

## 유전 알고리즘을 이용한 자기부상 제어기의 개인 최적화

김종문

한국전기연구원 계측제어연구그룹

### Gain Optimization by Using Genetic Algorithm for Magnetic Levitation Controller

Jong-Moon Kim

Instrumentation and Control Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper presents a gain optimization method using genetic algorithm (GA) for a magnetic levitation (Maglev) controller. GA uses the integral of square error(ISE) as performance index. The plant dynamics are described and modelled by mathematical equations. Also, the system apparatus for the Maglev system are described. Using the derived model, to optimize the feedback gains of conventional state feedback controller(SFC), GA is simulated with SIMULINK model. Finally, using the optimized feedback gains, SFC is applied to the Maglev system. From the results, we can see that GA can give a solution for the better control performance for the Maglev system.

### 1. 서 론

지난 수십 년 간 자기부상 기술은 자기부상열차, 자기베어링, 플라이 휠 등 산업 현장에 널리 사용되어 왔다 [1]. 최근에는 초고속 회전장치 및 초정밀 반도체 장비 [2]와 같은 극한 기술 분야에도 자기부상 기술을 적용하는 중에 있다. 이러한 자기부상 시스템은 자력에 의해 대상체를 비접촉으로 부상시켜 추진 또는 회전시키기 때문에 자체적으로 많은 이점이 있다. 즉, 마모, 마찰이 없어 내구성이 강하며, 소음이 없다. 또한 윤활 장치를 필요로 하지 않기 때문에 공해 문제가 없어서 청정설에도 적합한 시스템이다. 그리고 기존의 기계적 베어링에 비하여 자기 베어링은 수 나노 급의 위치 제어시스템에 적용할 때, 진동 및 마찰이 거의 없어 초정밀 위치제어가 가능하다는 장점도 있다.

자기부상 시스템은 구현된 마그네트에 따라 여러 가지가 있으나, 이 논문에서는 코일과 영구자석이 혼용된 controlled-permanent magnet(CMAG) 즉 하이브리드 자기부상을 대상으로 한다. CMAG 시스템은 정상상태에서는 코일 전류가 거의 0이기 때문에 손실이 거의 없게 구현될 수 있다는 장점이 있다.

자기부상 제어기는 지금까지 여러 가지의 형태로 구현되어 왔다. 그 중 가장 일반적으로 사용되어온 제어기는 Proportional-Integra-Derivative(PID)와 SFC[1]이다. PID 제어기는 자기부상 뿐만 아니라 산업계 전반에 걸쳐 적용되어 왔고, 구조가 간단하면서도 성능이 뛰어나다는 장점이 있다. 상태 케환 제어기는 시스템의 상태 변수를 직접 피드백하여 원하는 제어 성능을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 상태 변수를 직접 측정할 수 없다면 문제가 생길 수 있게 된다. 이 경우 관측자를 사용하여 내부 상태 변수를 추정하여 결국 상태 변수를 피드백하는 것이 일반적이다. 하지만 부상 제어기의 형태가 PID 또는 상태 케환 제어기라 하더라도 그 제어기 파라미터를 최적값으로 선정하는 것이 매우 중요하다.

따라서 이 논문에서 자기부상 제어기는 관측자를 포함

하는 상태 케환 제어기 형태(OSFC)이고, 주어진 제어 알고리즘에 대해 성능 지수를 최소로 하는 최적의 파라미터를 선정하기 위한 방법을 살펴보자 한다. 제어기 파라미터를 최적화하는 알고리즘은 여러 가지가 있으나, 이 논문에서는 유전 알고리즘을 적용하기로 한다. 유전 알고리즘[3]은 John Holland에 의해 처음 도입된 최적화 탐색 알고리즘으로서 유전적인 계승과 적자생존이라는 진화의 원리를 이용, 확률적인 방법으로 최적 해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘은 탐색영역의 미분가능과 같은 수학적인 조건이 필요하지 않고 국부 수렴을 피할 수 있다는 점에서 다른 최적화 기법에 비해 우수하다는 장점은 있으나 해가 수렴하기 까지 시간이 많이 걸리며 설계 변수의 유전자적인 표현이 곤란한 경우 적용하기가 쉽지 않다는 단점도 지니고 있다.

이 논문에서는 CMAG 시스템에 대한 자기부상 시스템의 부상제어기인 SFC와 개인 투닝 알고리즘인 GA를 결합하여 설계하고, 이 결과는 제작된 자기부상 장치에 적용한다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 2.1절에서는 먼저 영구자석을 포함한 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델링을 한다. 2.2절에서는 구해진 모델에 대한 상태 케환 제어기를 설계한다. 그리고 2.3절에서는 Matlab /SIMULINK에 의해 GA를 적용한 개인 최적화 과정을 설명한다. 2.4절에서는 구해진 개인을 이용하여 실제 실험장치에 적용한 결과를 보인다. 마지막으로는 결론을 맺었다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시스템 모델링

이 절에서는 그림 1과 같이 케일이 강체이고, 누설 자속이 없다는 가정한 후, 영구자석을 포함한 마그네트-케일 시스템에 대한 수학적 모델링을 한다. 영구자석이 포함된 자기부상 마그네트의 형태는 매우 다양하지만, 이 논문에서 다루는 하이브리드 자기부상 마그네트는 U자형 케일에 코일을 감고 케어 사이에 영구자석을 박은 형태이다. 관심의 대상인 이 부상 방식은 흡인식이며, 영구자석은 전체 자기회로에서 일정한 기자력을 발생하고, 시간적으로 변하는 제어용 기자력을 케일에 위해서 발생된다. 그리고 코일과 영구자석에 의한 공극에서의 흡인력  $f(t)$ 는 자기 축적에너지  $W(t)$ 를 공극에 대해 편미분 형태로 표현되고, 전류의 자승에 비례하고, 공극의 자승에 반비례한다.

$$f(t) = \frac{S}{\mu_0} \left( \frac{c_1 i(t) + B_r}{c_2 \delta(t) + 1} \right)^2 \quad (1)$$

여기서  $B_r$ 는 잔류자속밀도,  $S$ 는 공극에서의 철심의 극 단면적이고, 계수  $c_1$ 와  $c_2$ 는 각각  $\mu_\mu N/l_r$ 와  $2\mu_\nu/l_r$ 이다.

$\ell$ 는 영구자석의 자로길이인데, 영구자석의 높이와 같다.

그림 1에서 흡인력  $f(t)$ 와 가속도  $\ddot{\delta}(t)$  사이의 관계는

$$m\ddot{\delta}(t) = mg - f(t) + f_d(t) \quad (2)$$

이고,  $m$ 은 전체 질량이고,  $g$ 는 중력가속도,  $f_d(t)$ 는 외부로부터의 힘 외란이다. 힘 외란의 소스는 CMAG 시스템에서는 부상 후 추진할 때의 추진 모터에서 발생하는 수직력이 가장 크고, 작업 중에 부하가 수시로 변하는 것도 부상계에서의 외란이라 할 수 있다. 또한 그림 1에서 인덕턴스  $L(t)$ 는

$$L(t) = \frac{c_3}{c_4 + 2\delta(t)} \quad (3)$$

이 된다. 여기서  $c_3$ 과  $c_4$ 는 각각  $\mu_0 N^2 S$ ,  $\frac{l_c}{\mu_c} + \frac{l_o}{\mu_p}$ 이고,  $\mu_c$

와  $\mu_p$ 는 각각 철심과 영구자석의 비투자율이고,  $\mu_o$ 는 전공속의 비투자율이다.  $\ell$ 는 철심의 자로길이이고,  $N$ 은 코일의 권선수이다.

식 (2)의 기계적 방정식과 별도로 전기적 방정식은 다음과 같이 전압 방정식으로 표현된다.

$$v(t) = Ri(t) + L(\delta, i)\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{d\delta}\left(\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (4)$$

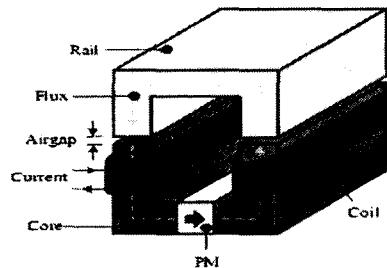


그림 1 영구자석이 있는 자기부상 시스템

## 2.2 부상제어기 설계

이 논문에서는 CMAG 자기부상 시스템의 부상제어를 위하여 전형적인 상태궤환 제어를 설계한다.[4]

$$\begin{aligned} v(t) &= K_p(\delta(t) - \delta_r(t)) \\ &+ K_i \int (\delta(t) - \delta_r(t)) dt + K_v \dot{\delta}(t) - K_c i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $K_p$ 는 캡 게인,  $K_i$ 는 적분 게인,  $K_v$ 는 속도 게인,  $K_c$ 는 전류 게인이다.

피드백 게인은 GA에 의해 가장 성능이 우수한 것으로 선택된다.

## 2.3 제어기 파라미터 최적화

유전 알고리즘은 최적화 탐색 알고리즘으로서 유전적인 계승과 적자생존이라는 진화의 원리를 이용, 확률적인 방법으로 최적해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 즉 자연의 진화 과정을 인공시스템에 적용한 것으로 이 진수의 문자열로 표현되는 개체군으로부터 출발한다. 이들은 모여서 하나님의 세대를 이루며 복제, 교배, 돌연변이 등과 같은 과정을 거쳐 다음 세대를 형성한다. 유전 알고리즘이 적용되는 목적으로 따라 적합도를 판별하는 함수가 정의되고 각 세대들은 이 적합도가 큰 방향으로 적자 생존의 이론을 기본으로 진화되어 나간다.

이 논문에서는 SFC 제어기의 각 개인을 유전 알고리즘을 이용하여 최적의 값으로 구했다. 유전 알고리즘은 기본적으로 세 가지의 유전자로 구성된다. 선택, 교배, 돌연변이로 구성되고, 일정한 길이와 크기를 갖는 스트링이 필요하며, 길이가 변하는 스트링을 가질 경우 새로운 연산자의 개발이 필요하게 된다. 탐색 과정에 염색체간의 국부적 동작을 통해 어버이보다 더욱 나은 전역적 성능을 얻을 수 있다는 점이 유전적 탐색방법의 장점중의 하나이며, 교배는 그 핵심적 역할을 수행한다. 사용한 시뮬레이션 툴은 MATLAB 6.1 SIMULINK와 MATLAB SIMULINK[5]와 연결이 가능한 GA tool을 사용하였다. 시스템 오차에는 제곱오차 적분 값, 시간을 곱한 제곱 오차 적분 값, 절대오차 적분 값, 시간을 곱한 제곱 오차 적분 값 등이 있으나 본 논문에서는 제곱오차 적분 값을 목적 함수로 사용했다. 제곱오차 적분 값은 시스템 오차 값을 제곱한 후 전 시간에 대해 적분한 것이다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f(x) = \int_0^t (-\delta_r(t) + \delta(t))^2 dt \quad (6)$$

SFC 제어기의 개인에 해당하는 비트 수는 6비트로 두었고 세대 수는 40세대를 반복시켜서 최적의 해를 얻어내었다. 또한 초기 기준 입력은 0.1초 후의 스텝 입력으로 두었다.

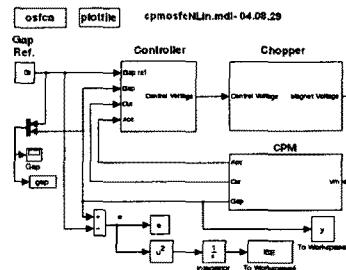


그림 2 시뮬레이션 다이아그램

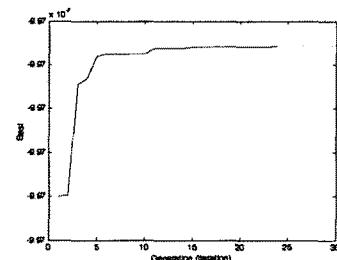


그림 3 각 세대 당 최적 스트링의 ISE 값

표 1 SFC 개인 튜닝 결과

제어기 gain	SFC 제어기	
	튜닝 전	튜닝 후
$K_p$	15000	16864
$K_i$	5000	5688
$K_v$	150	165.6

## 2.4 실험 결과

이 절에서는 제작된 영구자석이 포함된 자기부상 시스템의 하드웨어에 대하여 설명한다. 제작된 시스템은 U자형 상전도 마그네트와 영구자석이 함께 있고, 센서로는 캡 센서, 전류 센서 및 가속도계를 사용하였고, 마그네트는 2 개가 병렬로 연결되어 한 코너를 담당하여 모두 8 개의 마그네트가 있다. 따라서 네 코너가 비접촉으로 공중에 떠있는 형태가 되며, 마그네트 사이는 강체로 연결되었다. 부하를 기반하기 위하여 마그네트 위에 부하를 실을 수 있도록 하였다. 또한, VME 버스 기반의 미국 Motorola사의 300 MHz 클럭 주파수의 PPC604 CPU 보드를 사용하였다. 제어 프로그램에서 샘플링 주파수는 4 kHz이고, 실시간 운영체계인 VxWorks[6] 환경에서 C 코드로 구성되어 있다. 제어 프로그램은 Tornado[7] 환경에서 노트북에서 개발된 후, 컴파일되어 이더넷을 통하여 VME CPU 보드에 다운로드 된 후, 실행된다. 센서는 미국 KAMAN사의 캡 센서와 Dytran 사의 가속도계 그리고 전류 센서를 사용하였다. VME AD 보드는 12 bit의 정밀도를 가지며, -5~+5 V까지 변환할 수 있고, 최대 32 채널까지 변환이 가능하다. 디지털 제어기는 AD 보드로부터 읽은 디지털 값을 이용하여 제어 알고리즘을 계산한 후, 제어기 출력 신호를 초퍼에 PWM 형태로 팍케이블을 통하여 전송된다. 초퍼는 4상한 방식으로서, 부하에 전압 및 전류를 양방향으로 인가할 수 있다. 스위칭 소자는 IGBT, 스위칭 주파수는 10 kHz, DC 입력전압은 120 V이다. 이 시스템에서 부상 마그네트는 모두 8개인 데, 초기 부상에 필요한 전류는 약 5A가 된다. 그러나 정상상태에서는 거의 0 A가 되며, 이 때, 전체 부하는 영구자석에 의해 지지된다. 물론 부하가 변하면 부상제어기는 캡을 일정한 값으로 유지하기 위하여 마그네트 전류를 증가 혹은 감소시키게 된다. 그러나 제어 목적에 따라서 그 반대로 할 수도 있다. 즉, 마그네트 전류는 항상 0 A로 유지하고, 부하에 따라 캡을 바꿀 수도 있는 데, 이것은 영구자석을 쓰는 응용분야에 따라 제어기 구조를 변화시키면 된다. 제작된 CMAG형 자기부상 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

표 2 시스템 파라미터

파라미터	값	단위
대차 무게	1000	kg
마그네트 개수	8	개
마그네트 저항	7	$\Omega$
공칭 인덕턴스	0.26	H
코일 권선수	600	턴
코일 굵기	1.0	mm
초기 공극	1.5	mm
공칭 공극	3	mm
영구자석 재료	NdFeB	
영구자석 등급	N35SH	
영구자석 $B_r$	1.17	T

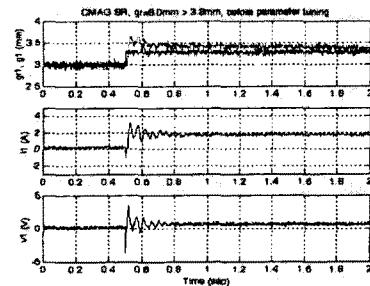


그림 4 튜닝 전 부상 결과: 캡, 전류 및 제어전압

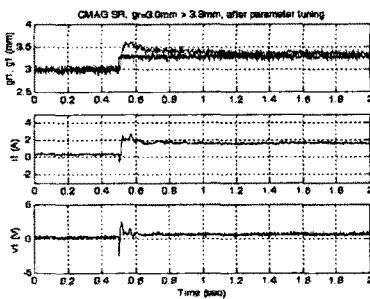


그림 5 튜닝 후 부상 결과: 캡, 전류 및 제어전압

### 3. 결 론

이 논문에서는 하이브리드 자기부상 시스템에 대한 부상 제어기 파라미터 결정을 하기 위한 방법에 대해 언급을 하였다. 부상 제어기는 SPC이고, 속도 신호를 추정하기 위해 저차수 관측자를 사용하였다. 파라미터 최적화를 위한 알고리즘인 GA에 의해 제어기 파라미터는 ISE 값을 최소화하면서 20 세대 이내에 결정되었고, 그 최적값은 실제의 실험 결과에서도 최적의 제어 성능을 보여 주었다.

하지만 이 논문에서 구현된 부상 제어기인 SFC와 다른 제어기를 구현할 경우 그 제어기 파라미터의 최적값을 GA에 의해 다시 결정할 수도 있다. 이것은 부상 제어기 알고리즘과 GA는 전혀 별개의 문제가 된다. 따라서 추후 과제로는 부상 성능을 향상시킬 수 있는 부상 제어기 설계가 필요하고, 이와 함께 제어기 파라미터 최적화를 위한 고성능의 새로운 튜닝 알고리즘을 적용할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*, Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] Dick de Roover, *Motion control of a wafer stage*, Delft University Press, 1997.
- [3] C.F. Ostia and O.Y. Chuy, "Genetic tuning of fuzzy controller," *Mindanao Journal XXVII*, pp. 197-239, 2003.
- [4] 한국전기연구소 보고서, 부상 및 추진 제어기술 개발, 1998. 9.
- [5] B. Shahian and M. Hassul, *Control system design using MATLAB*, Prentice-Hall Inc, 1993.
- [6] *VxWorks User's Guide*, The WindRiver, 1996.
- [7] *Tornado 2 User's Guide*, The WindRiver, 2000.