

### 4개의 자기 부상 액츄에이터 제어에 관한 연구

원진국\*, 문지우\*\*, 조윤현\*, 구대현\*\*  
 동아대학교 전기공학과\*, 한국전기연구원\*\*

### A Study on Four Magnetic Levitation Actuator Control

Jin-kuk Won\*, Ji-woo Mon\*\*, Yun-hyun Cho\*, Dae-hyun Koo\*\*  
 Electrical Engineering, Dong\_A University\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*

**Abstract** - Recently, there are a great many research for magnetic levitation(Maglev) system. Maglev system is eco-friendly used in a place that is not friction. But Maglev is system that inductance is changed according to air-gap, so this is unstable system. In this paper, we simulate 1 Maglev actuator Control and we do an experience on 4 Maglev actuator system control. however, we get a problem of 4 maglev actuator control, because Maglev is 3 DOF(Degree of Freedom). so we control average err of 2 Maglev actuator in the rear.

#### 1. 서 론

다양한 생산공정에서는 고정밀도의 운동에서는 접촉에 의한 마찰이 큰 문제가 되기 마련이다. 이러한 마찰 문제를 해결하기 위해서는 자기 부상시스템(magnetic levitation system, MAGLEV)을 이용할 수 있다. 자기부상 시스템을 이용함으로써 마찰이 존재하지 않아 액츄에이터(actuator)의 정밀도를 높일 수가 있으며, 마찰을 줄이기 위한 윤활제를 사용하지 않아 친환경적인 특성을 가지고 있다[1]. 하지만 자기부상 시스템은 중력을 이용한 제어를 하게 되므로 불안정(unstable)하다는 단점이 있어 자기부상 제어에 있어 좀 더 정밀한 제어가 필요하게 된다.

부상력을 얻는 방법으로 반발부상(repulsive suspension or electric dynamic system(EDS))방식과 흡인부상(attraction suspension or electric magnetic system(EMS))방식이 있다[2]. EMS 방식이 구조가 EDS방식보다 구조가 보다 간단하고 단거리 운송 수단에 적합한 중, 저속용 모델로 현재 실용화를 이루고 있다.

또한, 자기 부상의 배치 따른 일자형 구조와 편심형 배치로 나뉘어질 수 있다. 일자형 배치 구조는 안내력의 크기를 결정할 수 없어 횡방향에 대하여 좌우로 스프링 진동 형태로 나타난다. 편심형 배치는 횡방향 외란에 대한 복원력 또는 일정 위치 제어 등이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 전자석의 일자형 배치 구조로 Gap Sensor(ECL134 U25B 80kHz SMM)를 사용하여 4상의 흡인식 자기부상 제어를 실시하였다. air-gap 제어기법은 PID를, 전류는 P제어를 각각 실시하였다. 1상의 전자석 액츄에이터 시뮬레이션 후 실험 시에는 4상의 독립제어를 실시하였으나 제어에 있어 문제점이 있어 front면의 2개의 액츄에이터에는 독립 제어를 하고, rear 부분의 2개의 액츄에이터 공극의 err의 합의 평균값을 취하여 실험을 실시하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 Maglev의 수학적 모델링

흡인식 자기 부상 시스템에 대한 수학적인 모델링을 하고 선형화한 모델에 1개의 액츄에이터를 구성하여 PID 제어기를 설계하고 시뮬레이션을 실시하였다. 따라서, 1개의 자기부상 모델링을 실시하였는데 다음과 같은 가정을 둔다. 즉, 누설자속은 근사적으로 0으로 두고, 자기 core의 Reluctance가 공극의 Reluctance 보다 매우 작다고 가정하자.

인덕턴스는 공극에 의한 함수이므로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(z) = \frac{u_0 N^2 A}{4} \quad (1)$$

gap 변화에 의한 인덕턴스 값이 변화하므로 시변시스템이 되고, 따라서 흡인력은 식(2)와 같다.

$$F(i, z) = \frac{u_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i(t)}{z(t)} \right]^2 \quad (2)$$

이 된다, 전자석 수직 운동방정식은 식(3)과 같다.

$$m\ddot{z}(t) = -F(i, z) + f_d(t) + mg \quad (3)$$

$$mg = F_0(i_0, z_0) = -\frac{u_0 N^2 A}{4} \left[ \frac{i_0}{z_0} \right]^2 \quad (4)$$

여기서,  $i_0, z_0$ 는 각각 평형 상태에서의 전류와 공극 값이고,  $f_d(t)$ 는 외란 힘이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_z}{m} & 0 & -\frac{K_i}{m} \\ 0 & \frac{K_z}{K_i} & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \\ \frac{1}{L_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(t) \\ f_d(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

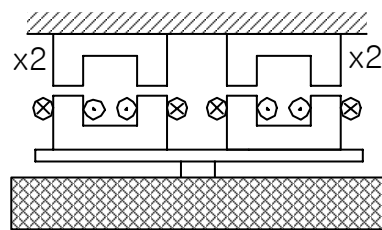
$$K_z = \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{(i_0, z_0)} = \frac{u_0 N^2 A i_0^2}{2z_0^3}, K_i = \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{(i_0, z_0)} = \frac{u_0 N^2 A i_0}{2z_0^2}$$

$L_0 = (i_0, z_0)$ 에서 inductance

$\Delta z(t), \Delta \dot{z}(t), \Delta i(t)$ 를 상태변수로 정의해서 상태 방정식으로 표현하면 식 (5)와 같다.

##### 2.2 1개의 Maglev 액츄에이터 시뮬레이션

###### 2.2.1 Plant Model과 Root locus



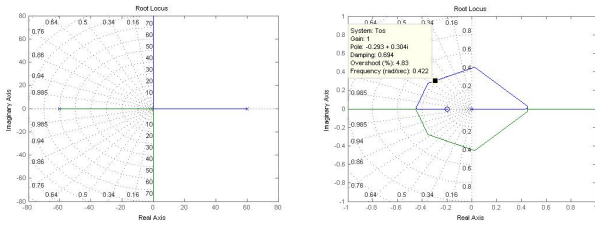
〈그림 1〉 plant 모델

〈그림 1〉은 Plant Model을 나타낸 것이다[3]. 하단 측에 코일을 winding하여 전자석이 흡인식에 의해 부상할 수 있도록 총 4개가 제작되었다. 이 Plant 모델은 한 개의 액츄에이터 당 500N의 힘을 내도록 설계 되었고, 4개의 액츄에이터이므로 총 2000N급 자기부상 시스템으로 제작되었다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 1개의 액츄에이터, 즉 500N급의 자기부상 모델을 잡아 제어를 실시하였다. 〈그림 2〉의 좌측 그림은 제작되어진 plant의 근계적도를 나타낸 것으로 극점이 ±60.0에 있는 불안정한 시스템으로 나타난다. 우측 그림은 제어 함수를 포함한 근계적도이다. 페루프 극점이 모두 좌반평면에 위치하여 안정한 시스템이며 영점 또한 모두 좌반평면에 위치하는 최소위상시스템임을 알 수 있다.

###### 2.2.2 simulation

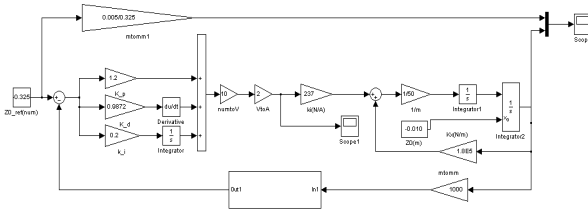
위의 plant Model의 파라메타 값들을 바탕으로 부상 시스템 및 제어

기 모델링을 구현하여 <그림 3>과 같이 matlab/simulink를 이용하여 시



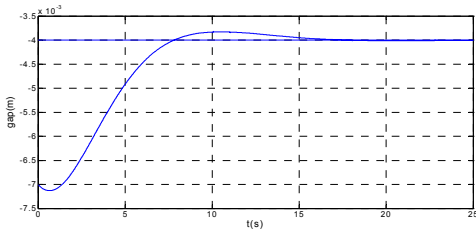
<그림 2> plant 모델의 root locus와 제어 root locus

물레이션을 실시하였다. 실제 자기 부상 Plant 모델은 4개의 전자식 액추에이터이지만 현재 시물레이션은 1개만의 액추에이터를 실시하였다. 초기 공극은 7mm로 두었으며 reference 공극은 4mm를 주었다. 이에 따른 시물레이션 결과는 <그림 4>와 <그림 5>와 같다.

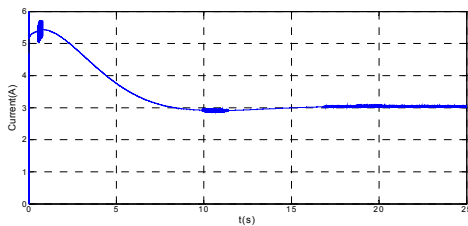


<그림 3> 부상 시스템 및 제어기 모델링

<그림 4>에서 초기 공극에서 reference 공극 값으로 15초 후에 수렴하게 되고 <그림 5>는 그때의 전류 파형을 나타낸다. 초기 공극에서는 5[A]이상의 전류가 가해지고 공극이 줄어들수록 전류 값은 3[A]정도에 수렴하게 된다. 그리고 초기에 미소의 전류 떨림이 발생하였다.



<그림 4> 1개의 전자식 시물레이션 공극파형(reference값과 비교)

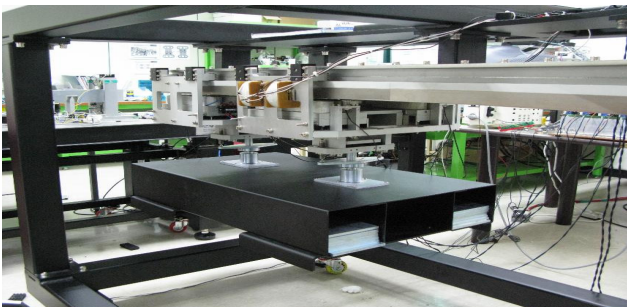


<그림 5> 1개의 전자식 시물레이션 전류파형

## 2.3 실험 결과

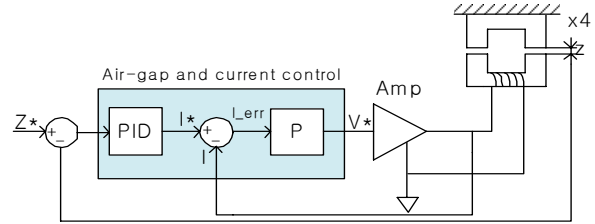
### 2.3.1 system Modeling

<그림 6>는 자기 부상 시물레이터(Plant)의 모습이다. 그림에서와 같이 4개의 전자식으로 구성 되어 있으며 부하를 추가적으로 달 수 있도록 하단부에 빈 공간을 두어 제작되었다.



<그림 6> 자기 부상 시물레이터

본 연구에서는 dSPACE ControlDesk를 이용하여, MMI(Man-Machine Interface)를 구축하였다. <그림 7>에서는 구체적인 시스템 모델을 나타낸다. 센서로 통해 들어온 gap 값과 지령 gap의 err는 dSPACE에서 PID 제어를 통한 지령 전류 값은 실제 전류 값과의 err값을 P 제어만을 통한 PWM 값으로 나타나게 된다.

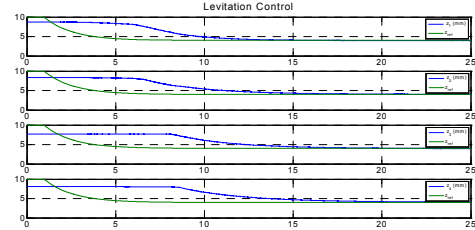


<그림 7> system model

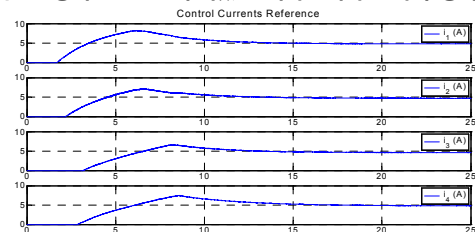
그리고 Bandwidth(10KHz 제어주기)가 굉장히 낮다고 보고, 전류 제어를 상수 개인으로 취급하였다. 하지만, 실제 Plant 응답은 전류제어의 비례제어개인의 값에 민감하게 반응하였다.

### 2.3.2 실험 파형

<그림 8>와 <그림 9>는 실제 자기 부상 시물레이터를 실험한 결과 파형이다. 1개의 액추에이터 시물레이션과는 달리 4개의 액추에이터의 독립제어에 있어서는 3개의 전자식 제어로 3자유도제어가 가능하나 한 개의 전자식이 외란처럼 작용을 함으로써 제어에 문제점이 발생하였다. 따라서 rear 부분의 두 전자식 air-gap err의 합의 평균값을 취함으로써 평면상의 3점 제어로 문제없이 부상에 성공하였다. 초기 7mm에서 4mm로의 공극변화는 Lowpass filter를 이용하여 soft-start 방식을 구현하였다. <그림 8>은 4개의 액추에이터의 공극변화를 나타낸 것이다. 각 4상의 초기 공극의 약간의 차이로 인한 수렴 시간이 달라질 수 있다는 것을 확인하였고, <그림 9>은 그 때의 전류파형을 나타낸 것인데, 각각에 따라 차이는 있지만 평균적으로 초기 부상때 7[A]의 전류가 흐르게 되고 reference 공극에서는 5[A]정도의 전류가 흐르게 된다.



<그림 8> 공극 4mm로 주어졌을 때의 4개의 전자식 공극변화



<그림 9> 공극 4mm로 주어졌을 때의 4개의 전자식 전류 변화

## 3. 결 론

1개의 액추에이터 시물레이션과는 달리 4개의 전자식 제어에는 문제점이 발생하였다. 따라서, 후면에 위치한 두 전자식의 평균 gap err 값을 취하여 세 점의 독립 PID제어를 실시하여 부상에는 문제가 없음을 증명하였다. 하지만 후면 2개의 평균 gap err값을 취했기 때문에 각 전자식에는 약간의 gap err값이 존재하게 된다.

### [참 고 문 헌]

- [1]Takahashi, M., Kwok, G., and Kubota, K.(2006). "Marketing strategy of the HSST system," Maglev'2006 Germany, Proceedings, Volume I, pp.53-57.
- [2] Kortum, W. and Utzt, A.,1984, "Control Law Design and Dynamic Evaluations for a Maglev Vehicle with a Combined Lift and Guidance Suspension System," Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 106, pp.286-292
- [3]P.K.Sinha, "Electromagnetic Suspension Dynamics & control", Peter Peregrinus Ltd.,1987