

# 자기부상 시스템의 $H_\infty$ 제어

## $H_\infty$ control of magnetic suspension system

°김종문, 김춘경, 박민국, 김국헌

\* 한국전기연구소 계측제어연구그룹

Tel : 81-055-280-1443; Fax : 81-055-280-1476; E-mail: jmkim@keri.re.kr

**Abstract :** This paper shows an application of  $H_\infty$  control design for a magnetic suspension system which has strongly nonlinearity and parameter perturbation. The control design is evaluated by numerical simulations and experiments.

**Keywords :** magnetic suspension system,  $H_\infty$  control

### 1. 서론

자기부상 시스템은 비접촉으로 대상체를 부상시켜 추진 또는 회전시키는 시스템을 말하며, 그 응용분야로서 자기부상열차, 에너지 저장장치, 클린룸 이송장치 등을 들 수 있다. 이것은 부상원리에 따라 흡인식과 반발식으로 나눌 수 있는 데, 본 논문에서는 흡인식 부상방식에 국한하기로 한다. 일반적으로 흡인식 부상방식은 상전도 마그네트에 의해 구현되나, 제어 관점에서 보면 이 시스템은 매우 큰 비선형성과 불안정 제어특성 그리고 파라미터 변동 등 많은 제어문제를 가지고 있다[1]. 또한 자기부상 시스템의 레일이 유연하거나, 자기베어링에서 회전속도가 매우 커지게 되면 회전축이 휘어져서 제어가 힘들어 지게 된다. 따라서 이러한 다양한 제어문제를 해결하기 위해 여러 강인 제어 알고리즘이 제시되어 왔는데 그 중의 하나가 바로  $H_\infty$  제어기[2]이다.

강인 제어기로서  $H_\infty$  제어기는 상태공간식에서 해를 구하게 되며 비모델화 성분이 있거나, 외부 외란이 있는 경우에 안정한 제어성능을 주는 것으로 알려져 있다. 또한 MATLAB과 같은 소프트웨어에 의해 쉽게 설계가 가능하다.

본 논문에서는 자기부상 시스템에 대한  $H_\infty$  제어기를 설계 및 구현을 하였으며, 시뮬레이션과 실험결과에 대해 언급하고자 한다.

### 2. 자기부상 모델링

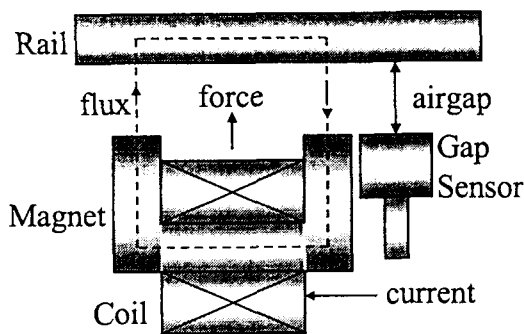


그림 1. 단일자석 자기부상 시스템

Fig. 1 Magnetic Suspension System using a Single Magnet

단일자석 자기부상 시스템의 모델링은 레일이 강체이고, 누설자속이 없다는 가정하에 이루어져 있다. 마그네트와 레일 사이의 공

극  $z(t)$ , 속도  $\dot{z}(t)$  그리고 마그네트 전류  $i(t)$ 를 상태변수로 하고, 부상제어기로부터의 제어입력  $v(t)$ 와 공극  $z(t)$ 를 각각 입력과 출력으로 하는 비선형 방정식을 공칭 공극  $z_0$ , 공칭 전류  $i_0$ 에서 선형화 과정을 거쳐 다음과 같은 상태방정식을 구할 수 있다. [1]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $x(t) = [z(t) \dot{z}(t) i(t)]'$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_z}{M} & 0 & \frac{K_i}{M} \\ 0 & \frac{K_z}{K_i} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{ch}}{L_c} \end{bmatrix}', \quad (2)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0], D = 0$$

이다. 그리고 각 변수는 표 1에서 언급하기로 한다.

이 상태방정식을 전달함수 형태로 고치면 상전도식 자기부상 시스템의 극점이  $s$  평면의 오른쪽에 위치하여 개루프 불안정하다는 것과 선형화 과정에서 공극, 전류 및 힘 사이에 비선형성이 강하다는 것을 알 수 있다. 그러나 앞에서 레일이 강체라고 가정을 하였지만 실제적인 자기부상 시스템에서는 유연한 레일이 대부분이기 때문에 이를 고려하면 위의 상태방정식에서 더 고차의 모드가 나타나게 된다.

한편, 위의 상태방정식 (2)은 별도의 전류 피드백을 하지 않은 경우로서, 자기부상 시스템에서 전류센서를 사용하여 전류 피드백을 하면 상태방정식의  $A$  행렬은 다음과 같이 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_z}{M} & 0 & \frac{K_i}{M} \\ 0 & \frac{K_z}{K_i} & -\left(\frac{K_{ch}}{L} K_c + \frac{R}{L}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 3. 제어기 설계 [3]

그림 2와 같은 피드백제어기를 포함한 폐루프 시스템을 고려한다. 곱셈형 모델링오차를 고려하였으며, 플랜트와 제어기 전달함수 행렬  $G, K$ , 가중함수  $W_1, W_3$  모두 정방행렬이다.

전달함수행렬이  $G(s)$ 로 주어지는 동역학 시스템의  $H_\infty$  노름(norm)은 다음과 같이 정의된다.