

유전알고리즘을 이용한 전자기 펌프용 선형유도전동기의 최적설계

김창업 *홍성옥
호서대학교 전기공학과

Optimum Design of a Linear Induction Motor for Electromagnetic Pump using Genetic Algorithm

Chang Eob Kim * Sung Ok Hong
Department of Electrical Engineering, Hoseo University

Abstract - This paper presents an optimum design of a linear induction motor(LIM) using genetic algorithm(GA). Sequential unconstrained minimization technique(SUMT) is used to transform the nonlinear optimization with constraints to a simple unconstrained problem. The objective functions of LIM such as trust, weight are optimized and the result was applied to the design of linear induction pump.

1. 서론

본 논문은 선형유도전동기(LIM)의 액체금속 이송 응용분야에 관한 연구이다[1,2]. 1차 시작기로 선형유도전동기의 이송시험 결과를 기준으로 삼아 실제 적용할 LIM 설계를 유전알고리즘을 이용하여 최적화 하였다.

유전알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간을 조사해 나감으로써 주위환경에 알맞은 가장 적절한 해를 얻고자 하는 방법이다. 그러므로 이 알고리즘은 기존의 순차적 탐색의 알고리즘과 달리 여러점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색을 행한다는 점에서 다극점 문제에 있어서 극복수렴 할 가능성이 적다. 또한 확률적인 방법에 의한 의사결정으로 최적점 탐색을 위한 어떠한 가능성도 배제하지 않는 점이 장점이다[3].

본 논문에서는 공극 100[mm]일 때 설치장소의 제약 조건에서 최대추력을 발생하는 LIM을 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다.

2. 편축식 선형유도전동기의 설계

2.1 설계조건

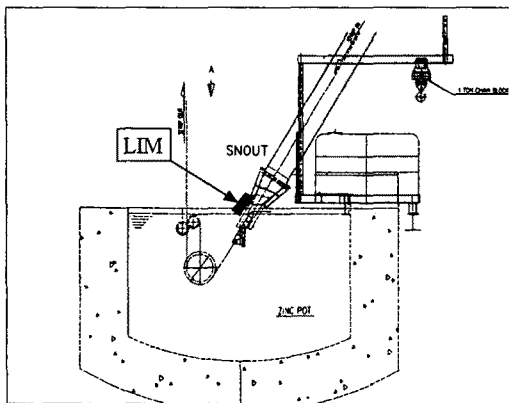


그림 1. 실제 공정의 단면도와 LIM 설치 위치

그림 1은 실제 공정의 단면도이다. 그림에서 SNOUT 위쪽 표면에 장착되어 있는 것이 설계한 LIM이다. SNOUT 밖에서 SNOUT 안의 Ash를 끌어내기 위한 표면 유속을 만들어야 하므로 공극이 필연적으로 커질 수밖에 없다. 그러므로 장소에 대한 제약조건이 발생하며 본 논문에서는 LIM의 폭 300[mm]이하, 길이 1000[mm]이하를 설계 조건으로 산정 하였다.

2.2 기초설계 변수 산정

기초설계 변수를 산정하기 위하여 설계의 기준이 되는 1차 시작기의 표면 유속을 실험을 통하여 알아보았다 [4]. 실험결과 공극 30[mm]일 때 약 0.24[m/s], 20[mm]일 때 약 0.5[m/s]가 됨을 알 수 있었다. 1차 시작기의 동기속도가 12.96[m/s]이기 때문에 slip은 약 0.96으로 산출 할 수 있다. 이 결과값을 기준으로 장하분배법을 이용하여 실제의 설치 위치인 공극 100[mm]에서 slip 1에서 60[N]이상이 되는 LIM을 설계 하고자 한다.

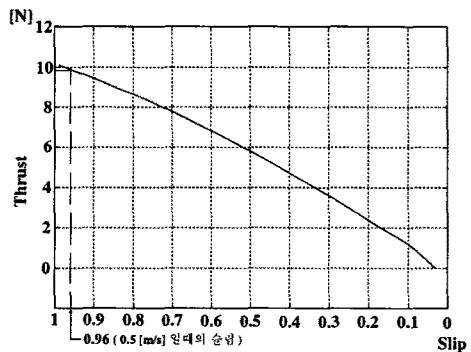


그림 2. 2차 시험기의 슬립에 대한 추력곡선

3. 유전알고리즘을 이용한 설계변수의 최적화

유전알고리즘은 자연의 유전학과 자연선택의 원리에 근거한 최적점 탐색법으로서 최근들어 기계나 전동기의 설계에 다각도로 활용되고 있는 최적화 기법이다[3].

3.1 목적함수의 변환

유전알고리즘을 이용한 최적화 기법도 실제적인 최적화 문제를 해결하는 데에는 몇 개의 제약조건이 포함되는 것이 일반적이다. 일반적으로 제약이 있는 최적화 문제를 제약이 없는 최적화 문제로 변환하여 최적화 단계에서 제약에 대한 별도의 고려없이 궁극적으로 제약조건을 만족하는 최적해를 얻는 방법으로 penalty method가 쓰인다[5].

일반적인 비선형 최적화 프로그래밍의 문제에서 penalty method는

$g_j(X) \leq 0$ ($j=1,2,\dots,m$)의 조건하에서 $f(X)$ 를 최소화시키는 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 을 구한다.

penalty method는 내점법과 외점법이 있다. 내점법은 초기점이 반드시 제약조건을 만족하는 허용영역(feasible region)에 있어야 한다. 그러므로 초기값이 랜덤하게 주어지고 제약조건에 아무런 정보없이 여러 위치에서 전역적으로 탐색을 하는 유전알고리즘은 외점법이 적절하다. 그러므로 목적함수를 제한이 없는 형태로 변환하면,

$$P(X) = f(X) + r_p \cdot \sum_{i=1}^m [\max(0, g_i(X))]^2 \quad (1)$$

$$r_p = r_{p0}, r_{p1}, r_{p2}, \dots, r_{pk} \rightarrow \infty$$

여기서, $r_p(r_p > 0$: 최소화, $r_p < 0$: 최대화,)를 penalty계수라 한다. 이 계수를 순차적으로 증가시켜 가면서 점점 제약의 강도를 높인다. 목적함수와 제약함수는 다음과 같다.

$$f_1(X) = F_X \quad (2)$$

$$f_2(X) = V \quad (3)$$

$$g_1(X) = J - b_1 \quad (4)$$

$$g_2(X) = B_m - b_2 \quad (5)$$

$$g_3(X) = L - b_3 \quad (6)$$

$$g_4(X) = -F_X + b_4 \quad (7)$$

위의 함수에서 F_X 는 추력[N], V 는 1차축 철심의 중량[kg], J 는 전류밀도 [A/mm], B_m 은 치자속밀도[T], L 은 1차축의 길이[m]이고 b_1, b_2, b_3, b_4 는 각각 5.0, 1.5, 1.0, 60이며, r_p 는 6으로 하였다.

3.2 전자기 펌프용 선형유도전동기의 설계변수

본 논문에서는 공장자동화에 응용되는 전자기 펌프에 대한 설계에 있어서, 목적함수를 최대추력, 중량으로 두고 슬롯폭(Ws), 치폭(Zt), 슬롯깊이(ds), 적층폭(SL)을 독립변수로 선정하여 길이 1000[mm]이하, 폭 300[mm]이하인 공간 제약조건과 전류밀도 5.0[A/mm]이하, 치자속밀도 1.5[T]이하인 전기적 제약조건, 그리고 치폭이 3[mm]이상인 기계적 제약조건에서 최적화를 수행시켰다. LIM의 특성계산은 등가회로에 의한 근사특성 계산식[2]를 이용하였다.

3.3 최적화 수행결과

유전알고리즘을 수행하기 전에 몇 가지 기본 값을 설정해야 한다. 첫 번째로 각 변수들에 대한 스트링의 길이를 선정한다. 여기서는 47[bit]의 길이의 염색체 90개가 사용되었다. 그리고 교배확률은 0.25로 하고, 돌연변이 확률은 0.015로 하였다.

그림 3은 최대추력을 목적함수로 알고리즘을 수행한 결과이다. 50세대 이전은 penalty가 비교적 적은 구간으로 $P(X)$ 값과 $f(X)$ 값이 많이 차이가 나고 있다. 즉, 제약조건을 만족하지 못하고 있는 것이다.

그림 4는 슬롯폭에 대한 그래프이다. 이 그래프는 100세대까지 많이 변화하고 있다. 그러나 100세대가 넘어

가면 일정한 값으로 수렴하고 있다. 그림 5는 치폭에 대한 그래프이다. 세대수가 100세대 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그림 6과 그림 7은 슬롯깊이와 적층폭에 대한 최적화 과정으로 모두 100세대를 넘으면 일정한 값으로 수렴한다. 그림 8은 세가지 제약함수의 값을 하나의 그래프에 표현하고 있다. 모든 값이 제한치 이하로 수렴하는 영역이 약 100세대이나 그림 3에서 150세대부근에서 $P(X)$ 와 $f(X)$ 가 약간 틀리는 구간이 있다. 따라서 최적구간은 200세대 이후로 볼 수 있고 여기서 infeasible과 feasible를 정의 할 수 있다. 그림 9은 추력 60[N] 이상의 제약조건에서 목적함수를 1차축 중량으로 하였을 경우 최적화 수행과정에서의 목적함수값의 변화 및 수렴과정을 나타내었다.

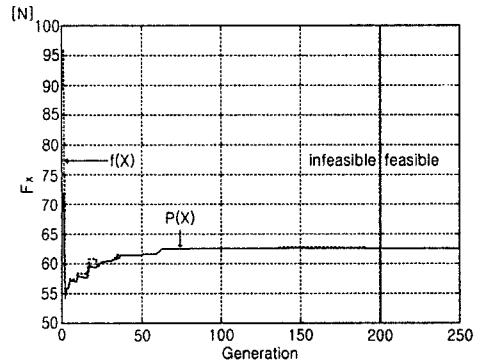


그림 3. 목적함수(추력)의 최적화

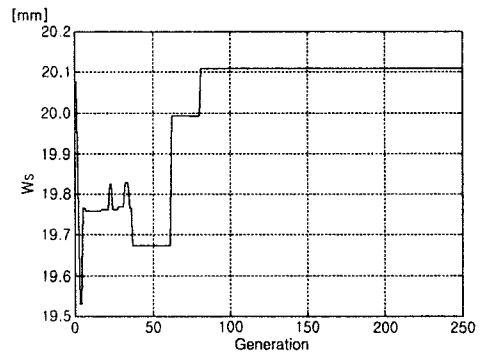


그림 4. 독립변수(슬롯폭)의 최적화

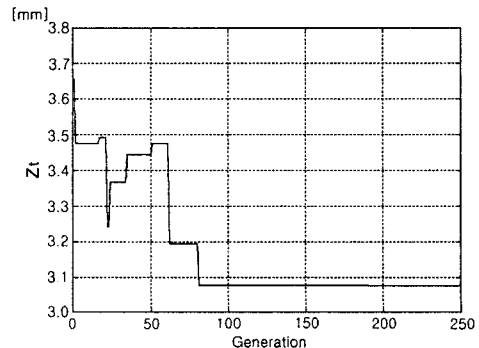


그림 5. 독립변수(치폭)의 최적화

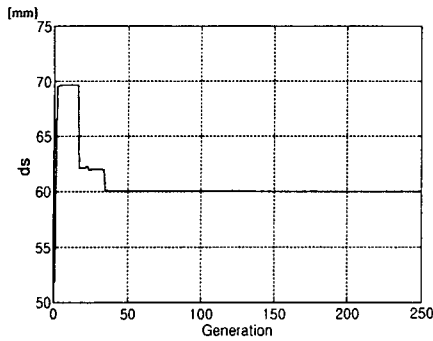


그림 6. 독립변수(슬릿깊이)의 최적화

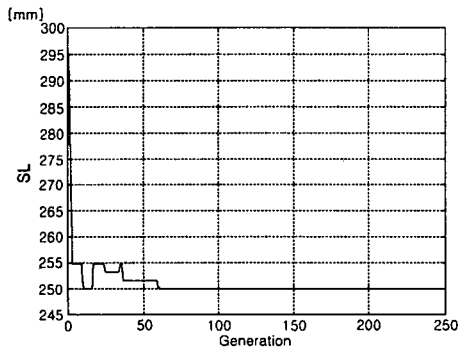


그림 7. 독립변수(적층폭)의 최적화

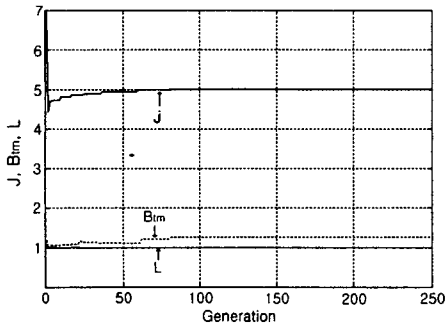


그림 8. 제약함수(전류밀도, 치자속밀도, 1차축길이)

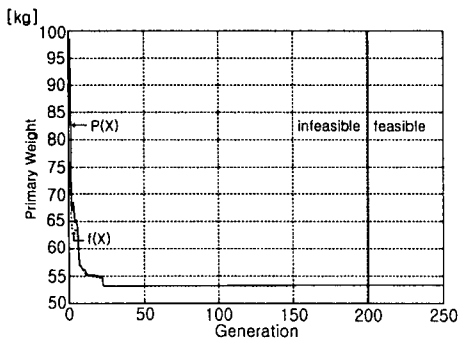


그림 9. 목적함수(중량)의 최적화

표 1은 GA를 이용하여 각 목적함수에 대한 최적화 과정을 수행한 후의 설계사양을 나타내고 있다. 여기서 각 목적함수에 따라 설계 결과의 차이가 있었다.

표 1. 전동기 설계사양

분류	명칭 및 단위	제약 조건	고정 변수	독립 변수	목적함수	
					추력	중량
정격	선간전압 [V]		○		220	220
	주파수 [Hz]		○		60	60
	1차전류 [A]				241.5	241.6
	전류밀도 [A/mm ²]	≤5			5	5
	추력 [N]	≥60			62.6	60.7
1차	모터길이 L [m]	≤1000			1.000	0.985
	상 수		○		3	3
	극 수		○		4	4
	극간격 [mm]				208.7	205.6
	철심적층두께 SL [mm]			○	250	250
	철심높이 [mm]				81.68	79.50
	매극매상의 슬릿수		○		3	3
	슬릿폭/슬릿피치				0.8673	0.8687
	슬릿폭 Ws [mm]			○	20.1	19.8
	슬릿피치 [mm]				23.2	22.8
	치폭 Zt [mm]	≥3.0		○	3.1	3.0
	슬릿깊이 ds [mm]			○	60	58.7
	단절률			○	7/9	7/9
축	코일당 Turn수				5	5
	상당적렬 Turn수				60	60
	반코일 길이 [mm]				493.4	489.9
	1차저항 [Ω]				0.0327	0.0336
	1차누설리액턴스 [Ω]				0.1803	0.1795
	치외자속밀도 Bm [T]	≤1.5			1.2635	1.2985
	1차축중량 [kg]				56.52	53.48
기계적 공극 [mm]			○	100	100	
2차축	용융아연깊이 [mm]		○		300	300

4. 결 론

용융금속 이송을 목적으로 한 전자기 펌프용 선형유도 전동기의 설계변수를 유전알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 이송에 필요한 추력은 공극 100[mm]일 때 slip 1 부근에서 10[N]이상으로 정하고 추력은 최대, 중량은 최소가 되는 LIM을 설계하였다. 일반적인 LIM에서와 달리 공극이 크고 2차축의 도전율이 작아 1차축의 슬릿폭, 치폭, 적층폭을 설계 변수로 잡았다. GA의 염색체수를 90개로 했을 때 약 200세대에서 수렴함을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- (1) 장석명, 우종섭, 김형규, "원자로 냉각재 이송을 위한 평판형리니어 유도펌프의 설계", 대한전기학회추계학술대회 논문집, pp.10-12, 1998.
- (2) 김창업, 홍성욱, 김성원, 심동준, "용융금속 이송용 편축식 선형유도전동기의 설계 및 해석", 대한전기학회추계학술대회 논문집, pp.46-48, 1999
- (3) 류근배, 최영준, 김창업, 김성우, 임달호, "유전알고리즘을 이용한 편축식 유도전동기의 최적설계", 대한전기학회추계학술대회 논문집, pp.923-928, 1993
- (4) 김창업, "선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석", 한국조명·전기설비학회논문집 vol.14, no.2, pp.36-42, 2000
- (5) Garret N. Vanderplaet, Numerical Opimization Techniques For Engineering Design, McGraw-Hill, 1984.
- (6) David E. Goldberg, Genetic Algorithms, Addison Wesley, 1989