기와 최종 치형

3.3 C-core 액츄에이터의 위상 최적 설계⁷⁾

본 예제는 그림 18과 같은 C-core 액츄에이터에 대한 위상 최적 설계 적용 사례이다. C-core 액츄에이터의 목적은 코일에 전류를 가하여 전기자(armature)를 끌어당기는 것이다. 목적에 부합하기 위해서 주어진 전류로 최대의 자기력을 낼 수 있는 코어의 위상을 구하는 위상 최적 설계의 필요성이 대두된다.

따라서 다음과 같이 코어의 체적을 줄이면서

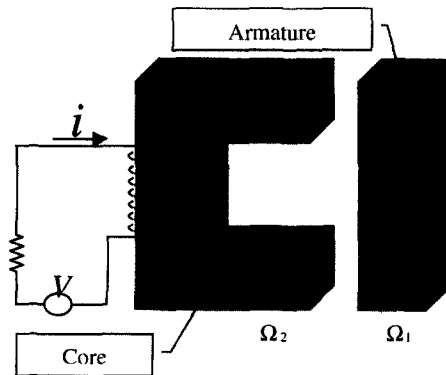
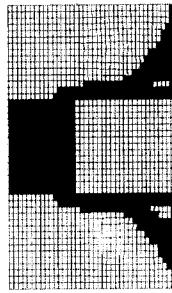
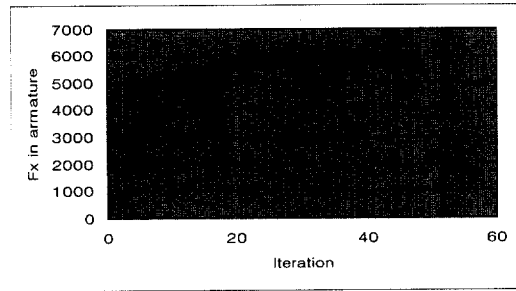


그림 18 C-core 액츄에이터



(a) 최적화된 코어의 형상



(b) 목적 함수의 수렴 상태

그림 19 C-core 액츄에이터의 위상 최적 설계 결과

전기자에 유도되는 전자기력을 최대화하는 최적화 문제를 구성할 수 있었다.

Maximize

$$f_x = \iint_{\Omega_1} \frac{1}{\mu_0} \left[B_x \frac{\partial B_x}{\partial x} + B_y \frac{\partial B_y}{\partial x} \right] d\Omega_1$$

Subject to

$$\frac{\iint_{\Omega_2} \rho A t d\Omega_2}{V_r} - 1 \leq 0$$

여기에서 V_r 은 최적화 후에 남아야만 하는 코어의 체적을 의미한다

그림 19는 최적화 후의 체적이 초기 체적의 20% 미만 이도록 하고($V_r=0.2V_{initial}$), 벌칙 상수 $P=2$ 일 때의 최적화 결과이다.

그림 19의 최적화된 코어를 사용했을 때 전자기에 유도되는 자기력은 원래의 코어를 사용했을 때 보다 약 5%정도만 줄어들었지만 80%의 체적을 줄일 수 있었다. 전자기 시스템의 경우에 원하는 성능을 만족시키면서 체적을 줄이면 2가지의 장점이 있다. 즉, 재료의 절감과 경량화를 할 수 있고, 이력 현상에 의해 발생하는 이력 손실(hysteresis loss)은 체적에 비례하기 때문에 체적을 줄임으로써 이력 손실도 줄일 수 있다.

참고 문헌

1. Wang, S.M. and Ki, S.H., 1997, "Configuration Design Sensitivity Analysis Using CAD-based Design Velocity Field", *Proc. Of 2nd World Congress of Structural and Mathdisciplinary Optimization*, pp.265~270
2. Haug, E. J. Choi, K. K. and Komkov, V., 1986, *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*, Academic Press, Orlando
3. Wang, S.M., Moon, H.G. and Ki, S.H., "Synthetic Procedure for Design of Reinforcement", *3rd WCSMO*, pp.638~640, Buffalo, New York, May 17-21, 1999
4. 왕세명, 이제원, 기성현, 문희곤, 서진관, "자동차 소음, 진동 저감을 위한 차체 설계 프로그램 개발", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집 pp.57~63, 1998
5. 왕세명, 기성현, 정성천, "CAE/CAT를 이용한 BLDC 스피들모터 설계" 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp.154~159, 1998
6. 왕세명, 정순규, "유한요소법을 이용한 전자기장의 연속 형상설계 민감도 해석", 대한기계학회 춘계학술대회, 1998
7. 왕세명, 김용수, 박기환, "전자기 시스템의 위상 최적설계", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.65~69, 2000