

복합자석형 자기부상차량의 PID제어와 Fuzzy제어

권 병 일

한국기계연구소 자기부상열차개발 국책연구사업단

PID Control and Fuzzy Control of Hybrid Magnetic Levitation System

Kwon Byung-Il

Korea Institute of Machinery and Metals

ABSTRACT

A magnetic levitation system with hybrid magnets, which is composed of permanent magnets and electromagnets, consumes less power than the conventional attraction type system.

In this paper, we propose PID controller and PID-Fuzzy controller for hybrid magnet.

We first present "constant gap" control technology with PID controller. Secondly, "zero power" control technology with PID-Fuzzy hybrid controller is presented .

1. 서론

선진 각국에서 자기부상열차의 연구가 시작된지도 이미 20년이 넘었으며, 이제 거의 대부분의 연구는 성숙기에 들어서서, 실용화를 위한 몇가지 기술의 보완 및 안정도의 향상에 주력하고 있는 것으로 알려져 있다. [1]

국내에서도 경부고속전철 건설계획의 발표에 즈음하여, 1980년대 후반 부터 자기부상열차에 대한 관심이 급속히 증가되었다. [2][3][4][5] 학계에서는 한양대학을 필두로, 산업체에서는 현대정공이 선두로 개발에 착수하여 EXPO'93 용 자기부상열차 전시운행의 주계약업체로 선정될 전망이며, 또한 대우중공업도 개발에 착수한 것으로 알려지고 있다.

1990년 12월 21일 한국기계연구소에서는 10대 국책연구사업의 하나인 "자기부상열차개발 국책연구사업단"이 발족되었다. 자기부상열차개발 국책연구사업단은, 産·學·研의 콘소시움 형태를 형성하여, 기계연구소, 전기연구소, 해사기술연구소, 경북대학교, 동국대학교, 서울대학교, 충남대학교, 충북대학교, 한양대학교, 현대중전기 등이 참가하고

있다. [6] 또한 1991년 전기학회 하계학술대회에서는 자기부상열차의 要素技術에 관련된 전자석설계, 선형유도전동기 설계 및 제어기술, 인버터, 콘버터들에 대한 연구논문이 10여편 이상에 이르렀다.

자기부상철도와는 별도로 자기부상기술을 소형의 搬送裝置에 이용하려는 연구도 일본에서는 활발하게 진행되고 있다. [7][8][9][10] 선형전동기로 추진하고, 자기부상기술에 의하여 완전부상을 실현하면, 종래의 반송장치의 접촉에 의한 먼지발생등의 단점을 완전히 제거할 수 있기 때문이다. 이와 같은 장치는 주로 고도의 청결성이 요구되는 반도체 생산공장의 반송장치로서 이용가치가 높다.

자기부상을 이용한 支持·案内방식으로서, 영구자석에 의한 흡인 또는 반발부상, 초전도를 이용한 반발부상, 제어직류전자석을 이용한 흡인부상등이 있다.

영구자석을 이용하는 부상방식中에는, 부상을 위한 전력의 절감을 위해서, 차량중량을 支持하기 위한 흡인력을 영구자석에 부담시키는 방식이 시험되고 있다. 즉, 영구자석의 흡인력과 차량의 중량을 일치시키고, 차량의 중량변화 및 외란이 발생하여서 부상계가 불안정하게 될 경우에만, 제어직류자석에 의해서 제어하는 부상시스템이다. 이하에서는 이러한 제어를 "제로전류제어"라 부르기로 한다.

이러한 시스템은 영구자석이 高價이므로, 주로 소형의 반송장치에 이용된다. 이하 이러한 시스템을 "複合磁石形 磁氣浮上車輛"이라 부르기로 한다.

복합자석형 자기부상차량의 경우, 추진력을 얻기 위한 선형유도전동기를 地上1次式으로 하고, 제어전자석의 전력을 축전지에 의해서 공급하면 완전 非接觸 자기부상을 실현할 수 있다.

흡인식자기부상차량의 부상계는 원래 불안정한 시스템이므로 제어에 의해서 안정화 할 필요가 있다.

본 논문에서는, 복합자석형자기부상차량의 안정화제어를 위하여, 공극장일정제어와 제로전류제어에 대하여 고찰한다. 공극장일정제어특성을 얻기 위하여 PID제어계를 구성

하여 실험 및 시뮬레이션에 의하여 제어특성을 구한다. 또한, 제로전류제어특성은 PID제어계 뿐 만 아니라 PID제어수법과 Fuzzy제어수법을 함께 사용하는 PID-Fuzzy제어계에 의한 시뮬레이션에 의하여 각각 구하기로 한다. 이로써 Fuzzy제어의 자기부상시스템에의 적용가능성을 고찰하기로 한다.

2. 복합자석형 자기부상차량의 구조[11],[12]

본 논문의 실험에 사용된 소규모 반송용 자기부상차량의 정면도를 그림2.1에 나타낸다. 추진계로서는 편축식 선형 유도전동기를 사용하며 地上1次式이다.

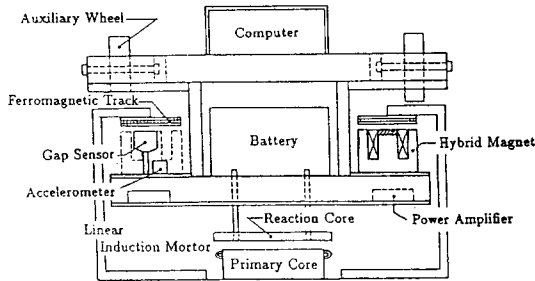


그림2.1 복합자석형 자기부상차량
Fig 2.1 Cross section of magnetic levitation system with hybrid magnets

부상계로서의 복합자석을 그림2.2에 나타내고, 그 제원을 표2.1에 나타낸다.

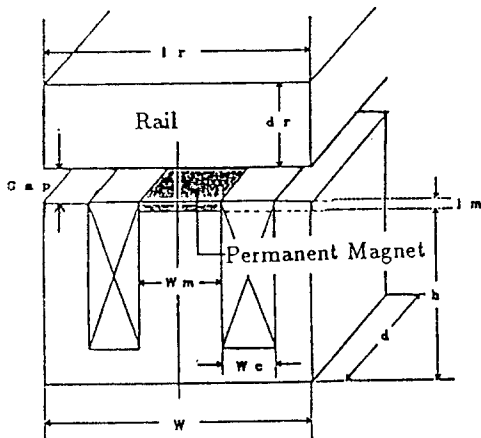


그림2.2 복합자석의 구성
Fig 2.2 Structure of hybrid magnet

표2.1 복합자석의 제원

Table 2.1 Specification of hybrid magnet

복합자석의 크기	h = 0.0508m W = 0.0762m W _m = 0.0254m W _c = 0.0127m d = 0.065 m
영구자석의 크기	l _c = 0.08 m
보자력	H _c = 687.5 kA/m
코일권수	n = 430 turn
코일저항	R = 7.26 Ω

영구자석은 서머리움계의 휘트류영구자석을 사용하여, 공극장 8mm에서 대차(bogie)의 중량(M = 53kg중)을 支持하도록 되어 있다. 안내방향은, 그림2의 복합자석을 5mm 스테거 배치하므로서 수동적으로 안내되도록 하였다.

제어계는 디지털로 구성하였으며 上下方向, pitching, rolling의 각운동을 집중제어[13]한다. 하지만 여기에서는 상하방향의 力外亂만을 고려하기로 하며, 상하방향의 제어계에 대해서만 설명하기로 한다.

3. 복합자석형 자기부상차량의 제어특성

3.1 부상계의 상태방정식[11][12]

부상계의 상하방향의, 평형점에 있어서의, 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -8f_{xx}x - 8f_{xi}i + f_{dx} \quad (1)$$

$$\text{단, } f_{xx} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial x} \right|_{x=x_0}^{i=0}, f_{xi} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial i} \right|_{x=x_0}^{i=0}$$

F_x 는 전자석의 부상력으로 공극장 x 와 coil전류 i 의 함수로서, 이론적인 일반식, 또는 실험식으로 주어 진다. F_{dx} 는 려외란이다.

전압방정식은 식(2)와 같다.

$$e = Ri + (L_n + n\phi_i) \frac{\partial i}{\partial t} + n\phi_x \frac{\partial x}{\partial t} \quad (2)$$

$$\phi_i = \left. \frac{\partial \phi_0}{\partial i} \right|_{x=x_0}^{i=0}, \phi_x = \left. \frac{\partial \phi_0}{\partial x} \right|_{x=x_0}^{i=0}$$

단, R : 주자속, L_n : 누설인덕턴스

식(1), (2)에 의해 상태방정식은 식(3)과 같이 주어진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ v \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ v \\ a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g_3 \end{pmatrix} e + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} f_{dx} \quad (3)$$

단, 여기에서는 궤도의 外亂은 없는 것으로 가정한다.

pitching, rolling의 각운동에 대해서도 같은 방법으로 상태방정식이 구해진다.

3.2 PID제어에 의한 공극장일정제어

대규모 자기부상차량의 경우, 비접촉조건을 만족시키기 위하여, 중량의 변화 및 외란등에도 불구하고 공극이 일정하도록 하는 공극장일정제어를 실시하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 공극장변위를 적분하여 제어전압에 피드백하면 된다.

공극장일정제어를 위한 제어전압을 다음식에 나타낸다.

$$e = k_x x + k_v v + k_a a + k_p \int x dt \quad (4)$$

제어전압을 식(4)로 하여, 1.70kg중의 스텝 외란(중량의 증가와 同一)이 가해졌을 경우의 제어특성을 실험 및 시뮬레이션에 의해 구하여 그 결과를 그림3.1에 나타낸다. 진동이 많은 선이 실험결과이고, 진동이 없는 선이 시뮬레이션 결과이다.

중량의 증가에 의하여 공극장변위는 과도적으로는 변화하지만, 곧 정상공극장(공극장변위 제로)상태로 돌아감을 알 수 있다. 또한, 중량의 증가를 감당하기 위하여, 전자석의 전류가 증가함을 나타내고 있다.

시뮬레이션 및 실험결과는 잘 일치하고 있다.

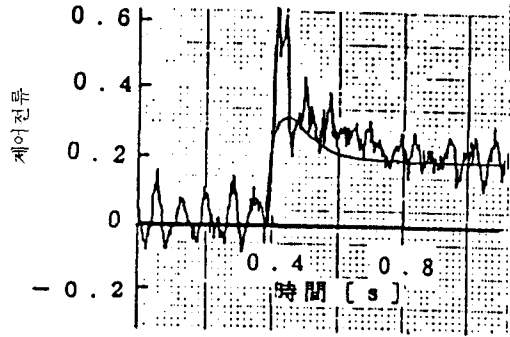
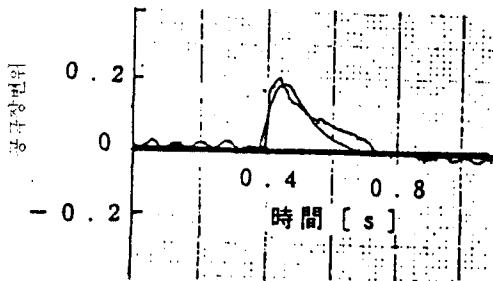


그림3.1 스텝외란에 대한 공극장일정제어특성 (PID 제어)

Fig 3.1 Transient response of gap constant control with PID controller to force disturbance

3.3 제로전류제어

3.3.1 PID제어에 의한 제로전류제어

공극장일정제어는 공극장을 적분하여 제어전압에 피드백 시킴으로서 실현하였던 것과 마찬가지로, 제로전류제어는 전압 또는 전류를 적분하여 제어전압에 피드백하므로써 실현할 수 있다. 여기에서는 전류를 피드백하는 경우를 다루기로 한다.

정상상태에서 제로전류를 실현하기 위한 제어전압은 다음식과 같다.

$$e = k_x x + k_v v + k_i i + k_q \int i dt \quad (5)$$

이하에서 사용된 제어정수의 값은 다음과 같다.

$$k_x = 89768 \text{ V/m}, \quad k_v = 1931.7 \text{ V}\cdot\text{s/m}, \\ k_a = -15.3 \text{ V}\cdot\text{s}^2/\text{m}, \quad k_q = 0.92 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{s})$$

제어전압을 식(5)로 하는 상태방정식을 다음식에 나타내며, 그 블록선도를 그림3.2에 나타낸다. 단, 상태방정식의 계수는 식(3)의 계수와 다르다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ v \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ f_{31} & 0 & f_{32} & 0 \\ 0 & f_{32} & f_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_3 \\ 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_{dx} \quad (6)$$

$$f_{31} = -\frac{8f_{32}}{M}, \quad f_{32} = -\frac{8f_{21}}{M}, \quad f_{33} = \frac{-n\phi_2}{L_n + n\phi_1}, \\ f_{33} = \frac{-R}{L_n + n\phi_1}, \quad g_3 = \frac{1}{L_n + n\phi_1},$$

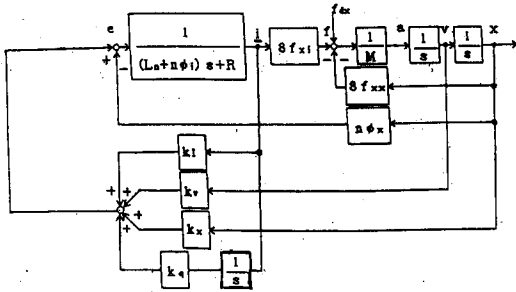


그림3.2 부상계의 제로전류제어 블록선도
Fig 3.2 Block diagram of levitation system for zero current control

제어전압을 식(5)와 같이하여, 0.05M의 스텝 外亂에 대하여 제로전류제어를 실시한 시뮬레이션 결과를 그림3.3에 나타낸다.

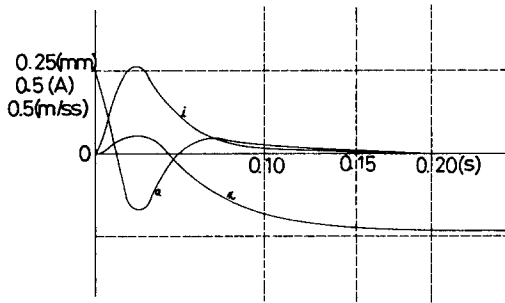


그림3.3 스텝외란에 대한 제로전류제어특성 (PID 제어계)

Fig 3.3 Transient response of zero current control with PID controller to force disturbance

3.3.2 PID-Fuzzy제어계에 의한 제로전류제어

제어전압을 식(5)로 할 경우 상태변수는 4개가 된다. 이들 전부를 다루는 Fuzzy규칙을 만들려면 그 수가 너무 많아 지고, 제어를 위한 계산시간에도 문제가 있을 것으로 생각된다. 따라서, 공극장변위 및 속도는 PID에서 사용한 제어정수를 사용하고 가속도 및 전류의 적분의 상태변수만을 고려하는 Fuzzy규칙을 구성하여 그 수를 줄이기로 하였다.

증가된 무게를 감당하기 위하여, 공극장변위는 감소된다. 또한, 과도상태에서는 과도전류가 흐르지만 정상상태에서는 제어전류가 제로로 됨을 알 수 있다.

그림3.4에 Fuzzy변수를 나타내며, 또한 이들을 사용한 제어규칙을 표3.1에 나타낸다. [14] Fuzzy제어기로서는 속도형을 채용하였다.

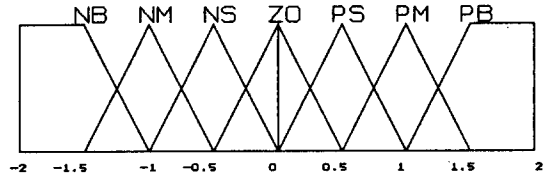


Fig 3.4 Triangular membership function

표3.1. 제어규칙

Table 3.1 Control rule

	Δi						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB				NB	NM		
NM				NM			
NS				NS	ZO		PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM		ZO	PS			
PM						PM	
PB							PM

이상의 제어정수, Fuzzy변수 및 제어규칙을 이용하여 0.05M의 스텝외란에 대한 제어특성을 시뮬레이션에 의하여 구하여 그 결과를 그림3.5에 나타낸다.

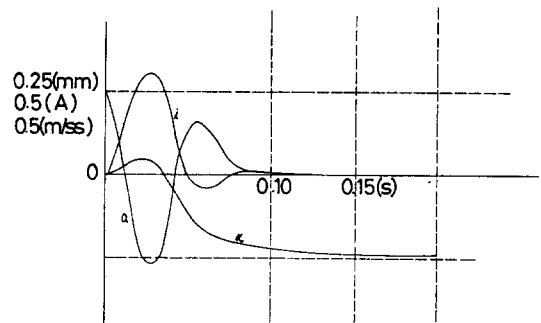


그림3.5 스텝외란에 대한 제로전류제어특성 (PID-Fuzzy제어계)

Fig 3.5 Transient response of zero current control with PID-Fuzzy controller to force disturbance

PID-Fuzzy제어계에 의한 시뮬레이션결과는 PID제어계의 시뮬레이션결과와 근사하나, Fuzzy변수와 제어규칙을 적당히 선택함으로써 PID제어계보다는 진류 및 공극장의 정상상태에 도달하는 시간을 줄일수 있었다. 하지만 과도상태의 피크値는 더 크다.

4. 결론

복합자기부상차량의 공극장일정제어와 제로전류제어특성을 고찰하였다.

공극장일정제어에 대해서는, PID제어계에 의한 실험 및 시뮬레이션에 의하여 그 특성결과를 얻어, 실험결과와 시뮬레이션과 결과가 잘 일치함을 보여주었다.

제로전류제어에 대해서는, PID제어계 및 PID-Fuzzy제어계 특성에 의한 시뮬레이션에 의하여 제어특성을 얻어서 비교, 고찰하였다. 그 결과, 두 방법에 의한 상이점은 알 수 있었으나 PID-Fuzzy제어계의 우수성을 입증하는데에는 이르지 못하였다. 하지만 자기부상차량의 부상제어계에 새로운 제어이론의 적용예를 보여주었다.

끝으로 3.3.2절의 시뮬레이션은, 저자가 (株) 東芝 의 시스템 소프트웨어 연구소에서 연구원으로 재직하고 있는 동안, 그곳에서 독자적으로 개발하여 소유하고 있던 소프트웨어[15]를 이용하였음을 밝혀둔다.

5. 참고문헌

[1] 正田英介, 他. "리니어 모터 카 실용화의 동향", 일본 전기학회논문지D, Vol.110, No.1, pp.2-13, 1990.
 [2] 正田英介, 권병일, "자기부상철도의 현상과 전망", 대한전기학회지, Vol.37, No.4 pp.58-70, 1988.
 [3] 김용주, "초고속 자기부상시스템의 세계적 기술현황과 실용화 타당성", 대한전기학회지, Vol.38, No.6, pp.26-36, 1989.
 [4] 임달호, "상전도 자기부상열차의 주행모들 개발", 대한전기학회지, Vol.39, No.5, pp.68-75, 1990.
 [5] 장석명, "미국을 중심으로 한 자기부상열차의 응용전망 및 시장성과 우리나라의 개발동향", 대한전기학회지, Vol.40, No.2, pp.20-29, 1991.
 [6] 자기부상열차개발 국책연구사업단, "자기부상"(News Letter), 1991년 5월호.
 [7] 森下, 他, "常電導吸引式磁氣浮上系のゼロパワー制御", 일본전기학회논문지D, Vol.108, No.5, pp.447-454, 1989.5.
 [8] M.Morishita, T.Atukizawa, "A New Electromagnetic Guidance Technology with No Guidance Magnets", Int. Conf. on Maglev'89, pp.381-386, 1989.7.

[9] T. Minakata, et al, "Magnetically Levitated Transportation System for Automated Production Lines in Factories", Int. Conf. on Maglev'89, pp.375-380, 1989.7.

[10] 권 병일, 正田英介, "스타가配置電磁石による磁氣支持 案内の新しい制御方式", 일본전기학회논문지D, Vol.110, No.12, pp.1227-1236, 1990.12.

[11] 권 병일, 他, "복합자석형흡인식자기부상차량의 전자력해석과 제어특성", 제11차국내외한국과학기술자종합학술대회는문집, 정보산업분과, pp.1308-1312, 1990.6.

[12] 권병일, "복합자석형자기부상차량의 제어특성", 대한전기학회 하계학술대회는문집, pp.127-130, 1991.

[13] 山村, 大西, 正田, "吸引力形常電導磁氣浮上台車の制御系理論, 일본전기학회논문지B, Vol.91, No.11, pp.752-759, 1979.

[14] 菅野道夫, "ファジィ制御(book)", 日刊工業社, 1989.

[15] 遠藤, 石井 "ファジィエキスパートシステム構築シェル", 情報處理, Vol.30, No.8, pp.948-956, 1989.