

병렬 퍼지-PID 제어를 이용한 자기부상 제어

Magnetic Levitation Control Using The Parallel Fuzzy Controller

김명건*, 김종문**, 최영규***

(Myoung-Gun Kim, Jong-Moon Kim, Young-kiu Choi)

Abstract - In this paper, a parallel fuzzy controller for one degree of freedom magnetic levitation is designed and its performance is compared with the performance of a PID controller. Input, output scaling factor of fuzzy controller and gain of PID controller were tuned using the GA algorithm. The designed controllers are validated by numerical simulations. So it's shown that parallel fuzzy controller can give the better performance for the plant than PID controller.

Key Words : parallel fuzzy controller, degree of freedom, magnetic levitation, GA algorithm

1. 서 론

자기부상 시스템은 부상원리에 따라 크게 흡인식과 반발식으로 나눌 수 있는데, 흡인식은 반발식과 달리 보통 상전도 마그네트를 단독으로 구현하는 경우도 있지만 보통 영구자석과 함께 사용된다. 반발식은 스스로 안정한 부상 특성을 지니는데 반하여 흡인식은 불안정한 특성을 가지면서 비선형과 파라미터 변동 등 많은 제어문제를 가지고 있다. 위에서 언급한 응용 사례 중 자기부상 열차를 예로 들면, 차량이 궤도 위를 이동할 때, 매우 다양한 형태의 외란이 발생한다. 즉 레일이 유연체라든가 또는 고가, 단가, 커브 등에 의한 외란과 필스 및 스텝형태 이면서 상하, 좌우로 작용하는 힘 외란 등이 있다. 이 경우 자기부상 열차의 속도가 저속이면 문제가 없을지라도 고속으로 달리면 심각한 문제를 발생할 수도 있다.

따라서 기존에 주로 쓰였던 PID 제어기만으로는 다양한 형태의 외란이 존재할 때, 정밀한 부상제어를 하지 못하므로 본 논문에서는 PI와 PD의 장점을 결합한 병렬 퍼지-PID 제어를 부상 제어기로 적용한다. PID 제어기의 gain 및 퍼지 제어기의 임, 출력 가중치는 유전 알고리즘을 사용하여 최적의 값으로 구하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 적용한 제어기의 우수성을 보였다.

2. 자기부상 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 사용한 자기부상 시스템은 옆의 그림과

같이 단일 자석을 이용한 흡인식이다.

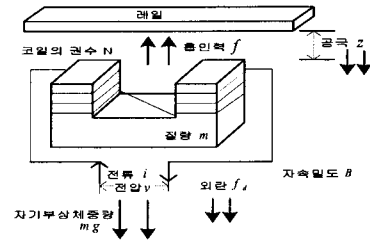


그림1 단일 자석을 사용한 자기부상 시스템

Fig. 1 Magnetic Levitation using an electromagnet

자기부상 시스템의 레일을 강체라고 가정 한 후, 마그네트-레일에 대해 수학적으로 모델링 하였다. 부상측의 질량을 m , 외력(외란)을 f_d , 단면적을 A , 전자석은 N 회의 코일을 감고 전류 i 를 흐르게 한다. 이 때, 전자석에는 자기포화, 히스테리시스가 없다고 가정한다.

평형점(i_0, z_0)부근에서 미소변화를 고려하여 테일러 급수 전개에 의해 최종적으로 구해진 선형방정식은 다음과 같다 [1].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z} \\ \Delta z \\ \Delta \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_z}{m} & 0 & -\frac{k_i}{m} \\ 0 & \frac{k_z}{k_i} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta z \\ \Delta i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \\ \frac{1}{L_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ f_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

k_i, k_z 및 L_0 은 평형점에서의 전류계수, 공극계수 및, 인

저자 소개

* 準 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 計 測 制 御 研 究 生

** 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 先 任 研 究 員

*** 正 會 員 : 釜 山 大 學 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

덕턴스이며 그에 따른 식은 다음과 같이 정의된다.

$$k_1 = k_1 \frac{i_0}{z_0}, k_2 = k_1 \frac{i_0}{z_0}, \frac{k_2}{k_1} = \frac{i_0}{z_0}, L_0 = \frac{k_1}{2z_0} \quad (2)$$

여기서 $k_1 = \mu_0 N^2 A$ 이고, μ_0 는 공기 중의 투자율이다

3. 제어기 설계

3.1 PID 제어기

본 논문에서는 적용된 병렬 퍼지-PID 제어기의 성능을 확인하기 위하여, 고전 PID 제어기와 비교하기로 한다. 그림 2와 구현된 단일 입, 출력 PID 제어기의 구조는 다음과 같다[3].

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{\tau_d s + 1} \quad (3)$$

τ_d 는 미분값의 크기를 제한하기 위한 상수로 두었다.

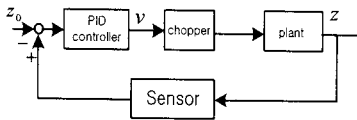


그림 2 PID 제어기 및 자기부상 시스템
Fig 2 PID controller and Maglev system

제어기를 통한 출력 전압은 -5~5[V]로 두었고 초과외 값은 $K_{CH}=12$ 로 두었다.

3.2 병렬 퍼지-PID 제어

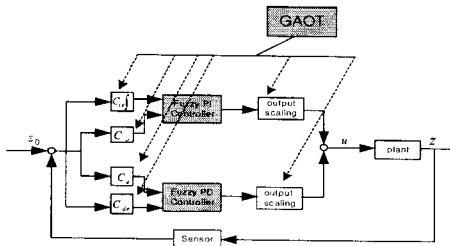


그림 3 병렬형 퍼지-PID 제어기 및 자기부상 시스템
Fig. 3. Fuzzy-PID controller with Parallel Structure and Maglev system

퍼지-PID형 제어기와 퍼지-PD형 제어기의 장, 단점을 고려하여 그림3과 같이 병렬로 결합한 병렬 퍼지-PID 제어기를 플랫폼에 적용하였다. 이렇게 구성함으로써 입력추종 및 힘 외란의 제거 능력에 대해 어느 정도 향상된 응답 특성을 얻을 수 있었다[2].

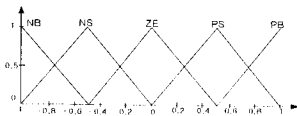


그림 4 입, 출력 멤버십 함수 e, e, ε
Fig. 4 Input, Output Membership function of e, e, ε

표 1 PI형 퍼지 제어 규칙

		integral error					
		NB	NS	ZE	PS	PB	
e r r o r	NB	NB	NS	ZE	PS	PB	
	NS	NS	NS	NS	ZE	NS	
	ZE	PB	PS	ZE	NS	NB	
	PS	PS	ZE	PS	PS	PS	
	PB	ZE	PS	PS	PB	PB	

표 2 PD형 퍼지 제어 규칙

		derivative error					
		NB	NS	ZE	PS	PB	
e r r o r	NB	NB	NS	ZE	PS	PB	
	NS	NS	NS	NS	ZE	NS	
	ZE	PB	PS	ZE	NS	NB	
	PS	PS	ZE	PS	PS	PB	
	PB	ZE	PS	PB	PB	PB	

Table 1 PI type fuzzy rules

Table 2 PD type fuzzy rules

본 논문에서 사용한 퍼지 PI형 제어기 및 PD형 제어기의 멤버십 함수는 그림4와 같고 제어 규칙표는 표 1,2와 같다. NB : Negative Big, NS : Negative Small, ZE : Zero, PS : Positive Small, PB : Positive Big이다.

위의 퍼지 제어규칙 표에서 보이는 것과 같이 3차원의 비례오차, 적분오차, 미분오차를 사용하면 $5 \times 5 \times 5$ 의 125개의 제어규칙이 필요하지만 이를 2차원의 병렬 비례오차, 적분오차 그리고 비례오차, 미분오차를 사용함으로써 $5 \times 5 + 5 \times 5$ 의 50개로 제어규칙을 감소시킬 수 있었다.

제어기의 추론 방법은 Mamdani의 Max-Min 방법을 사용하였으며, 비퍼지화 방법은 무게 중심법을 사용하였다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

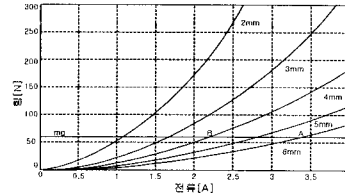


그림 4 힘, 전류 및 공극간의 특성 곡선
Fig. 4 Force, current and gap characteristic

표 3 시스템 파라미터

Table 3 System parameters

파라미터	값	단위
자석무게 m	6.0	kg
전류계수 k_i	38	N/A
공극계수 k_g	35615	N/m
평형점 인덕턴스 L_0	0.09	H
마그네트 단면적 A	0.085×0.013	m^2
코일 권선수 N	726	회
평형점 공극 z_0	0.004	m
평형점 전류 i_0	2.2	A
저항 R	3.4	Ω

그림 4는 설계된 자기부상 시스템에 대한 흡인력-전류-공극간의 특성곡선을 보여 준다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 A지점은 초기 공극 6[mm]에서 약 3.4[A]이상 흘러야만 부상이 가능하다는 것을 의미하며, B지점은 기준 공극 4[mm]에서 평형점 전류가 약 2.2[A] 라는 것을 알 수 있다[3]. 표3은 사용된 파라미터이다.

시뮬레이션 tool은 Matlab 5.3 Simulink와 Matlab과 호환

이 가능한 GA tool을 사용하였다[4]. 목적함수로는 제곱오차 적분 값을 사용하였으며 PID 제어기의 gain과 병렬 퍼지-PID 제어기의 임, 출력 가중치에 해당하는 비트 수는 6비트로 두었고 세대 수는 20세대를 반복시켜 최적의 해를 얻어 내었다. 또한 초기 reference 입력은 0.1초 후의 스텝 입력으로 두었다.

4.2 시뮬레이션 결과

4.2.1 PID 제어

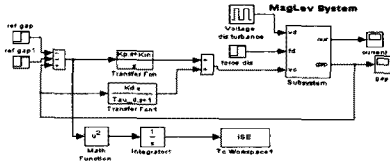


그림 5 PID 제어 시스템 모델
Fig. 5 PID control system model

4.2.2 병렬 퍼지-PID 제어

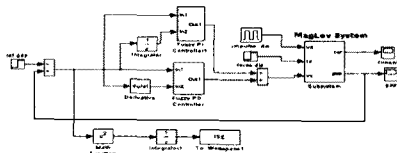
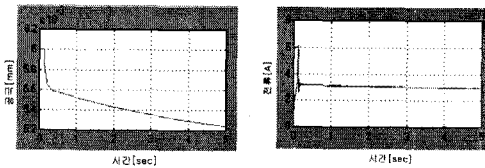


그림 6 병렬 퍼지-PID 제어 시스템 모델
Fig. 6 Parallel Fuzzy-PID ctrl system model

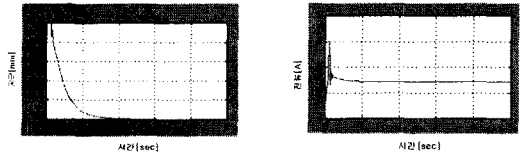
4.2.3 시뮬레이션 결과

입력추종의 경우 기준입력 4[mm]에서 1[mm] 증가 시켰고 힘 외란 제거 성능의 경우 기준입력이 4[mm]일 때 2.5초 지난 후 스텝 힘 외란으로 주었으며 그 크기는 자기부상 체중량의 50% 크기인 $0.5 \times mg$ 로 두었다. 유전 알고리즘을 사용하여 구한 PID 제어기의 최적파라미터는 $k_p=2000.028$, $k_i=304.3991$, $k_d=69.609$ 이며 $\tau_i=-1$ 로 두었다. 또한 병렬 퍼지-PID 제어기에 있어서 퍼지-PD형의 입력가중치는 (83.3158, -4.4483), 출력가중치는 (17.8014)로 구했으며 퍼지-PI 타입의 입력가중치는 (10.8639, -65), 출력가중치 (31.8570)로 각각 구했다.

1) 기준 공극 5[mm] 추종 시

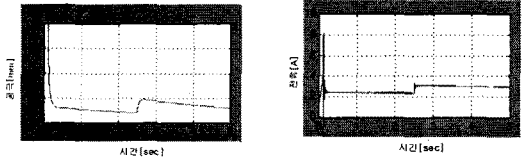


(a) PID 제어기 튜닝 후 (5초 후 공극 변화 : 5.237[mm], 전류 변화 : 2.973[A], 목적함수 : $8.823 \times 10^{-7} [m^2]$)

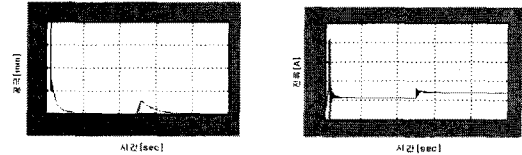


(b) 병렬 퍼지-PID 제어기 (5초 후 공극 변화 : 4[mm], 전류 변화 : 2.834[A], 목적함수 : $1.39 \times 10^{-7} [m^2]$)

2) 2.5초 후 스텝 힘 외란 ($0.5 \times mg$)



(a) PID 제어기 튜닝 후 (5초 후 공극 변화 : 5.237[mm], 전류 변화 : 2.973[A], 목적함수 : $1.614 \times 10^{-6} [m^2]$)



(b) 병렬 퍼지-PID 제어기 (5초 후 공극 변화 : 4[mm], 전류 변화 : 2.834[A], 목적함수 : $1.439 \times 10^{-7} [m^2]$)

기준 공극 추종 시 PID 제어기는 5초 후에도 기준공극에 도달하지 못하지만 병렬 퍼지-PID 제어기는 약 1.2초 후 기준 공극에 잘 도달함을 알 수 있다. 또한 평형점 전류 및 목적함수인 제곱오차 적분 값도 PID제어기에 비해 좀 더 유연함을 알 수 있다. 스텝 힘 외란에 대해서도 병렬 퍼지-PID 제어기의 응답특성이 우수함을 보였다.

5.결론

본 논문에서는 자기 부상 시스템의 입력추종 성능과 힘 외란 제거 능력에 있어 좀 더 안정한 제어를 위해 기존에 널리 사용되던 PID 제어기보다 어느 정도 향상된 성능을 보이는 병렬 퍼지-PID 제어기를 적용하였다. 병렬형 퍼지-PID 제어기를 구성함으로써 제어 규칙의 수를 줄이고 간편화할 수 있었다. 또한 유전 알고리즘을 이용하여 PID제어기의 gain과 퍼지 제어기의 임, 출력 가중치를 최적화하였다.

적용된 제어기의 효율성을 입증하기 위해 기준 입력추종과 힘 외란에 대해 시뮬레이션 함으로써 적용된 제어기가 PID 제어기보다 좀 더 나은 성능을 나타냄을 보였다.

참고 문헌

- [1] P.K Shinha, Electronics Suspension: dynamics and control. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] 추인규, 강신철 “병렬 구조를 갖는 퍼지 PID 제어기 설계” 진주산업대논문집 p. 37-42, 2001.
- [3] 김종문, 강도현, 박민국, 최영규, “자기부상 시스템의 부상제어기 설계”, 한국전기학회 논문집, 2002.
- [4] 정승, 제어시스템의 분석과 MATLAB 및 SIMULINK의 활용, 청문각, 2000