개선된 니칭 유전 알고리즘을 이용한 토크모터의 최적 설계

論 文
50B-7-3

Optimal Design of Torque Motor using an Improved Niching Genetic Algorithm

金 在 光* · 曺 東 赫** · 鄭 炫 敎*** · 李 哲 均§
(Jae-Kwang Kim · Dong-Hyeok Cho · Hyun-Kyo Jung · Cheol-Gyun Lee)

Abstract - Niching method enables the genetic algorithm(GA) to be applied to the problems that require the location of multiple solutions in the search space, but these methods have fatal disadvantages. The main disadvantage is that the method requires too much calculation of object function. In this paper, a niching method using restricted competition selection(RCS) combined with a pattern search method(PSM) is proposed to identify multiple niches more efficiently and fast in a multimodal domain. The validity of the proposed method is verified by the simulation of test functions and the optimal design of an torque motor.

Key Words : 유전 알고리즘, 패턴 탐색법, restricted competition selection, 토크 모터

1. 서 론

유전 알고리즘(Genetic algorithms)은 자연적인 진화와 발생의 현상을 기초로 하는 확률적인 최적화 방법이다. 근래 들어, 유전 알고리즘을 통해 주어진 함수에서 한 개 이상의 국소 최적점을 찾는 것을 가능하게 하는 많은 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 목적을 위해 발전된 기법이 니칭 기법이다[1][2]. 자연 생태계에서 니체(niche)는 생물체의 영역으로 알려져 있다. 이러한 니체는 생물군(종:species)이 그들의 환경에서 살아남는 것을 가능하게 한다. 생물군은 유사한 특징들을 가지는 비슷한 개체들의 집합으로 정의할 수 있다. 생물체들의 역할에 기인하는 환경의 분할로 인해서 주변 자원에 대한 동일 종족간의 경쟁이 감소한다. 이러한 경쟁의 감소로 인해 서로 다른 니체 주변에서는 안정된 생물군의 유지가 가능하다.

이와 유사하게, 멀티모들(multimodal) 유전 알고리즘에서는 일반적으로 니체를 탐색공간내의 각각의 최적점의 위치로 표현하거나 피크의 값을 나타내는 적합성으로 표현한다. 니체 내의 생물체들을 유사한 특성을 지니는 비슷한 개체들로 정의한다.

전기기기의 형상 최적화 또는 구조 최적화 문제는 하나 이상의 적합한 해를 가지는 경우가 많다는 사실이 널리 알려져 있다. 따라서, 이러한 다중해를 가지는 문제를 해결하기 위해서 니칭 유전 알고리즘이 매우 적합한 도구가 될 수 있다[3]. 먼저 탐색공간에서 다중해를 구하고 기기의 성능을 평가할 수 있는 몇 가지 기준들을 적용하여 문제의 요구에 가장 적절한 해를 선택할 수 있다.

본 논문에서는 패턴 탐색 방법(Pattern search method)을 니칭 유전 알고리즘과 결합한 새로운 니칭 유전 알고리즘을 제안하였다. 여기서 제안된 알고리즘은 정확하게 피크치를 찾고 목적함수의 계산 회수를 감소시키는 매우 강력한 도구가 된다.

제안한 방법을 서보밸브용 토크모터의 최적설계에 적용하였고 여기서 구해진 후보해들로부터 평가함수를 이용하여 최종해를 구했다. 단일 목적함수의 전체 최적점보다도 설계자의 다양한 요구에 더욱 잘 부합되는 국소 최적점을 제시하여 그 효용성을 입증하였고 또한 최적 설계 결과에서 목적함수 호출회수의 감소에 따른 계산시간의 단축도 확인할 수 있었다.

2. 기존의 Niching 유전 알고리즘

기존의 대표적인 니칭 유전 알고리즘에는 Sharing, Crowding과 RCS(Restricted Competition Selection) 등이 있다[4][5].

2.1 Sharing

Sharing기법에서는 개체의 적합도를 다음과 같이 구한다[4]. 한 개체의 적합도를 전체 개체집단내에서 비슷한 개체수에 관련된 양인 니체 용량(Niche Count)으로 나누어 새로운 적합도(Shared Fitness)로 정의한다. 각 개체의 니체 용량은 그 개체와 전체 개체집단내의 개체들과의 Sharing 함수 값들의 합이다. Sharing 함수 값은 미리 정의된 몇가지

* 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 博士課程
** 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 博士課程
*** 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 東義大 工大 電氣工學科 助敎授 · 工博
接受日字 : 2001年 3月 19日
最終完了 : 2001年 6月 18日

상수의 값과 두 개체간의 거리 $d(i,j)$에 따라 결정되는데, 만일 두 개체가 완전히 동일하면 최대값인 1이 되고 거리가 니체 반경(Niche Radius)인 σ_{share}를 초과하는 경우에는 0이 된다. 어떤 개체 i의 Shared Fitness(f')와 Sharing 함수(sh)는 다음과 같이 정의된다.

$$f'(i) = \frac{f(i)}{\sum_{j=1}^{N_p} sh(d(i,j))} \quad (1)$$

$$sh(d) = \begin{cases} 1-(\frac{d}{\sigma_{share}})^{\alpha}, & \text{if } d<\sigma_{share} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

여기서, α는 Sharing함수의 형태를 결정하는 상수, N_p는 개체집단의 수이다.

이와 같이 Sharing 기법은 적합도의 계산 과정에 있어서만 표준 유전 알고리즘과 다른 특성을 가지고 있다. 이러한 Sharing기법을 Deb는 전기계나 기계계의 공진점의 위치를 찾는 문제에 적용하였다[1]. 전 주파수 영역에서 가장 큰 진폭의 공진주파수 외에 어느 진폭이상의 모든 공진주파수의 위치를 찾아서 설계자에게 제시하면 설계자가 시스템의 공진을 최소화하는 설계를 할 때 탐색된 모든 공진주파수를 최소화시킬 수 있는 설계를 하는 것이 가능하다는 것이다. Sharing 기법의 단점은 σ_{share}와 α를 미리 결정해야 하며 개체집단의 크기가 충분히 커야 Sharing 함수가 올바로 작동할 수 있다는 것이다.

2.2 Deterministic Crowding

Crowding 기법은 새로운 개체를 개체집단내의 기존 개체들 중에서 가장 비슷한 개체와 교체하는 것이다[5]. Mahfoud는 동일 니체의 부모 세대와 자식 세대간의 경쟁을 도입함으로써, 기존의 Crowding기법을 개선한 Deterministic Crowding(DC)을 제안했다[2]. 부모 세대와 자식 세대간의 2가지 가능한 토너먼트(tournament)중 더 유사한 부모와 자식끼리 경쟁하도록 하는 것이다. Deterministic Crowding의 흐름도는 다음과 같다.

step 0 : (초기화)
 * 랜덤(random)하게 초기개체집단(개체수 N_p) 구성
step1.
 step1-1. 복원하지 않고 2개의 부모개체 선택, p1 & p2.
 step1-2. 유전조작으로 자식개체 생산, c1 & c2.
 step1-3. If [d(p1,c1)+d_2(p2,c2)] < [d(p1,c2)+d_2(p2,c1)]
  c1과 p1의 적합도 비교, 큰 것 선택.
  c2과 p2의 적합도 비교, 큰 것 선택.
 Else
  c2와 p1의 적합도 비교.
  c1과 p2의 적합도 비교.
 step1-4. N_p/2번 반복하여 새로운 개체집단 구성
step2. 세대수가 미리 지정한 반복 세대수이내이면 종료, 아니면 세대수를 1증가 시키고 step 1로 감.

위에서 설명한 DC는 탐색 과정중에 찾았던 국소 최적점이 다른 최적점과의 경쟁에서 사라질 가능성이 있다는 단점이 존재한다.

2.3 Restricted Competition Selection

Sharing과 DC는 니체의 적합도(Fitness)에 비례하여 개체들을 유지한다. 그러나 전기기기의 형상이나 구조 설계 최적화 문제의 경우 어떤 니체내에서 가장 큰 적합도를 가지는 개체만이 필요하다. 그 이유는 같은 니체 내에 있는 개체들은 형상, 구조, 기기 특성 등이 아주 비슷하기 때문이다. 이러한 이유로 니체 하나 당 적합도가 최대인 하나의 개체만 유지하는 새로운 Niching 유전 알고리즘인 Restricted Competition Selection(RCS)을 제안하였다[6]. 보통의 유전 알고리즘은 자식 세대 개체집단을 구성할 때 Roulette Wheel Selection을 사용하므로 개체들의 선택확률이 적합도에 비례한다. 그러나, RCS 기법은 자식 세대 개체집단을 구성할 때 개체의 다양성을 유지하기 위해 같은 니체 개체간의 경쟁은 허용하지만 서로 다른 니체 개체들간의 경쟁을 제한한다. 즉, 탐색영역에서 서로간의 거리가 Niche Radius이내인 개체들의 적합도를 비교하여 승자의 적합도는 그대로 유지하고 패자의 적합도는 0으로 지정한다. 이렇게 함으로써 같은 니체내에서는 적합도가 가장 큰 하나의 개체만이 자식 세대로 전달되고, 다른 니체의 개체는 비록 적합도가 작더라도 선택된다. 또한 DC에서와 같이 탐색과정중에 찾았던 국소 최적점이 사라지지 않도록 엘리트 집합을 도입한다. 따라서 우수한 개체들(엘리트 집합의 개체들)을 유지하면서 계속해서 새로운 국소 최적점을 찾아가는 것이다. 그러나 RCS는 여전히 최적점 부근에서 정확한 최적점을 찾아가는데 많은 시간이 소요된다는 단점을 가진다.

2.4 직접 탐색법과 결합된 RCS

위에서 제안한 여러 가지 니칭 유전 알고리즘은 전기기기의 전체 최적점 뿐만 아니라 국소 최적점까지도 잘 찾아내고 있다. RCS 유전 알고리즘은 일반적인 니칭 유전 알고리즘(sharing, crowding)보다 더 많은 최적점을 찾고 최대값에 가까운 값을 유지한다. 그러나 여전히 최적점 주위에서 너무나 많은 시간을 소비하는 유전 알고리즘의 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 최적점 주위에서 정확한 최적점을 찾아가는 과정을 위해 새로운 알고리즘을 도입하는 방법들이 연구되었다[7]. 유전 알고리즘의 확률론적인 특징을 이용하여 최적값에 가까운 값들을 발견하고 새로운 방법으로 최적점을 바로 찾아간다면 전체적인 목적함수의 계산 회수가 현저히 감소하여 시간적으로 많은 이득을 얻을 수 있을 것이다. 이러한 탐색을 위해서 최근의 관련 연구에서는 유니베리언트 탐색 방법(USM:Univariant Search Method)과 결합된 RCS 유전 알고리즘(RCS-USM)을 제안했었다[7].

유전 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 보통 다음과 같은 두 가지 기준을 이용한다. 첫 번째는 발견된 최적점의 개수(NMP:Number of Maintained Peak)이고 두 번째는 발견된 최적점 값의 합을 실제 전체 최적점 값의 합으로 나누

어 구해지는 값(MPR:Maximum Peak Ratio)이다[6]. 이러한 기준들을 적용해 볼 때 RCS-USM(Restricted Competition Selection-Univariant Search Method)은 적절한 NMP와 MPR값을 가지면서도 목적함수의 계산 회수가 20%가량 감소하는 좋은 결과를 나타내었다[7].

3. 새로운 Niching 유전 알고리즘

3.1 패턴 탐색법(Pattern Search Method)

전기기기 최적 설계에서는 목적함수를 계산하기 위해서 대부분의 시간이 소요된다. 따라서 최적 설계 시간의 감소를 위해서는 목적함수의 계산 회수를 감소시키는 것이 가장 중요한 요소이다. RCS-USM은 단순 RCS에 비해서 20%가량의 시간이 절약된다. 만일 더욱 효율이 높은 결정론적인 방법과 결합된다면 소요시간이 더욱 줄어들 것이다.

유전알고리즘의 특징들을 살펴 볼 때 새롭게 결합할 결정론적 알고리즘은 다음과 같은 특징들을 가져야만 한다.

1. RCS법이 미분을 이용하지 않기 때문에 새로운 알고리즘은 함수값 자체를 이용하는 직접 탐색법이어야 한다.
2. 새로운 방법은 다중변수 함수로 확장 가능해야 한다.
3. 새로운 방법은 보다 효율적이고 강력해야 한다.

따라서 여러 가지 직접 탐색법중에서 패턴 탐색 방법이 선택하였다. 기본적으로 패턴 탐색 과정은 한번에 한가지 변수만을 고려하는 경험적(exploratory)인 이동과 몇가지 여러 가지 변수의 이동 규칙이 적용되는 패턴 이동의 결합에 의해 표현될 수 있다[8]. 경험적인 이동은 함수의 국부적인 경향을 시험해서 만일 경사가 존재한다면 그 방향을 탐색해 내는 과정이다. 패턴 이동은 경사면을 따라서 더욱 급하게 변수의 값을 변화시킬 수 있도록 경험적인 이동의 과정에서 나타난 정보를 이용한다. 다음 그림1에서 패턴 탐색 방법의 흐름을 보여주고 있다.

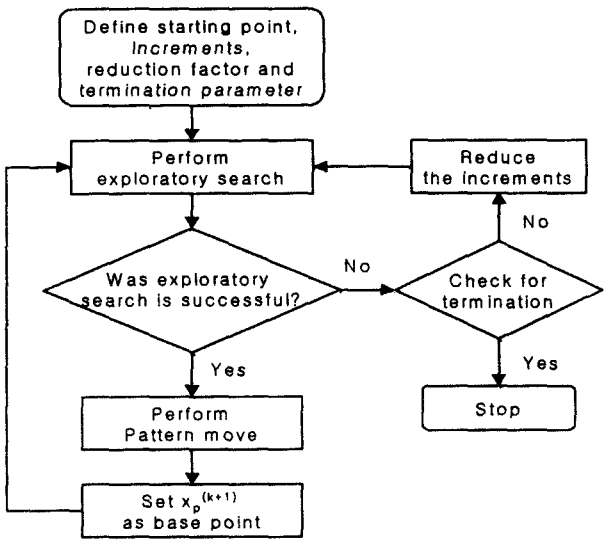


그림 1 패턴 탐색법의 순서도
Fig. 1 Flowchart of Pattern Search Method

3.2 패턴 탐색법과 결합된 niching 유전 알고리즘

패턴 탐색법과 결합된 niching 유전 알고리즘(RCS-PSM)의 원리를 그림2에 나타내었다. 아래 그림에서 엘리트 집합의 크기는 2이다. p1부터 p6중에서 p2와 p5가 단순 RCS에 의해 엘리트 집합으로 선택된다. 다음으로 PSM법에 의해 니체 반경내에서 p2와 p5로부터 최적점을 찾기 시작하고 P2와 P5가 발견된다. RCS-PSM에서는 P2와 P5가 p2와 p5대신에 엘리트 집합에 저장되고 따라서 만일 RCS법이 최적점 주변을 발견하기만 하면 PSM이 매우 쉽고 빠르게 최적값을 찾을 수 있고 계산 시간을 단축할 수 있다.

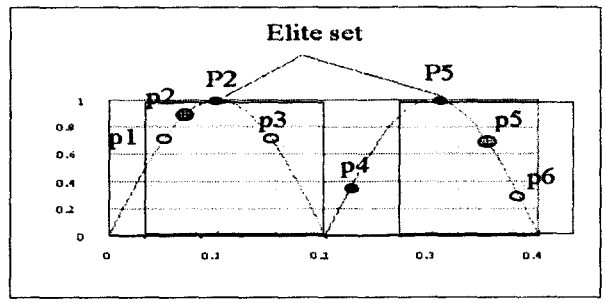


그림 2 RCS-PSM의 원리
Fig. 2 Principle of RCS-PSM

결합한 방법을 단계적으로 다음에 제시하였다. 단계 5를 추가했다는 것이 단순 RCS법과의 차이점이다.

step 0 : (초기화)
* 임의(random)로 초기개체집단(개체수 N_p) 구성
* 적합도 순서로 M개를 선택, 엘리트 개체 집단 구성
* 세대수 g를 1로 지정

step 1 : (유전조작)
* 개체집단에서 비복원으로 2개의 부모세대 개체를 선택하여 교배와 변이 시행
* $N_p/2$번 반복하여 새로운 개체집단 구성

step 2 : (새 경쟁 개체 집단 구성)
* 새 개체집단에 엘리트 집합을 합쳐 N_p+M 개체수를 지닌 경쟁 개체집단 구성.

step 3 : (Restricted Competition Selection)
* FOR i = 1 to N_p+M-1, j = i+1 to N_p+M
  d_{ij}(두 개체 x_i 와 x_j간의 거리) < σ_{share}(niche radius) 일 때 적합도 비교.
* 패자의 새 적합도를 0으로 지정

step 4 : (새 부모 세대 및 엘리트 개체 집단 구성)
* 경쟁 개체집단에서 새 적합도 순서대로 N_p개 선택, 새로운 부모 세대 개체 집단 구성.
* 그 중에서 적합도 순서대로 상위 M개 선택하여 엘리트 개체집단 구성.

step 5 : (패턴 탐색법 : Pattern Search Method)
* 엘리트 개체집단을 이전 엘리트 개체집단과 비교하여 추가된 개체를 판단
* 새롭게 추가된 개체에 대해서 패턴 탐색법을 이용하여

최적값을 찾음.

step 6 : (종료)

* 세대수가 g = Gn(미리 지정한 반복 세대수)이면 종료, 아니면 세대수를 1증가시키고 step 1로 감.

관련 연구에서 언급된 RCS-USM(Restricted Competition Selection-Univariant Search Method)의 경우에는 단계5에 패턴 탐색법 대신 유니베리언트 탐색법이 이용된다[7].

4. 수학적 예제 함수에 대한 적용

4.1 수학적 예제 함수

본 논문에서 제안한 RCS-PSM 기법을 이용하는 새로운 Niching 유전 알고리즘을 기존의 방법과 비교하기 위하여 대표적인 multi-modal 함수들을 시험 함수로 사용하였다. 시험 함수들은 식 (3) - (5)와 같이 표현된다. 식 (3)처럼 표현되는 F1 함수는 sine함수를 응용한 함수 형태로 그림3에서 나타낸 것과 같이 각 피크의 높이와 간격이 같으며 F2 함수는 Foxhole함수로 불리며 그림4와 같이 높이가 같지 않은 25개의 피크를 가진 2차원 함수이다. F3 함수는 Shubert 함수로 불리며 18개의 높이가 서로 같은 전체 최적점과 760개의 국소 최적점을 지니고 있다. 그림5는 F3함수의 18개의 전체 최적점 중 2개가 있는 곳을 나타낸 것이다.

$$F1(x1,x2)=\sin^6(5x1)\sin^6(5x2),\quad 0<x1,x2<1 \tag{3}$$

$$F2(x1,x2)=500-\frac{1}{0.002+f2(x1,x2)} \tag{4}$$

여기서,

$$f2(x1,x2)=\sum_{i=0}^{24}\frac{1}{1+i+[x1-a(i)]^6+[x2-b(i)]^6}$$

$$a(i)=16[(i \bmod 5)-2],\quad b(i)=16[(i/5)-2]$$

$$-65.536<x1,x2<65.536$$

$$F3(x1,x2)=f3(x1)\cdot f3(x2) \tag{5}$$

여기서, $f3(x)=\left\{\sum_{i=1}^{5} i\cos[(i+1)x+i]\right\}$,

$$-10<x1,x2<10$$

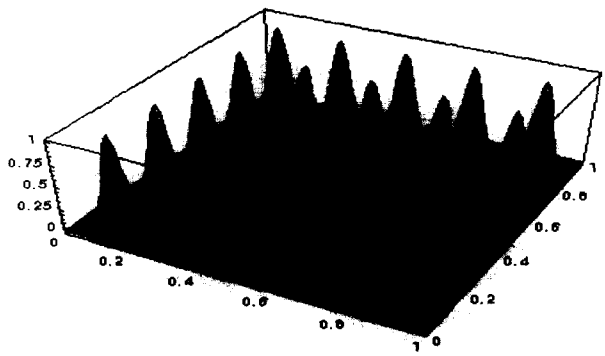


그림 3 2차원 sine 함수

Fig. 3 2-D sine function

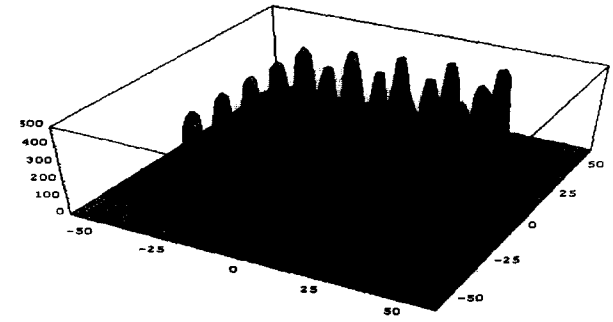


그림 4 Foxhole 함수

Fig. 4 Foxhole function

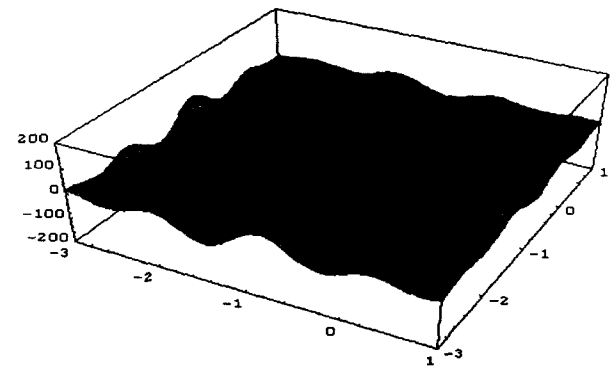


그림 5 Shubert 함수

Fig. 5 Shubert function

4.2 시험 함수에 대한 적용 결과

Niching 유전 알고리즘의 각종 파라미터들은 변수당 비트수 8, 교배율 0.9, 변이율 0.1로 동일하게 정했다.

각 함수의 Niche Radius, 개체집단 크기, 엘리트 집단의 크기는 표1에 제시하였다. 개체 집단의 크기는 피크수의 2배와 4배로 하였고 엘리트집단의 크기는 피크수와 동일하게 설정했다.

표 1 시험 함수에 따른 GA 인자들

Table 1 GA parameters of each test function

	2차원 sine 함수	Foxhole 함수	Shubert 함수
피크수	25	25	18
개체집단 크기	50	50	50
엘리트집단 크기	25	25	25
Niche Radius	0.1	8	0.5

각각의 시험 함수에 단순 RCS, RCS-PSM 기법을 각각 100회씩 적용하여 그 결과의 평균값을 구하였다. 시험 함수에 대한 알고리즘의 적용 결과를 아래 표에 제시하였다.

표 2 시험함수에 의한 결과
Table 2 Results by test functions

		Simple RCS	RCS-PSM	개선비율[%]
F1	목적함수 계산 회수	4311	2875	33.3
	MPR	0.984	0.999	1.5
F2	목적함수 계산 회수	4727	3357	29.0
	MPR	0.979	0.999	2.0
F3	목적함수 계산 회수	4679	3181	32.0
	MPR	0.984	0.999	1.5

위의 결과에서도 알 수 있는 것처럼 RCS-PSM을 이용하면 주어진 모든 국소 최적점을 찾을 수 있으므로 MPR값은 거의 1이 된다. 또한 최적화 과정에서 대부분의 시간을 소요하는 목적함수의 계산 회수를 이전의 방법들에 비해서 현저히 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있다.

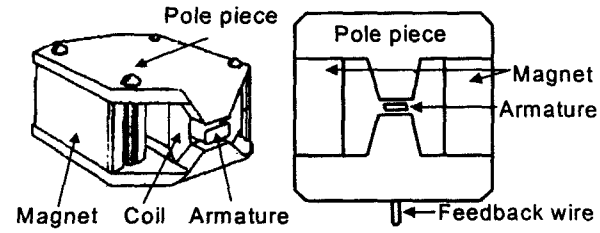
5. 토크 모터의 최적 설계

5.1 서보밸브용 토크모터

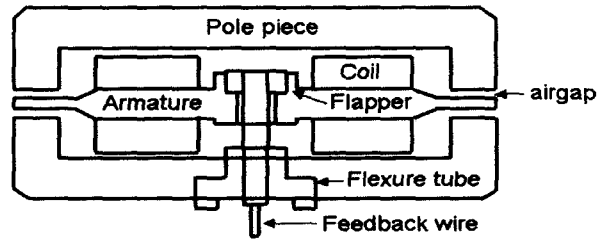
산업 전반에 걸쳐 정밀도가 높은 제어 시스템의 수요 증가와 사용되는 응용범위의 확대에 따라 이러한 제어 시스템의 중추적 역할을 담당하는 전기적 입력 기기가 연구되고 있다. 그러한 기기중에서 토크모터는 다양한 용도로 사용되는 서보 밸브의 전기적 입력을 담당하는 부분으로써 기술적 차원에서 다각적인 연구가 이루어지고 있는 실정이다[9].

서보 밸브의 구성품 중에서 전기적인 입력 신호를 각변위형의 미소 변위로 전환하는 부분을 토크모터라고 한다. 여기서는 전류를 입력으로 받아 발생시킨 토크를 서보 밸브의 유압을 증폭하는 스풀(Spool)부에 전달하는 전기 기계적 변환부를 일컫는다.

토크모터는 입력이 없는 상태에서도 기본적인 자속의 흐름을 발생시키는 영구 자석(Magnet), 자속의 경로 형성을 도와주는 폴피스(Pole pieces), 그리고 코일을 감은 전기자(Armature)가 주요 구성품이다. 코일에 전류가 흐르지 않는 경우에는 각 공극을 따라 흐르는 자속에 차이가 발생하지 않으므로 동일한 흡인력을 일으키고 전체적으로 토크가 생성되지 않게 된다. 코일에 전류가 흐르게 되면 전기자가 자성을 띄게 되어 기자력을 발생시키며 이 기자력에 비례하는 자속의 차가 공극에 발생하게 된다. 여기서 발생한 자속의 차이만큼 양 공극의 흡인력에 차이가 생겨나고 그에 따라 토크가 생성된다. 토크모터에서 생성된 토크는 플래퍼(Flapper)와 플렉셔 튜브(Flexure tube)등을 통하여 유압시스템의 스풀부에 연결된 스프링(Feedback wire) 기구에 대응하여 힘의 균형을 이룰 때까지 전기자를 움직이게 한다. 그러나 그 움직임은 매우 작아서 폴피스와의 간격은 거의 비슷하게 유지된다. 다음 그림6에 토크모터의 3차원 형태와 측면도 그리고 정면도(단면)가 나타나 있다. 그림에서 보여지는 피드백 스프링(feedback wire)에 의해 유압부와 연동되는 구조를 지닌다.



(a) 3차원 모델 (b) 측면도
(a) 3-D model (b) Side view



(c) 정면도 (단면)
(c) Front view (cross-section)

그림 6 서보밸브용 토크 모터
Fig. 6 Torque motor for servo-valve

5.2 토크모터의 최적 설계

토크모터의 특성상 입력전류에 대한 출력토크의 선형성이 전체 시스템의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소이다[10]. 유압부와의 연계성으로 인해 입력 전류에 대한 출력 토크의 선형성이 보장되어야만 최종출력의 정밀한 선형적 제어가 가능해지기 때문이다. 따라서 본 논문에서도 토크 모터의 토크 선형성을 목적함수로 설정하였다. 설계 변수값들의 개체집단이 선택되어진 후에 실제 사용되는 범위의 다양한 입력전류(1 ~ 14mA)에 대한 출력토크의 값들에 대한 상관계수를 구하여 이 값을 토크모터의 선형성을 판별하는 기준으로 삼는다. 상관계수는 주어진 자료의 집합과 직선과의 유사한 정도를 나타내는 통계적 계수이다[11]. 입력전류에 대한 출력토크의 상관관계를 구하기 위한 그래프의 예를 아래 그림7에 제시하였다.

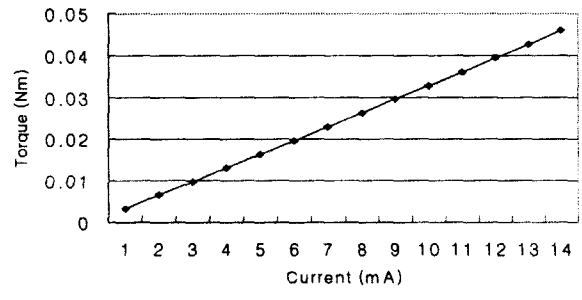


그림 7 전류 대 토크 (각변위가 0[degree]인 경우)
Fig. 7 Current vs torque (at 0 degree)

정격전류가 10[mA]이기 때문에 40%의 여유값을 적용하여 14[mA]까지의 전류에 대한 토크값의 상관계수를 구한다. 상관계수는 위의 그래프가 완전한 직선일 때 최대값 1을 가지며 아래의 식(6)에 의해 구해진다[11].

$$r = \frac{\sum_{1}^{N}(x_i-\hat{x})(y_i-\hat{y})}{\sqrt{\sum_{1}^{N}(x_i-\hat{x})^2}\sqrt{\sum_{1}^{N}(y_i-\hat{y})^2}} = \frac{n(\sum xy)-(\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2)-(\sum x)^2}\sqrt{n(\sum y^2)-(\sum y)^2}} \quad (6)$$

여기서, r : 상관계수, N : 측정점의 갯수

$\hat{x}$: x 값의 평균, $\hat{y}$: y 값의 평균

본 논문에서 사용된 유전 알고리즘은 최대값을 찾는 알고리즘이기 때문에 위에서 구해지는 상관계수를 직접 목적함수로 이용할 수 있다.

공극을 사이에 두고 전기자와 접해 있는 부분의 폴피스의 형상(두께 및 너비)을 독립적인 설계변수로 설정하였고 토크상수(입력전류와 출력토크의 비율을 나타내는 계수) 및 출력토크의 최소값과 모터의 무게, 크기, 영구자석의 잔류자속밀도 그리고 공극의 최소값 등을 최적화의 제한조건으로 선택했다. 토크모터의 응용분야가 주요 서보시스템의 핵심부품이고 크기와 부피가 작기 때문에 설계변수의 변화에 따른 약간의 가격차이나 미세한 중량차이 등은 문제가 되지 않으므로 최적화의 제한 사항으로 고려하지 않았다.

정격 전류에서 유압부를 제어하기 위해서 필요한 최소한의 토크값이 토크상수의 제한치가 되고 전기자 코일의 권선수는 상수가 된다. 공극의 길이는 기계적인 정밀성과 토크가 가해지는 경우의 각변위 때문에 최소값에 제한을 받게 되고 폴피스의 두께와 너비는 기계적 구조 때문에 일정한 값을 넘지 못한다. 영구자석의 잔류자속밀도는 재질의 특성으로 몇가지 특정한 값들만을 취한다. 아래 표3에 다양한 제약 조건들을 제시하였다.

표 3 토크모터 설계 제한 조건

Table 3 Design constraints of torque motor

토크상수	> 3.0[Nm/A]
공극의 길이	> 0.25[mm]
폴피스 두께	< 4.2[mm]
폴피스 너비	< 6.8[mm]

5.3 최적화 결과

토크선형성을 목적함수로 해서 최적 설계를 한 결과를 표 4에 제시하였다. 일반적인 최적설계의 결과라면 목적함수인 토크 선형성이 가장 큰 첫 번째 최적점을 선택하여 설계를 수행하겠지만 앞서 설명했던 niching 개념을 적용해 보면 나머지 국소 최적점 중에서 실제 시스템에 더 적합한 해가 있을 수도 있다. 정격 토크의 크기는 두 번째 최적점이 더 크며 토크모터의 시정수는 네 번째 최적점이 가장 좋은 특성을 나타낸다.

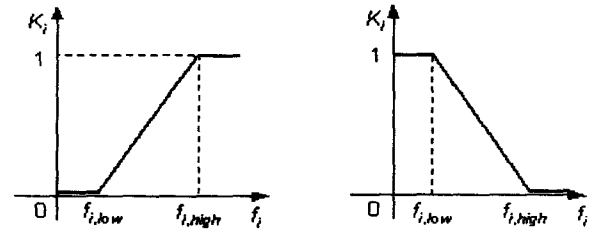
표 4 최적 설계 결과

Table 4 Result of optimal design

토크모터 특성	전역 최적점 및 국소 최적점			
	#.1	#.2	#.3	#.4
토크 선형성	**0.994**	0.989	0.992	0.993
정격전류에서의 토크[Nm]	0.0327	**0.0338**	0.0329	0.0325
토크모터 시정수[ms]	0.017	0.015	0.017	**0.014**

설계의 결과로 나온 최적해 후보들 중에서 시스템에 가장 적합한 것을 선정해야 하는데, 이를 위해서는 여러 설계점들을 비교 및 평가할 수 있는 평가기준이 필요하다. 평가기준은 최적설계가 적용되는 시스템의 요구 특성에 따라 결정되는데, 목적함수로 사용된 토크의 선형성, 정격입력전류를 가했을 때의 출력토크의 크기(정격 토크), 토크모터의 시정수 등을 이용한다. 출력토크의 크기는 전체 시스템(서보 밸브)의 제어 범위에 관계되며 토크모터의 시정수는 시스템의 응답특성과 관련이 있다.

시스템의 평가기준을 수치적으로 나타내기 위해서 후보해들의 만족도를 평가함수로 나타냈다. 다음 그림8에서 제시한 두 가지 형태의 평가함수를 사용한다.



(a) 함수 A (b) 함수 B

(a) Function A (b) Function B

그림 8 평가함수

Fig. 8 Rating function

평가기준의 값이 증가함에 따라서 설계자의 만족도가 증가하면(예를 들어, 토크의 선형성과 출력토크의 크기) 평가함수 A를 사용하고 반대의 경우에는(예를 들어, 토크모터의 시정수) 평가함수 B를 사용한다. 일반적으로 평가함수 A에서 $f_{i,high}$는 평가기준에 대한 최적해 후보들의 특성치 중 최대값으로 하고 $f_{i,low}$는 사양 및 규격에 의해 주어지거나 허용할 수 있는 특성치의 하한으로 결정된다. 평가함수 B에서 $f_{i,low}$는 평가기준에 대한 최적해 후보들의 특성치 중 최소값으로 하고 $f_{i,high}$는 사양 및 규격에 의해 주어지거나 허용할 수 있는 특성치의 상한이 된다. 또한 사양이나 규격이 결정되어 있지 않을 경우에는 후보해들의 최대값이나 최소값을 이용할 수도 있으며 설계자 자신의 경험을 활용하여 이러한

값들을 조정할 수도 있다.

토크모터에서 평가함수들의 형태는 다음 표5와 같다. 시스템의 기본적인 제어성능과 일정 제어범위를 보장하기 위한 토크 선형성과 정격 토크의 제한치를 하한으로 이용하였고 시정수의 최대 허용치를 상한으로 이용했다.

표 5 평가함수
Table 5 Rating function

평가기준	f_{high}	f_{low}	함수 형태
토크 선형성	0.994	0.930	함수 A
정격전류에서의 토크[Nm]	0.0338	0.0250	함수 A
토크모터 시정수[ms]	50	14	함수 B

다양한 국소 최적점들(후보해들)에 대해서 평가기준을 적용한 결과를 표6에 제시하였다. 각 평가기준들의 중요도가 유사하기 때문에 가중치는 모두 1로 설정했다. 평가기준을 적용하지 않았을 경우와는 달리 전체 평가함수값의 평균값이 더 높은 두 번째 최적점이 적합한 해로 채택되고 있음을 알 수 있다.

표 6 평가기준을 적용한 결과
Table 6 Result by evaluation criteria

토크모터 특성들	전역 최적점 및 국소 최적점			
	#.1	**#.2**	#.3	#.4
토크 선형성	**1.00**	0.92	0.97	0.98
정격전류에서의 토크[Nm]	0.88	**1.00**	0.90	0.84
토크모터 시정수[ms]	0.92	0.97	0.92	**1.00**
평가함수의 평균값	0.933	**0.963**	0.930	0.940

다음 표7에 기존 토크모터와 최적설계를 적용한 토크모터의 설계 변수와 주요 특징 및 계산시간을 비교하여 제시하였다.

표 7 최적설계 결과의 비교
Table 7 Comparison of optimization results

설계 변수	기존 모터	단순 RCS	RCS-PSM
폴피스 두께	3.0[mm]	3.4[mm]	**3.4[mm]**
폴피스 너비	4.0[mm]	4.2[mm]	**4.2[mm]**
토크 선형성	0.983	0.989	0.989
정격전류에서의 토크[Nm]	0.0314	0.0338	0.0338
토크모터 시정수[ms]	0.018	0.015	0.015
목적함수 계산 회수		**5814**	**4219**

결과에서도 알 수 있는 것처럼 공극과 인접하는 폴피스의 면적이 넓어져서 자속의 흐름을 원활하게 해주며 공극 길이가 짧아져서 정격토크값도 커졌다. 토크 선형성이 줄어들긴 했지만 그 변화량이 매우 작고 기기의 특성과 응용에도 거의 변화가 없다. RCS-PSM에 의한 최적설계 결과가 단순 RCS의 경우와 같은 설계변수값이 나오지만 목적함수 계산 회수에서는 현저한 차이가 발생한다.

6. 결 론

전기기기의 최적 설계를 위해 본 논문에서는 패턴 탐색법과 결합된 RCS(Restricted Competiton Selection) 니칭(Niching) 유전 알고리즘을 제안하였다. 전기기기의 형상 최적화 또는 구조 최적화 문제는 하나 이상의 적합한 해를 가지는 경우가 많다는 것이 알려져 있고 이러한 문제를 해결하기 위해서 기존의 니칭 유전 알고리즘보다 다중해를 더 효율적으로 탐색하는 RCS(Restricted Competiton Selection) 니칭 유전 알고리즘을 이용하였다. 또한 전기기기를 최적설계하는 과정에서 대부분의 시간을 소요하는 목적함수 계산 회수를 감소시키기 위하여 패턴탐색법을 결합시켰다. 제안된 알고리즘을 대표적인 다봉성 함수들의 문제에 적용하여 탐색된 최적점의 수와 값에 있어서 기존의 니칭 유전 알고리즘보다 우수하고 함수 계산 회수도 현저히 감소함을 보여주었다. 또한 토크모터의 최적 설계에 적용하여 실제 문제에서의 유용성도 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] K. Deb and D. E. Goldberg, "An investigation of Niche and Species Formation in Genetic Function Optimization," *Proc. 3rd ICGA*, 1989.

[2] S.W. Mahfoud, *Niching Methods for Genetic Algorithms,* Doctoral Dissertation / IlliGAL Report 95001, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois Genetic Algorithm Laboratory, 1995.

[3] 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.

[4] D. E. Goldberg and J. Richardson, "Genetic Algorithms with Sharing for Multimodal Function Optimization," *Proc. 2nd ICGA*, 41-49,1987.

[5] K. A. De Jong, *An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems,* Doctoral dissertation, Univ. of Michigan, 1975.

[6] 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. 34, N. 3, P.1, 1722-1755, 1999.

[7] Dong-Hyeok Cho, Hyun-Kyo Jung, Cheol-Gyun Lee, Niching Genetic Algorithm Adopting Restricted Competition Selection Combined with a Deterministic

Method," *CEFC-2000*, p.337, June 4-7, 2000.
[8] G. V. Reklaitis, et al., *Engineering Optimization-Methods and Application*, pp. 82-86, John Wiley & Sons, Inc.1983.
[9] Martin, D.J. and Burrows, C.R. "The Dynamic Characteristics of a Electrohydraulic Servovalve," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, pp. 395-406, Dec. 1976.
[10] J. Watton, "The Effect of Drain Orifice Damping on the Performance Characteristics of a Servovalve Flapper/Nozzle Stage," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 19-23, March 1987.
[11] A. Leon-Garcia, Probability and Random Processes for Electrical Engineering, Addison-Wesley, pp.223-225, 1994.

저 자 소 개

김 재 광 (金 在 光)
1971년 7월 10일 생. 1999년 서울대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 박사과정
Tel : 02-880-7262, Fax : 02-878-1452
E-mail : light7@elecmech.snu.ac.kr

조 동 혁 (曺 東 赫)
1973년 3월 27일 생. 1995년 서울대 전기공학부 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 박사과정
Tel : 02-880-7262, Fax : 02-878-1452
E-mail : cdh@snu.ac.kr

정 현 교 (鄭 炫 敎)
1955년 8월 17일 생. 1981년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984.8 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1994. 3~현재 서울대 공과대학 교수
Tel : 02-880-7242, Fax : 02-878-1452
E-mail : hkjung@snu.ac.kr

이 철 균 (李 哲 均)
1967년 1월 28일 생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 현재 동의대학교 공대 전기공학과 조교수
Tel : 051-890-1672, Fax : 051-890-1664
E-mail : cglee@hyomin.dongeui.ac.kr