

개선된 Auto-Tuning 니칭 유전 알고리즘을 이용한 영전자식 권상기의 최적 설계

論 文

57-5-8

Optimal Design of Electro-Permanent Magnet Lifter Using Improved Auto-Tuning Niching Genetic Algorithm

李 範 柱* · 徐 章 皓* · 郭 尙 燁* · 李 相 燁* · 鄭 炫 教†

(Bum-Joo Lee · Jang-Ho Seo · Sang-Yeop Kwak · Sang-Yeop Lee · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - This paper presents the mechanism of the machine and the numerical result of attractive force in the Electro-Permanent Magnet Lifter (EPML) and an improved niching Genetic Algorithm (GA) applying the concept of auto-tuning and detecting traces. Population size and both (right and left) niche radii of each peak in an asymmetrical objective function can be determined automatically. The validity of the proposed method is verified by simulation results.

Key Words : Auto-tuning, Detecting trace, 니체 반경, Niching Genetic Algorithm, Electro-Permanent Magnet Lifter

1. 서 론

철재를 운반하는데 유용하게 사용되는 권상기 시스템은 전자석식과 영전자식 시스템으로 구분된다. 전자석식 권상기는 무게가 무겁고, 전력소모가 많으며 정전 시 사고가 발생할 수 있는 위험이 있는 등 문제점이 있으나 고온의 철재 운반이 가능하여 아직까지 산업계에서 많이 사용되고 있는 기기이다. 영전자식 권상기는 전자석식보다 가볍고, 경제적이며 안전성이 뛰어난 기기로서 전자석식 권상기를 대체할 기기로 각광받고 있는 반면, 고온의 철재운반에는 제한사항이 많은 단점이 있다[1].

본 논문에서는 영전자식 권상기의 부피를 최소화하는 최적 설계를 위해 개선된 auto-tuning 니칭 유전 알고리즘을 제안하였다.

유전 알고리즘은 적자생존과 자연도태의 생물학적 이론을 바탕으로 해서 이룩된 최적화 알고리즘으로 설계 변수의 집합을 생물의 개체로, 목적함수를 그 개체가 지니는 적합도로 설정하여 전역 최적점을 찾는 최적화 기법이다[2][3]. 하지만, 유전 알고리즘은 전역 최적점과 함께 국소 최적점도 동시에 탐색할 필요가 있는 전기기기 최적 설계 문제를 해결하는 데는 한계가 있다. 따라서 생태계에서 자신만의 영역과 특성을 지니는 개체들의 특징을 나타내는 니체(niche) 개념을 도입하여 다양한 국소 최적점을 탐색할 수 있는 니칭 유전 알고리즘이 제안되었으며, Sharing, Crowding, RTS, Restricted Competition Selection(RCS)과 같은 다양한 니칭 유전 알고리즘이 소개되었고[4]-[19] 실제 전기기기 최적화에 응용되고 있다[6][7][20]-[23].

본 논문에서는 기존의 니칭 유전 알고리즘의 문제점을 분

석하고 비대칭 목적 함수에 대해서도 모든 국소 최적점들을 정확하게 탐색할 수 있는 개선된 알고리즘을 제안하였다. 또한 함수 호출 횟수를 줄여 전체 계산 시간을 크게 줄일 수 있는 Detecting Trace 개념을 새롭게 제안하였다. 수학적 시험 함수의 최적화 문제에 실제 적용하여 기존의 알고리즘과 비교하여 정확성과 우수성을 검증하였으며, 아울러 부피 최소화를 목적함수로 하는 영전자식 권상기의 최적 설계에 적용하여 실제 전기기기 설계에 유용함을 보였다.

2. 기존의 니칭 유전 알고리즘

기존의 니칭 유전 알고리즘은 유전 알고리즘 내에 결정론적 알고리즘을 결합하여 수렴 속도의 향상을 꾀하였고 결정론적 알고리즘에 의해 찾아진 각각의 엘리트 개체마다 각기 다른 니체 반경을 자동으로 정할 수 있기 때문에 목적 함수의 모양을 알지 못하는 실제의 최적화 문제에 쉽게 적용할 수 있다.

그림 1에 니칭 유전 알고리즘의 피크 탐색 과정을 나타내었다. 어떤 세대에 개체 6개(p1-p6)가 그림 1과 같이 분포하였다고 가정하면 이때 각 개체들에 결정론적 방법인 패턴 탐색 알고리즘을 적용하여 피크를 탐색하게 되어 개체 p1-p3까지는 E1으로 수렴하게 되고 p4-p6까지는 E2로 수렴하게 된다. 이때 E1과 E2가 이전 세대에 중복된 피크가 아니라면 엘리트 집단에 포함되게 된다. 또한, E1과 E2에 대한 니체 반경은 가장 멀리 이동한 점과의 거리로 결정되어 즉, E1의 니체 반경은 가장 원거리를 이동한 p1과의 거리가 되고(R1) E2의 니체 반경은 p6과의 거리가 된다(R2). 이 후 세대에서 발생한 개체가 니체 반경 내에 위치한다면 그 개체의 적합도를 "0"으로 부여함으로써 불필요한 탐색과정을 생략하고, 이후의 자식세대 구성에도 포함되지 않도록 한다.

* 學生會員 : 서울대학교 공과대학 전기역학 연구실

† 교신저자, 正會員 : 서울대 공대 전기컴퓨터공학부 정교수

E-mail : hkjung@snu.ac.kr

接受日字 : 2008年 1月 28日

最終完了 : 2008年 4月 16日

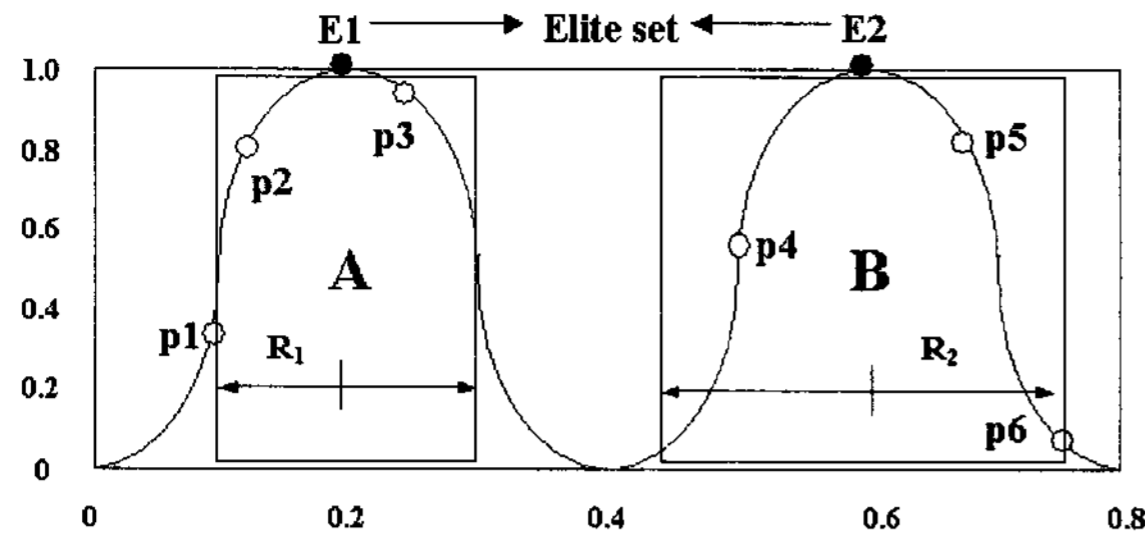


그림 1 Auto-tuning 니칭 유전 알고리즘의 원리
Fig. 1 Principle of auto-tuning niching genetic algorithm

3. 개선된 니칭 유전 알고리즘

3.1 비대칭 목적함수

전술한 니칭 유전 알고리즘은 개체들과 엘리트간의 가장 먼 이동거리를 좌우 동일한 니체 반경으로 결정한다. 이는 목적 함수의 모양이 각 피크점을 기준으로 대칭인 경우에는 모든 최적점들을 찾아낼 수 있지만, 비대칭 목적 함수의 경우에는 피크 탐색에 실패할 가능성이 발생하게 된다. 그림 2에 비대칭 목적 함수에서 기존 알고리즘의 피크 탐색 과정을 도시하였다. 세 개의 개체(p1-p3)가 각기 패턴 탐색 알고리즘을 통해 엘리트 개체인 E1을 찾게 되고 가장 멀리 이동한 거리인 R1을 니체 반경으로 결정하게 되어 왼쪽 니체 반경안에 위치한 국소 최적점 탐색에 실패하게 된다.

이러한 비대칭 목적 함수에 적용하기 위해서 각 엘리트 개체마다 좌우 다른 두개의 니체 반경을 가지도록 개선하였다. 그림 3에 개선된 알고리즘의 니체 반경 결정 과정을 나타내었다. 각 개체들이 피크를 탐색할 때 이동거리 뿐만 아니라 탐색 방향도 저장하여 각 엘리트들의 좌우 니체 반경을 자동적으로 결정하게 된다. 또한 그림 3에서 보듯이 다음 세대에 생성된 개체 p5에 의해 E1의 오른쪽 니체 반경이 새롭게 갱신되지만 왼쪽 니체 반경 결정에는 영향을 주지 않게 된다.

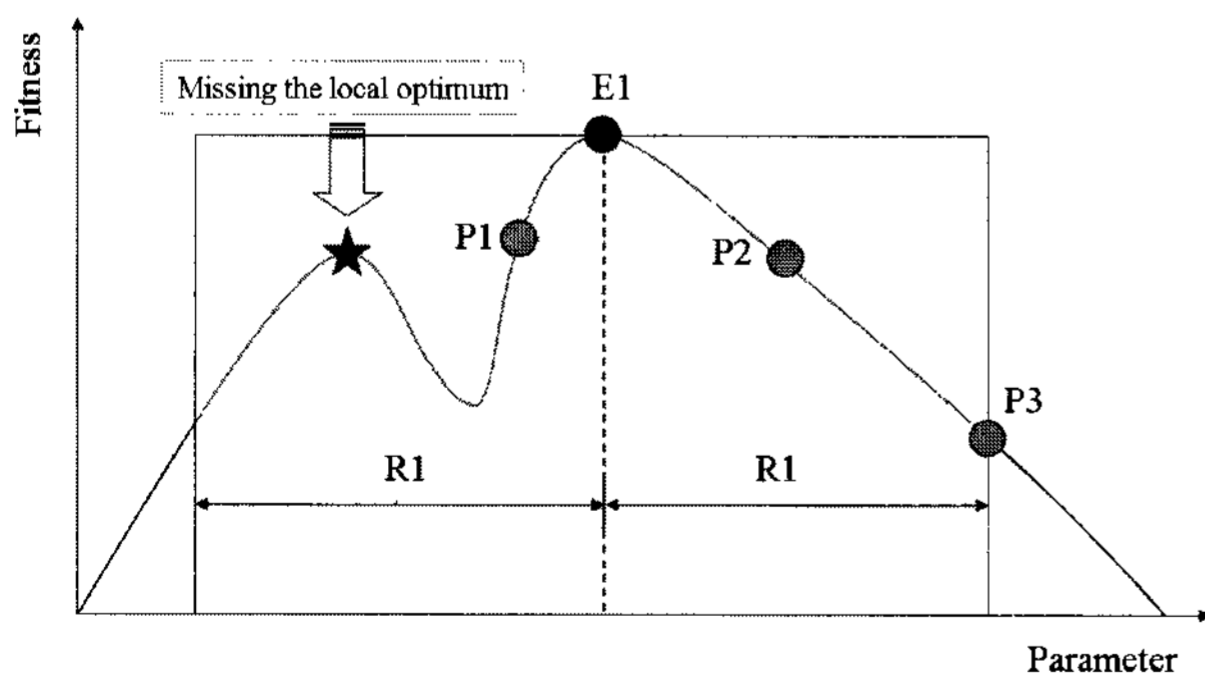


그림 2 기존의 방법을 적용한 비대칭 목적함수 : E1 으로부터 P3 까지의 거리가 E1 의 니체 반경(R1) 이 되고, E1 의 좌측 반경 내에 위치한 국소 최적점은 기존의 방법으로 찾을 수 없다.

Fig. 2 Asymmetrical objective function (applying conventional algorithm)

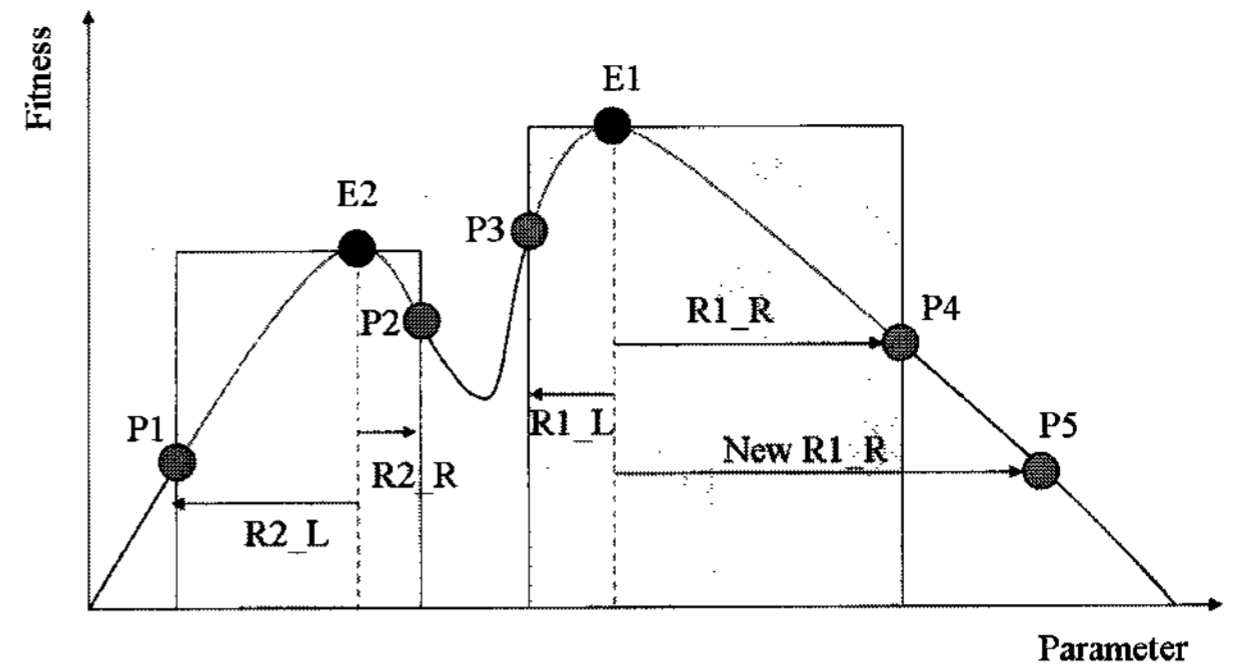


그림 3 제안된 알고리즘의 원리
Fig. 3 Principle of the proposed method

3.2 Detecting Trace 개념

그림 4에 불필요한 함수 호출 횟수를 줄이기 위하여 새롭게 제안된 detecting trace 개념과 기존 알고리즘의 비교를 도시하였다. 기존 알고리즘의 경우, 개체 p1이 피크를 찾아가면서 E1의 오른쪽 니체 반경 안에 도달하게 되더라도 계속 탐색을 수행하게 되어 E1에 도달하게 된다. 이는 불필요한 함수 호출을 야기하게 되어 계산 시간의 증가를 가져오게 된다. 새롭게 제안된 detecting trace 개념은 함수 호출시마다 피크를 탐색해가는 각 개체들의 위치 정보를 피드백 받아 이전의 엘리트 개체들의 니체 반경 안에 있는지 여부를 판별하는 것으로 p1이 E1의 니체 반경 안에 도달하게 되면 자동적으로 패턴 탐색 알고리즘을 종료하여 불필요한 함수 호출을 줄이도록 하였다.

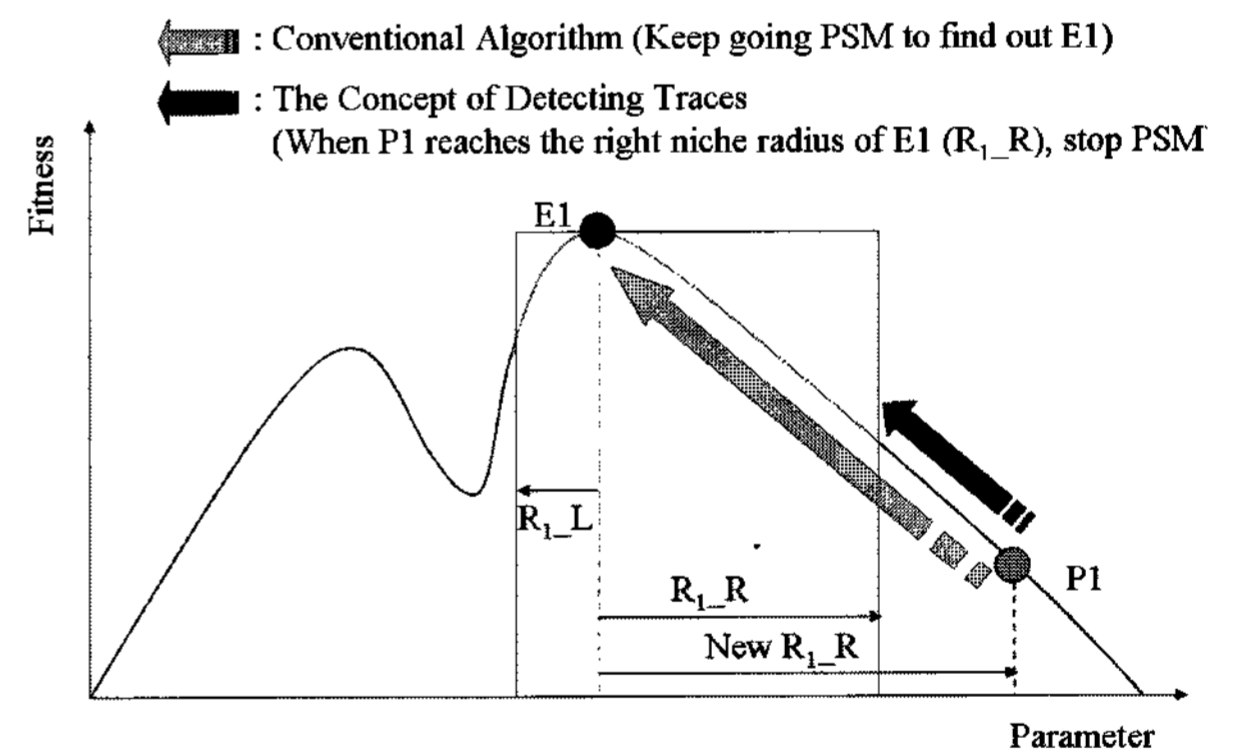


그림 4 Detecting Trace 개념
Fig. 4 The concept of detecting trace

3.3 개선된 알고리즘의 성능 비교

3.3.1 대칭 시험 함수

개선된 알고리즘과 기존의 니칭 유전 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 다음과 같은 대칭 시험 함수를 적용하였다.

$$f = 900 - (x - 5)^2 + 10\cos 2\pi(x - 5) + (y - 5)^2 + 10\cos 2\pi(y - 5), \quad (2 \leq x, y \leq 8) \quad (1)$$

그림 5에 시험 함수의 형상을 나타내었다.

시험 함수가 주어진 변수 범위 내에서 49개의 피크가 있고, 각각의 피크가 대칭 형태임을 보여준다. 시험 결과는 표 1에 정리되어 있듯이 대칭 함수에 대해서 피크를 찾는 것은 기존의 방법과 제안된 방법이 차이가 없음을 알 수 있으나 목적함수 호출 횟수는 경로추적 개념을 적용한 제안된 방법이 기존의 방법보다 적은 것을 확인하였다.

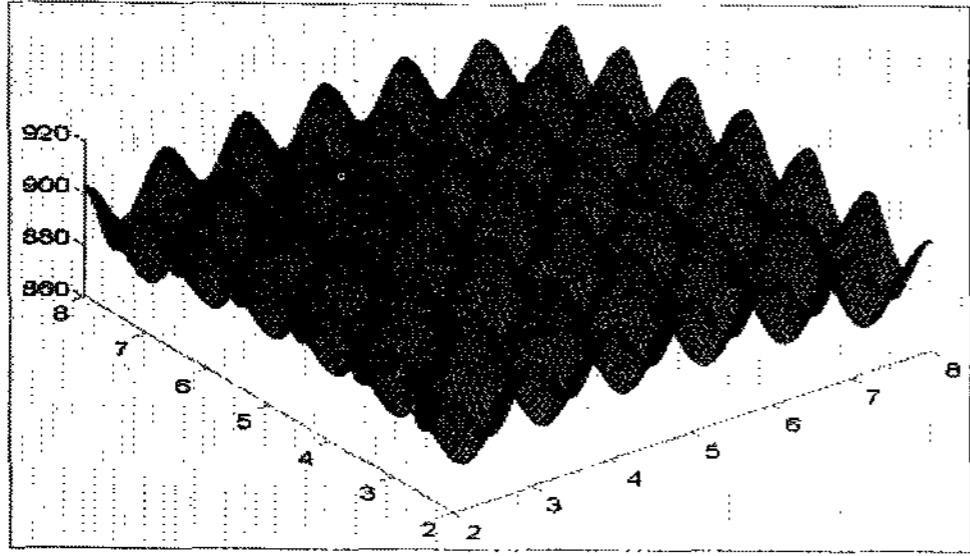


그림 5 대칭 시험 함수

Fig. 5 A symmetrical test multimodal function

표 1 기존 방법과 제안된 방법의 최적화 수행결과 비교
Table 1 Performance comparison between conventional and proposed method

	기존방법	개선된방법
찾은 피크수	49	49
함수 호출 횟수	9887	6216

3.3.2 비대칭 시험 함수

$$f = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{b_k}{1 + \frac{(x-x_{pk})^2 + (y-y_{pk})^2}{a_k}}, \quad -60 < x, y < +60 \quad (2)$$

식 (2)는 제안된 방법의 유용성을 검증하기 위해 사용한 비대칭 시험 함수이다. 그림 6에 시험 함수의 형상을 나타내었다. 총 11개의 피크를 가지고 있으며 각 피크들은 비대칭 형상을 보이고 있다. 표 2에 개선된 알고리즘의 수행 성능을 기존의 알고리즘과 비교하였다. 기존의 알고리즘과 다르게 개선된 알고리즘은 전체 최적점 탐색에 성공하였으며, detecting trace 개념을 적용하여 불필요한 함수 호출을 없애 전체 함수 호출 횟수가 크게 줄어들음을 알 수 있다.

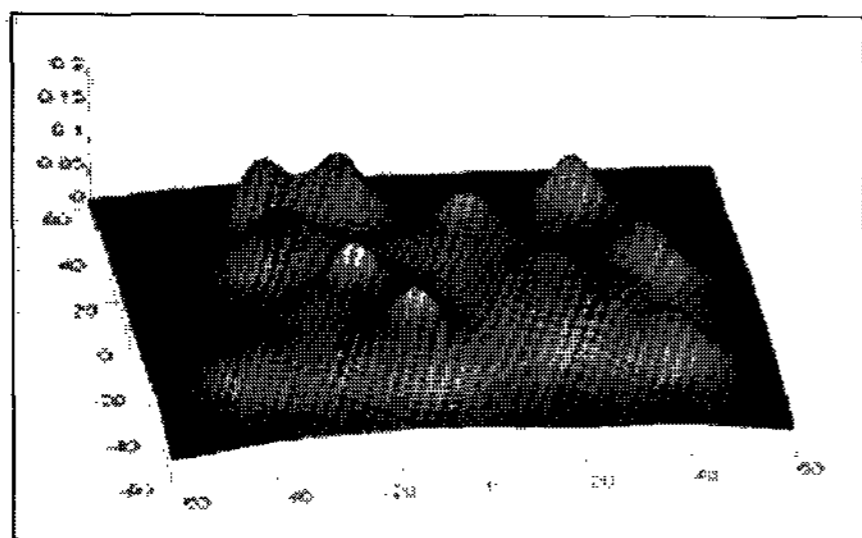


그림 6 비대칭 시험 함수

Fig. 6 An asymmetrical test multimodal function

표 2 기존 방법과 제안된 방법의 최적화 수행결과 비교
Table 2 Performance comparison between conventional and proposed method

	기존방법	개선된방법
찾은 피크수	9	11
함수 호출 횟수	4084	1612

4. 영전자식 권상기의 최적 설계

4.1 최적 설계 모델

개선된 니침 유전 알고리즘을 적용하여 안정적인 흡착력을 요구하는 영전자식 권상기의 최적 설계를 수행하였다. 그림 7은 영전자식 권상기의 단면도를 보여주고 있다. 영전자식 권상기는 가변 영구자석과 고정 영구자석, 철심, 코일 등으로 구성되어 있으며 전체 시스템의 자속 경로는 가변 영구자석의 자화방향에 따라 결정되며, 가변 영구자석의 자화방향은 코일에 흐르는 전류의 방향에 의하여 결정된다. 그림 8에서 가변 영구자석의 자화방향에 따른 권상기의 자속경로를 나타내었다. 그림 8 (a)는 흡착력을 발생시키는 자속경로이고, 그림 8 (b)는 가변 영구자석의 자화방향이 반대로 됨에 따라 흡착력이 발생하지 않는 상태에서의 자속경로를 보여주고 있다.

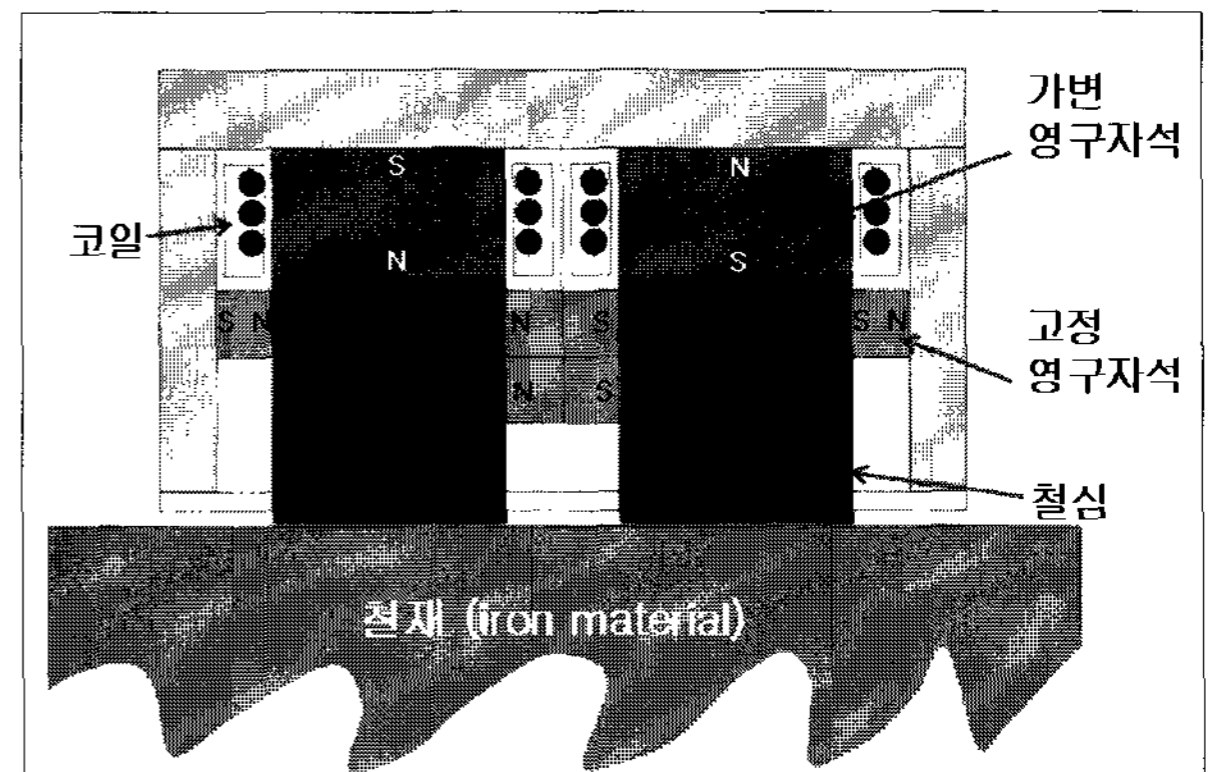


그림 7 영전자식 권상기의 단면도

Fig. 7 Cross section of Electro-Permanent Magnet Lifter

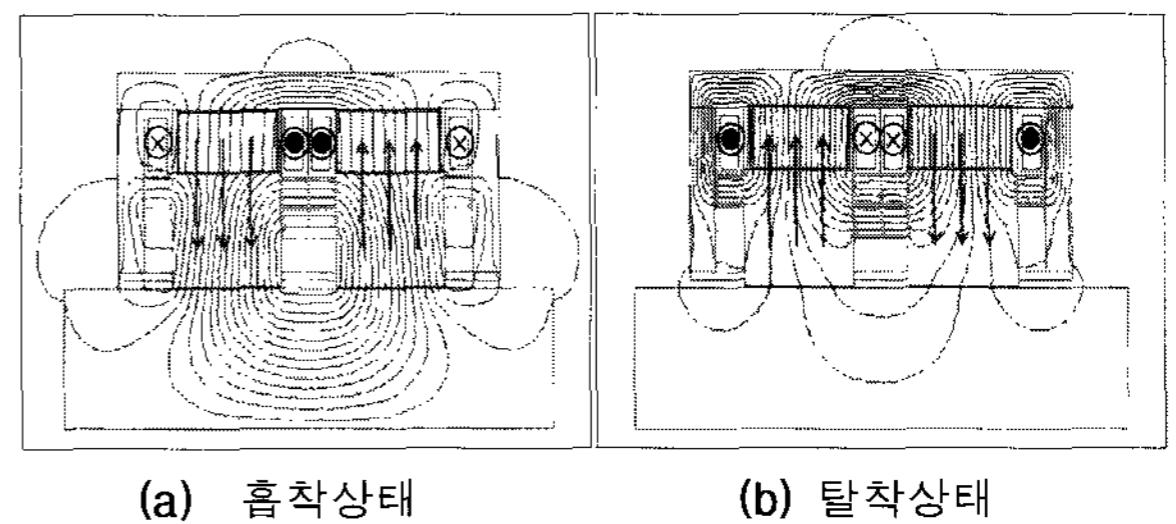


그림 8 영전자식 권상기의 자속

Fig. 8 Flux distribution of Electro-Permanent Magnet Lifter

4.2 목적함수 및 설계 변수 결정

최적 설계의 목적함수는 전체 시스템의 질량과 제작 비용을 동시에 절감할 수 있는 부피 최소화로 하였다. 권상기는 철재를 안전하게 이동시켜야 하는 기기이므로 부피 최소화를 목적함수로 하여도 충분한 흡착력을 발생시킬 수 있어야 한다. 흡착력은 맥스웰 스트레스 텐서법에 의하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_{mag} = \iint_S \left(\frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \vec{n} \right) dS \quad (3)$$

위 식 (3)에서 \vec{n} 은 철재 표면의 법선 방향으로의 단위 벡터, 그리고 S는 철재를 둘러싸는 바깥 표면의 넓이를 나타내며, 흡착력은 공극을 통과하여 철재를 지나는 자속을 해석하면 계산할 수 있다. 권상기는 철심의 자계가 포화된 상태에서 동작하기 때문에 유한요소법을 적용한 비선형 수치 해석을 수행하였다.

그림 9에서 최적화를 위한 설계 변수를 나타내었다. 설계 변수는 부피 결정에 관련된 변수와 자석량을 고려하기 위하여 가변 영구자석과 고정 영구자석의 폭, 상단 부 폭과 깊이 길이를 선정하였다. 설계 변수들의 범위를 표 3에 나타내었다.

변수들이 만족해야 할 제한 조건은 권상기의 안전성을 고려하여 흡착력이 8 ton × 300 % 이상의 값을 가지도록 하였다. 설계 모델로 제시한 권상기는 무게 8 ton의 하중을 흡착할 수 있어야 한다. 안전도 300 %를 고려하면 권상기의 흡착력은 235.4 kN 이상이어야 한다. 또한, 상단 부와 깊이 길이를 제한 없이 줄인다면 철심에서의 자계 포화가 더욱 심하게 이루어질 것이고, 이처럼 자계 포화가 극심하게 이루어진 기기는 실제와 유사한 해석을 할 수가 없으므로 상단 부와 깊이 길이를 각각의 범위 내에서 정하도록 하였다.

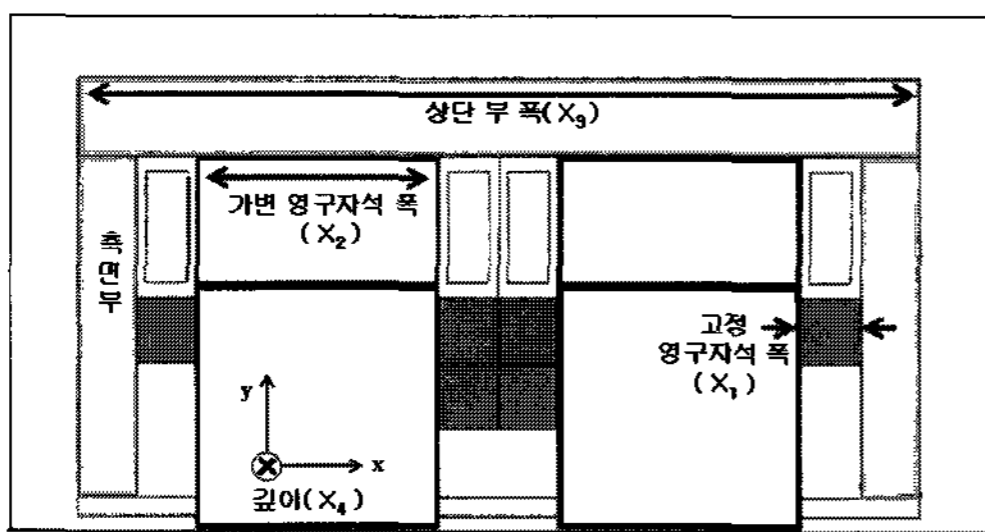


그림 9 설계 변수
Fig. 9 Design variables

표 3 최적화를 위한 설계 변수들의 범위
Table 3 Range of design variables for optimization

설계 변수	최소값 [mm]	최대값 [mm]
X_1	36.0	60.0
X_2	185.0	205.0
X_3	651.0	715.0
X_4	505.0	560.0

4.3 최적 설계 결과

개선된 니칭 유전 알고리즘을 적용하여 최적 설계를 수행한 결과 6개의 후보해를 선정하여 표 4에 기존의 설계 모델과 비교하였다. 후보해 모두 제한조건인 흡착력을 만족하고 있으며, 부피 감소율은 10 % 정도의 수준을 보이고 있다. 목적 함수의 전역 최적점만을 찾는 일반 유전 알고리즘을 사용하였다면 부피 감소율이 가장 큰 1번 후보해가 선정되었지만 니칭 유전 알고리즘을 적용함으로써 부피는 다소 크더라도 다른 특성 면에서 더 나은 설계안을 고려할 수 있게 되었다.

표 4 최적 설계 후보해 결과 비교
Table 4 Characteristic comparison of candidates from optimal design

	기존	1번	2번	3번	4번	5번	6번
부피 [10 ⁻³ m ³]	140.14	<u>123.04</u>	125.88	126.15	127.60	128.15	128.49
X1[mm]	51	55.3	50.5	51.3	48.0	48.0	58.9
X2[mm]	205	185.9	185.9	186.6	189.0	195.0	189.9
X3[mm]	715	651.0	671.0	665.0	651.0	655.0	694.0
X4[mm]	560	540.0	536.0	542.0	560.0	559.0	529.0
흡착력 [ton중]	25.14	24.03	24.05	24.26	24.66	24.45	24.08
NdFeB [10 ⁻³ m ³]	8.71	9.10	8.25	8.48	<u>8.18</u>	<u>8.14</u>	9.50
Alnico [10 ⁻³ m ³]	22.96	20.08	<u>19.93</u>	20.23	21.15	21.81	20.09
최대자속 밀도[T]	2.29	2.40	<u>2.28</u>	2.30	<u>2.25</u>	<u>2.26</u>	2.39
전체질량 [ton]	1.09	<u>0.95</u>	0.98	0.98	1.00	1.01	1.00

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 니칭 유전 알고리즘의 문제점을 분석하고 비대칭 목적 함수에 대해서도 모든 국소 최적점들을 정확하게 탐색할 수 있는 개선된 알고리즘을 제안하였다. 또한 함수 호출 횟수를 줄여 전체 계산 시간을 크게 줄일 수 있는 Detecting Trace 개념을 새롭게 제안하였다. 수학적 시험 함수의 최적화 문제에 실제 적용하여 기존의 알고리즘에 비해 정확성과 우수성을 검증하였으며, 아울러 부피 최소화를 목적 함수로 하는 영전자식 권상기의 최적 설계에 적용하여 실제 전기기기 설계에 유용함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] 영전자식 권상기 의 개발 [양충진], 산업자원부 연구보고서, 2001.
 [2] D.E.Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Co., 1989.
 [3] 문병로, 유전 알고리즘, 다성 출판사, 2002.

- [4] B. Sareni, L. Krahenbuhl and A. Nicolas, "Niching Genetic Algorithms for Optimization in Electromagnetics," The 11th COMPUMAG'97, pp.563-564, Rio de Janeiro, 1997.
- [5] S. W. Mahfoud, Niching Methods for Genetic Algorithms, Doctoral Dissertation / IlliGAL Report 95001, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois Genetic Algorithm Laboratory, 1995.
- [6] 이철균, Niching 유전알고리즘을 이용한 전기자동차용 유도 전동기의 최적 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 1998.
- [7] C. G. Lee, D. H. Cho, and H. K. Jung, "Niching Genetic Algorithm with Restricted Competition Selection for multimodal function optimization," IEEE Trans. On Magnetics, V. 35, N. 3, P.1, 1722-1725, 1999.
- [8] S. Ramburger and S. Russenschuck, "Genetic Algorithms with Niching for Conceptual Design Studies," The 11th COMPUMAG '97, 563-564, Rio de Janeiro, 1997.
- [9] O. Aichjolz et al, "Niching Evolution Strategy with Cluster Algorithms," Digests of the 9th CEFC 2000, p. 137, 2000.
- [10] K. Deb and D. E. Goldberg, "An investigation of Niche and Species Formation in Genetic Function Optimization," Proc. 3rd ICGA, 1989.
- [11] K. Deb and D. E. Goldberg, "Natural Frequency Calculation using Genetic Algorithm," Proceedings of the 15th Southeastern Conference on Theoretical and Applied Mechanics, 1990.
- [12] S. W. Mahfoud, "Crowding and preselection revisited," In R. Manner & B. Manderick (Eds.), Parallel problem solving from nature, Vol. 2, pp. 27-36, Elsevier, 1992.
- [13] Jelasity, M. Dombi, "GAS, an approach to a solution of the niche radius problem," First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems : Innovations and Applications (GALESIA), pp. 424-429, 1995.
- [14] B. L. Miller, M. J. Shaw, "Genetic Algorithms with Dynamic Niche Sharing for Multimodal Function Optimization," IEEE International Conference on Evolution Computation, pp. 786-791, 1996.
- [15] G. Harik, "Finding Multimodal Solutions using Restricted Tournament Selection," Proc. 6th Int. Conf. Genetic Algorithms, pp. 24-32, 1995.
- [16] D. E. Goldberg and J. Richardson, "Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization," Proc. 2nd ICGA, 41-49, 1987.
- [17] A. Petrowski, "A clearing procedure as a niching method for genetic algorithms," Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 798-803, 1996.
- [18] B. Sareni, L. Krahenbuhl, "Fitness sharing and niching methods revisited," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 2, Issue 3, pp. 97 - 106, Sept. 1998.
- [19] K. A. De Jong, An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems, Doctoral dissertation, Univ. of Michigan, 1975.
- [20] 김재광, 차량용 다층 매입형 영구자석 회전기의 해석 및 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 2006.
- [21] 조동혁, Auto-Tuning 니칭 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 2001.
- [22] 김기화, Genetic Algorithm에 의한 다목적 함수 최적 구조 설계, 박사학위논문, 서울대학교, 1994.
- [23] 심동준, 수정된 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 다목적 최적설계, 박사학위논문, 서울대학교, 1997.

저 자 소 개



이 범 주 (李 範 柱)

1975년 1월 11일생. 1997년 육군사관학교 토목공학과 졸업(공학). 2008년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업(공학).
Tel : 010-5075-2323
Fax : 02-878-1452
E-mail : minskup@naver.com



서 장 호 (徐 章 皓)

1978년 4월 11일생. 2003년 중앙대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 현재 서울대 전기공학부 석박통합 박사과정
Tel : 02-880-7262
Fax : 02-878-1452
E-mail : jangho78@elecmech.snu.ac.kr



곽 상 엽 (郭 尙 燁)

1974년 5월 20일생. 2002년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사과정.
Tel : 02-880-7262
Fax : 02-878-1452
E-mail : aceonepair@elecmech.snu.ac.kr



이 상 업 (李 相 燁)

1981년 2월 6일생. 2004년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2006년 동 대학원 졸업 (공학석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-880-7262

Fax : 02-878-1452

E-mail : lstonion@elecmech.snu.ac.kr



정 현 교 (鄭 炫 教)

1979년 서울대 전기공학과 졸업(공학사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1994년 강원대학교 전기공학과 조교수/부교수, 1994년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 정교수

Tel : 02-880-7242

Fax : 02-878-1452

E-mail : hkjung@snu.ac.kr