

최적 퍼지PID제어기를 이용한 자기부상시스템의 부상제어기 설계

Design of Levitation Controller with Optimal Fuzzy PID Controller for Magnetic Levitation System

조재훈* · 김용태*†

Jae-Hoon Cho*, and Yong-Tae Kim*†

*한경대학교 스마트물류기술연구센터, **한경대학교 전기전자제어공학과

†Smart Logistics Technology Institute, Hankyong National University

† Dept. of Electrical, Electronics and Control Engineering, Hankyong National University

요 약

본 논문에서는 최적화 기법과 퍼지 PID제어기를 이용한 자기부상시스템의 부상제어기를 제안한다. 흡인식 자기부상시스템은 일반적으로 비선형 특성을 포함하는 불안정한 시스템이기 때문에 일반적인 선형 제어기를 적용할 경우 우수한 성능을 얻기에는 어려운 점이 있다. 본 논문에서 제안된 제어기는 고정파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기를 이용하였으며, 퍼지 PID 제어기 파라미터들은 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하였으며 유전알고리즘의 목적함수로는 일반적으로 사용되는 성능지수 함수를 사용하였다. 제안된 퍼지 PID 제어기를 적용한 자기부상시스템의 성능을 평가하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 고전적 PID제어기와 성능을 비교 분석하였다. 제안된 제어기를 적용한 자기부상시스템의 성능이 고전 PID제어기에 비하여 더 우수한 성능을 보임을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

키워드 : 자기부상시스템, 유전자 알고리즘, 퍼지 PID제어기, 부상제어기

Abstract

This paper proposes a optimum design method for the Fuzzy PID controller of magnetic levitation-based Rail-Guided Vehicle(RGV). Since an attraction type levitation system is intrinsically unstable, it is difficult to completely satisfy the desired performance through the methods designed by conventional controllers. In the paper, the Fuzzy PID controller with fixed parameters are applied and then the optimum parameters of fuzzy PID controller are selected by genetic algorithm. For the fitness function of genetic algorithm, the performance index of PID controller is used. To verify the performance of the proposed method, we used Matlab/simulink model of Maglev and compared the proposed method with the performance of PID controller. The simulation results show that the proposed method is more effective than conventional PID controller.

Key Words : Fuzzy PID cotroller, Magnetic Levitation-based Rail-Guided Vehicle, Genetic algorithm.

1. 서 론

자기부상 기술은 기계적 접촉이 없어 분진이 적고 윤활 장치를 필요로 하지 않는 장점들로 인하여 자기 베어링, 플

라이 휠, 산업용 액츄에이터 등에 널리 사용되고 있다. 흡인식 자기부상방식은 자석의 인력을 이용하는 방법으로 자성체 아래 부분에 전자석을 위치시켜 전자석의 흡인력에 의해 부상체가 부상하는 원리를 이용한다. 흡인식 자기부상방식은 일반적으로 불안정 시스템이기 때문에 제어기의 높은 제어능력이 요구된다. 흡인식 자기부상시스템의 안정화를 위한 제어시스템 설계에는 현재 다양한 기법들이 제안되고 있다[1].

PID 제어기는 구조가 간단하고, 적용성 및 신뢰성이 우수하기 때문에 다양한 형태로 자기부상시스템에 적용되고 있다. 그러나 PID제어기의 우수한 성능에도 불구하고 흡인식 자기부상시스템과 같은 비선형성이 강한 시스템에서는 만족할 만한 성능을 얻기에는 어려운 단점을 가지고 있다. 비선형성이 강한 시스템의 제어를 위해서 최근까지도 다양한 비선형 제어기들이 연구되고 있으며, 특히 퍼지제어기에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 퍼지제어기는 퍼지논리 이론을 응용한 제어기로서 크게 퍼지논리제어기

접수일자: 2014년 3월 9일

심사(수정)일자: 2014년 4월 1일

게재 확정일자 : 2014년 6월 9일

† Corresponding author

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음. [(GRRC 한경2011-B01), 스마트물류기술연구센터]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

와 퍼지 PID제어기로 구분될 수 있다. 퍼지 PID제어기는 퍼지제어기를 실제 시스템에 적용할 때 문제가 될 수 있는 안정성 문제를 고려할 수 있고, 설계과정이 기존의 고전적 PID제어기의 설계과정에서 유도될 수 있다는 장점들을 가지고 있다. 또한 퍼지PID제어기의 이득은 고정된 값을 가지지만 입력신호의 변화에 따라 가변되는 비선형 함수형태를 가지고 있어 비선형 보상 능력과 자기동조 능력이 우수하다 [2]. 그러나 퍼지 PID제어의 게인(스케일 파라미터)은 고전적 PID제어기의 설계절차에 따라 구해진 고정된 상수 값을 사용하기 때문에 고전적 PID제어기의 설계에 따라 퍼지 PID제어기의 성능에도 큰 영향을 미치게 되는 단점을 가지고 있다[3,4].

본 논문에서는 흡인식 자기부상시스템의 부상제어를 위하여 퍼지 PID제어기를 적용하고 앞서 언급한 단점을 해결하기 위해서 스케일 파라미터들의 최적 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 선정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법에서 유전자 알고리즘의 개체는 각각의 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU로 구성되며, 최적의 스케일 파라미터들을 찾기 위한 적합도 함수는 일반적인 PID제어기에서 자주 사용되는 시간곱절대오차적분(ITAE)을 사용하였다. 제안된 기법의 성능을 평가하기 위하여 고전적 PID제어기의 게인을 유전자 알고리즘으로 최적화 하여 비교하였으며, 시뮬레이션 결과로 제안된 기법이 고전적 PID제어기보다 우수한 성능을 보임을 확인 하였다.

2. 자기부상시스템 수학적 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 편측 자기부상시스템의 수학적 모델을 사용하였다. 편측 자기부상시스템은 상부에만 전자석이 있는 것으로서 전자석에는 자기부상시스템의 선형화를 위해서 자기포화 및 히스테리시스가 없다고 가정하여 수학적으로 모델링 하였다[1]. 자기부상시스템의 운동방정식은 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다

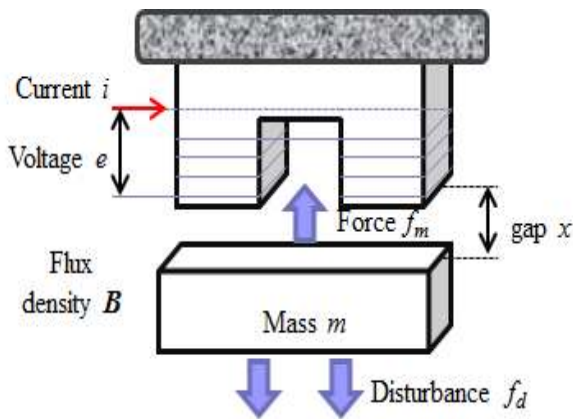


그림 1. 자기부상시스템 구성
Fig. 1. Structure of magnetic levitation system

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg - f_m + f_d = mg - k_f \left(\frac{i}{x + X_0} \right)^2 + f_d \quad (1)$$

여기서, $k_f = (n^2 \mu_0 S) / 4$, $X_0 = l_m / 2\mu_s$, n 은 코일 수, S 은 전자석의 단면적, l_m 은 전자로의 길이, μ_s 는 철심의 비투자율을 나타낸다. 전자석 코일에 흐르는 전류에 관한 전기회로방정식은 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$e = \frac{d}{dt}(Li) + Ri = - \frac{Q}{(x + X_0)^2} iv + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (2)$$

식 (1)의 운동방정식에 다음 식 (3)의 공극 x 와 전류 i 를 대입하고, 식 (4)를 만족하는 평형점 부근($E=RI$)에서 Talyer 급수를 이용하여 선형화하면 자기부상시스템의 운동방정식은 다음의 식 (5)와 같이 표현된다.

$$x = X + \Delta x, \quad i = I + \Delta i \quad (3)$$

$$mg = k_f \left(\frac{I}{X + X_0} \right)^2 \quad (4)$$

$$m \Delta \ddot{x} = 2k_f \left(\frac{I}{X_1} \right)^2 \left(\frac{\Delta x}{X_1} - \frac{\Delta i}{I} \right) + f_d \quad (5)$$

여기서, X 는 평형점에서의 공극, I 는 평형점에서의 전류, $X_1 = X + X_0$, Δ 는 평형점에서의 각각의 미소변화이다. 또한 식 (2)의 전기회로방정식에 $e = E + \Delta e$ (E 는 평형점에서 전압)을 대입하면, 다음 식 (6)과 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta e = - \frac{QI}{X_1^2} v + L \Delta \dot{i} + R \Delta i \quad (6)$$

Δx , $\Delta \dot{x}$ 와 Δi 를 상태변수로 정의해서 상태방정식으로 나타내면 다음의 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \ddot{x} \\ \Delta \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2kl^2}{xX_1^3} & 0 & -\frac{2kl}{mX_1^2} \\ 0 & \frac{QI}{LX_1^2} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \dot{x} \\ \Delta i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/m \\ 1/L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ f_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)의 상태방정식을 전달함수로 표현하면, 다음 식 (8)과 같이 유도된다.

$$G(s) = \frac{-2kLx_1^2}{X_1^4 Lms^3 + X_1^4 s^2 + 2kI^2(-X_1L + Q)s - 2kRI^2 X_1} \quad (8)$$

식 (8)과 표 1의 자기부상시스템의 실제 설계 파라미터를 사용하며, 전달함수는 다음 식 (9)와 같이 표현된다.

$$G(s) = \frac{-1420.60}{s^3 + 283.5s^2 + 392.38s - 551880} \quad (9)$$

표 1. 자기부상시스템의 파라미터
Table 1. Parameters of magnetic levitation system

Parameters		Nominal value
$Q[Hm]$	E.M.F	13.1812×10^{-4}
$k[Hm]$	Force constant	6.5906×10^{-4}
$L[H]$	Inductance of Coil	0.1097
$R[\Omega]$	Resistance of Coil	31.1
$X_1[m]$	$X+X_0$	0.01
$m[kg]$	Mass	0.01058
$I[A]$	Current	0.125

3. 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기

3.1 기본구조

고정 파라미터를 갖는 병렬형 퍼지 PID제어기의 블록도는 그림 2와 같으며 퍼지 제어규칙과 비퍼지화기를 포함하는 서로 다른 두 개의 퍼지제어 블록으로 구성된다[5]. 입력으로는 목표값에 대한 오차, 오차의 변화율, 오차의 변화율에 대한 변화율을 입력으로 사용하고 비퍼지화의 입력을 이산형태로 나타내면 아래의 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$e(nT) = ref(nT) - y(nT) \quad (10)$$

$$e^* = GE \times e(nT) \quad (11)$$

$$r(nT) = [e(nT) - e(nT - T)] / T \quad (12)$$

$$r^* = GR \times r(nT) \quad (13)$$

$$a(nT) = [r(nT) - r(nT - T)] / T \quad (14)$$

$$= [e(nT) - 2e(nT - T) + e(nT - 2T)] / T^2 \quad (15)$$

$$a^* = GA \times a(nT) \quad (16)$$

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (17)$$

$$du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (18)$$

$$u(nT) = du(nT) + u(nT - T) \quad (19)$$

여기서 n 과 T 는 양의 정수와 샘플링 시간 $y(nT)$, $e(nT)$, $r(nT)$, $a(nT)$ 는 각각 샘플링 시간 nT 에서 플랜트의 출력, 오차, 오차의 변화율, 오차 변화율의 변화율을 나타내며 GE, GR, GA, GU는 각각의 입력 및 출력신호에 대한 퍼지화 스케일 상수이며, 퍼지 PID제어기의 파라미터이다. dU_1 , dU_2 는 퍼지 제어 블록 1, 2의 출력, u 는 제어 입력이다.

3.2 퍼지 제어규칙

스케일된 입력변수들의 소속함수와 출력소속함수는 각각 그림 3과4와 같다. 각각의 입력신호들은 P와N의 두 개의 멤버를 가진다. 오차는 EP와 EN, 오차의변화율은 RP와 RN, 오차변화율의변화율은 AP, AN 각각 두 개의 멤버를 갖는다. output1은 그림 4(a)와 같이 OP, OZ, ON 세 개의 멤버를 갖고, output2는 그림 4(b)와 같이 OPM, ONM 두 개의 멤버를 갖는다. 퍼지 제어블록1과 퍼지 제어블록2에 대한 퍼지 제어규칙은 다음과 같이 구성된다[5].

Fuzzy Control 1

- R_1 : IF error=EP and rate=RP THEN output=OP
- R_2 : IF error=EP and rate=RN THEN output=OZ
- R_3 : IF error=EN and rate=RP THEN output=OZ
- R_4 : IF error=EN and rate=RN THEN output=ON

Fuzzy Control 2

- R_1 : IF rate=RP and acc=AP THEN output=OPM
- R_2 : IF rate=RP and acc=AN THEN output=ONM
- R_3 : IF rate=RN and acc=AP THEN output=OPM
- R_4 : IF rate=RN and acc=AN THEN output=ONM

퍼지 PID 제어기의 비퍼지화 방법으로는 식 (20)과 같은 중심평균법을 사용하였다[4,5].

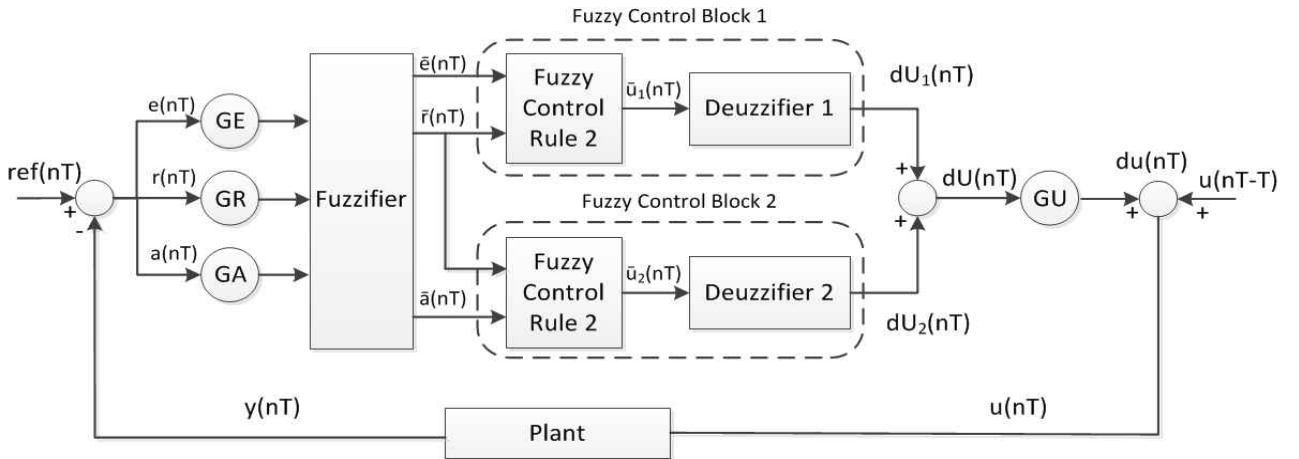


그림 2. 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 구조
Fig. 2. Structure of a fuzzy PID control system with fixed parameters

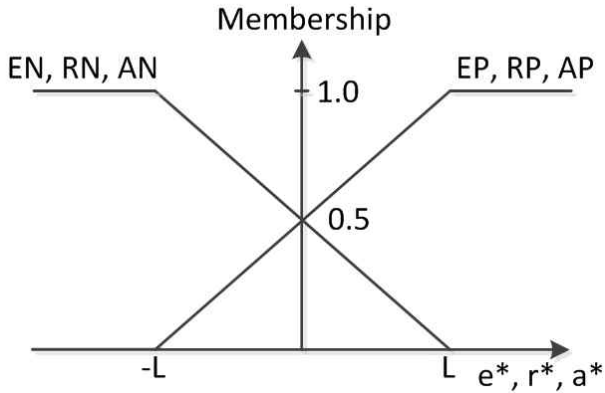
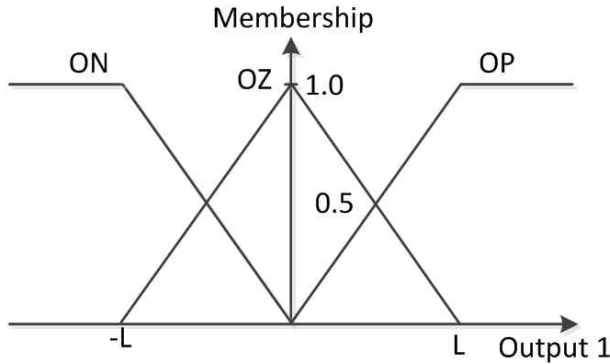
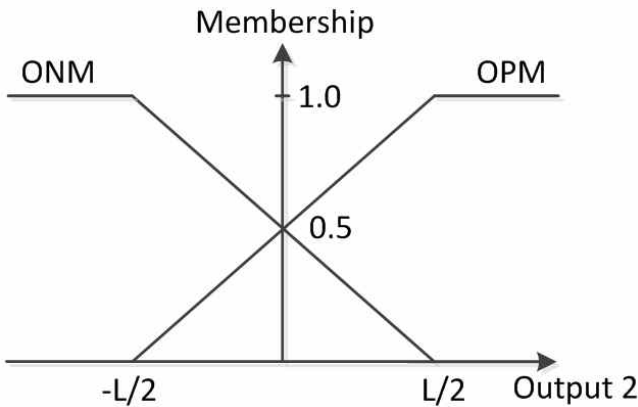


그림 3. e*, r*, a*의 소속함수
Fig. 3. Membership functions of e*, r* and a*



(a) 퍼지 제어블록 1



(b) 퍼지 제어블록 2

그림 4. 출력 소속함수
Fig. 4. Output membership functions

$$dU = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i) \times w_i}{\sum_{i=0}^n \mu_{output}(w_i)} \quad (20)$$

식(20)에서 n은 규칙의 수, w_i 는 멤버의 값, $\mu_{output}(w_i)$ 는 소속정도를 나타낸다.

퍼지 제어블록1에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내에서 비퍼지화하면 다음과 같이 계산될 수 있다,

$$\begin{aligned} & \text{IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L, \quad (21) \\ dU_1(nT) &= \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] \\ & \text{IF } GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \quad (22) \\ dU_1(nT) &= \frac{0.5 \times L}{2L - GE \times |r(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] \end{aligned}$$

퍼지 제어블록2에 대해 출력 퍼지집합을 L 구간 내에서 비퍼지화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{IF } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \quad (23) \\ dU_2(nT) &= \frac{0.25 \times L}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times a(nT)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{IF } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \quad (24) \\ dU_2(nT) &= \frac{0.25 \times L}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times a(nT)] \end{aligned}$$

따라서 퍼지제어기의 출력 $dU(nT)$ 는 식 (25)와 같이 퍼지 제어블록1의 출력 $dU_1(nT)$ 와 퍼지 제어블록2의 출력 $dU_2(nT)$ 의 산술적인 합이 되고, 제어신호의 증분 $dU(nT)$ 는 식 (26)과 같이 출력 스케일러 GU를 곱하여 생성한다.

$$dU(nT) = dU_1(nT) + dU_2(nT) \quad (25)$$

$$du(nT) = GU \times dU(nT) \quad (26)$$

3.3 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기의 제어칙

제어칙은 입력 범위에 따라 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & 1) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \\ & \quad \text{and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\ du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] \\ & \quad + \frac{0.25 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times a(nT)] \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2) \text{ IF } GR \times |r(nT)| \leq GE \times |e(nT)| \leq L \\ & \quad \text{and } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \\ du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GE \times |e(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] \\ & \quad + \frac{0.25 \times L \times GU}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times a(nT)] \quad (28) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 3) \text{ IF } GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L \\ & \quad \text{and } GA \times |a(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L, \\ du(nT) &= \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] \\ & \quad + \frac{0.25 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GA \times a(nT)] \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 4) \text{ IF } GE \times |e(nT)| \leq GR \times |r(nT)| \leq L \\ & \quad \text{and } GR \times |r(nT)| \leq GA \times |a(nT)| \leq L, \end{aligned}$$

$$du(nT) = \frac{0.5 \times L \times GU}{2L - GR \times |r(nT)|} [GE \times e(nT) + GR \times r(nT)] + \frac{0.25 \times L \times GU}{2L - GA \times |a(nT)|} [GA \times a(nT)] \quad (30)$$

위의 식 (30)을 정리하면 다음과 같다.

$$du(nT) = K_i e(nT) + K_p r(nT) + K_d a(nT) \quad (31)$$

여기서 K_i, K_p, K_d 는 다음과 같다.

$$K_i = \frac{0.5 \times L \times GU \times GE}{2L - GE \times |e(nT)|} \quad (32)$$

$$K_p = \frac{0.5 \times L \times GU \times GR}{2L - GE \times |e(nT)|} \quad (33)$$

$$K_d = \frac{0.25 \times L \times GU \times GA}{2L - GR \times |r(nT)|} \quad (34)$$

식 (31)의 퍼지 PID제어기는 일반적인 디지털 PID제어기와 동일한 구조를 갖는다. 식 (32), (33), (34)에서 보듯 일반적인 PID 제어기의 게인은 고정되지만, 퍼지 PID 제어기의 적분게인 K_i , 비례게인 K_p , 미분게인 K_d 는 오차, 오차의 변화율, 오차변화율의 변화율의 값에 따라 가변된다. 다른 입력 공간에 대한 게인 K_i, K_p, K_d 는 식 (28), (29), (30)을 통하여 구할 수 있다. 퍼지 PID 제어기의 게인은 오차, 오차의 변화율, 오차변화율의 변화율의 값이 0에 아주 가까운 값을 지닐 때, 즉 정상상태에서 식 (35)와 같은 상수값 게인을 갖는다[4,5].

$$K_p^* = \frac{GU \times GR}{4}, K_i^* = \frac{GU \times GE}{4}, K_d^* = \frac{GU \times GA}{8} \quad (35)$$

4. 고정 파라미터를 갖는 퍼지 PID제어기

고정 파라미터를 갖는 병렬형 퍼지 PID제어기는 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU를 사용하여 정규화하고, 입력 공간 분석을 통해 연산 시간을 줄일 수 있는 간단한 형태로써 적용될 수 있으나 고정된 스케일 파라미터는 고전적 PID제어기를 설계한 후 PID제어기의 파라미터를 이용하여 계산으로 구해지기 때문에 최적의 값을 찾기에 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해서 스케일 파라미터들의 최적 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 선정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서 유전자 알고리즘의 개체는 각각의 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU로 구성되며, 최적의 스케일 파라미터들을 찾기 위한 적합도 함수는 일반적인 PID제어기에서 자주 사용되는 시간곱절대오차적분(ITAE)을 사용하였다. 다음은 제안된 알고리즘의 수행 절차를 나타내었다.

[Step1] 유전자알고리즘과 클론선택의 초기 파라미터 선정
- 집단크기 : 100

[Step2] 적합도 평가 : ITAE 사용

[Step3] 재선택 단계 : Step2에서의 계산된 유전자 알고

리즘의 개체들과 클론들의 적합도를 이용하여 다음 세대 개체의 생성

[Step4] 유전자 알고리즘의 교배

- 일점교배 사용 : 교배율 0.75

[Step5] 유전자 알고리즘의 돌연변이

- 단순돌연변이 : 돌연변이율 0.06

[Step7] 새롭게 선택된 세대의 적합도 평가

[Step8] Stop condition에 만족을 하면 전체 계산과정을 종료하며, 그렇지 못하면 3단계로 가서 반복 수행

5. 시뮬레이션 결과

자기부상시스템에 대한 제안된 퍼지PID제어기의 성능 검증을 위하여 Matlab/simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 고전적 PID제어기(C-PID)와 결과를 비교하였다. 그림 5는 부상목표 3mm 지령치에 대한 각각의 제어기들의 출력결과이며, 표 2는 시뮬레이션에 적용된 각각의 파라미터들과 성능지표로 사용된 오버슈트(Mo)와 시간곱절대오차적분(ITAE)의 결과를 보여준다. 표 2에서 알 수 있듯이 퍼지 PID제어기의 ITAE는 고전적인 PID제어기보다 우수한 반면, 오버슈트에서는 약 10%정도 차이를 보이고 있다. 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 오버슈트를 실제 환산하면 약 0.03mm이다. 따라서 전체 출력에 대한 오차를 고려하면 제안된 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있다.

표 2. 제어기 파라미터들과 결과

Table 2. The parameters and results of controllers

C-PID	GA bound	Max	1000	5000	100	Mo(%)	
		Min	0	0	0	58.2	
Parameter	Kp		987.4	3971.5	30.4	ITAE	
	Ki					0.007	
F-PID	GA bound	Max	100	10	500	500	Mo(%)
		Min	0	0	0	0	68.3
Parameter	GE		48.7	0.47	398	40.8	ITAE
	GCE						0.0009

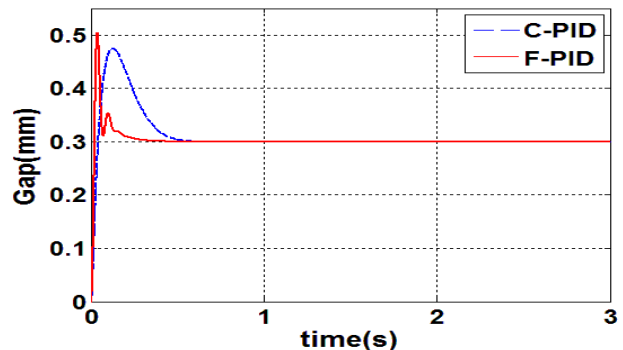


그림 5. 고전적 PID제어기와 제안된 제어기의 실험결과
Fig. 5. The experimental results of conventional PID controller and the proposed controller

6. 결 론

본 논문에서는 흡인식 자기부상시스템의 부상제어를 위하여 퍼지 PID제어기를 적용하고 퍼지 PID제어기에서 스케일 상수를 고정하여 발생하는 단점을 해결하기 위해서 스케일 파라미터들의 최적 파라미터를 유전자 알고리즘을 이용하여 선정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서 유전자 알고리즘의 개체는 각각의 스케일 파라미터 GE, GR, GA, GU로 구성되며, 최적의 스케일 파라미터들을 찾기 위한 적합도 함수는 일반적인 PID제어기에서 자주 사용되는 시간곱절대오차적분(ITAE)을 사용하였으며 Matlab/simulink 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과로 제안된 기법이 고전적 PID제어기보다 우수한 성능을 보임을 확인 하였다.

References

[1] J.H. Cho and Y.T. Kim, "Design of PID Controller for Magnetic Levitation RGV Using Genetic Algorithm Based on Clonal Selection," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 22 pp. 239-254, 2012.

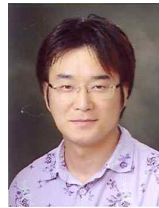
[2] B.K. LEE, I.H Kim, and J. H. Kim, "Stability Analysis and Proposal of the Simplified Form of a Fuzzy PID controller with Fixed Parameters," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 14, pp. 807-814, 2004.

[3] B.K Lee, I.H Kim and J.H Kim, "A Study on the Nonlinear Fuzzy PID Controller with Variable Parameters", *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 127~134, 2005.

[4] J. H. Kim, "A Suggestion of Nonlinear Fuzzy PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear or Uncertain Systems," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 87~100, 1995.

[5] J. X. Xu, C. C. Hang, and C. Liu "Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller," *Automatica*, Vol 36, pp 673-684, 2000.

저 자 소 개



조재훈(Jae-Hoon Cho)

2011년 : 충북대학교 제어계측공학과 박사
2011년~현재 : 한경대학교 스마트물류기술연구센터 연구교수

관심분야 : Intelligent Optimization algorithm, Pattern Recognition, Renewable source & Smart grid
Phone : +82-31-670-5674
E-mail : jhcho@hknu.ac.kr



김용태(Yong-Tae Kim)

1991년 : 연세대학교 전자공학과(학사)
1993년 : KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학석사)
1998년 : KAIST 전기및전자공학과 졸업(공학박사)
1998년~2000년 : (주)삼성전자

2006년 : Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 방문연구
2002년~현재 국립 한경대학교 전기전자제어공학과 교수

관심분야 : 지능로봇, 지능시스템, 지능제어, 물류자동화
Phon : +82-31-670-5292
E-mail : ytkim@hknu.ac.kr