

OPERA를 이용한 전기기기의 최적설계 기법

심기덕*, 배준한, 진홍범, 권영길, 류강식, 이상진**
 *한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, **위덕대학교 전기공학과

Optimum Design Technique with OPERA for Electromagnetic Devices

Kideok Sim*, Joon Han Bae, Hon Beam Jin, Young Kil Kwon, Kang Sik Ryu, Sang-Jin LEE**
 *KERI, **Dept. of Electrical Eng. Unduk Univ.

Abstract - The procedure of optimum design is consist of a system analysis module, an optimum design module and an optimizing method module. In this paper, the method to connect the system analysis module with the optimizing method module using the self script language of OPERA has been provided. Optimum design for a magnet whose central field must be 2T has been carried out with the presented method. OPERA Pre/Post-processor has been used as a system analysis module and mixed decent/gradiant method as an optimizing method.

1. 서 론

경쟁력 있는 전기기기 제품을 만들기 위해서는 설계에 대한 기본적 사항들을 재검토할 필요가 있기 때문에 전자장 해석 및 설계 프로그램의 사용은 최근 몇 년 사이에 급격히 증가하고 있으며, 이러한 추세는 앞으로도 지속될 것으로 예상된다. 전자장 해석결과에 대한 높은 신뢰도와 간단한 사용법을 장점으로 가진 Vector Fields 사의 OPERA series는 위의 설계과정에 적합한 프로그램이다.

많은 설계변수들이 설계에 관여하는 경우, 각 설계변수들의 변화가 기기 전체에 미치는 영향을 판단하기란 쉬운 일이 아니며, 또한 설계변수들이 서로 상충되는 경우가 종종 있다. 따라서 기기에 대한 최적화 설계가 필요하게 된다. 최적화 설계에 사용되는 최적화기법에는 이미 검증된 여러 종류의 프로그램이 있다. 이러한 검증된 최적화기법 프로그램과 전자장해석 전문프로그램인 OPERA를 결합할 수 있다면, 전기기기의 설계에 있어서 신뢰도를 배가시킬 수 있을 뿐만 아니라 설계시 소요되는 시간과 경비를 절감할 수 있을 것이다. 이 논문에서는 OPERA 프로그램과 최적화기법 프로그램을 결합하여 전기기기의 최적화 설계를 수행하는 방법에 대해 소개한다.

2. OPERA를 이용한 최적설계

2.1 구성모듈의 역할

최적화 과정은 시스템해석 모듈, 최적설계 모듈, 그리고 최적화기법 모듈로 구성된다[1]. 시스템해석 모듈은 최적화 시킬 대상에 대한 설계 변수들을 입력받아 시스템해석을 수행하고, 목적함수를 평가하여 이를 최적설계 모듈로 넘겨주는 역할을 담당한다. 전기기기 설계의 경우 유한요소법을 이용한 전자장해석 프로그램을 여기에

사용할 수 있는데, 여기서는 OPERA의 전/후처리기와 여러 가지 해석 프로그램을 이용하였다. 최적화기법 모듈은 최적설계 모듈로부터 목적함수들의 값을 넘겨받아 이 값들이 최소가 되는 방향으로 설계변수를 변경하여 그 결과를 다시 최적설계 모듈로 넘겨주는 역할을 담당한다. 최적화기법 모듈로는 임의의 최적화 프로그램들이 사용될 수 있는데 여기서는 mixed decent/gradiant method를 사용하였으며, 목적함수의 최소화 방향을 판별하는데 필요한 미분정보는 목적함수를 선형 근사하여 사용하였다. 이러한 방법은 시스템해석 모듈의 코드에 직접 접근할 수 없는 경우에 유용하며, 동시에 사용자에게 미분 정보를 공개하지 않으므로 모듈 사이에 단순화된 인터페이스를 유지할 수 있다. 최적설계 모듈은 시스템해석 모듈과 최적화기법 모듈을 연결시키는 역할을 하는 것으로, 설계변수의 초기값을 설정하여 이를 시스템해석 모듈로 넘겨주며, 시스템해석 모듈로부터는 목적함수의 값들을 입력받아 최적화기법 모듈로 전달한다. 또한 최적화기법 모듈로부터는 변경된 설계변수들을 입력받아 이를 시스템해석 모듈에 전달하는 역할과 함께 목적함수가 수렴하는지도 판단하는 최적화과정을 총괄하는 모듈이라고 할 수 있다. 최적설계 모듈은 FORTRAN과 유사한 OPERA의 자체 스크립트 언어를 사용하여 작성되었으며[2], 그림 1에 최적화과정을 구성하는 모듈의 관계를 표현하였다.

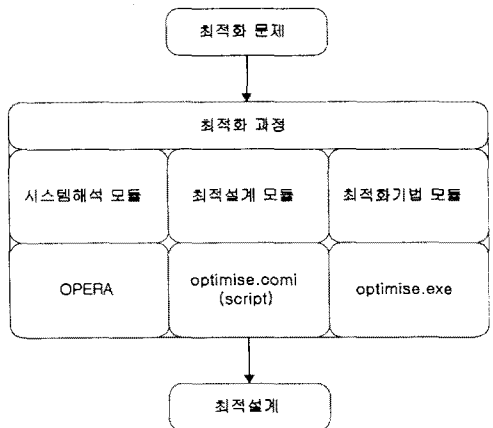


그림 1. 최적화과정 모듈의 구성

Fig. 1. Composition of optimizing procedure

2.2 최적설계 과정

최적설계는 모델에 대한 초기설계에서부터 시작된다. 초기설계에 대한 검증이 완료되면, 변수화 모델링 단계

를 수행한다. 변수화 모델링이란 기기의 각 치수들을 설계치수가 아닌 설계변수의 이름을 사용하여 지정하는 방법으로, 한 설계변수를 변경하였을 때 어떠한 결과가 발생하는지를 알고자 할 때 가장 효율적인 방법이다. [3] 일단 변수를 이용하여 모델을 만든 후에는 변수에 입의 값을 대입하여 모델의 형태를 변경하는 것이 가능해진다. 이러한 개념은 기기의 설계에 있어 가장 기본적인면서도 필수적인 내용으로 모델의 형태를 변화시켜 가면서 특성을 파악하기 위한 전단계라고 할 수 있을 것이다. 다음으로 각 설계변수에 초기값을 지정한다. 초기값으로 최적설계 결과와 유사한 값을 지정하면, 반복과정의 횟수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 목적함수가 국부 최저값으로 빠지는 오류를 피할 수 있다. 그러나, 최적설계 결과는 초기값을 지정하는 단계에서는 알 수 없으므로, 이 단계에서는 설계자의 경험이 중요시된다. 다음 단계는 지정된 초기값을 가지고 유한요소 모델을 형성하고 전자기해석을 수행하여 목적함수의 값을 도출하는 단계이다. 이 결과들이 수렴하는지를 판단하여 수렴하지 않으면 최적화기법 모듈에서 설계변수를 변경하고 이 변경된 설계변수들을 새로운 초기값으로 입력하여 위의 과정을 반복한다. 만약 목적함수가 수렴하면 최적화 과정을 종료하고 최적화된 모델을 출력한다. 그림 2는 최적화 과정에 대한 알고리즘을 표현한 그림이다.

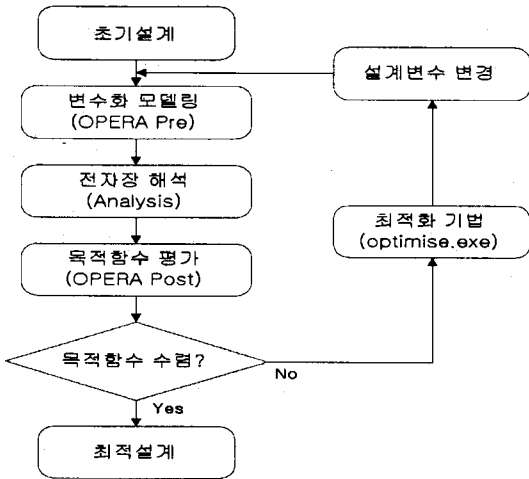


그림 2. 최적화 과정
Fig. 2. Optimizing procedure

3. 적용사례

3.1 균등자장 발생용 전자석

최적설계의 대상은 그림 1과 같이 3개의 권선으로 구성된 실험용 전자석이다. 다분할 권선을 사용하면 균등자장 발생에 유리하다는 것이 일반적으로 받아들여지고 있으며, 여기서는 제작비를 고려하여 3개의 권선으로 제한하였다. 권선의 치수와 위치를 변화시키면서, 8cm DSV에서 2T의 균등자장을 발생시키도록 하는 것이 설계의 목적이다. 설계 대상이 Z축과 R축에 대해 대칭이므로 전체 전자석의 1/4만을 모델로 설정하여 축대칭 문제로 해석할 수 있다.

3.2 설계변수 및 목적함수의 설정

최적설계를 위해서는 먼저 모델의 치수를 변수화 하여야 한다. 그림1은 변수화된 설계변수에 의한 모델의 형태를 나타낸다. 이 모델에서 전자석의 구동전류는 100A로 고정시켰다. 목적함수는 중심에서의 자속밀도, 8cm DSV위의 4점에서의 자장균일도, 전자석 내부공간의 크기 그리고 코일의 단면적 등에 대하여 총 7개를 설정하였다. 표 1은 목적함수들에 대한 식을 정리한 것이다.

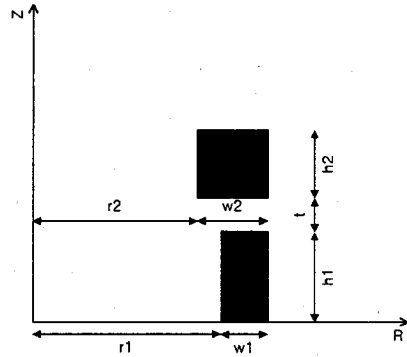


그림 3. 모델의 형상 및 설계변수
Fig. 3. Geometry and design variables of the model

목적함수	내용
$f_1 = \frac{(B_{0,0} - 2)}{2} \times 10^6$	중심 자장값 = 2T
$f_2 = \frac{(B_{40,0} - B_{0,0})}{B_{0,0}} \times 10^5$	8cm DSV 위의 네 점에서의 자장균일도
$f_3 = \frac{(B_{40,30} - B_{0,0})}{B_{0,0}} \times 10^5$	
$f_4 = \frac{(B_{40,60} - B_{0,0})}{B_{0,0}} \times 10^5$	
$f_5 = \frac{(B_{40,90} - B_{0,0})}{B_{0,0}} \times 10^5$	
$f_6 = (r2 - 45) \times 10^2$	전자석 내부의 공간확보
$f_7 = (w1 \times h1) + (w2 \times h2)$	코일의 단면적을 최소화

표 1. 목적함수에 대한 수식
Table 1. Expressions for each objective function

실제 최적화 과정은 위 함수들 각각이 최소값을 갖도록 진행되는 것이 아니고, 식 (1)과 같이 각 목적함수들의 유효평균이 최소가 되는 방향으로 최적화를 수행하였다. 또, 이 식의 값을 점검하여 수렴하거나 또는 반복회수가 어느 값 이상이 되면 최적화 과정을 종료한다. 가장 큰 가중치가 부여된 목적함수가 이 식의 값의 크기를 결정할 것이며, 결국 이 모델에서는 중심자장의 값이 목적함수에 가장 많은 영향을 주게 된다. 이렇게 목적함수들의 유효평균을 최소화하는 방식은 서로 상충되는 목적함수들을 최소화시킬 때 유리한 방법이다.

$$f = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_n^2} \quad (1)$$

3.3 최적화 과정

이 문제에서 사용된 최적화기법은 최적화 알고리즘 중 에서 가장 기본적인 할 수 있는 mixed decent/gradient method 이다[4]. 하지만 임의의 최적화기법에 대해서도 쉽게 적용 가능하다. 그림 4는 각 설계변수들이 최적값을 찾아가는 과정을 보여준다. 임의로 지정한 초기값에서 시작하여, 약 20번의 반복과정 뒤에 모든 설계변수들이 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

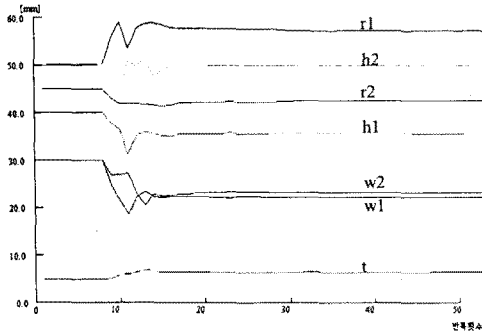


그림 4. 반복횟수에 따른 설계변수들의 변화

Fig. 4. Variation of design parameters w.r.t. iterations

그림 5는 각 목적함수들의 수렴과정을 보여준다. 그림에서 f1의 변동이 심한 것은 f1에 곱해진 가중치가 다른 목적함수들에 비해 상대적으로 크기 때문이다. 약 30번의 반복과정 뒤에 모든 목적함수들이 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다.

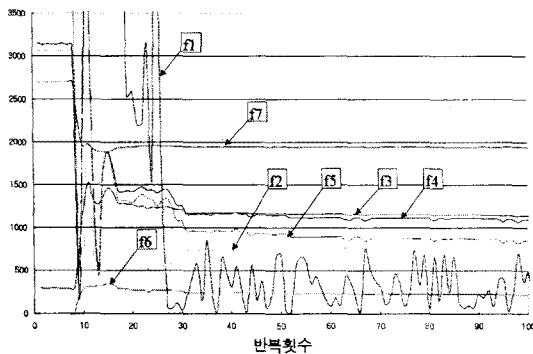


그림 5. 목적함수의 변화

Fig. 5. Variation of objective functions w.r.t. iterations

3.4 최적설계 결과

그림 6은 초기설계 모델과 최적화 된 모델을 비교한 그림이다. 각 코일의 위치와 크기에 변동이 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림에서 초기 설계값이 최적설계 결과와 거의 일치하는데 이러한 경우 수렴속도가 빠른 것을 확인할 수 있다.

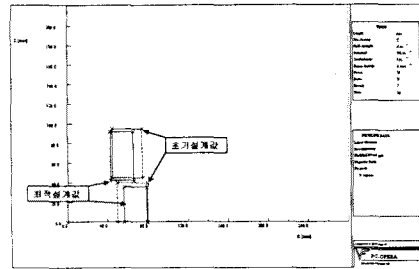


그림 6. 초기 설계값과 최적설계값의 비교

Fig.6. Comparison between the initial model and the optimized model

최적화 된 모델에 대해 전자장해석을 수행하거나 혹은 최적화 과정에서 만들어진 목적함수들에 대한 데이터들을 확인하여 전자석 중심에서의 자장값과 자장균일도 등을 계산할 수 있다. 그림 7은 중심이 원점에 있고 반경이 40mm인 1/4원(8cm DSV의 표면) 위에서 자속밀도의 크기를 표현한 그래프이다. 여기에서 angle은 R축을 기준으로 시계방향의 각도이다. 자속밀도가 목적함수 값인 2T 근방에서 최적화 되었음을 확인할 수 있다.

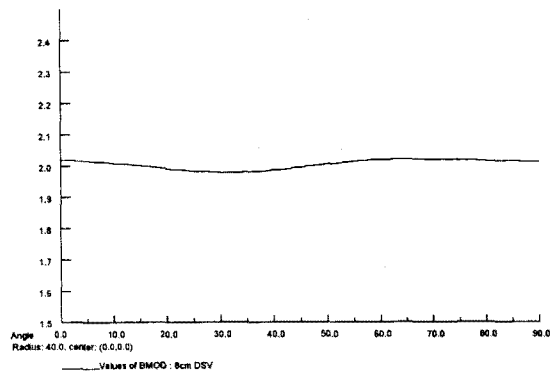


그림 7. 8cm DSV에서의 자속밀도

Fig. 7. Line graph of magnetic flux densities at 8cm DSV

4. 결론

OPERA 프로그램과 일반적인 최적화기법 프로그램들을 연계하면 전기기에 대한 효율적인 최적설계가 가능하다. 이러한 방법은 OPERA 프로그램에서 계산이 가능한 모든 분야에 적용할 수 있으며, 이미 개발된 임의의 최적화기법과 연계하여 사용할 수 있는 장점이 있다.

(참고 문헌)

- [1] 박인환, "전기기의 최적설계 기법", 대한전기학회지, 45권 2호, pp.6-10, 1996
- [2] Vector Fields, "OPERA-2d Training Course Notes", Vector Fields, Ltd., Chap 9, March 1999
- [3] 임인택, 이상진, "OPERA-3d 전처리기에서의 변수화 모델링 기법", 대한전기학회 1998 하계학술대회 논문집 A, pp.214-216, 1998
- [4] Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill, pp.278-319, 1989