

## 실험적 설계방식에 의한 C-Core Actuator의 최적설계

이현국\*, 신영준, 이기욱, 권영안  
부산대학교

### Optimal Design of C-Core Actuator Using Experimental Design

H. G. Yi\*, Y. J. Shin, K. W. Lee, and Y. A. Kwon  
Pusan National University

**Abstract** - 전자계 시스템의 설계에서 많이 활용되는 FEM은 비교적 고정도의 설계치수 산정이 가능하나 많은 계산 시간을 필요로 한다. 최근 FEM의 계산회수를 축소하는 실험적 설계방식이 많이 연구되고 있다. 본 연구에서는 C-Core Actuator 형상에 관한 최적설계를 실험적 설계 방식으로 수행한다. 설계평가는 FEM으로 수행하게 되며, 전개승설계 및 표면응답법을 적용하여 최적화를 수행한 결과의 정도를 검토하여 본 최적화 기법의 타당성을 제시한다.

검토한다. 이러한 최적화 기법은 FEM 반복계산의 회수를 감소하여 시물레이션의 비용감소 및 시간단축을 달성하며, FEM에 의해 야기되는 미분의 어려움을 해소하게 된다.

## 2. C-Core Actuator의 자속 계산

그림 1은 본 연구에서 설계사례로 사용하는 C-Core Actuator 모델이며 체적 최적화를 위한 설계 변수는 표 1과 같이 3개의 변수로 설정하였다.

## 1. 서 론

전자계 시스템의 최적화 설계과정에서 컴퓨터 시물레이션에 의한 해석방법으로서 유한요소법(FEM)의 활용은 필수적이다. FEM은 비교적 고정도의 자속 계산 및 전자계 시스템의 설계치수 산정에 활용이 가능하나 많은 계산 시간을 필요로한다. 따라서 전자계 시스템의 최적설계에 있어서 FEM 반복계산의 회수를 감소하는 문제는 시물레이션의 비용 감소 및 시간 단축을 위한 문제가 된다. 본 연구는 저비용 최적화 기법으로서 잘 알려진 실험적 설계방식을 사용하여 C-Core Actuator의 체적 최소화를 수행하는 연구이다.

제약조건을 가지는 비선형 문제의 최적화에 관한 연구로는 결정론적인 방법에서 제약조건을 페널티함수 및 배리어함수로 처리하여 무제약 비선형 문제로 변환하게 되며, 최적화법으로 다차원 탐색법, 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법, 그리고 목적함수 값에 의한 직접적인 방법으로 공액방향법 등이 있다. 목적함수의 미분치를 요구하는 경사법 및 공액경사법은 수렴이 빠른 속용성이 있으나 국지적 최적화에 도달하는 취약성이 있으며 특히 FEM을 활용하는 최적설계에 있어서 목적함수의 경사를 구하는데 어려움이 따른다. 공액방향법은 보다 강인성을 가지나 수렴이 늦어 많은 FEM 반복계산을 요구한다. 확률론적인 방법으로서 최근에 신경회로망, 유전알고리즘, 진화알고리즘 등이 활용되고 있다. 이러한 방법들은 국지가 아닌 전체의 최적화에 수렴하는 확률이 높으나 많은 평가가 수행된다.

상기한 최적화 방법을 전자계 시스템의 설계에 적용하는 여러 연구가 수행되었으나 많은 반복 계산으로 설계 과정에 어려움이 따른다. 최근에 이러한 어려움을 극복하는 연구가 관심을 가지게 되었으며 방법으로서 목적함수를 해석적인 근사로서 단순화하고 이로부터 최적해를 구하는 연구가 수행되었다(1,2).

본 연구에서 수행하는 C-Core Actuator의 최적화는 목적함수가 체적이 되며 제약조건으로는 Actuator가 받는 힘과 설계변수 등이다. 제약조건 중 Actuator가 받는 힘은 FEM에 의해 계산되는 값으로서 종래의 최적화 기법으로는 많은 FEM의 반복 계산이 요구된다. 본 연구에서는 실험적 설계방식으로서 전개승설계(Full Factorial Design)와 표면응답법(Surfce Response Method)을 이용하여 최적화를 수행하고 그 효용성을

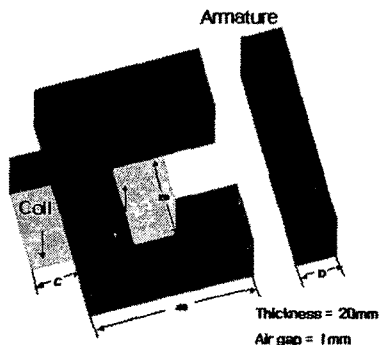


그림 1. C-Core Actuator

표 1. 모델의 설계변수

C	W	D
x1	x2	x3

모델의 자속 및 Actuator가 받는 힘의 계산은 유한요소해석 프로그램인 FLUX2D를 이용하여 계산하였으며, 모델의 요소 분할도는 그림 2와 같다.

그림 3은 본 모델에서 FEM에 의해 수행된 동자속곡선의 계산결과를 나타내고 있다.

## 3. C-Core Actuator의 최적화

본 연구에서 수행하는 C-Core Actuator의 최적화에서 목적함수는 코일의 체적, C-Core의 체적 및 Blade의 체적의 합이 되며, 각 체적의 가중치를 다르게 하여 식 (1)과 같은 목적함수를 설정하였다.

$$V_{mag}(x_1, x_2, x_3) = 5000x_1 + 2000x_2 + 100x_3 + 10x_2x_3 \quad (1)$$

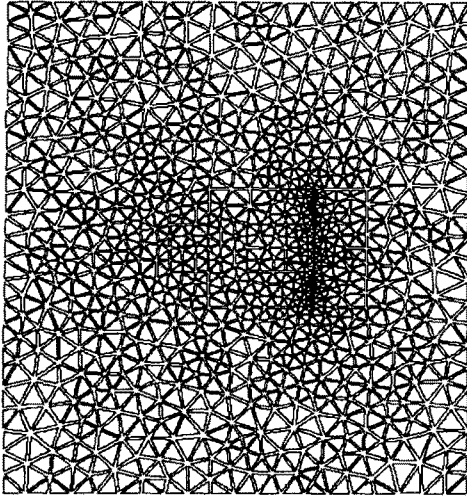


그림 2. 모델의 요소 분할도

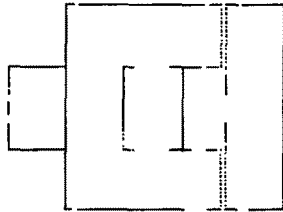


그림 3. FEM에 의한 등자속곡선의 계산결과

제약조건으로는 Actuator가 받는 힘과 설계변수의 물리적인 치수로서 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned}
 F(x_1, x_2, x_3) &\geq 50 \text{ N} \\
 10 \text{ mm} &\leq x_1 \leq 20 \text{ mm} \\
 10 \text{ mm} &\leq x_2 \leq 20 \text{ mm} \\
 10 \text{ mm} &\leq x_3 \leq 20 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

상기한 최적화 문제에서 제약조건 중 Actuator가 받는 힘은 FEM에 의해 계산되는 값으로서 종래의 최적화 기법으로는 많은 FEM 반복 계산이 요구된다. 본 연구에서는 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하고 간단화된 최적화 문제로부터 최적해를 구한다. 이러한 최적화 기법을 사용함으로써 FEM 반복계산의 회수를 감소하여 시뮬레이션의 비용감소 및 시간단축을 달성하며 FEM에 의해 야기되는 미분의 어려움을 해소하게 된다.

첫 단계로서 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하기 위하여 전계승설계와 표면응답법을 활용하여 근사함수를 결정한다. 응답표면법은 성능 또는 제품의 특성에 큰 영향을 미치는 다수의 입력 변수를 가지는 시스템에

서 품질 향상을 위한 기법으로 유용성이 입증된 방법으로서 전기기기 설계에 적용하는 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 연구에서 제약조건 중 Actuator가 받는 힘은 다음과 같은 2차 및 3차의 다항식 함수로서 응답표면을 근사화한다.

$$\begin{aligned}
 y &= f(x_1, x_2, x_3) \\
 &= a_0 + \sum_{i=1,2,3} a_i x_i + \sum_{i,j=1,2,3} a_{ij} x_i x_j
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 y &= f(x_1, x_2, x_3) \\
 &= a_0 + \sum_{i=1,2,3} a_i x_i + \sum_{i,j=1,2,3} a_{ij} x_i x_j \\
 &\quad + \sum_{i,j,k=1,2,3} a_{ijk} x_i x_j x_k
 \end{aligned} \quad (3)$$

응답표면법에서 설계 변수는 인자(factor)가 되며 인자에 대한 목적함수 등의 함수 값은 응답(response)이 된다. 인자는 연속적인 값이거나 이산적인 값이 될 수 있다. 실험을 수행하는 동안 각각의 인자는 레벨이라는 일정한 값을 가지게 된다. 실험의 회수는 인자의 수와, 각 인자의 레벨에 의해서 결정된다. 예를 들어 3개의 설계변수와 3개의 레벨인 경우에서 실험 회수는  $3^3=27$  가지가 된다. 이러한 종류의 실험은 각 인자의 모든 상호작용(interaction)이 고려되며 전계승설계라고 한다. 표 2는 전계승설계에서 배열을 나타낸다. 표 2에서  $x_1$ ,  $x_2$  및  $x_3$ 의 레벨 1, 2 및 3에 해당하는 실제 값은 각각 10mm, 15mm 및 20mm이다.

표 2. 전계승설계 배열표

	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	1	2
12	2	1	3
13	2	2	1
14	2	2	2
15	2	2	3
16	2	3	1
17	2	3	2
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	1	2
21	3	1	3
22	3	2	1
23	3	2	2
24	3	2	3
25	3	3	1
26	3	3	2
27	3	3	3

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

상기한 최적화 문제에서 제약조건중 Actuator가 받는 힘을 FEM에 의한 계산 결과로부터 근사하였다. 27번의 실험회수를 가지는 전계승설계에서 힘의 2차 및 3차 근사식은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 구해졌다.

$$F = 27.70115 - 4.73635 x_1 - 1.61726 x_2 - 1.30852 x_3 + 0.1503764 x_1^2 - 0.10306 x_2^2 - 0.10351 x_3^2 + 0.423861 x_1 x_2 + 0.160592 x_1 x_3 + 0.172772 x_2 x_3 \quad (4)$$

$$F = 0.05831 + 0.269485 x_1 + 0.285656 x_2 + 0.063855 x_3 + 0.268331 x_1^2 + 0.178244 x_2^2 + 0.157825 x_3^2 - 0.22258 x_1 x_2 - 0.28578 x_1 x_3 - 0.17498 x_2 x_3 - 0.00822 x_1^3 - 0.00318 x_2^3 - 0.00078 x_3^3 + 0.013536 x_1^2 x_2 + 0.009208 x_1^2 x_3 - 0.00423 x_2^2 x_1 - 1.7E-05 x_2^2 x_3 - 0.00799 x_1^2 x_3 - 0.00305 x_2^2 x_3 + 0.027553 x_1 x_2 x_3 \quad (5)$$

식(4) 및 식(5)에 의한 전계승설계에서 Actuator가 받는 힘의 응답표면은  $x_3 = 15\text{mm}$ 인 경우에 그림 4 및 5와 같다.

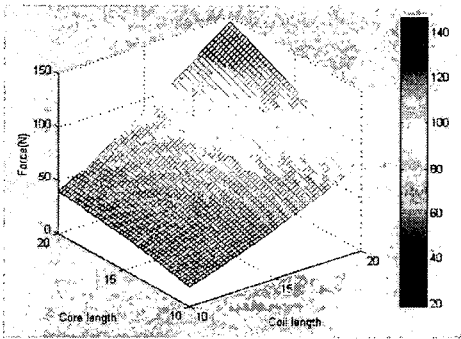


그림 4. 2차 근사에 의한 Actuator가 받는 힘의 응답표면

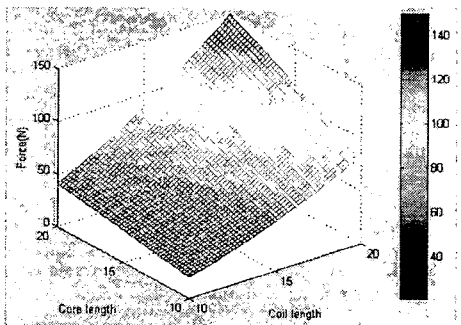


그림 5. 3차 근사에 의한 Actuator가 받는 힘의 응답표면

이상에서 제약함수를 해석적인 근사로서 단순화하고 간단화된 최적화 문제로부터 최적해를 구하기 위하여 Microsoft사의 Excel을 활용하였으며 Actuator가 받는 힘에 대한 제약조건을 50N, 75N, 100N으로 한 결과는 다음과 같다.

표 3.  $F \geq 50\text{N}$ 인 경우에 2차 및 3차 근사에서 최적결과

x1	x2	x3	F	Vmag
12.73	14.49	13.89	50.	96090
12.94	14.59	14.20	50.	97428

표 4.  $F \geq 75\text{N}$ 인 경우에 2차 및 3차 근사에서 최적결과

x1	x2	x3	F	Vmag
14.69	16.55	16.49	75.	110950
14.75	16.57	18.17	75.	111764

표 5.  $F \geq 100\text{N}$ 인 경우에 2차 및 3차 근사에서 최적결과

x1	x2	x3	F	Vmag
16.32	18.22	18.58	100.	123306
16.25	18.08	20.	100.	123079

상기한 최적결과의 설계변수를 대입하여 FEM을 수행한 결과, Actuator가 받는 힘이 50N의 제약조건인 경우에 2차 및 3차 근사에서 49.3N 및 51.3N, 75N의 제약조건인 경우에 2차 및 3차 근사에서 74.7N 및 75.5N, 그리고 100N의 제약조건인 경우에 2차 및 3차 근사에서 101.0N 및 99.7N이 구해졌다. 이상에서 Actuator가 받는 힘을 2차 및 3차로 근사한 값과 FEM에 의하여 계산한 값이 약 3%의 이내의 오차를 나타낸다. 그리고 2차 및 3차 근사에서 최적설계에 의한 최소체적의 차이는 약 2%이내의 차이를 나타낸다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 C-Core Actuator 형상에 관한 최적설계를 실험적 설계방식으로서 전계승설계와 표면응답법을 이용하여 최적화를 수행하고 그 효율성을 검토하였다. 시뮬레이션 결과에서 나타난 바와 같이 Actuator가 받는 힘에서 근사 결과와 FEM에 의한 결과의 오차가 3% 이내이며, 최적설계에 의한 최소체적의 결과는 2차 및 3차 근사에서 2% 이내의 차이를 보여 매우 양호한 결과를 나타내고 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] R. H. Myers, D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology*, Wiley Interscience Publication, 1995.
- [2] F. Gillion, P. Brochet, "Screening and Response Surface Method Applied to The Numerical Optimization of Electromagnetic Devices", *IEEE Trans. Mag.* Vol.36, No.4, pp.1163-1167, 2000.