

박테리아 생존전략기반 최적화 기법을 이용한 자기부상 이송장치의 전자석 설계

Design of the Electromagnet of Maglev using Optimization Algorithm Based on Bacterial Survival Strategies

조 재 훈* · 김 용 태†
(Jae-Hoon Cho · Young-Tae Kim)

Abstract - This paper introduces a new optimal design method using a bacterial survival strategies for a electromagnet of Maglev transportation vehicle. Usually, an electromagnetic suspension which has more advantages than electro dynamic suspension is used in Maglev systems. However, the structural constraints must be considered in the optimal design of an electromagnet for electromagnetic suspend system. In this paper, the optimal design method of a electromagnet based on a bacterial survival strategies optimization algorithm to design the electromagnet satisfying the structural constraints. The effectiveness of the proposed method was verified by Matlab simulations and the simulation results show that the proposed method is more efficient than conventional methods.

Key Words : Magnetic levitation system, electromagnet, Bacterial survival strategies, Electromagnetic suspension, Optimization algorithm.

1. 서 론

최근 자기부상기술의 발전으로 국.내외 자기부상열차는 물론 반도체 이송장비 등의 타분야 적용에 대한 관심이 크게 증가하고 있다[1-2]. 자기부상 기술은 비접촉 이송 및 무분진 등의 장점으로 인하여 기존의 이송기술에 비해 큰 장점들을 가지고 있으며 크게 반발식 자기부상방식과 흡인식 자기부상방식으로 구분된다[3]. 흡인식 자기부상방식은 자성체 레일과 차체에 고정되어 자기력을 조절하는 전자석으로 이루어졌으며, 전자석과 레일의 거리를 측정하여 자기력 조절함으로써 제어된다. 또한 흡인식은 자석의 반발력을 이용하는 방법에 비해 구조가 간편하고 비용적인 측면에서 장점이 있으나 제어에 어려운 단점을 가지고 있다. 또한 제어기의 성능이 우수하더라도 부상 전자석의 고유한 변수들의 전자기적 설계가 적절하게 이루어지지 않는다면 우수한 제어 및 응답 성능들을 보장하기는 어렵다. 기존에 제안된 부상전자석의 설계 기법들은 크게 전자석의 등가자기회로 및 전자기적 수학적 해석을 통한 설계와 지능형 최적화 기법을 이용한 기법들이 많이 연구되어지고 있다[4,5].

등가자기회로를 이용한 설계기법의 경우 외형 규격이 선정되면 수학적으로 해석이 쉽게 할 수 있다는 장점이 있는 반면에 외형의 규격이나 파라미터들이 추가되었을 경우 설계자가 반복적으로 수정 및 해석을 해야 하기 때문에 설계의 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하고 더 정밀한 외형 설계 및 특성들을 해석하기 위하여 최근에는 다양한 지능형 최적화 기법들을 이용한 전자석 설계 기법들이 제안되어지고 있다[6,7]. 지능형 최적화 기법을 이용한 방법은 전자석 파라미터들을 다양하게 선정할 수 있고 목적함수(Object function) 또는 비용함수(Cost function)을 목적에 맞게 선정함으로써 전자석의 성능이 원하는 특성을 가지도록 설계할 수 있는 장점을 가진다. 박테리아 생존전략 기법은 박테리아의 생존을 위한 행동을 모방한 지능형 최적화 알고리즘으로서 박테리아의 상호 정보교환에 의한 군집 활동 최적화 기법이다[8]. 박테리아 생존전략 기법에서 전자석의 파라미터들은 박테리아의 위치정보로 대응되며 박테리아가 생존하기 위한 최적의 위치정보는 목적에 맞는 최적 전자석들의 파라미터들이 된다.

본 논문에서는 안정적인 제어가 요구되는 자기부상 물류이송장치에 적합한 전자석의 설계를 위하여 박테리아 생존전략 최적화 기법을 이용한 방법을 제안한다. 제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 Matlab 프로그램을 이용하여 전자석 모델을 설계하였으며 일반적으로 알려진 지능형 최적화 기법들과 비교하였다. 모의 실험결과 제안된 기법이 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)[9] 및 입자군집최적화(Particle Swarm Optimization)[10]에 비해 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical, Electronics and Control Engineering, Hankyong National University, Korea.
E-mail: ytkim@hknu.ac.kr

* Smart Logistics Technology Institute, Hankyong National University, Korea.

Received : January 16, 2016; Accepted : May 22, 2016

2. 자기부상 이송장치를 위한 전자석 설계

2.1 자기부상 시스템

부상 전자석의 모델링 및 수학적 해석을 위하여 자기등가회로법이 많이 이용된다. 그림 1에서 누설자속이 없는 것으로 가정하고, 자로는 철심의 중심을 통과한다고 가정하면 부상 전자석의 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = 2R_\delta + R_r + R_c \quad (1)$$

$$\phi_\delta = \frac{Ni}{R_t} \quad (2)$$

$$B_\delta = \frac{\phi_\delta}{A_\delta} \quad (3)$$

$$F_0 = \frac{\partial W}{\partial g_0} = \frac{B^2}{2\mu_0} S = \frac{B^2}{2\mu_0} 2A_g = \frac{B^2}{\mu_0} A_g = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{4} \left(\frac{i_0}{g_0} \right)^2 \quad (4)$$

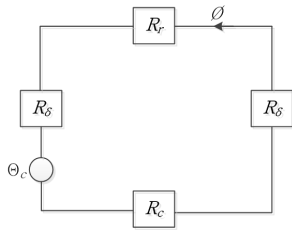
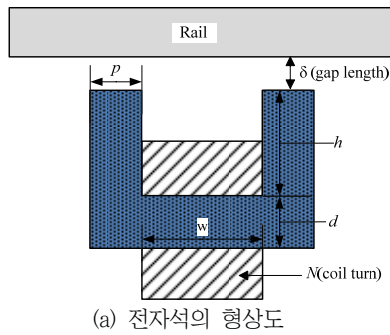


그림 1 전자석의 형상도 및 자기등가회로
Fig. 1 Electro magnetic and magnetic equivalent circuit

여기서, R_r 레일의 자기저항을, R_c 는 코어의 자기 저항, R_δ 는 공극의 자기 저항, ϕ 는 공극의 자속, B_δ 는 공극의 자속밀도, A_g 는 전자석의 단면적, μ_0 는 진공투자율, F_0 는 흡입력을 나타낸다.

2.2 자기등가회로법을 이용한 전자석 설계

본 논문에서는 그림 2와 같은 실험실 레벨의 자기부상시스템의 전자석 설계를 대상으로 하였으며, 4개의 전자석으로 구성하

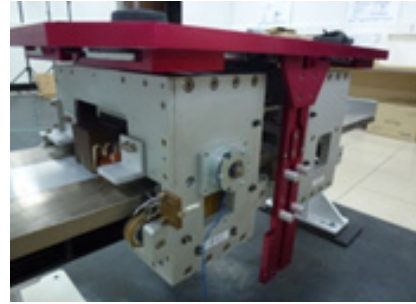


그림 2 실험실 레벨의 프로토타입 자기부상시스템
Fig. 2 The prototype maglev system of laboratory level

여 총 하중 200kg을 운반할 수 있는 전자석 설계에 대하여 설명한다. 본 자기부상 시스템의 전자석 설계를 위하여 초기 사양을 선정하고 자기회로법에 의해서 계산된 설계 사양을 표 1에 나타내었다.

일반적으로 전자석 설계를 위하여 초기 사양의 결정은 전자석의 목적에 따라 달라 질 수 있으며, 다양한 변형된 방법들이 존재한다. 본 논문에서는 요구되는 부상력과 권선 수, 정격전류, 권선의 직경을 초기 값으로 선정하여 전자석을 설계하는 방법을 설명한다[11].

전체 중량과 전자석 수를 이용하여 부상 전자석 1개에서 요구되는 부상력을 아래의 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$F = \frac{T_{mass}}{N_m} \times G [N] \quad (5)$$

여기서, T_{mass} 는 총 중량, N_m 은 RGV의 전자석 수, G 는 중력 가속도를 나타낸다. 전자석의 코일의 권선 수를 700회로 선정하면 아래의 식 (6)으로 초기공극에서의 자속밀도 B_0 를 구할 수 있다.

$$B_0 = \frac{\mu_0 N i_0}{2g_0} [T] \quad (6)$$

권선수는 임의로 결정하여 시행착오법으로 설계 될 수도 있으나 본 논문에는 코어를 먼저 선정하는 것으로 가정하고 코어(SM20C)의 자기포화 특성을 고려한 최대자속밀도 1[T]와 정격전류를 3.6A로 결정하고 권선수를 선정하였다.

전자석의 단면적을 구하기 위하여 식 (4)와 식 (6)을 이용하면 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 전자석의 단면적 길이와 폭의 제한 조건들을 고려하여 전자석의 크기를 적절하게 선택할 수 있다.

$$A_g = F \frac{\mu_0}{B_0^2} [mm^2] \quad (7)$$

전자석의 단면적을 선정 후 권선이 감겨지는 창 면적(window area, W_e)을 선정하기 위하여 식 (8)을 이용하여 전자석의 기자력과 권선 직경(dp)과 식 (9)를 이용하여 전류밀도(J)를 계산하고 최종적으로 식 (10)을 이용하여 창의 면적(W_e)을 구한다.

$$M = N i_0 = \frac{2g_0}{\mu_0} B_0 [AT] \quad (8)$$

$$J = \frac{4i_0}{\pi d_p^2} [A/mm^2] \quad (9)$$

$$J = \frac{Ni}{Ff^* W_c}, \quad W_c = \frac{Ni}{Ff^* J} \quad (10)$$

자기부상시스템의 전체 하중을 최소화 하기 위하여 전자석의 무게도 고려되어야 하며 ρ_i 와 ρ_w 를 각각 전자석과 권선의 밀도로 가정하면 아래와 같은 수식으로 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} g_c &= \rho_i 2(h+d)p + wdl \\ g_w &= \rho_w SF2l + \pi(d+h)wh \\ W_T &= g_c + g_w \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 l 의 전자석 극(pole)의 길이, g_c 와 g_w 는 각각 코어와 권선의 무게, W_T 는 전자석의 총 중량이다. 또한 시정수 계산을 위하여 정격 동작점(nominal operating point: i_0, g_0)에서의 인덕턴스 L_0 와 시정수 τ 는 아래의 수식으로 계산될 수 있다.

$$L_0 = \frac{N^2 \mu_0 A_\delta}{2\delta_0} \quad (12)$$

$$R_{coil} = \rho \frac{l_c}{A_{coil}}, \quad \tau = \frac{L_0}{R} \quad (13)$$

여기서, R_{coil} 권선저항, l_c 권선의 길이, A_{coil} 권선의 단면적, ρ 고유저항(동선 : $1.7241e-8[\Omega m]$)을 나타낸다.

표 1 자기회로법에 의한 설계 값

Table 1 The parameter for the method of magnetic circuit

Specification	Values	Units
Total Mass [T_{mass}]	200	kg
No. electromagnet [N_m]	4	ea
Force [F_d]	500	N
Current density [J]	2.94	A/mm ²
Norminal curretn [i_d]	3.6	A
No. Winding [N]	700	turn
Max. current density [Bmax] Core(SM20C)	1	Tesla
Norminal gap [g_d]	3	mm
Diameter of coil [d_p]	1.25	mm
Fill factor [F_f]	0.6	

3. 박테리아 생존 알고리즘

3.1 박테리아의 생존을 위한 최적화

박테리아는 생존을 위하여 최적의 환경과 먹이를 찾아 항상 무작위로 이동하는 박테리아의 주화성 반응을 한다. 이동 후 그 위치가 생존에 유리한 환경인지 아닌지를 평가한 후 좋은 환경이면 그 곳에서 멈춰 생활을 하고 아니면 다시 임의의 방향으로 이동하게 된다. 좋은 환경에서의 박테리아들은 세포분열, 형질전환, 접합, 형질도입과 같은 재생산과 돌연변이를 하게 된다. 그러나 유리한 환경을 찾지 못한 박테리아들은 제거된다[12].

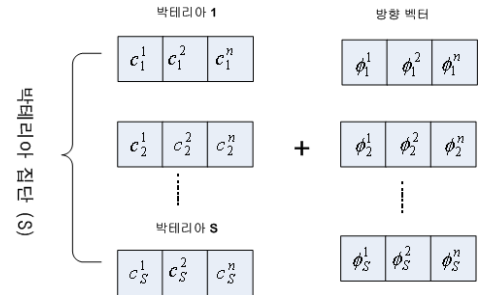


그림 3 박테리아 집단의 초기 구조.

Fig. 3 Initial Structure of Bacteria population.

박테리아의 생존을 위한 행동들은 기존의 다른 진화 알고리즘들이 최적화 문제에서 평가함수를 이용하여 어떤 임의의 해공간의 값들을 평가하는 과정들과 매우 유사하다. 만약 어떤 평가함수 $J(\theta)$ 를 최소화 하는 문제에 박테리아 생존 알고리즘들을 적용한다면 θ 는 박테리아의 위치(최적화 문제에서는 임의의 후보해)로 생각할 수 있고, $J(\theta)$ 가 작을수록 박테리아에 좋은 환경(최적화 문제에서는 최적해), $J(\theta)$ 가 커질수록 좋지 않은 환경으로 생각할 수 있다.

박테리아 생존 메커니즘을 최적화 문제에 적용하기 위하여 다음과 같이 정의한다. j, k, l 은 각각 주화성 단계, 재생산 단계, 제거-분산 동작으로 각각 정의하고 다음 식으로 표현한다.

$$P(j, k, l) = \theta^i(j, k, l), \quad i = 1, 2, \dots, S. \quad (14)$$

식 (14)는 박테리아 집단 S 에서 l 번째 제거-분산 동작, k 번째 재생산, j 번째 주화성 단계를 가지는 i 번째 박테리아의 위치 (θ)를 말한다. 여기서 우리는 i 번째 박테리아의 위치 $\theta^i(j, k, l)$ 에서의 평가된 값(예를 들어 환경의 최적성)을 $J(i, j, k, l)$ 으로 표현 할 수 있다. 최적화 문제에서는 비용함수로 생각할 수 있다.

$C(i) > 0, i = 1, 2, \dots, S$ 는 주화성 단계에서 한 번 이동할 때의 이동 길이로 정의한다. $\phi(j)$ 는 주화성 단계 동안 박테리아가 방향 전환을 할 때 선택되어지는 무작위적인 방향을 나타낸다. 위의 기호들을 사용해서 아래에 식 (15)처럼 다음 단계의 박테리아의 행동을 표현한다. 식 (15)는 어떤 임의의 박테리아가 전

주화성 단계에서(j)에서 다음 주화성 단계($j+1$)에는 무작위 방향에서 $C(i)$ 만큼 이동 된다는 것을 의미한다. 만약 $\theta^i(j+1, k, l)$ 에서 $J(i, j+1, k, l)$ 가 $\theta^i(j, k, l)$ 에서 보다 더 우수한 값을 가지면 같은 방향에서 $C(i)$ 크기의 길이를 작게 하여 더 정밀한 탐색을 할 수 있고, 더 나쁜 값을 가진다면 $C(i)$ 의 길이를 크게 하여 좀 더 광범위한 탐색을 할 수 있도록 조절할 수 있다. 이러한 주화성 반응은 정해진 주화성 단계에 도달하거나 사용자가 원하는 목적을 달성하면 주화성 반응은 멈추게 된다.

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\phi(j) \quad (15)$$

여기서, $C(i)$ 는 i 번째 박테리아 이동할 때의 거리를 나타내며, $\phi(j)$ 는 j 번째 주화성 반응에서의 각 박테리아들이 이동하는 방향을 나타내며, 방향은 무작위로 설정된다. 한번 설정된 방향은 주변 환경이 계속적으로 좋아진다면 방향을 유지하고 그렇지 않다면 방향이 임의로 재설정 된다.

3.2 정족수 인식의 모델링

박테리아들 상호간의 의사소통 및 동족 인식을 정족수 인식(Quorum sensing)이라고 한다. 이는 박테리아 생존에서 세포들의 밀도나 상태를 인지하여 서로 간에 전달 가능한 작은 펩타이드나 분자 등의 의사 전달 물질들을 서로 주고받아 그것을 통하여 신호를 교환함으로써 특정한 유전자들의 발현과 조절을 수행하는 일련의 동작을 말한다. 이 활동에 의해서 박테리아의 분열이 조절되어 개체들 수가 유지되거나 늘어난다[13]. 박테리아의 분열은 주변의 박테리아의 밀도와 환경의 적합도에 따라 조절된다. 이러한 박테리아의 반응들과 조절 기능들은 생물학적으로 명확하게 규명되어지지 않았으나, 본 논문에서는 주변 환경에 대한 각 박테리아들의 분열 확률과 분열되는 자손의 수를 정의하여 박테리아들의 분열 메커니즘을 모델링 하였다. 박테리아의 정족수 인식을 최적화 문제에 적용하기 위하여 식 (15)와 같이 정의한다. 정의된 식 (15)는 박테리아(최적화 문제에서 최적 후보해)의 분열 확률로서 최적해를 탐색하는 동안에 자기의 상태(자신의 적합도)와 주변의 박테리아의 밀도(자신 근처의 다른 박테리아의 수)에 따라 자신의 분열 확률이 결정된다. 자신이 우수한 박테리아이며 주변의 다른 박테리아들의 수가 적을 경우 더 자주 분열하게 되고 임의의 방향을 생성하여 최적해 근처에서 더 다양하게 탐색을 시도하게 된다. 분열된 자손 박테리아는 정해진 회수만큼(N_{qs}) 이동하여 부모 박테리아에 비해 우수한 값을 가지면 생존하여 부모 박테리아와 교체되며 그렇지 못할 경우 소멸된다.

그림 4는 제안한 박테리아 생존 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 식 (16)에서 D_i^j 는 주화성 단계에서의 i 번째 박테리아의 분열 확률로서 우수한 박테리아이며 주변의 다른 박테리아가 적을수록 더 높은 값을 가지게 되고 더 많은 자손 박테리아로 분열된다. M 은 분열 단계 동안 최대 박테리아 수를 나타내며 설계자에 선정되고 큰 값을 가질수록 우수한 박테리아가 분열될 확률이 더

높아진다. w_B 박테리아의 적합도와 밀도의 가중치로서 큰 값을 가지면 박테리아의 밀도에 따라 박테리아가 분열할 확률이 높아지며, 작은 값이면 박테리아의 목적함수의 적합도에 따라 분열할 확률이 높아진다.

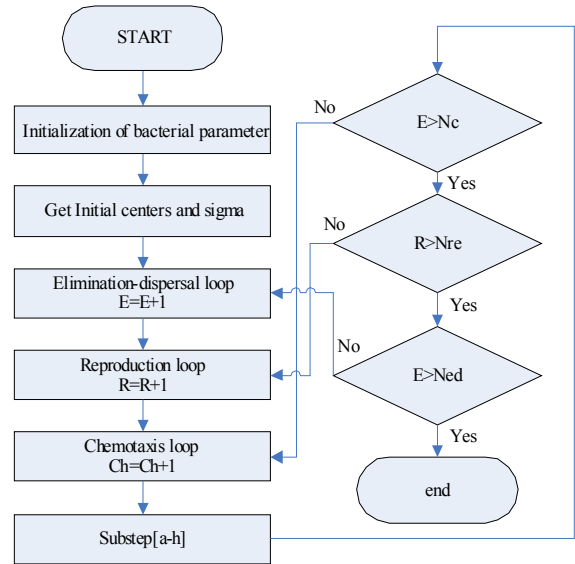


그림 4 박테리아 생존 알고리즘의 순서도.
Fig. 4 Flowchart of Bacterial Foraging algorithm.

$$D_i^j = w_B \left(1 - \frac{R^j}{M} \right) + (1 - w_B) \left(\frac{F_i^j}{F_{best}^j} \right) \quad (16)$$

- D_i^j : j 번째 주화성 단계에서의 i 번째 박테리아의 분열 확률
- R^j : j 번째 주화성 단계에서 박테리아 수
- M : 분열 단계 동안 최대 박테리아 수
- F_i^j : j 번째 주화성 단계에서의 i 번째 박테리아의 적합도 값
- F_{best}^j : j 번째 주화성 단계에서의 전체의 박테리아 중 가장 우수한 적합도 값
- w_B : 박테리아의 적합도 값과 밀도 사이의 가중치

M 과 w_B 는 정확도와 문제의 목적에 따라 설계자에 의해 적절히 선택되어질 수 있다. 예를 들어, 더 우수한 해를 찾기 위해서는 M 을 높게 선택하여 분열되는 박테리아 수를 높여 더 다양한 후보 해들을 탐색하고, 가중치 w_B 의 선택은 문제공간의 크기에 따라 적절히 선정될 수 있다.

4. 제안한 박테리아 생존 최적화 기법

제안된 박테리아 생존기법의 순서는 다음과 같으며 정족수 인식 단계는 QS step으로 표현하였다.

[step 1] BF 알고리즘의 초기의 파라미터들 ($n, S, N_c, N_{re}, N_{ed}, P_{ed}, C(i), \phi^i$) 을 정의한다.

- 여기서, n : 문제 해공간의 차원.
- S : Bacteria의 집단 수.
- N_c : 주화성 단계의 반복 횟수.
- N_{re} : 재생산 단계의 반복 횟수.
- N_{ed} : 제거-분산 반응의 반복 횟수.
- P_{ed} : 제거-분산의 비율
- $C(i)$: 주화성 반응에서의 단위 이동 크기.
- ϕ^i : 박테리아의 이동 방향.

[Step 2] 제거-분산 loop: $l = l + 1$

[Step 3] 재생산 loop: $k = k + 1$

[Step 4] 주화성 loop: $j = j + 1$

[QS step 1] 목적함수 식 (15)를 이용하여 분열확률을 계산하고 우수한 값 순으로 정렬한다.(분열이 진행될 때 우수한 박테리아부터 분열을 시작하여 최대 박테리아 수(M)에 도달할 경우 분열확률이 줄어들어 최대 개체 수를 조절한다.)

[QS step 2] 정렬된 순서대로 D_i^j 값에 따라 각 박테리아의 분열을 수행한다.

[QS step 3] 분열된 자손 박테리아의 임의의 이동방향을 생성한다. (식 (14)에서 $\phi(j)$ 를 생성)

[QS step 4] 정해진 횟수만큼(N_{qs}) 이동(Run)과 방향전환(Tumble)을 수행하면서 적합도를 평가.

[QS step 5] 부모 박테리아보다 더 우수한 값을 가지는 자손 박테리아는 부모박테리아와 교체 그렇지 못할 경우 소멸.

[step 4-1] 부모박테리아의 정해진 초기방향으로 계속적으로 이동(Run)하면서 적합도 함수를 계산한다. 적합도 함수가 더 좋은 값으로 계속 나오면 그 방향으로 계속 이동하고 더 낮은 적합도가 나오게 되면 그 방향으로의 탐색을 중단하고 $F_{last} = F(i, j, k, l)$ 에 적합도 함수를 저장한다.

[step 4-2] 방향전환(Tumble)을 위하여 새로운 무작위적인 방향을 생성한다. 무작위적인 방향은 -1에서 1 사이의 값 중에서 선택되어진다.

[step 4-3] 새로운 위치 $\theta^i(j+1, k, l)$ 에서의 적합도 함수 $F(i, j+1, k, l)$ 를 계산한다.

[step 5] If $j < N_c$, go to step 4. (설계자에 의해 정해진 주화성 횟수나 목적함수 값을 만족하면 반복을 멈추고 그렇지 않으면 step4로 가서 주화성 및 정족수 인식을 반복한다)

[step 6] If $k < N_{re}$, go to step 3. (설계자에 의해 정해진 재

생산 횟수만큼 반복)

[Step 7] If $l < N_{ed}$, then go to step 2 (설계자에 의해 정해진 제거-분산 횟수만큼 반복)

End

5. 모의 실험 및 결과

제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 단순유전자 알고리즘 [9]과 일반적인 입자군집최적화기법 [10]을 이용하여 비교하였다. 표 2는 제안된 박테리아 생존 최적화 기법과 비교 알고리즘들의 초기 파라미터를 나타내며 일반적으로 자주 사용되는 값들로 선정하였다[14][15]. 자기부상 RGV의 전자석 설계는 초기 요구조건들과 목적에 따라 다양한 기법들이 제안되어져 왔으나 본 논문에서 전자석의 부상 제어 성능을 고려한 능형 최적화 기법 기반의 전자석 최적 설계를 제안한다. 부상제어의 우수한 응답성을 위해서 우선적으로 고려되어야 하는 설계 변수는 전자석의 시정수이며 전자석의 총 중량을 포함한 식 (11)~(12)를 이용하여 계산된다. 또한 단순 유전자 알고리즘의 경우 입자군집알고리즘과 제안된 박테리아 생존최적화기법에 비해 목적함수의 계산 횟수가 작아 공정한 비교가 어렵다. 따라서, 제안된 알고리즘과 입자군집 알고리즘의 경우 초기 집단을 100, 유전자알고리즘은 400으로 수

표 2 최적화 기법들의 초기 파라미터.

Table 2 Initial parameters of the optimization algorithm

Symbol	Parameter	Value
Bacterial survival algorithm		
S	: The initial bacteria population size for BPO	100
QS-S	: The initial bacteria population size for QS-BPO	40
N_c	: Chemotactic steps	100
N_{qs}	: The number of run and tumble in QS step	2
N_{re}	: The number of reproduction steps	2
N_{ed}	: The number of elimination-dispersal events	2
P_{ed}	: Elimination-dispersal with probability,	0.5
M	: The number maximum of bacteria in solution space during differentiation step	100
w_B	: Weight between density and fitness values of bacteria	0.5
D_{ss}	: The iteration size of division step.	4
Genetic algorithm(GA)		
P	Population size	400
P_c	Probability of crossover	0.7
P_m	Probability of mutation	0.05
Particle Swarm Optimization(PSO)		
	Particle	100
C_1	social Coefficient	2
C_2	social Coefficient	2
w	Inertia Weight	0.5

행하여 성능을 비교하였다. 본 논문에서는 식 (17)의 목적함수를 이용하였으며 전자석의 설계에서 요구되어지는 조건들을 벌점함수를 이용하여 최적의 설계 변수값들을 탐색할 수 있도록 하였다.

$$Obj_F = \alpha W_T + (1 - \alpha)\tau + \sum_{i=0}^N P \quad (17)$$

식 (17)에서 Obj_F는 목적함수, α 는 가중함수, WT는 전자석의 총 중량 제한요구조건 수, N은 제한조건 수, P는 벌점 값을 나타내며 요구조건을 만족하면 0, 만족하지 않으면 100을 부과하여 목적함수 값이 최소가 되는 설계 값들을 탐색하도록 하였다. 2장에서 언급한 실험실 레벨의 자기부상시스템의 전체 길이와 폭을 감안하여 본 논문에서 사용된 전자석 최적 설계의 조건들은 표 3과 같이 선정하였다. 표 4는 제안된 기법과 자기등가회로기법 및 일반적인 지능형 최적화 기법과의 성능 비교 결과를 나타낸다. 표 4의 자기회로법은 제한조건 하에서 시행착오법으로 계산한 결과이며 제안된 기법과 다른 알고리즘들은 초기집합들을 변경하여 20번의 실험을 통한 평균값과 표준편차를 나타낸다.

표 4에서 알 수 있듯이 초기집합의 변화에 가장 민감한 성능 변화를 보인 것은 입자군집최적화 기법이며, 제안된 기법이 가장 작은 성능 변화를 보임을 알 수 있었다. 또한 20번의 실험에서 유전자 알고리즘은 가장 우수한 목적함수 값은 2.957, 입자군집최적화기법은 3.003, 제안된 기법은 2.909로서 제안된 기법이 가장 우수하였다. 그림 5는 최적의 목적함수가 탐색되었을 때의 세대 변화에 따른 각각의 알고리즘의 탐색성능을 보인다. 그림 5에서 알 수 있듯이 제안된 알고리즘이 가장 우수한 탐색 성능을 보임을 확인할 수 있다. 표 4와 그림 5에서 제안된 알고리즘이 자기회법이나 다른 최적화 기법에 비해 전자석의 총 중량과 시정수를 최적으로 하는 전자석 설계 문제에서 더 우수한 성능을 보

표 3 전자석 설계 요구조건

Table 3 The design constraints for electromagnets.

parameter	Lower	Upper	Units
The width of core [p]	0.01	0.1	meter
The height of window [h]	0.04	0.1	meter
The height of bottom core [d]	0.01	0.1	meter
The width of window [w]	0.01	0.1	meter
The length of the magnetic pole [l]	0.1	0.5	meter
The number of turns [N]	600	1000	Turns
Flux density [B]	0.5	1	Tesla

표 4 최적화 기법들의 결과 비교

Table 4 Comparisons results between the optimization methods

Method	p	h	d	w	l	N	B	Weight[kg]	τ [ms]	Obj-func
자기회로법	0.015	0.045	0.013	0.013	0.14	700	1	6.27	36.4	4.957
GA	0.01 $\pm 2.24 \times 10^{-4}$	0.045 $\pm 1.70 \times 10^{-3}$	0.01 $\pm 8.82 \times 10^{-4}$	0.02 $\pm 9.00 \times 10^{-4}$	0.01 $\pm 1.05 \times 10^{-3}$	608 ± 5.1	0.78 $\pm 4.96 \times 10^{-2}$	3.70 $\pm 9.23 \times 10^{-2}$	23.7 $\pm 6.98 \times 10^{-4}$	3.0353 $\pm 5.92 \times 10^{-2}$
PSO	0.011 $\pm 3.2 \times 10^{-3}$	0.055 $\pm 2.34 \times 10^{-2}$	0.026 $\pm 3.34 \times 10^{-2}$	0.028 $\pm 3.20 \times 10^{-2}$	0.106 $\pm 1.39 \times 10^{-2}$	689 ± 138	0.891 $\pm 2.34 \times 10^{-2}$	3.50 ± 0.180	30.8 $\pm 9.60 \times 10^{-3}$	4.2825 ± 1.26
제안된 기법	0.01 ± 0	0.040 ± 0	0.01 ± 0	0.0175 $\pm 8.32 \times 10^{-4}$	0.1 ± 0	602 $\pm 6.33 \times 10^{-2}$	0.864 $\pm 4.66 \times 10^{-2}$	3.53 $\pm 4.66 \times 10^{-2}$	22.8 $\pm 4.71 \times 10^{-4}$	2.9095 $\pm 6.82 \times 10^{-4}$

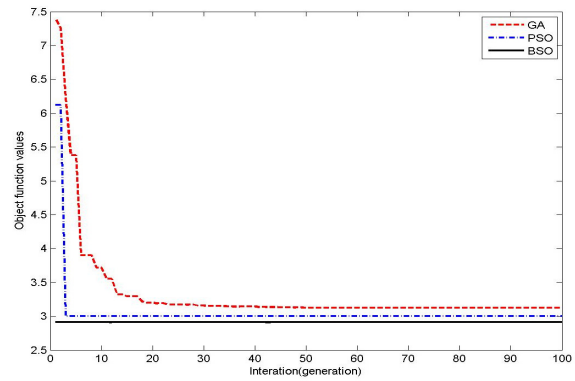


그림 5 세대수에 따른 각각의 알고리즘의 목적함수 값 변화

Fig. 5 The objective function values of each method according to the iteration

임을 알 수 있다. 그러므로 제안된 기법을 이용하여 선정된 설계 변수들을 이용하여 전자석을 설계할 경우 자기부상시스템에서 총 중량과 전류 제어기의 빠른 응답 특성을 보장하여 소비전력과 안정적인 제어를 할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 자기부상 이송장치에 적합한 전자석의 설계를 위하여 박테리아생존전략 최적화 기법을 이용한 전자석 최적 설계 기법을 제안하였다. 전자석 설계의 목적함수로서 부상제어에 큰 영향을 미치는 시정수와 전자석의 총 중량을 제한조건을 만족 하면서 시정수와 중량을 최소로 하는 설계 변수들을 선정할 수 있도록 목적함수를 제안 하였다. 제한 조건들은 실제 실험실 규모의 자기부상이송장치의 길이와 폭을 감안하여 선정되었으며 제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 자기등가회로기법, 유전자 알고리즘 및 입자군집최적화기법과 결과를 비교하였다. 또한 공정한 비교를 위하여 유전자 알고리즘의 초기집합을 400으로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과에서 제안된 기법이 다른 기법들에 비해 더 우수한 성능을 보임을 확인하였고 향후 제안된 기법으로 선정된 변수들을 이용하여 전자석을 설계 할 경우 자기부상이송장치의 총 중량과 시정수가 감소하여 소비 전력과 빠른 응답 특성 면에서 더 우수한 성능을 보일 것으로 예상된다.

References

[1] G. B Cho, H. L Baek, G. K Oh, Y. D Kim, H. J Kim, "Design of Magnetically Levitation Electromagnet Conveying Non-contact Steel Plate", Proceedings of the KIEE autumn annual conference 1995, pp. 107-109, 1995.

[2] S-H Lee, I-S Sin, Y-H Cho, "Magnetic Force Characteristics Analysis of Magnet for Magnetic Levitation Conveyor," Proceedings of the KIEE autumn annual conference 2008, pp. 99-101, 2008.

[3] C-H Kim, et al., "Levitation and thrust control of a Maglev LCD glass conveyor", IECON 2011, pp. 610-615, 2011.

[4] H-W Cho, C-H Kim, J-M Lee, Hyung-Suk Han Analysis on the Levitation Force Characteristics of Longitudinal Flux Type Levitation Magnet using Equivalent magnetic Circuit model, The transaction of the KIEE, Vol. 60, No. 11, pp. 2236-2245, 2011.

[5] Tzeng YK, Wang T, "Optimal design of the electro-magnetic levitation with permanent and electro magnets. IEEE Trans Magn", Vol. 30, pp. 4731-4733, 1994.

[6] H-W Lim, G-S Cha, "Optimal Design of a Levitation Magnet for an OLED System by using Evolution Strategy" The transaction of the KIEE B, Vol. 55B, No. 11, pp. 541-546, 2006.

[7] G-S Cha, H-W Lim, "Design of a levitation magnet with large flux leakage by using evolution strategy", Proceedings of the KIEE spring annual conference 2006, pp. 106-108, 2006.

[8] Passino, K. M., Biomimicry of Bacterial foraging for distributed optimization, University Press, Princeton, New Jersey, 2001.

[9] Song, Young-Won, Kyebyung Lee, and Chang-Hyun Park. "Optimal Placement of Distributed Generation Units Considering Voltage Sags." The Transactions of KIEE Vol. 62, No. 11, pp. 1505-1510, 2013.

[10] W-K Kim, S-K Oh, H-K Kim, "A Study on Feature Selection in Face Image Using Principal Component Analysis and Particle Swarm Optimization Algorithm", The Transaction of KIEE, Vol. 58, No. 12, pp. 2511-2519, 2009.

[11] Cho, Jae-Hoon, and Yong-Tae Kim. "Optimal design of electromagnet for Maglev vehicles using hybrid optimization algorithm." Soft Computing, Vol. 19, No. 4, 901-907, 2015.

[12] Cho, Jae-Hoon, Lee, Dae-Jong, Chun, Myung-Geun, "Parameter Optimization of Extreme Learning Machine Using Bacterial Foraging Algorithm", Journal of KIIS, Vol. 60, No. 2, pp. 398-406, 2007.

[13] H.J. Bremermann, "chemotaxis and optimization," J. Franklin Inst., Vol. 297, pp. 397-404, 1974.

[14] CHO, Jae Hoon, et al. "Bacterial foraging with quorum sensing based optimization algorithm". IEEE International Conference on FUZZ-IEEE 2009, pp. 29-34, 2009.

[15] Jae-Hoon Cho, Yong-Tae Kim, "Design of PID Controller for Magnetic Levitation RGV Using Genetic Algorithm Based on Clonal Selection", Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 22, No. 2, pp. 239-245, 2012.

감사의 글

본 연구는 2011년도 경기도의 경기도지역협력연구센터 (GRRC)사업 [(GRRC 환경2011-B01)]에 의하여 이루어진 결과로서 관계부처에 감사드립니다.

저 자 소 개



조 재 훈 (Jae-Hoon Cho)

2011년 : 충북대학교 제어계측공학과 박사
 2011년 ~ 현재 : 한경대학교 스마트물류기술 연구센터 연구교수
 관심분야 : Intelligent Optimization algorithm, Pattern Recognition, Renewable source & Smart grid
 Phone : 031-670-5674
 E-mail : jhcho@hknu.ac.kr



김 용 태 (Young-Tae Kim)

1991년 : 연세대학교 전자공학과(학사)
 1993년 : KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학 석사)
 1998년 : KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학 박사)
 1998년 ~ 2000년 : (주)삼성전자
 2006년 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구
 2002년 ~ 현재 국립 한경대학교 전기전자제어공학과 교수
 관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 물류자동화
 Phon : 031-670-5292
 E-mail : ytkim@hknu.ac.kr