

유전알고리즘과 반응표면법을 이용한 LIM 최적설계

전 문호, 차 재걸, 김 창업  
호서대학교

Optimum Design of LIM using Genetic Algorithm, Response Surface Method

Mun-Ho Jeon, Jea-Keul Cha, Chang-Eob Kim  
Hoseo University

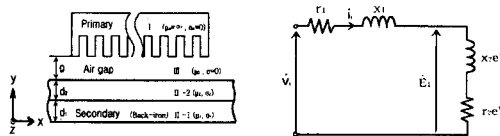
**Abstract** - In this paper the optimum design of LIM is proposed using GA, RSM for maximum thrust force and minimum weight. Four design variables(slot width, teeth width, slot depth, stack height) are chosen as independent ones. The simulation results using GA and RSM are discussed.

1. 서 론

선형유도전동기(LIM)는 19세기 중반에 발명되어 현재 까지 팔목할 만한 성과를 거두며 발전해 왔다. LIM의 설계는 많은 설계 변수들과 그 설계 변수들 간의 상호 작용 그리고 경험적인 인자들 때문에 매우 어려운 문제라 할 수 있다. 기존의 LIM설계는 장하분배법, 동가회로법 등의 설계 과정과 유한요소법 등의 수치해석을 기반으로 기본 설계를 보완하는 정도이다. 자연의 유전학과 자연선택의 원리에 근거한 최적점 탐색방법인 유전알고리즘(Genetic Algorithm), 하나 또는 그 이상의 반응변수와 정량적인 실험변수 또는 인자의 집합과의 관계를 규명하는 반응표면법(Response Surface Method), 생물학적 신경세포의 특성을 수학적으로 모델화하고 모델화된 수많은 신경세포의 연결들로서 새로운 정보시스템을 구현한 신경회로망(NN)등 많은 방법들이 연구 되고 있다[1-3]. 본 논문에서는 여러 가지 설계방법 중 GA와 RSM을 사용하여 LIM의 특성 가운데 추력 및 중량을 목적함수로 한 최적설계를 하고 이를 비교 검토 하였다.

2. LIM 최적설계

2.1 LIM 모델



(a)LIM 해석모델 (b)LIM의 등가회로  
그림 1. LIM 해석모델

그림 1은 선형 유도 전동기의 해석 모델과 등가회로이다. 그림(a)에서 'd<sub>1</sub>'은 자기 저항을 줄여 여자 전류를 감소시키기 위한 철편이며, 'd<sub>2</sub>'는 일반적으로 알루미늄 판으로 된 2차측 반작용 평판이다. 'g'는 공극이며, 1차측은 성층 철심으로 해석의 간략화를 위해 μ = ∞, σ = 0으로 가정하였다. 그림(b)에서 V<sub>1</sub>은 입력전압, r<sub>1</sub>, x<sub>1</sub>은 1차권선 저항과 리액턴스, r<sub>2e</sub>, x<sub>2e</sub>는 단부효과를 고려한 등가 2차 저항과 리액턴스를 나타내고 특성 식은 다

음과 같이 나타낼 수 있다[4].

동기 와트 :  $P_{z1} = m V_1^2 r_{2e} / Z_1^2 [W]$  (1)

추력 :  $F_x = m V_1^2 r_{2e} / V_S Z_1^2$  (2)

출력 :  $P_0 = (1-s)m V_1^2 r_{2e} / Z_1^2 [W]$  (3)

1차 입력 :  $P_1 = m V_1^2 (r_1 + r_{2e}) / Z_1^2 [W]$  (4)

1차 동손 :  $P_{c1} = m V_1^2 r_1 / Z_1^2 [W]$  (5)

2차 동손 :  $P_{c2} = sm V_1^2 r_{2e} / Z_1^2 [W]$  (6)

피상 입력 :  $P_A = m V_1^2 / Z_1 [VA]$  (7)

효율 :  $\eta = P_0 / P_1 = (1-s) r_{2e} / (r_1 + r_{2e})$  (8)

표 1과 그림 2는 설계 변수와 제약 조건을 나타냈다.

표 1. 설계 변수와 제약 조건

설계 변수	제약 조건
X <sub>1</sub> : Ws(슬롯폭)	1차전류밀도 $J_1 \leq 5 [A/mm^2]$ 치 최대 자속밀도 $B_m \leq 1.5 [T]$ LIM의 최대길이 $L \leq 500 [mm]$
X <sub>2</sub> : Zl(치폭)	$7 \leq Ws \leq 9 [mm]$
X <sub>3</sub> : ds(슬롯 깊이)	$2.5 \leq Zl \leq 3 [mm]$
X <sub>4</sub> : h(적층 폭)	$40 \leq ds \leq 50 [mm]$ $80 \leq h \leq 100 [mm]$

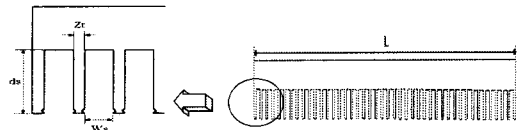


그림 2. 리니어 모터의 설계 변수

설계변수를 슬롯폭, 치폭, 슬롯깊이, 적층폭 네 가지로 두었고, 1차 전류밀도가 5[A/mm<sup>2</sup>]이하, LIM의 길이는 500[mm]이하, 치 자속밀도가 1.5[T]를 넘지 않도록 제약 조건을 주었다.

2.2 유전알고리즘

유전알고리즘은 유전학과 자연 진화를 모방한 적응 탐색법으로 1975년에 개발된 것이다. 복잡한 최적화 문제를 해결하기 위해서 유전알고리즘은 집단을 사용하고 여기에 모의 진화를 일으켜 이를 점진적으로 개선해 나가게 된다. 본 논문은 초기에 변수의 적절한 설계점의 수를 결정하고 설계점들이 적합한지 평판한 후, 교배와 돌연변이를 거쳐 초기의 설계점 수와 같은 새로운 세대를 만들어 이를 반복하여 원하는 값을 찾도록 하였다. 제약이 있는 최적화 문제를 제약이 없는 최적화 문제로 변환

하여 최적화 단계에서 제약에 대한 별도의 고려 없이 궁극적으로 제약 조건을 만족하는 최적해를 얻는 방법으로 순차 비제약 최소화 기법(Sequential Unconstrained Minimization Technique : SUMT)을 사용하여 제약 조건을 만족시켰다[5]. 또 추력과 중량의 두가지 목적함수를 둔 다중 목적함수를 사용하여 최대의 추력과 최소의 중량 값이 나오도록 프로그래밍 하였다. 그림 3은 그 결과를 나타낸 것이다.

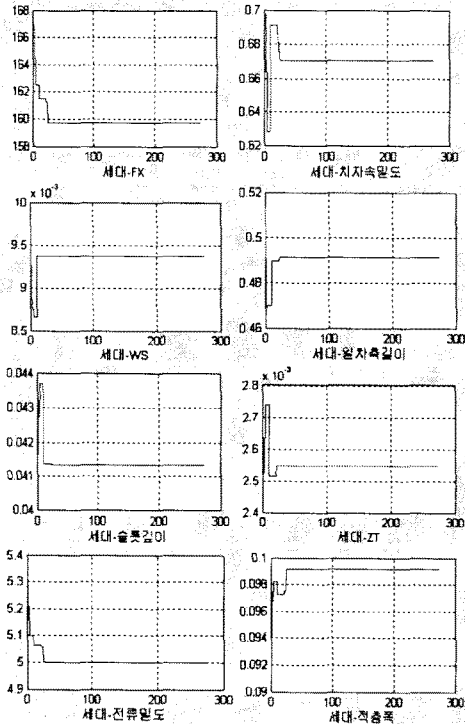
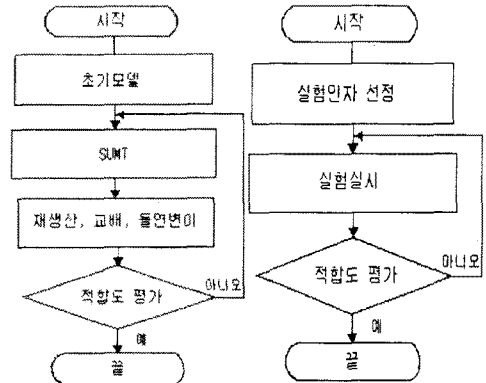


그림 3. GA를 이용한 변수들의 최적해 값

GA를 사용한 결과 슬롯폭은 9.3[mm], 치폭은 2.5[mm], 슬롯깊이는 41.3[mm], 적층폭은 99.1[mm]로 제약조건인 전류밀도, LIM길이, 치차속 밀도의 범위를 만족하면서 수렴하였다. 그 결과 추력은 159.75[N], 중량은 13.27[kg]을 얻을 수 있었다.

### 2.3 반응표면법

반응표면법은 여러개의 설계 변수가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 본 논문에서는 설계자가 관심을 가지고 있는 반응과 설계인자들의 관계를 근사적으로 모델링 하고 최적화를 위해 반응표면법을 사용하였다. 우선 실험인자들을 결정하여 어떤 인자가 유의한지를 얻고, 실험을 실시 하여 데이터를 수집한 후 수집한 데이터를 이용하여 최적해를 찾아 나갔다. 그림 4의 (a)는 유전알고리즘, (b)는 반응표면법의 설계 흐름도를 도시화 한 것이다.



(a)유전알고리즘 (b)반응표면법  
그림 4. 유전알고리즘, 반응표면법 흐름도

우선 슬롯폭, 치폭, 슬롯깊이, 적층폭 4개의 변수의 범위를 유전알고리즘과 동일하게 표 1과 같은 변수 값으로 정하고 이 범위 사이에서 변화를 가질 때 반응하는 값을 가지고 최적해를 찾았으며, 최적해를 찾기 위한 실험계획법으로는 중심합성법을 사용하였다. 그림 5는 중심합성법 중 간단한 2인자 중심합성법 이고 중심합성법의 실험 횟수는 식 (9)로 구할 수 있다.

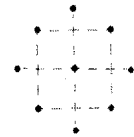


그림 5. 중심합성법

$$N = 2^k + sk + n_c \quad (9)$$

여기서,  $2^k$  는 요인 배치법의 설계를 위한 실험이고,  $sk$  는 축에서 점의 수이며,  $n_c$ 는 중심점에 대한 반복 실험 횟수 이다. 따라서 실험 횟수는 2수준 4인자 이기 때문에 31번의 실험을 한다. 31번의 실험을 통해 슬롯폭은 8.89[mm], 치폭은 2.66[mm], 슬롯깊이는 46.25[mm], 적층폭은 80.07[mm]인 변수들의 최적해를 구할 수 있었다. 그림 6에서 설계 변수들의 최적해를 나타내었다.

Optimal	Hi	Ws	ZI	Ds	Hi
D	9.0	3.0	50.0	100.0	
0.89251	[8.8997]	[2.6650]	[46.250]	[30.0776]	
Lo	8.250	2.50	46.250	80.0	
FX					
Maximum					
y = 156.4186					
d = 0.94031					
WG					
Minimum					
y = 11.5286					
d = 0.84714					

그림 6. RSM을 이용한 변수들의 최적해 값

슬롯폭, 적층폭, 슬롯깊이, 치폭의 변수 값들로 설계하면 추력은 153.86[N], 중량은 11.41[kg]이 나오며, 전류밀도, 일차속 길이, 치차속 밀도의 제약조건을 충족시키면서 초기 설계 값보다 좋은 결과 값을 얻었다. 그림 6에서  $y=156.41$ 로 실제 식(2)로 계산한 값(153.86)과 오차가 2 [%]정도로 정확한 것을 볼 수 있다. 또 회귀분석을 통해 유의 수준을 나타내어 유의한 회귀모형을 정하였다. 표 2에 회귀모형을 나타내었다.

표 2. 회귀모형

R-Sq	R-Sq(adj)	C-p	S	Ws	Zt	Ds	Hi
93.1	92.3	3.6	13.972	X		X	X
88.7	88.7	15.3	16.878	X	X	X	
92.1	92.1	5.0	14.092	X	X	X	X

표 2에서 S는 회귀모형의 적합도를 측정하는 기준이 되는데, 값이 작을수록 모형의 적합도가 좋다는 것을 나타낸다. 따라서 치폭(Zt)과 적층폭(Hi)이 설계에 덜 유효하므로 슬롯폭(Ws)과 슬롯깊이(Ds)의 관계만을 등고선도를 통해 나타내었고, 치폭과 적층폭은 중간 값을 넣어 주었다. 그 결과의 등고선도를 그림 7에 나타내었다.

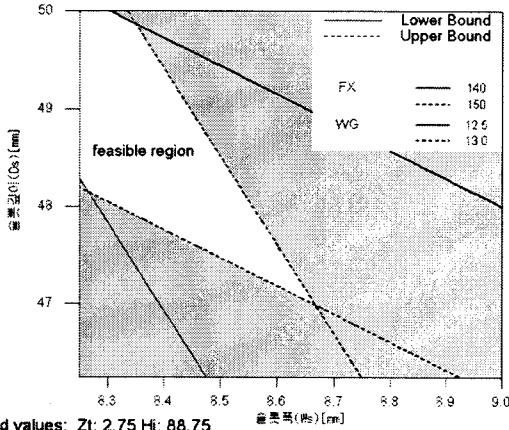


그림 7. RSM의 등고선도

그림 7에서 추력은 점선, 중량은 실선으로 만나는 좌측 상단 하얀 부분이 반응변수들을 만족 시키는 수준 값의 변화이다. 표 3은 선형 유도전동기의 설계사양을 초기모델과 유전알고리즘, 반응표면법을 이용하였을 때의 설계 변수들을 나타낸 것이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 GA, RSM을 이용하여 LIM 최적 설계를 하였다. 계산결과 GA는 추력이 159[N], 중량이 13.3[kg]이고 RSM은 추력이 153[N], 중량이 11.4[kg]으로 나타났다. GA는 변수들의 범위에 제약을 받지 않지만 RSM은 변수 범위에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었고, RSM은 31번의 실험만으로 최적설계 결과를 얻어 GA보다 시간이 다소 감소되었다. 시뮬레이션 결과 LIM 최적설계에서 RSM을 이용하기 위해서는 변수 범위를 잡기 위한 사전지식이 필요하다. 따라서 GA를 사용하는 것이 더 효과 적이었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호:R-2004-B-128) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 임달호, 박승찬, 장석명, 이철직, "신경회로망과 SUMT를 이용한 선형유도전동기의 설계기법", 대한 전기학회 논문지, vol.43,no.8,pp.1244-1251, 1994.
- [2] 진강규, "유전알고리즘과 그 응용", 교우사, 2000.

- [3] 이레테크미니템사업부, 세한미디어주식회사 공저, "Minitab 실무 완성", 2000.
- [4] 이주현, "유전알고리즘과 신경회로망을 이용한 선형 유도전동기 최적 설계", 호서대학교 석사학위논문, pp.3-41, 2002.
- [5] 임달호, 이철직, 박승찬, "등가회로법과 SUMT를 이용한 편축식 선형유도 전동기의 설계변수 최적화", 대한 전기학회 논문지, vol.42, no.5, pp.340-343, 1993.

표 3. 선형유도전동기 설계사양

설계 변수	초기모델	GA	RSM
1차 전압 [V]	220	220	220
주파수 [Hz]	60	60	60
1차 전류 [A]	7.23	7.2	7.9
1차 길이 [m]	0.495	0.491	0.476
극 수	6	6	6
슬롯 깊이 [mm]	47	41.3	46.25
슬롯 폭 [mm]	8.8	9.37	8.89
슬롯 피치 [mm]	12	11.91	11.55
치 폭 [mm]	3.2	2.54	2.66
슬롯폭/슬롯피치	0.733	0.786	0.77
단절률	5/6	5/6	5/6
치 차속밀도 [T]	0.4615	0.67	0.73
반코일 길이 [mm]	190	188	166
1차 저항 [ $\Omega$ ]	3.0967	2.92	2.71
1차 리액턴스 [ $\Omega$ ]	8.5240	6.75	7.15
적층폭 [mm]	100	99.1	80
공극 [mm]	4	4	4
Back-iron 두께 [mm]	6	6	6
알루미늄 두께 [mm]	2	2	2
추력 [N]	137	159.7	153.8
1차축 철심중량 [kg]	17.89	13.3	11.4