

유전알고리즘을 이용한 편측식 선형유도전동기의 최적설계

류근배 최영준* 김창업* 김성우* 임달호*

효성중공업(주) 기술연구소* 한양대학교 전기공학과*

Optimal Design of Single-sided Linear Induction Motor Using Genetic Algorithm

Keun-Bae, RYU Young-Jun, CHOI* Chang-Eob, KIM*[†] Sung-Woo, KIM* Dal-Ho IM*

R&D Institute, Hyosung Industries Co., Ltd.*

Dept. of Electrical Eng., Hanyang University*

Abstract

Genetic algorithms are powerful optimization methods based on the mechanism of natural genetics and natural selection. Genetic algorithms reduce chance of searching local optima unlike most conventional search algorithms and especially show good performances in complex nonlinear optimization problems because they do not require any information except objective function value. This paper presents a new model based on sexual reproduction in nature. In the proposed Sexual Reproduction model(SR model), individuals consist of the diploid of chromosomes, which are artificially coded as binary string in computer program. The meiosis is modeled to produce the sexual cell(gamete). In the artificial meiosis, crossover between homologous chromosomes plays an essential role for exchanging genetic informations. We apply proposed SR model to optimization of the design parameters of Single-sided Linear Induction Motor(SLIM). Sequential Unconstrained Minimization Technique(SUMT) is used to transform the nonlinear optimization problem with many constraints of SLIM to a simple unconstrained problem. We perform optimal design of SLIM available to FA conveyor systems and discuss its results.

1. 서 론

유전알고리즘(Genetic Algorithm)이란 자연의 유전학(natural genetics)과 자연선택(natural selection)의 원리[1]에 근거한 최적점 탐색방법(optimum search method)이다. 60년대 중반부터 지속적으로 연구가 진행되어온 유전알고리즘은 확률적인 방법과 개체간의 체계적인 정보교환을 통해 탐색공간(search space)을 조사해나감으로써 주위환경(environment)에 알맞은 가장 적절한 해를 일고자하는 방법이다. 유전알고리즘이 기존의 최적점 탐색방법과 다른 점은 기존방법이 탐색공간의 한 점에서 그 다음 한 점으로 순차적으로 해를 구해 진행해가는 국부적 탐색(local search)인데 비해 유전알고리즘은 여러 점을 동시에 탐색하는 전역적 탐색(global search)을 행한다는 점이다. 따라서 다극점(multimodal) 문제에 있어서 국부수렴(local convergence)할 가능성이 적고, 확률적인 방법에 의한 의사결정으로 최적점 탐색을 위한 어떠한 가능성도 배제하지 않는 점 또한 장점중의 하나다. 그동안 유전알고리즘에 대한 형태 및 성능, 그리고 응용사례 등의 연구결과가 발표되었고[2,3,4,5], 최근에는 국내에서도 효과적인 최적화방법으로서 활용한 연구사례가 제시되었다[6,7,8].

본 논문에서는 다변수에 제약조건이 많은 복잡한 비선형 최적화문제(nonlinear optimization problem)에 특히 유용한 유전알고리즘 모델로서 자연계의 유성생식과정에 기초한 새로운 모델을 제안한다. 기존의 Simple Genetic Algorithm[2]이나 그 밖의 변형된 형태의 모델들이 단일염색체형태인데 비해, 제안된 유성생식모델(Sexual Reproduction Model; SR Model)은 생체계의 경우와 마찬가지로 이배체(diploid)형태로 염색체를 보존한다. 이

러한 이배체 모델은 최적화단계에서 급속한 국부수렴을 막아주고 이중적 정보저장능력으로 동적함수(dynamic function)와 같은 환경변화 요인에 대해서도 적응성을 보여준다. 제안된 SR모델에서는 자손증식을 위해 모델링된 감수분열(meiosis)을 통해 생식세포가 형성되고, 그 과정에서 염색체간의 교차(crossover)를 통한 유전정보교환이 이루어져 다양한 형태의 형질발생이 가능하도록 하였다. 또한, 제약이 있는 최적화문제를 제약이 없는 문제로 변환하는 비선형최적화기법의 일종인 순차 비제약 최소화기법(Sequential Unconstrained Minimization Technique; SUMT)을 정식화하고, 제안된 SR 모델을 이용한 유전적 탐색(genetic search)방법을 논한다.

본 논문에서 제안한 유전알고리즘-SR모델을 이용하여 편측식 선형유도전동기(Single-sided Linear Induction Motor; SLIM)의 설계변수 최적화에 적용하였다. 자기부상열차, 공장자동화용 반송장치 등의 추진장치로 사용되는 SLIM은 특성계산이 복잡하고 고려해야할 변수와 제약조건이 많아 설계가 쉽지 않다. 이에 대한 연구로 SUMT를 사용한 사례가 발표되었는데, 탐색방법으로는 variable metric method를 이용한 방법[9]과 simplex method를 이용한 방법[10] 등이 제시되었다. 목적함수의 도함수를 이용하는 gradient방법의 일종인 variable metric method는 비선형최적화문제에서는 도함수를 구하기 어렵다는 근본적인 난점을 갖고 있고, 초기점을 허용영역(feasible region)에 두기 위한 초기설계가 필요하다는 점, 여타의 gradient방법들과 마찬가지로 국부최소점(local minima)의 문제가 있는 단점이 있다. 한편, simplex법을 이용한 방법은 도함수계산을 필요로 하지는 않으나, 근본적으로 선형계획법(linear programming)에 쓰이는 탐색방법이므로 비선형 최적화문제에서 적격이라고는 볼 수 없으며, 여전히 국부최소점문제를 해결할 수 없는 단점이 있다.

본 논문의 2장에서는 유전알고리즘의 생물학적 기초에 대한 설명과 이 원리에 충실한 SR 모델을 설명하고, 3장에서는 SUMT에 의한 비선형최적화방법에의 적용방법을 논한다. 4장에서는 실제적인 응용문제로서 공장자동화용 반송장치 등에 이용 가능한 SLIM의 최적설계를 행하고 그 결과를 제시한다.

2. 유전알고리즘 - 유성생식모델

생물학적 기초

자연생태계의 생물들은 생식과 유전, 그리고 진화의 과정을 거쳐 종족을 유지함으로써 생명을 연속시켜 왔다. 즉, 생물은 수명이 다하기 전에 자신과 닮은 자손을 생산하는 생식(reproduction)을 하며, 이들 자손이 어버이의 성질이나 모양을 물려받는 현상이 곧 유전(heredity)이다. 또한 생물은 생명의 탄생 이래 오랜시간에 걸쳐 변화하는 환경에 적응하면서 진화(evolution)하여 왔기 때문에 오늘날과 같은 종의 다양성이 나타나게 되었다.

생물의 유전정보는 그 생물의 체세포(somatic cell)속에 있는 염색체(chromosome)속에 존재하며, 이는 염색체에 개체의 형

질(trait)을 결정하는 유전자(gene)가 존재하기 때문이다. 이들 염색체들은 모양과 크기가 비슷한 염색체끼리 쌍을 이루는 이배성(diploidy)을 갖는다. 이와 같은 한 쌍의 염색체를 상동염색체(homologous chromosomes)라 하는데 이러한 구조는 하나의 형질에 대한 유전정보가 2중적임을 알려주는 사실이다. 19세기중반의 Mendel과 그 뒤의 유전학자들의 연구결과에 따르면, 상동염색체의 같은 좌위(locus)상에 자리잡고 있는 대립유전자는 한쌍의 대립형질(alleles)을 나타내며, 이중에서 한가지 형질만이 발현된다는 사실을 발견하였고 이로부터 형질에 우열관계가 있음이 알려졌다. 또한 유전형질의 외적발현과 관련한 우성(dominant)인자의 유전자와 염색체내에 잠재해 있는 열성(recessive)인자의 유전자는 각각 독립적으로 이루어진다는 사실도 관찰되었다. 유전자의 중복구성상과 유전자간 우열관계속에서, 개체의 형질발현과 직접적인 관련이 없는 열성인자가 후손에 와서 발현될 가능성이 일정비를 존재한다는 사실로부터 유전정보는 장기간기억(long term memory)의 효과를 가지게 되며, 생태환경의 변화에 따라 생존과 관련한 선택의 다양성이 주어진다. 실제로 유전자의 우열관계 자체가 진화한다는 사실이 생물학자들에게 의해 증명되어 왔으며, 이러한 사실은 형질의 우열관계가 개체에 주어질 환경변화와 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다.

자연생태계에서 이배성을 갖는 종족들이 번식을 하기위한 유용한 생식방식이 바로 유성생식(sexual reproduction)이다. 유성생식을 통해 자손의 염색체 구성은 어버이로부터 각각 50% 비율로 이루어지며 유전자의 새로운 조합이 생겨남으로써 새로운 형질이 나타난다. 새로운 형질의 발생으로 환경변화에 대하여 적응능력이 우수한 자손이 나타날 수 있다. 유성생식과정에서 어버이로부터 염색체의 수가 증가하지 않고 일정하게 유지되는 것은 생식세포(sexual cell; gamete) 발생을 위한 감수분열(meiosis)과정에서 상동염색체가 분리되어 염색체의 수가 반감(n) 되기 때문인데, 그 결과 발생된 자웅 양쪽의 생식세포가 교배(mating)에 의한 수정(fertilization)과정을 통해 이배성의 단일세포(2n) 즉 접합체(zygote)를 이룬다. 이 접합체로부터 새로운 개체가 형성된다.[1]

유성생식 모델

유전알고리즘을 이용한 최적화 문제에서 여러 제약조건들에 의한 환경변화에 대해 강인한 최적점 탐색성능을 얻기 위해서는 염색체의 이배체구성이 타당하다. 본 논문에서는 생태계의 감수분열과 유성생식의 생물학적 원리에 기초한 유성생식모델(Sexual Reproduction Model: SR Model)을 제안한다.

염색체의 구성

개체가 2n개의 염색체를 갖는 경우 유성생식을 통해 자손에 나타나는 염색체 배열의 경우의 수는 염색체의 수가 많을 수록 더욱 큰 폭으로 증가한다. 제안된 SR모델에서는 알고리즘의 간단화를 위해 한 개체의 염색체수는 한쌍의 상동염색체만을 고려하여 2n=2로 설정한다. 염색체의 구성은 프로그램상에서 인위적으로 유한길이의 2진스트링(binary string)으로 표현된다. 따라서, 유전자는 스트링상에서 1 또는 0의 값을 갖게되며 이러한 이진값들의 조합으로 형질이 결정된다.

적합도

개체와 환경의 상호관계는 그 개체가 갖는 적합도(fitness)로 표현되는데, 개체가 다음 세대(generation)로 자신의 유전자형(genotype)을 존속시키는 것과 깊은 관련을 맺는다. 제안된 SR 모델에서는 적합도값의 크기에 따라 개체의 교배(mating)와 생식할 수 있는 확률이 결정되고, 염색체상에서의 우열관계의 결정 및 감수분열단계에서 염색체간의 교차(crossover)의 확률을 결정하는데도 유용하게 사용된다.

우성과 열성

교배에 의해 얻어진 개체의 우성(dominance)과 열성(recessivity)의 결정은 두 스트링의 적합도를 각각 구하고 그 값이 상대적으로 큰 스트링을 우성으로 결정한다. 따라서, 우성인 스트링은 그 개체의 형질들을 나타내게 되며, 개체의 적합도도 우성의 적합도를 따른다. A, B 두개의 스트링을 갖는 i번째 개체

의 적합도는 다음과 같다.

$$Fitness(A, B, i) = \max[Fitness(A), Fitness(B)] \quad (2-1)$$

환경이 변화하지 않으면 염색체상에 대한 우열관계는 일정하나, 변화하는 환경, 즉 적합도값이 변화할 때에는 우열관계도 그에 따라 변할 수 있다. 따라서, 이전 세대에서의 열성인자로 잠재해 있었던 형질도 상대적 우성이 되어 환경변화에 대처하게 되고, 개체의 적응성이 유지될 수 있다.

연관과 교차

생물체에서 하나의 염색체에 여러개의 유전자가 일직선상으로 늘어서서 염색체와 행동을 같이 하게 되는데 이러한 현상을 연관(association)이라 한다. 마찬가지로 유전알고리즘에서 이진값을 갖는 인공의 유전자들은 스트링상에서 비트(bit)수만큼 연관된 것으로 볼 수 있다.

생태계의 감수분열 단계에서 상동염색체는 각각 2개의 염색분체(chromatid)가 되었다가 이중 하나씩이 일부 유전자를 서로 교환하는 현상이 발생한다. 이런 현상을 교차(crossover)라 한다. 교차를 통해 유전자가 교환되는 과정은 유한개수의 염색체를 갖는 개체가 생식을 통한 유전적 다양성(genetic diversity)을 일으키는 것과 관련하여 중요한 현상이다.

제안된 SR모델에서 교차는 두 스트링의 적합도를 비교하여 그 상대적 차이에 따라 두 스트링의 같은 위치에서 서로의 이진값을 확률적으로 교환하도록 한다. 즉, 두 스트링의 적합도를 비교하여 그 차이가 크다면, 적합도가 큰 스트링쪽에서 적합도가 작은 쪽 스트링으로부터 획득할 유전정보는 많지 않을 것이다. 그러나, 적합도가 비슷한 스트링들은 서로의 유전정보를 활발히 교환하도록 한다던지 적합도가 더욱 향상된 스트링을 얻을 수 있을 것이다. 두 스트링간에 교차가 일어날 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_c(A, B) = \frac{Fitness(A)}{Fitness(A)+Fitness(B)} \quad (2-2)$$

여기서, A, B 는 염색체, Fitness(·)는 염색체의 적합도, $P_c(\cdot, \cdot)$ 는 교차확률(crossover probability)이다.

스트링 길이가 l 인 한쌍의 상동염색체로부터 감수분열을 통해 생식세포가 발생하고, 분열단계에서 교차가 일어나는 과정을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

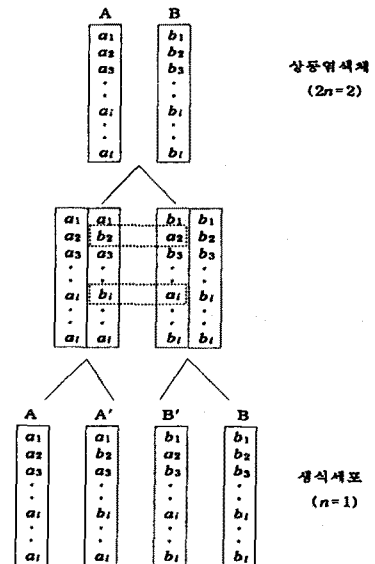


그림 1. 감수분열

그림 1에서 a_i, b_i ($= (0, 1)$)는 각각 A, B 스트링의 i 번째 유전자를 가리키며, 2번째와 i 번째 비트에서 교차가 발생했음을 예시하고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 SR모델에서 하나의 개체는 4개의 생식세포를 발생시킨다. 탐색 과정에서 염색체의 국부적 동작(local action)을 통해 어버이보다 더욱 나은 전역적 성능(global performance)을 얻을 수 있는 점이 유전적 탐색방법의 장점중의 하나이며, 교차는 그 핵심적 역할을 수행한다.

돌연변이

유전자의 본체인 DNA(Deoxyribonucleic Acid)는 복제(replication)과정에서 불규칙한 변화가 발생하기도 한다. 유전자의 돌연한 형태변화로 새로운 형질이 발생하게 되는 현상을 돌연변이(mutation)라 한다. 돌연변이는 생물의 진화에서 교차와 마찬가지로 중요한 요인이 된다. 일반적으로 유전알고리즘에서는 돌연변이에 의해 국부탐색(local search)은 물론 탐색공간을 다양하게 이동(global shift)하는 것이 가능하다. 그러나, 한편으로 돌연변이는 환경에 대한 적응성과는 무관하게 랜덤하게 발생하므로 그 발생확률을 너무 크게 하면 중요한 형질을 잃을 가능성이 있다. 따라서, 너무 크지 않도록 사전에 주의해서 선택해야 한다. 일반적으로 유전알고리즘에서는 스트링의 본래의 비트값을 0에서 1로 또는 1에서 0으로 변화시켜 간단히 돌연변이를 시행한다. 제안된 SR모델에서는 교차과정에서 일정확률로 돌연변이가 이루어지도록 한다.

교배와 생식

생태계에서는 여러 개체가 모여 하나의 개체군(population)을 이루고 교배를 의한 생식과정을 통해 자손을 증식하고 여러 세대에 걸쳐 종족을 보존한다. 개체군에 주어지는 생태환경의 변화에 따라 적응성이 높은 개체만이 적자생존 방식으로 선택되어 자손을 번식시킬 수 있다. 따라서, 유전알고리즘에서는 개체의 적합도에 비례하여 그 개체의 교배할 수 있는 확률이 주어진다. 유전알고리즘에서의 교배방법은 여러가지가 있으나 본 논문에서 제안된 모델에서는 일반적인 weighted roulette wheel[2]을 이용, 교배할 개체를 확률적으로 선택한다. 단, 지속적인 성능의 향상을 위해 한 세대에서 가장 적합도가 큰 개체는 반드시 교배가 이루어지도록 하여 다음세대까지 자손을 번식할 수 있도록 하는 것이 좋다. 다양한 유전자형의 발생을 위해 모든 개체는 2번이상 교배하는 것을 피하도록 한다. 또한, 같은 개체가 홀로 생식하는 자가수분(self fertilization)의 형태도 가능한 대립유전자가 같은 값을 갖는 동형접합자(homozygote)가 발생하게 되고, 동형접합자는 교차에 의한 새로운 형질의 발생이 불가능하므로 바람직하다고 할 수는 없다.

개체군의 크기

그림 1에서도 설명된 바와 같이 한 개체로부터 얻어지는 생식세포의 수는 4개이므로 한 번 교배로 얻어질 수 있는 자손의 형태는 16가지가 된다. 따라서, 제안된 SR모델에서 개체군을 이루는 개체의 수는 교배의 횟수에 따라 유동적이며, 개체수의 무한정 증가를 억제하기 위해서는 교배횟수를 억제하여야 한다.

3. 비선형 최적화 문제에서의 유전적 탐색

목적함수의 변환

실제적인 최적화문제에서는 몇개의 제약조건(constraints)이 포함되는 것이 일반적이다. 제약이 있는 최적화문제를 제약이 없는 문제로 변환하여 최적화단계에서 제약에 대한 별도의 고려없이 궁극적으로 제약조건을 만족하는 최적해를 얻는 방법으로 penalty method[14]가 쓰인다.

n 개의 부등식 제약이 있는 일반적인 최소화문제는 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(X) \\ \text{subject to} & h_i(X) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \end{array}$$

(3-1)

여기서, X 는 $m \times 1$ 변수벡터이다.

penalty method에는 내점법(interior method)과 외점법(exterior method)이 있다. 내점법은 목적함수의 도함수를 이용하여 점진적으로 최적점을 찾아나가는 탐색방법(gradient method)에 알맞으며, 초기점이 반드시 제약조건을 만족하는 허용영역(feasible region)에 있어야 하는 단점이 있다. 반면에 외점법에는 허용영역에 대한 제한이 없다. 따라서, 초기값이 랜덤하게 주어지고 제약조건등에 대해 아무런 정보없이 여러 위치에 서 병렬로 탐색하는 유전알고리즘에는 외점법이 적절하다.

위의 목적함수를 penalty method의 외점법에 의해 제약이 없는 형태로 변환하면, 식(3-2)와 같다.

$$\begin{array}{l} \text{Minimize} \quad P(X) = f(X) + r \cdot \sum_{i=1}^n [\min(0, h_i(X))]^2 \\ r = r_0, r_1, r_2, \dots, r_k \rightarrow \infty \end{array}$$

(3-2)

여기서, 정수 $r(>0)$ 을 penalty계수라 하며, 이 계수를 $r_k = r_{k-1} * c$ ($c > 1$)에 따라 순차적으로 증가시키면서 변환된 목적함수 $P(X)$ 를 최소화시키면, 제약에 대한 강도 또한 순차적으로 커지고, 결국 제약조건을 만족하면서 원래의 목적함수 $f(X)$ 를 최소화하는 해가 얻어진다. 따라서, 이러한 방법을 순차 비제약 최소화 기법(Sequential Unconstrained Minimization Technique : SUMT)이라고 부른다.

유전적 탐색을 위한 기본설정

형질결정을 위한 mapping

인공적인 염색체인 스트링상에 이진수의 유전자형(genotype)으로 코딩(coding)된 유전정보는 개체의 표현형(phenotype), 즉 실변수값을 얻기위한 과정이 필요하다. 또한, 다변수(multiparameter) 최적화문제에서는 각각의 변수에 대한 이진정보가 스트링상에서 직렬로 코딩되므로 이 정보들을 변수집합(parameter set)으로 mapping하면 변수 개수만큼의 형질이 결정된다. 한 변수에 대한 스트링의 길이를 l_i 로 할당하면, 스트링이 나타내는 이진수 b_i 의 범위는 $[0, 2^{l_i}-1]$ 이 되고 이 값은 다음식에 의해 실변수의 범위 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 로 선형적으로 mapping된다.

$$x_i = x_i^{\min} + \frac{b_i}{2^{l_i}-1} (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \quad (3-3)$$

변수범위

2진정보의 실변수로의 mapping을 위해서는 반드시 변수의 범위 $[x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ 를 설정해야 한다. 유전알고리즘을 이용한 탐색에서는 이러한 mapping 단계에서 변수에 대한 제약이 부가되는 것이다. 따라서, 최적화문제에서 변수 자체에 대한 제약조건이 주어지는 경우에는, 별도의 제약조건으로 두지 않아도 되는 장점이 있으며, 탐색과정에서 불필요한 공간으로의 확산을 방지할 수 있다.

스트링 길이

각 변수의 스트링 길이는 결정은 최적점탐색의 분해능(resolution)과 관련되는 문제이다. 만일, 최적점탐색에 있어 한 변수값에 요구되는 정밀도(precision)가 $p(x_i)$ 라면, 그 변수에 할당되어야 할 스트링상의 비트수 l_i (정수)는 다음식을 만족하여야 한다.

$$l_i \geq \log_2 \left(\frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{p(x_i)} + 1 \right) \quad (3-4)$$

예를 들어, 변수범위가 $[50, 150]$ 이고 요구되는 정밀도가 0.1 이라면, 식(3-4)에 따라 $l_i \geq 9.96$ 가 만족되어야 하고, 이에

따라 1번째 변수의 코딩을 위해서는 최소한 10비트가 할당되어야 한다.

스트링의 전체길이 l 은 각 변수에 할당된 비트수의 합으로 결정된다.

$$l = \sum_{i=1}^n l_i \quad (3-5)$$

적합도의 평가

스트링의 전체길이 l 이 결정되면, 유전알고리즘을 이용한 최적화문제는 2개의 점이 존재하는 이산적인 탐색공간에서 적합도를 최대화하는 점을 찾는 문제로 단순화된다. 그러므로, 목적함수 최소화문제를 적합도 최대화문제로 변환하는 과정이 필요하며, 이는 목적함수의 역으로 쉽게 얻을 수 있다.

$$Fitness(A) = 1 / P(X) \quad (3-6)$$

여기서, X 는 스트링 A 의 2진정보를 식(3-3)에 의해 mapping하여 얻어진 $m \times 1$ 의 변수벡터이다. 각 세대마다 모든 개체는 적합도에 대한 평가(evaluation)를 시행하고 적합도값의 결과는 우열관계, 교차, 교배등에 중요한 정보가 된다.

유성생식모델과 SUMT를 이용한 최적화

SUMT 는 식(3-1)과 식(3-2)에서 알 수 있는 바와 같이, 제약 목적함수속에 포함시키고 순차적으로 제약의 강도를 증가시켜 나간다. 한 세대에서 그다음 세대로 진화해감에 따라, penalty계수를 점진적으로 증가시킨다. 따라서, 목적함수가 최적화진행에 따라 변화하게 되며, 이 변화는 유전알고리즘의 관점에서 볼 때 환경의 변화로 생각할 수 있다. 제안된 SR모델은 개체간의 유성생식과 이배체구성에 의해 장기간 형질 보전이 가능하여 환경변화에 강한(robust)한 특성을 갖는다. 또한, 사전설계할 기본환경에 대한 사전설계가 끝나고 최적점탐색에 들어가면 적합도 평가를 위한 목적함수값이외에는 어떠한 정보도 필요로 하지 않으므로 비선형 최적화에서 직접적인 해를 얻는데 적절한 방법이다.

4. 편축식 선형유도전동기의 설계변수 최적화

편축식 선형유도전동기의 설계변수

자기부상열차, 공장내 자동반송장치등의 추진장치로 사용되는 선형유도전동기는 복잡계산이 복잡하고 고려해야할 변수와 제약조건이 많아 설계가 쉽지 않다. 그림 2에 편축식 선형유도전동기(SLIM)의 구조와 각종변수를 나타내었다.

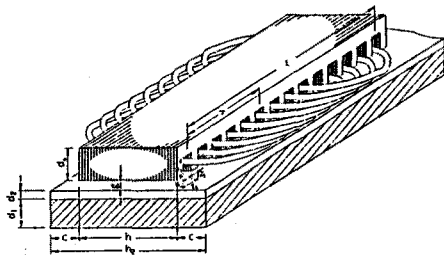


그림 2. SLIM 의 구조 및 변수

본 논문에서는 공장자동화나 기타산업용으로 사용가능한 소형SLIM을 설계하는데 있어서, 추력, 속도등 원하는 정격사양을

정하고, 목적함수로서 1차속중량, 전원용량을 선정, 이를 최소화하는 설계변수 최적화를 수행한다. 모터설계를 위한 독립변수로서는 1차속의 core 크기를 결정하는 데 필요한 극간격 τ , 적층 두께 h , 치의 형상을 결정하는 슬롯폭/슬롯피치의 비 kt , 자속을 결정하는 코일 Turn수 N , 2차속의 크기를 결정하는 Back Iron 두께 d_1 , 2차속도체(AI) 두께 d_2 , Overhang 길이 c 등 모두 7가지를 선정한다. 제약조건으로서는 상용전원을 쓰는 인버터의 출력전압에 대한 상한값으로 선간전압 $\sqrt{3}V_1 (< 220V)$, 모터크기에 대한 제약으로 모터길이 $L (< 300mm)$ 을 선정하고, 치폭 zt 은 제작상의 문제를 고려하여 하한치($\geq 2mm$)를 주며, 모터의 전기적, 자기적 특성을 고려하여 치의 최대자속밀도 $B_{tm} (< 1.5T)$, 역률(≥ 0.5)등을 제약조건으로 선정한다. 고정변수로서 기계적 공극 $g = 3mm$, 상수 $m = 3$, 매극매상당의 슬롯수 $q = 2$, 단절률 $\beta = 5/6$, 코일의 전류밀도 $J_1 = 4.3 A/mm^2$ 등이 주어진다. SLIM의 특성계산은 등가회로에 의한 근사특성계산식[11]을 이용하였다.

SR모델을 이용한 SLIM설계

SR 모델을 이용한 최적화를 수행하기 전에 몇가지 기본환경을 정해야 한다. 스트링의 길이 $l=64$, 돌연변이확률은 0.015로 하였다. 개체의 수는 가변적이나, 본 설계에서는 80개로 한정하고, 간단히 매세대마다 5번의 교배를 행하여 그 자신이 모두 다음세대의 개체군을 이루도록 하였다.

목적함수를 1차속중량으로 하였을 경우 최적화 수행과정에서의 목적함수값의 변화 및 수렴과정을 그림 3에 나타낸다. 독립변수의 수렴과정은 그림 4에, 그리고 제약조건에 대한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 penalty가 적은 영역에서는 몇가지 제약조건을 만족시키지 못하나, 점차 세대교체가 이루어짐에 따라, 제약을 벗어나 허용영역으로의 독립변수의 수렴이 이루어진다.

그림 6은 목적함수를 전원용량으로 하였을 경우의 최소화되는 과정을 보여주고 있다.

최적화 수행결과를 표 1에 제시하였다.

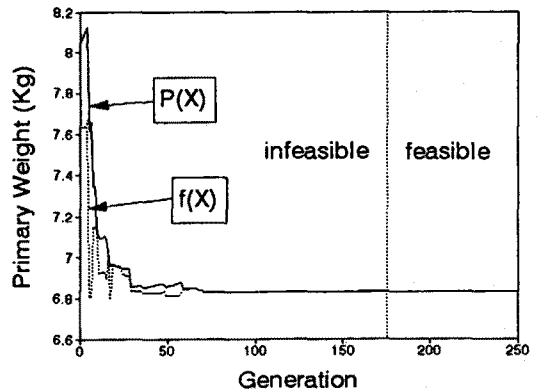
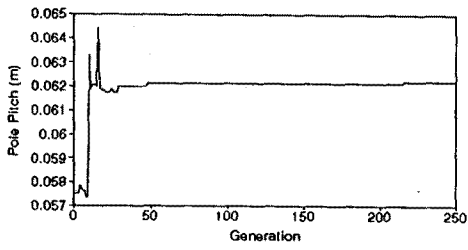
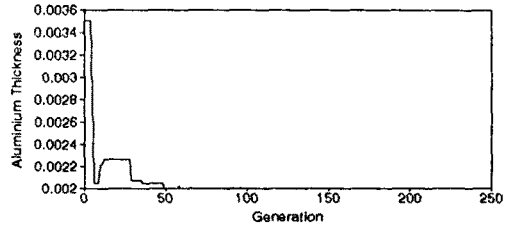


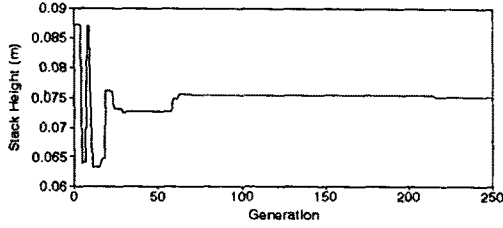
그림 3. 목적함수(1차속중량)



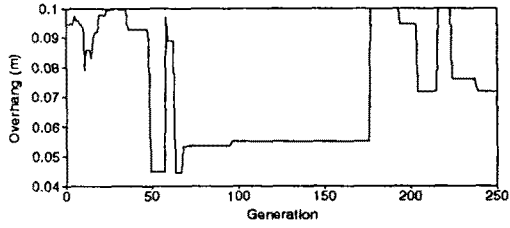
a. 극간격



f. Aluminium 두께

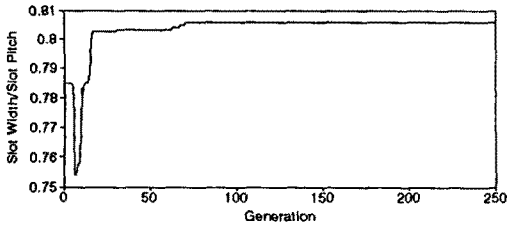


b. 적층 두께



g. Overhang 길이

그림 4. 독립변수



c. 슬롯폭/슬롯피치

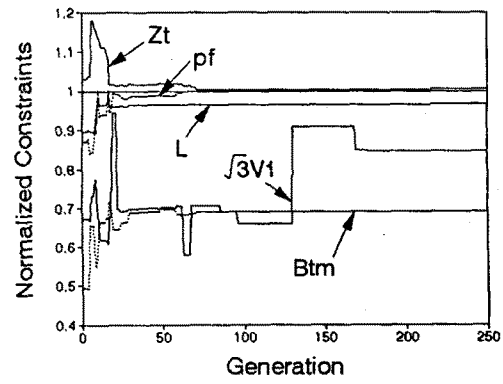
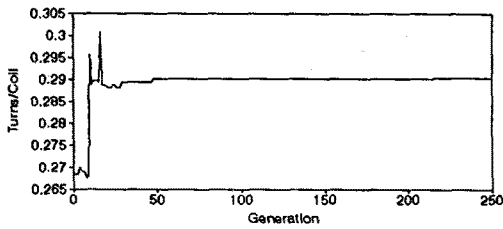


그림 5. 제약조건에 대한 변수



d. 코일 턴수

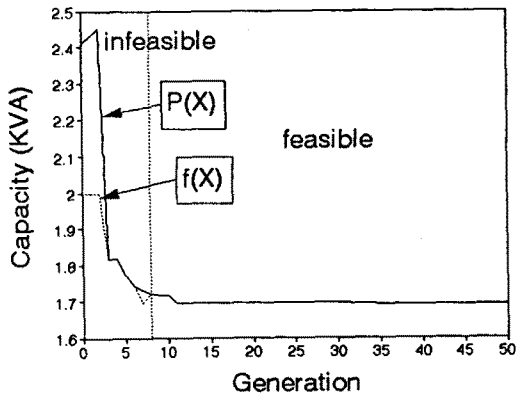


그림 6. 목적함수(용량)

표 1. SLIM의 설계 결과

분류	명칭 및 단위	계약 조건	고정 변수	독립 변수	목적함수	
					1차측중량	전원용량
정격	선간전압 (V)	≤220			186	130
	주파수 (Hz)		○		60	60
	1차전류 (A)				5.7	7.5
	용량 (KVA)				1.8	1.69
	정격슬립				0.67	0.68
	정격추력 (N)		○		100	100
	정격속도 (m/s)		○		2.5	2.5
1차측	모터길이 (mm)	≤300			290	299
	상수		○		3	3
	극수		○		4	4
	극간격 (mm)			○	62	64
	철심적층두께 (mm)			○	75	100
	철심높이 (mm)				47	40
	매극매상의 슬롯수		○		2	2
	슬롯폭/슬롯피치			○	0.81	0.81
	슬롯폭 (mm)				8	9
	슬롯피치 (mm)				10	11
	치폭 (mm)	≥2.0			2	2
	슬롯깊이 (mm)				43	36
	단집률		○		5/6	5/6
	코일당 Turn수			○	54	36
	상당리얼 Turn수				432	288
반코일길이 (mm)				153	180	
1차저항 (Ω)				1.7	1.0	
1차누설리액턴스 (Ω)				8.0	3.9	
치의최대자속밀도 (T)	≤1.5			1.0	0.8	
1차측중량 (Kg)				6.8	7.4	
2차측	기계적 공극 (mm)		○		3	3
	Back Iron 두께 (mm)			○	6	6
	Aluminium 두께 (mm)			○	2	2
Overhang	길이 (mm)			○	69	97
	KW/KVA				0.14	0.15
특성	역률	≥0.5			0.50	0.56
	효율				0.27	0.27

참고문헌

- [1] Francisco J. Ayala and John A. Kiger, Jr., *Modern Genetics*, Benjamin/Cummings, 1980.
- [2] David E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [3] Kenneth De Jong, "Adaptive System Design: A Genetic Approach," *IEEE Trans. Sys., Man, Cyber.* vol.SMC-10, no.9, September, 1980.
- [4] John J. Grefenstette, "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Sys., Man, Cyber.* vol.SMC-16, no.1, January/February, 1986.
- [5] Charles L. Karr and Edward J. Gentry, "Fuzzy Control of pH Using Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol.FS-1, no.1, pp.46~53, February, 1993.
- [6] 박세희, 김용호, 심귀보, 전홍태, "유전알고리즘을 이용한 퍼지 규칙 베이스의 자동생성," *대한전자공학회의논문지*, 제29권-B, 제2호, 1992.
- [7] 황희수, 오성권, 우광방, "유전알고리즘과 퍼지 추론 시스템의 합성," *대한전기학회논문지*, 제41권, 제9호, pp.1095~1103, 1992.
- [8] 김석환, 정현교, 한송엽, "커패시터로 구동되는 코일권의 최적설계," *대한전기학회논문지*, 제41권, 제12호, pp.1379~1385, 1992.
- [9] 임달호, 이철직, 박승찬, "등가회로법과 SUMT를 이용한 편측식 선형유도전동기의 설계변수 최적화," *대한전기학회논문지*, 제42권, 제5호, pp.20~28, 1993.
- [10] T. Higuchi and S. Nonaka, "非線形最適化手法を用いた片側式誘導モータの設計について," *Trans. IEE Japan*, vol.112-D, no.12, pp.1171~1178, 1992.
- [11] S. Nonaka, "片側式リアインダクションモータの近似特性計算式について," *Trans. IEE Japan*, vol. 102-B, pp.565~572, 1982.
- [12] S. Nonaka and T. Higuchi, "非線形最適化手法を用いた産業用小型LIMの設計について," *日本電氣學會研究會資料*, LD-91-81, 1991.
- [13] S. Nonaka and T. Higuchi, "ドライブからの制約を考慮した産業用小型LIMの設計について," *日本電氣學會研究會資料*, LD-91-99, 1991.
- [14] Garret N. Vanderplaet, *Numerical Optimization Techniques For Engineering Design*, McGraw-Hill, 1984.

5. 결론

본 논문에서는 자연계의 생물학적 원리에 근거한 새로운 유전알고리즘 모델을 제시하였다. 제안된 유성생식모델(SR 모델)과 비선형 최적화 기법인 SUMT에 대한 적용을 논하였고 실제적인 문제로서 편측식 선형유도전동기의 설계변수 최적화에 수행하였다. 결과에서 볼 수 있었던 바와 같이 제안된 SR 모델은 복잡한 비선형 최적화문제에 효과적인 성능을 보였다.

SLIM의 설계결과에서 볼 수 있는 바와 같이 목적함수를 달리 했을 경우에 따라, 설계결과의 차이가 있었다. 따라서, 2개의 목적함수를 동시에 최적으로 만족하는 설계치를 찾는 다중목적 최적화(Multiobjective Optimization)에 SR 모델을 이용하는 연구가 현재 진행되고 있다.

이 논문은 한국전력공사지원 제조업 경쟁력 강화를 위한 생산 기술개발사업으로 이루어진 연구결과중 일부입니다.