

# 자기부상 모듈의 4자유도 제어

김국현 · 김춘경 · 조창희 · 김종문 · 박민국

한국전기연구소 제어응용연구실

## 4 degrees of freedom control for attractive levitation module

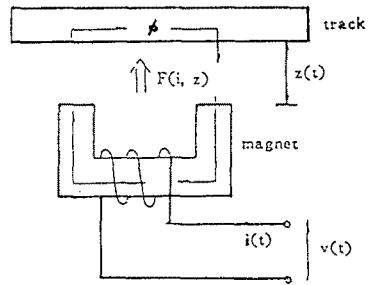
Kook-Hun Kim, Choon-Kyung Kim, Chang-Hee Cho, Jong-Moon Kim, Min-Kook Park

Korea Electrotechnology Research Institute

### Abstract :

One maglev vehicle is composed of 6 or 8 modules. Each module is composed of 4 staggered magnets attached to an aluminum bogie. In the view point of levitation control except propulsion-by LIM, 5 is the maximum degree of freedom to be controlled. But rolling control of the vehicle depends on the bogie structure. We describe just anti-roll type bogie structure and 4 degree of freedom control is sufficient for levitation quality improvement. Multivariable pole-placement concept is used for controller design.

Control experiment is performed on a specially designed test module as well as actual bogie system.



<단일자석 부상 구조>

### 1. 서론

흡인식 자기부상 열차는 LIM을 이용한 중저속 시스템과 LSM 방식을 이용한 초고속 시스템으로 구분될 수 있는데, 국내에서는 현재 중저속 시스템의 개발에 힘을 쏟고 있는 실정이다.

흡인식 부상열차의 승차감은 부상 모듈의 수직 및 수평방향 부상특성에 크게 좌우되며, 차체에 유연한 구조로 붙어있는 알루미늄 강체 모듈이 적절한 4자유도로 제어되어야 최상의 승차감이 보장되는 것은 주지의 사실이다. 4개의 전자석은 하나의 강체 bogie에 편심 배치되어 부착 되어 있으며, 각각의 전자석에 인가되는 전압 또는 전류를 제어함으로써 부상력과 안내력의 조합으로 발생하는 pitching, yawing, heaving, swaying의 제어를 시도하는 것이 본 논문의 핵심내용이다.

다변수 극배치기법을 이용하여 제어를 설계하였으며, 제어용 H/W는 16bit 프로세서를 이용하였다. 제어기의 성능실험은 4자유도 시험장치 및 실차형 2 module 시스템에서 수행하였고, 특히 횡방향 특성이 크게 개선되는 결과를 얻었다.

2장에서 부상시스템의 모델링에 관하여 언급하고

3장에서 제어기 설계 개념에 관하여 언급하며

4장에서 시험장치 및 방법, 결과등에 관하여 기술하며

5장에서 맺는다.

### 2. 부상 시스템 모델링

단일 자석-레일 시스템의 그림은 아래와 같다.

마그네트 인덕턴스는

$$L(z) = \frac{\mu_0 N^2 A}{2Z(t)}, \quad A \text{는 자석면적}$$

부상력은

$$F(i, z) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{Z(t)} \right]^2$$

전압-전류 관계식은

$$\begin{aligned} V(t) &= Ri(t) + \frac{d}{dt} [L(z, i)i(t)] \\ &= Ri(t) + \frac{\mu_0 N^2 A}{2Z(t)} \frac{di(t)}{dt} - \frac{\mu_0 N^2 Ai(t)}{2(Z(t))^2} \frac{dZ(t)}{dt} \end{aligned}$$

운동식은

$$mz(t) = -F(i, z) + fd(t) + mg$$

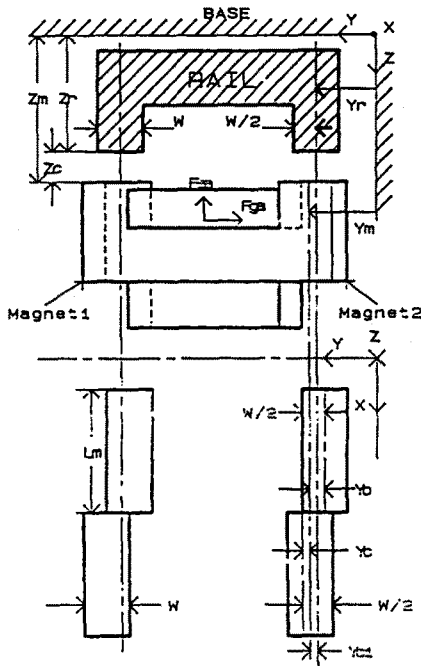
와 같아지고 선형화시키면

$$\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta z(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{Kz}{m} & 0 & -\frac{Ki}{m} \\ 0 & \frac{Kz}{Ki} & -\frac{R}{Lo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta z(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) \\ fd(t) \end{bmatrix}$$

여기서  $Kz = \frac{F(i, z)}{z} \Big|_{(i_0, z_0)}$ ,  $Ki = \frac{F(i, z)}{i} \Big|_{(i_0, z_0)}$  이고

$Lo$ 은 동작점  $(i_0, z_0)$ 에서의 마그네트 인덕턴스이다.

2개의 자석을 편심시킨 구조는 다음 그림과 같다.



< Staggered Magnets >

자석의 부상계, 안내계의 운동방정식, 각 자석의 회로 방정식으로부터 구해지는 미분방정식

$$M \frac{d^2 z_{m1}}{dt^2} = 9.8M - \alpha_s \left[ \frac{i_a}{Z_c} \right]^2 \alpha (Z_{c0} y_0 + y_{c1}) - \alpha_s \left[ \frac{i_b}{Z_c} \right]^2 \alpha (Z_{c0} - y_0 + y_{c1}) + f_{sd}$$

$$M \frac{d^2 y_{m1}}{dt^2} = -\alpha_s \frac{i_a^2}{Z_c} \tan^{-1} \frac{y_0 + y_{c1}}{Z_c} - \alpha_s \frac{i_b^2}{Z_c} \tan^{-1} \frac{-y_0 + y_{c1}}{Z_c} + f_{sd}$$

$$e_1 = \left[ R_a \frac{Z_c \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{3/2}} \frac{dz_{c1}}{dt^2} - i_0 \frac{(y_{c1} + y_0) \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{3/2}} \right. \\ \left. \frac{dy_{c1}}{dt} \right] \cdot i_1 + L \alpha_1 + \frac{L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{1/2}} \frac{di_1}{dt} - i_0$$

$$\frac{Z_c \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{3/2}} \frac{dz_{c1}}{dt^2} - i_0 \frac{(y_{c1} + y_0) \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{3/2}} \frac{dy_{c1}}{dt^2}$$

$$e_2 = \left[ R_b \frac{Z_c \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} - y_0)^2)^{3/2}} \frac{dz_{c1}}{dt^2} - i_0 \frac{(y_{c1} - y_0) \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} - y_0)^2)^{3/2}} \right. \\ \left. \frac{dy_{c1}}{dt} \right] \cdot i_2 + \left[ L \alpha_2 + \frac{L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{1/2}} \right] \frac{di_1}{dt} - i_0$$

$$\frac{Z_c \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} + y_0)^2)^{3/2}} \frac{dz_{c1}}{dt^2} - i_0 \frac{(y_{c1} - y_0) \cdot L \beta}{(z^2_{c0} + (y_{c1} - y_0)^2)^{3/2}} \frac{dy_{c1}}{dt^2}$$

앞의 식으로부터 선형화 시킨 시스템은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_{c1} \\ \dot{z}_{c1} \\ i_1 \\ \dot{y}_{c1} \\ \dot{y}_{c1} \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2 \cdot \beta_s \cdot \tau_s}{M} & 0 & -\frac{\beta_s}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{i_0 \cdot \xi_s}{M} & \frac{R_a}{L \alpha_2} & 0 & \frac{i_0 \cdot \xi_s}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_s}{M} & -\frac{2 \cdot \beta_s \cdot \tau_s}{M} & 0 & \frac{\beta_s}{M} \\ 0 & \frac{i_0 \cdot \xi_s}{M} & 0 & 0 & \frac{i_0 \cdot \xi_s}{M} & -\frac{R_a}{L \alpha_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{c1} \\ z_{c1} \\ i_1 \\ y_{c1} \\ y_{c1} \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

4개의 전자석을 제어하기 위한 모델은 4input 4output 12 state 의 미분방정식이 유도되며, 여기에는 생략한다.

### 3. 제어기 설계 개념

앞의 선형화된 MIMO model을 사용하여 상태궤환 제어기를 구성한다. 부상과 안내를 동시에 제어하는 경우, 부상, 안내제어계는 완전히 독립적으로 설계되어 질 수 없지만, 부상과 안내에 대한 System의 제어 특성을 고려하여, 부상계의 감속계수를 0.707, 자연주파수를 6Hz로 정하고, 안내계의 경우도 각각, 0.25, 3Hz로 정하였으며 실수 Pole을 부상계 -45, 안내계 -45로 정하였다.

이러한 Pole을 가지는 MIMO System에 대한 Control gain은 MATLAB을 이용하여 구하였다.

### 4. 실험 결과

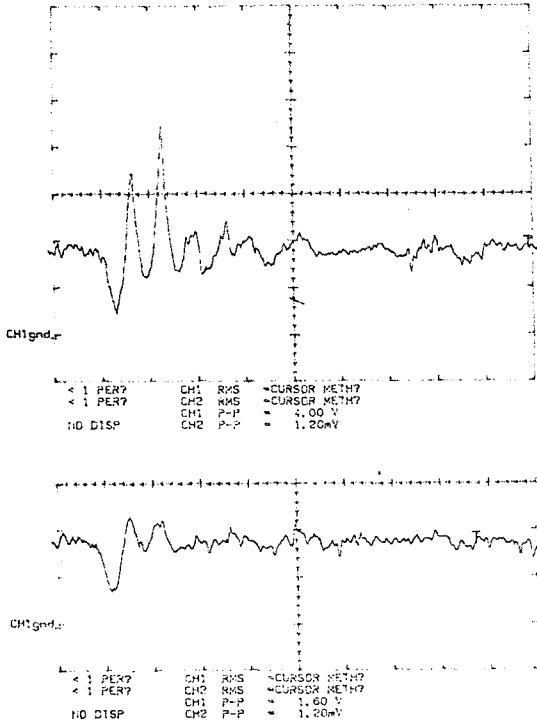
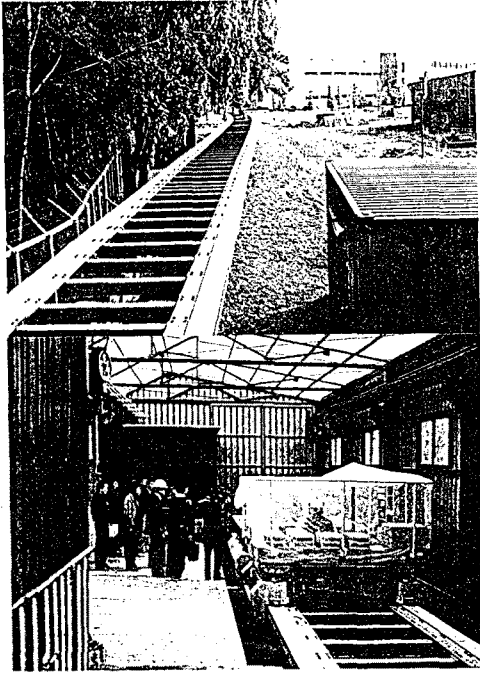
#### 4.1 실험장치

앞의 2 magnet 모델을 4 magnet로 확장하여 실험하였다. 마그네트 공급 전압은 A.C.를 전파 정류한 D.C. source를 chopper의 입력으로 하고, chopper의 스위칭 주파수는 2KHz로 하였다.

제어기는 센서 신호의 필터링을 위하여 아날로그 필터가 사용되고, 제어 연산부는 16 bit 마이크로 프로세서 사용하였다.

4자유도 전용시험장치는 2개의 linear guide, 1개의 Ball-Bush shaft, 1개의 support bearing으로 고정된 모델에 부착된 4개의 전자석으로 구성되며 수직 및 평방향 외란인가장치가 추가되었다.

실차형 모델실험은 사진에 보여주는 자기부상열차 및 운행 Track에서 이루어졌다.



<그림 4.2>

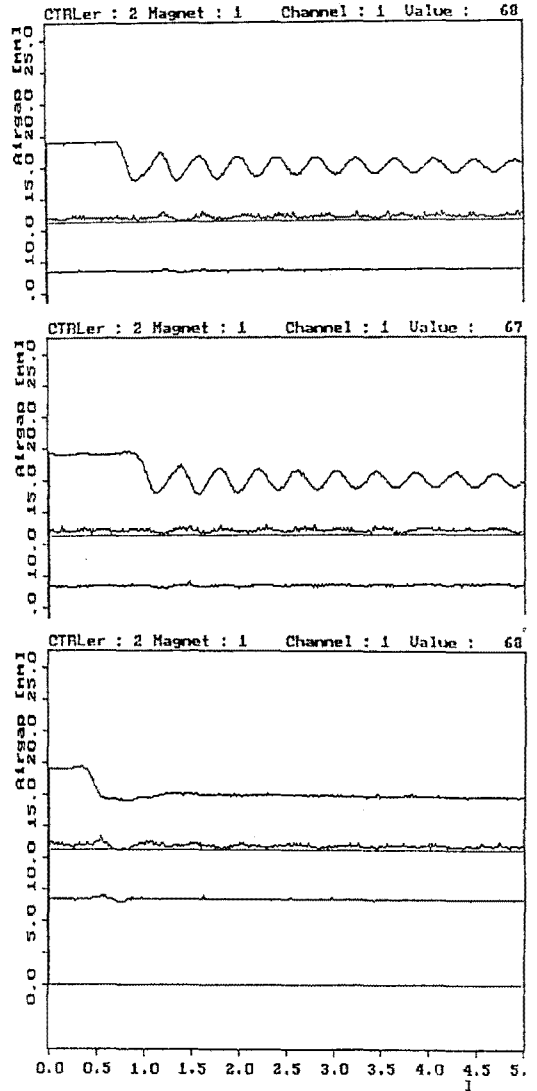
5. 결론

현재 4자유도 흡인식 부상 시스템의 제어를 통하여 차량 단위에 적용을 하고 있으며 이러한 적용 실험은 좋은 결과들 보이고 있다.

4.2 실험방법

그림 4.1은 4자유도 시험장치에서 정상상태에서 45° 방향으로 자체중량의 5%의 외란을 가하고 있다가 갑자기 제거 했을때의 실험파형으로 수직방향 1자유도 제어만 했을 경우, 수직방향 2자유도 제어를 할 경우, 수직/수평방향 4자유도 제어를 할때의 수평방향 gap 변화, pitching angle, 수직방향 gap의 변위이며, 4자유도 제어시 횡방향 damping 특성과 pitching 제어특성이 개선되는 것을 알 수 있다.

그림 4.2는 실차형 모듈에서 30° 방향으로 자체중량의 3%의 외란을 펄스형태로 가했을때의 진동하는 모습이며 1자유도 부상제어시에는 횡방향으로 역방향 피크가 더 크게 발생하여, 기계적 구조등에 따라 2차 피크도 크게 나타나나 4자유도 부상제어시에는 양호한 복귀 특성을 보여주고 있다.



<그림 4.1>

6. 참고문헌

- ① Sinha, "Electromagnetic Suspension Dynamics & Control" (1987)
- ② 한국전기연구소, "자기부상 및 추진 시스템 기술 개발" (1991. 9)
- ③ 한국전기연구소 "자기부상 열차 부상추진 제어 기술 개발" 보고서 (1993. 7월 발행예정)