

## 복합자석형 자기부상차량의 제어특성 개선

권 병 일

한국기계연구소 자기부상열차개발 국책연구사업단

A Noble Control Scheme of Hybrid Magnet Levitation Train

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.

A parallel complementary controller on the lift controller is proposed to reduce the sensitivity for parameter variation and force disturbance.

Simulation and experiment show that the lift system has robustness to force disturbance.

### 1. 서론

자기부상철도와는 별도로 자기부상기술을 소형의 搬送裝置에 이용하려는 연구도 활발하게 진행되고 있다. [1][2][3] 선형전동기로 추진하고, 자기부상기술에 의하여 완전부상을 실현하면, 종래의 반송장치의 접촉에 의한 먼지발생등의 단점을 완전히 제거할 수 있기 때문이다. 이와 같은 장치는 주로 고도의 정결성이 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 부상방식으로서, 부상을 위한 전력의 절감을 위해서, 전자석의 흡인력의 일부를 영구자석에 부담시키는 방식이 시험되고 있다. 즉, 영구자석의 흡인력과 차량의 중량을 일치시키고, 차량의 중량변화 및 외란이 발생하여서 부상계가 불안정하게 될 경우에만, 제어직류자석에 의해서 제어하는 부상시스템이다.

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

복합자석형 자기부상차량의 경우, 추진력을 얻기 위

한 선형유도전동기를 지상1차로 하고, 제어전자석의 전력을 축전지에 의해서 공급하면 완전 非接觸 자기부상을 실현할 수 있다.

복합형자기부상차량의 부상계는 원래 불안정한 시스템이므로 제어에 의해서 안정화 할 필요가 있다. 이 제어계의 제어특성은 력외란 및 파라미터변동에 대해서 그특성이 변하며, 극단적으로는 불안정하게 될 수도 있다(길랑변화는 력외란으로 등가적으로 고려할 수 있다). 따라서 이들에 대한 강인성을 부여할 필요가 있다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 본 논문에서는 안정화 제어계와는 독립적으로, DC모터[4], 흡인식자기부상열차[5]등에 적용된 예가 있는, 병렬보상회로의 일종인 수동적 적응제어계를 구성하였다. 수동적적응계는 다.

본 논문에서는, 우선 수동적 적응제어계의 유용성을 이론적으로 설명하고, 실시시스템인 복합자석형 자기부상차량의 실험에 의해 입증하기로 한다.

### 2. 복합자석형 자기부상차량의 제어특성

#### 2.1 복합자석형 자기부상차량[6]

부상차량의 정면도를 그림1에 나타낸다. 추진계로서는 편축식 선형유도전동기를 사용하여 지상 1차식이다.

부상계로서의 복합자석을 그림2에 나타내고, 그 사양을 표1에 나타낸다.

영구자석은 서머리움계의 휘로튬영구자석을 사용하여, 공극장 8mm에서 대차(bogie)의 중량( $M = 53\text{kg}$ )을 支持하도록 되어 있다. 안내방향은, 그림2의 복합자석을 5mm 스테거 배치하므로써 수동적으로 안내되도록 하였다.

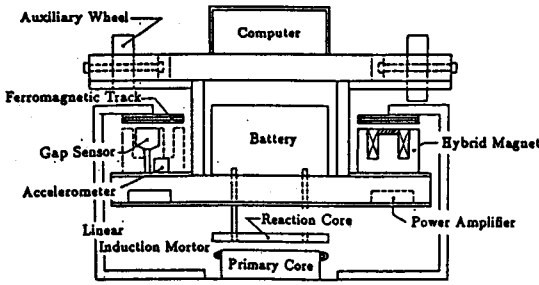


그림1. 복합자석형 자기부상차량

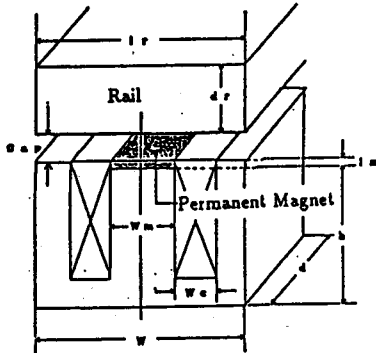


그림2. 복합자석의 구성

표1. 복합자석의 제원

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

제어계는, 디지털로 구성하였으며, 上下方向, pitching, rolling의 각운동을 집중제어한다. 하지만 여기에서는 상하방향의 역외란만을 고려하기로 하며, 상하방향의 제어계에 대해서만 설명하기로 한다.

### 2.2 수동적 적응제어계에 의한 제어특성의 개선

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

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

$$\text{단, } f_{zx} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial x} \right|_{x=x_0}, f_{zi} = \left. \frac{\partial F_x}{\partial i} \right|_{i=i_0}$$

$F_x$ 는 전자석의 부상력으로 공극장  $x$  와 coil전류  $i$ 의 함수로서, 이론적인 일반식, 또는 실험식으로 주어진다.  $F_{dx}$ 는 력외란이다.

전압방정식은 식(2)와 같다.

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

단,  $\phi$ : 주자속,  $L_n$ : 누설인덕턴스

$$\phi_i = \left. \frac{\partial \phi_0}{\partial i} \right|_{i=i_0}, \phi_x = \left. \frac{\partial \phi_0}{\partial x} \right|_{x=x_0}$$

식(1), (2)에 의한 상태방정식은 식(3)과 같이 주어진다.

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

단, 여기에서는 궤도의 외란은 없는 것으로 가정한다.

pitching, rolling의 각운동에 대해서도 같은 방법으로 상태방정식이 구하여진다.

제어전압  $e$ 를 식(4)로 하며, 각 제어정수는 식(3)을 離散化하여 最適制御理論에 의하여 구한다.

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

부상계의 안정과 피드백제어계와는 독립적으로 수동적 적응제어계를 구성한 블록선도를 그림3에 나타낸다.

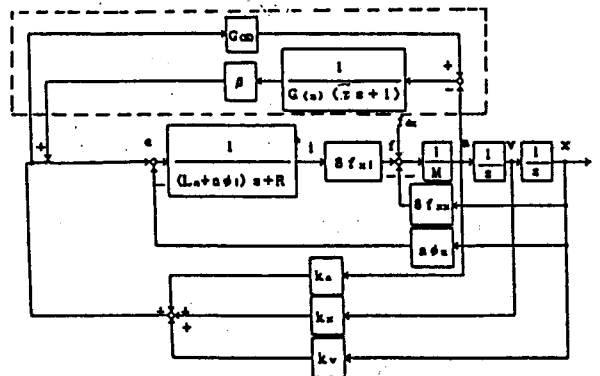


그림3. 수동적 적응제어계를 구성한 부상계의 블록선도

$G(s)$ 는, 파라미터변화가 없는 규범모델인 경우, 제어 전압으로 부터 가속도까지의 전달함수이며 다음식과 같다.

$$G(s) = \frac{g_3 s^2}{s^3 - f_{33} s^2 - f_{32} s - f_{31}} \quad (5)$$

단, 上派字 는 파라미터변화가 없을 경우의 규범 모델이다.

$G(s)$ 의 분모는 3차, 분자는 2차이므로 분모의 차수가 분자의 차수 보다 1차 높으므로, 그 역수인  $1/G(s)$ 는 분모보다 분자의 차수가 1차 낮게 된다. 이러한 전달 함수를 갖는 시스템의 실현은 곤란하므로  $1/(\tau s + 1)$ 를 곱하여, 분모와 분자의 차수가 같아지도록 하였다.

보상후의 력외란에 대한 부상공극장변위의 전달함수를 다음 식에 나타낸다.

$$\frac{X(s)}{F_{dx}(s)} = \frac{1}{G_1(s)} \quad (6)$$

$$G_1(s) = \left( \frac{\beta}{\tau s + 1} + 1 \right) \frac{g_3}{g_3} \left[ \{s^3 - (f_{33} + g_3^* k_x) s^2 - (f_{32} + g_3^* k_v) s - (f_{31} + g_3^* k_a)\} + \left\{ \frac{g_3}{g_3} (s^3 - f_{33} s^2 - f_{32} s - f_{31}) - (s^3 - f_{33} s^2 - f_{32} s - f_{31}) \frac{1}{\left( \frac{\beta}{\tau s + 1} + 1 \right)} \right\} \right]$$

윗식으로 부터 수동적 적응제어계의 구성에 의하여 력 외란 및 파라미터변동에 대한 감도가  $1/(\beta + 1)$ 만큼 낮아진 것을 알 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과에 의한 고찰

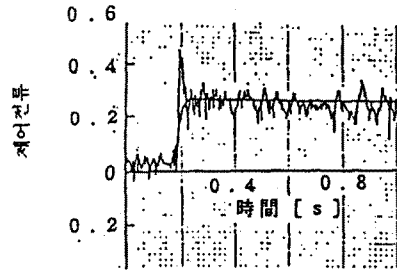
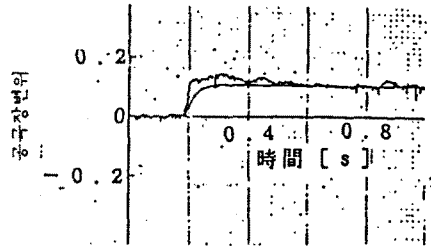
복합형자기부상차량은, 차량의 질량은 영구자석이 담당하고, 과도상태에서의 안정화 전력만 전자석이 담당하므로 정상상태에서의 소비전력은 영에 가깝다. 이와 같은 제어특성은 전류, 또는 전압의 적분을 제어전압에 feedback 함으로서 실현될 수 있다.[6] 하지만 여기에서는 수동적 적응제어계의 효과를 명확히 하기 위하여, 식(4)처럼, 공극장  $x$ , 속도  $v$ , 가속도  $a$ 만의 feedback제어를 하기로 한다.

제어전압을 식(4)로 하여 부상제어 실험을 행하였으며 제어정수는 다음과 같다.

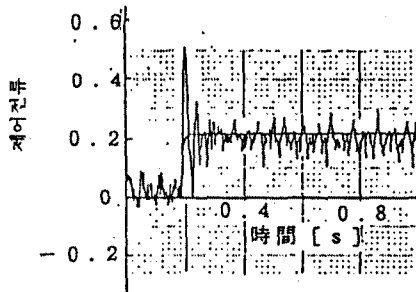
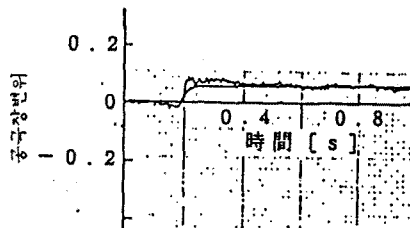
$$k_x = 22603 \text{ V/m}, k_v = 702 \text{ V}\cdot\text{s/m}, k_a = 5 \text{ V}\cdot\text{s}^2/\text{m}$$

1.35kg중의 스템 력외란에 대한 실험을 행하였으며, 부상공극장과 제어전류의 결과를 그림4에 나타낸다.

$\beta$ 의 크기에 의한 제어특성의 변화를 알아보기 위하여,  $\beta=0, 1, 20$ 에 대하여 결과를 얻었다.



$\beta = 0, \tau = 0.002$



$\beta = 1, \tau = 0.002$

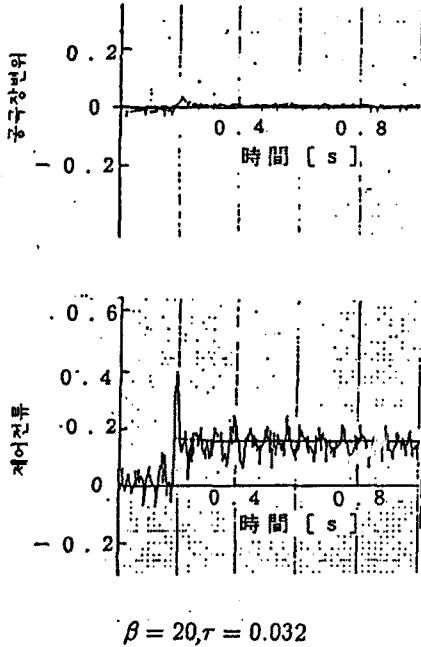


그림4. 시뮬레이션 및 실험에 의한 부상제어특성

$\beta=1$ 인 경우,  $\beta=0$ 의 경우에 비하여 부상공극장의 변위는 1/2정도도 감소되어, 이론치인  $1/(\beta+1)$ 인 것을 알 수 있다. 전류는 부상공극장변위의 감소에 따라 2/3정도도 감소되었다. 따라서, 수동적응용제어계의 구성은 부상계의 안정화에 필요한 과도적인 전력의 저감도 유효함을 알 수 있다.

$\beta=20$ 인 경우에는, 부상공극장이 거의 변동하지 않아, 부상공극장 일정제어에 가까운 제어특성이 실현될 수 있음을 알 수 있으며, 전류도 1/2정도도 저감 되었다.

시뮬레이션에 의한 결과와 실험에 의한 결과는 잘 일치함을 보여주고 있다.

실험결과중 외란이 가해진 직후의 전류의 피크値는 순간적인 력외란의 충격에 의한 것으로 생각되며, 정상적인 전류의 진동은 시스템의 제작상의 문제에 기인한 것으로 사려된다.

#### 4. 결론

복합자석형 자기부상차량의 제어특성을 개선하기 위한 수법을 제시하고, 시뮬레이션과 실험에 의하여 그 유용성을 입증하였다.

부상계의 安定化 제어계와는 독립적으로 병렬보상회로의 일종인 수동적응용제어계를 구성하였다. 이 수동적응용계에 의하여 력외란 및 파라미터에 대한 부상공극장의 감도를 크게 줄일 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

- [1] 森下, 他, “常電導吸引式磁氣浮上系のゼロパワー制御”, 일본전학지D, 108권 5호, pp.447-454, 1989.5.
- [2] M.Morishita, T.Atukizawa, “A New Electromagnetic Guidance Technology with No Guidance Magnets”, Int. Conf. on Maglev'89, pp.381-386, 1989.7.
- [3] T. Minakata, et al, “Magnetically Levitated Transportation System for Automated Production Lines in Factories”, Int. Conf. on Maglev'89, pp.375-380, 1989.7.
- [4] K.Tamaki, et al., “Microprocessor-Based Robust Control of a DC Servo Motor”, IEEE Control Systems Magazine, pp.30-36, 1986.9.
- [5] 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”, 일본전학지D, 110권 12호, pp.1227-1236, 1990.12.
- [6] 권 병일, 他, “복합자석형흡인식자기부상차량의 전자력해석과 제어특성”, 제11차국내외한국과학기술자종합학술대회는문집, 정보산업분과, pp.1308-1312, 1990.6.