

H_{∞} 제어기의 자기부상 시스템에의 적용

The Application of H_{∞} Controller to A Magnetic Levitation System

金鍾文* · 金碩柱* · 朴民國* · 崔榮奎**

(Jong-Moon Kim · Seog-Joo Kim · Min-Kook Park · Young-Kiu Choi)

Abstract - In this paper, a suspension control of a magnetic levitation(MagLev) system with a flexible rail is designed and presented. The numerical modelling for the electromagnetic system to be controlled as a target plant is carried out. And some kinds of the hardware system including CPU board, AD board, DA board, sensors, and switching power amplifier are described. Using the derived model, the stabilizing controllers, such as PID and H_{∞} controller, for the MagLev system are designed using the MATLAB toolbox. The designed controllers are validated by some experimental results as well as numerical simulations. So it is shown that H_{∞} controller can give the better performance for the plant with flexible modes than PID controller.

Key Words : Magnetic Levitation System, PID Control, H_{∞} Control, flexible mode

1. 서론

지난 수십 년 간 자기부상 기술은 자기부상열차, 자기베어링, 플라이휠 등 산업 현장에 널리 사용되어 왔다[1]. 최근에는 초고속 회전장치 및 초정밀 반도체 장비[2]와 같은 극한 기술 분야에도 자기부상 기술을 적용하는 중에 있다. 이러한 자기부상 시스템은 자력에 의해 대상체를 비접촉으로 부상시켜 추진 또는 회전시키기 때문에 자체적으로 많은 이점이 있다. 즉, 마모, 마찰이 없어 내구성이 강하며, 소음이 없다. 또한 윤활 장치를 필요로 하지 않기 때문에 공해 문제가 없어서 청정실에도 적합한 시스템이다. 그리고 기존의 기계적 베어링에 비하여 자기 베어링은 수 나노급의 위치 제어시스템에 적용할 때, 진동 및 마찰이 거의 없어 초정밀 위치제어가 가능하다는 장점도 있다. 이 밖에 여러 가지의 우수한 특성이 있어서 각광받고 있기도 하다.

자기부상 시스템은 부상원리에 따라 크게 흡인식과 반발식으로 나눌 수 있는데, 반발식과 달리 흡인식 부상방식은 보통 상전도 마그네트 단독으로 구현될 경우도 있지만 영구자석과 함께 사용될 수도 있다. 이 논문에서는 주로 U자형 전자석을 사용한 흡인식 부상방식을 대상으로 한다. 반발식은 스스로 안정한 부상 특성을 가지는 데 반하여 흡인식은 불안정한 특성을 가지면서 비선형성과 파라미터 변동 등 많은 제어문제를 가지고 있다. 위에서 언급한 응용사례 중 자기부상열차를 예를 들면, 차량이 궤도 위를 이동할 때 매우 다양한 형태의 외란이 발생된다. 즉, 레일이 강체라든가 유

연 또는 고가, 단차, 커브 등 레일에 의한 외란과 임펄스 및 스텝 형태이면서 상하좌우로 작용하는 힘 외란 등이 있다. 이 경우, 자기부상열차의 속도가 저속이면 문제가 없을지라도 고속으로 달리면 심각한 문제를 발생할 수도 있다. 즉 유연 레일 및 힘 외란이 있을 때의 부상제어기의 성능 저하는 자기부상열차의 추진 속도를 올릴 수 없는 가장 결정적인 이유가 된다. 따라서 부상제어기는 다양한 형태의 레일과 힘 외란이 있다고 하더라도 항상 안정도를 유지하는 동시에 궤도의 진동도 없애면서 댐핑 특성도 매우 우수해야만 한다.

따라서 이 논문에서는 자기부상열차에서 제일 치명적인 문제를 발생시킬 수 있는 유연 레일에 의한 진동 문제와 힘 외란 문제를 해결하기 위한 부상제어기를 설계하고, 그 설계된 제어기를 실제로 제작된 자기부상 실험장치에 적용하여 그 우수한 부상특성을 확인하고자 한다.

레일의 유연 모드를 제어하기 위한 부상제어기[3]로써, 강인성 제어기 중 하나인 H_{∞} 제어기[4]를 설계하였다. H_{∞} 제어기는 상태공간식에서 최적 해를 구하게 되며 비모델화 성분, 각종 외란 등을 제어기 설계 단계에서 고려할 수 있다는 장점이 있고, MATLAB[5][6]과 같은 소프트웨어 툴에 의해 자동적으로 쉽게 설계가 가능하다.

자기부상 시스템의 유연 레일을 제어하기 위해 제어 성능과 강인성을 고려해서 가중함수를 튜닝하였고, 그 결과 레일이 유연하더라도 안정한 제어 성능을 낼 수 있는 부상제어기의 주파수 영역에서의 특성을 제시하였다. 여기서 설계된 H_{∞} 제어기의 제어성능을 확인하기 위하여 기존에 주로 사용하던 제어기의 일종인 PID 제어기의 결과와 비교, 분석하였다.

이 논문의 내용은 다음과 같다. 먼저 마그네트-레일을 포함한 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델링해서 얻은 비선형 방정식을 공칭점에서 선형화하여 공칭 모델을 얻은 후 이 모델에 대한 PID 및 H_{∞} 제어기를 설계한 후 시뮬레이션을 하

* 正會員 : 韓國電氣研究院 計測制御研究그룹 先任研究員

** 正會員 : 釜山大 電子電氣情報컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 7月 16日

最終完了 : 2002年 9月 5日

였다. 시뮬레이션을 위한 자기부상 시스템의 각 파라미터 값은 관계식 및 실험을 통하여 구하였다. 그리고 설계된 두 제어기의 성능을 실험적으로 확인하기 위하여 제작된 자기부상 실험장치에 대해 스텝 실험과 임펄스 실험을 하여 PID 제어기를 유연 레일에 적용할 경우에는 큰 진동이 발생하지만 H_∞ 제어기를 적용할 때에는 매우 좋은 댐핑 특성을 얻을 수 있다는 것을 보였다.

2. 자기부상 모델링

상전도 자기부상 시스템은 비선형성이 강하고, 개루프 불안정한 시스템이며, 각종 파라미터가 시간적으로 변하는 제어 특성을 갖고 있다. 제2장에서는 이러한 자기부상 시스템에 대한 수학적 모델을 구하고자 한다. 그림 1에서 레일이 강체이면 레일과 레일 기준면 사이의 스프링 및 댐퍼는 무시할 수 있지만, 레일이 유연하면 2차 이상의 새로운 모드가 발생된다.

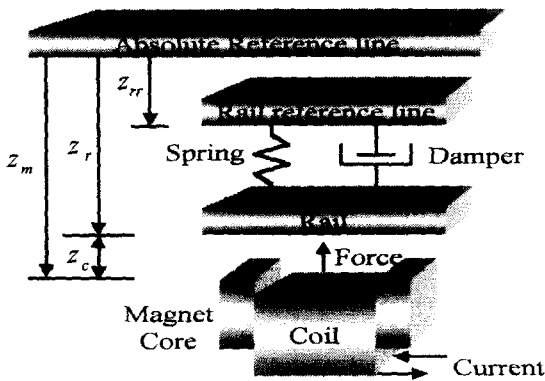


그림 1 마그네트 및 유연 레일 시스템
Fig. 1 Magnet and flexible rail system

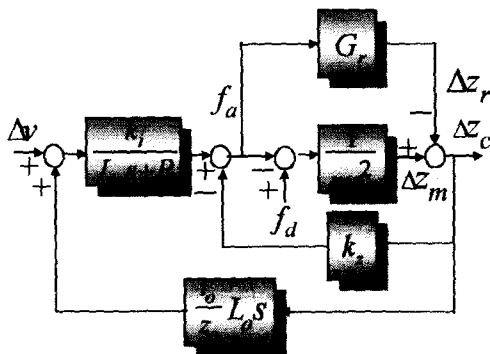


그림 2 자기부상 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 2 Block diagram of a MagLev system

이 장에서는 그림 1에서 일단 레일이 강체라고 가정 한 후, 마그네트-레일 시스템에 대한 수학적 모델링을 하고, 유연 레일에 대해서는 이 장의 마지막에서 언급하기로 한다. 관심의 대상인 흡인식 자기부상 시스템에서 누설 자속이 없다는 가정을 하고, 비선형 시스템의 상태변수로서, 마그네트와 레일 사이의 공극 $z_c(t)$ 와 속도 $\dot{z}_c(t)$ 및 마그네트 전류

$i(t)$ 를 선택한다. 여기서 공극과 속도는 기계적인 운동 상태이고, 전류는 전기적인 상태를 의미하게 되어 결국 시스템의 차수는 3이 된다. 이 시스템의 입력은 제어전압 $v(t)$ 이고, 출력은 공극 $z_c(t)$ 인 자기부상 시스템은 다음과 같은 비선형 방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t)u + d \quad (1)$$

여기서 비선형 함수 $f(x, t)$ 의 $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ 는 각각 시스템의 상태 벡터와 제어입력 벡터이고, $B \in R^{n \times m}$ 는 입력 행렬, d 는 자기부상 시스템에서 발생하는 외부 외란, 파라미터 변동, 모델링 안 된 플랜트 동특성 등 모든 모델 불확실성을 포함한다.

이제 z_o , i_o 및 v_o 를 평형점에서 마그네트를 지지하기 위한 평형점 공극, 전류 및 제어전압이라 하고, 평형점으로부터의 변화분을 $\Delta z_c(t)$, $\Delta i(t)$, $\Delta v(t)$ 이라 하면,

$$z_c(t) = z_o + \Delta z_c(t), \quad i(t) = i_o + \Delta i(t), \quad v(t) = v_o + \Delta v(t) \quad (2)$$

공극 변화분 $\Delta z_c(t)$ 는 레일과 마그네트 사이의 상대적인 값이고, $\Delta z_m(t)$ 와 $\Delta z_r(t)$ 는 각각 마그네트의 절대적인 위치 및 레일의 절대 위치를 의미하고, 그림 1에서 보인 바와 같이 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta z_c(t) = \Delta z_m(t) - \Delta z_r(t) \quad (3)$$

이제 평형점에서 테일러 급수에 의한 근사화 과정을 거쳐 1차 항만 고려하고, 2차 이상의 항은 무시하면 다음과 같은 선형 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{z}_c(t) \\ \Delta \dot{z}_m(t) \\ \Delta \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_z}{m} & 0 & -\frac{k_i}{m} \\ 0 & \frac{i_o}{z_o} & -\frac{R}{L_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_c(t) \\ \Delta z_m(t) \\ \Delta i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{i_o}{z_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d(t) \\ \Delta z_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_o} \end{bmatrix} \Delta v(t) \quad (4)$$

여기서 이 상태방정식은 3개의 외부 입력이 있는데, 그 중 $f_d(t)$ 와 $\Delta z_r(t)$ 는 각각 힘 외란과 레일 외란을 의미한다. $\Delta z_r(t)$ 는 레일이 강체이면서 표면이 고른 상태이면 0이 되지만, 레일이 유연하거나 표면이 고르지 못하면 임의의 크기를 갖게 된다. 또한 상수 R 과 m 은 마그네트 저항과 질량이고, 계수 k_i , k_z 및 L_o 는 각각 평형점에서의 전류계수, 공극계수 및 인덕턴스이며, 다음과 같이 정의된다. 이 계수들은 평형점에서 구한 값이기 때문에 실제로 평형점 공극과 전류값이 변하면 이에 따라서 변하게 된다.

$$k_i = k_1 \frac{i_o}{z_o}, \quad k_z = k_2 \frac{i_o}{z_o}, \quad \frac{k_z}{k_i} = \frac{i_o}{z_o}, \quad L_o = \frac{k_1}{2z_o} \quad (5)$$

여기서 $k_1 = \mu_0 N^2 A$ 이고, μ_0 는 공기 중의 투자율이고,

N 은 마그네트 권선수, A 는 마그네트 극 단면적이다.

한편, 이 논문에서는 앞에서 언급한 것처럼 일단 레일이 강제라고 가정하고 부상 제어기를 설계하고자 한다. 하지만 설계된 부상제어기는 레일이 유연하거나 각종 외란이 존재 하더라도 항상 설계 사양을 만족해야만 하기 때문에 레일의 특성에 대해 언급할 필요가 있다. 나중에 실험결과에서 부상제어기의 식용 결과를 보일 때, 레일이 강제인 경우와 유연체인 경우를 나누어서 설명하기로 한다. 실제로 산업 현장에서의 레일에서 발생하는 동역학은 매우 다양하게 나타나며, 수학적으로 표현하기 위해서는 고차항의 편미분을 포함하는 복잡한 방정식이 필요하게 된다. 하지만 이 논문에서는 레일의 구체적인 동역학을 다루지는 않을 것이며, 다만 근사화된 2차의 전달함수로 표현하기로 한다. 즉 질량-스프링-댐퍼로 간략히 나타낸다.

그림 2에서 전달함수 $G_r(s)$ 는 레일의 동역학을 의미하며, 만약 레일이 강제이면 무시된다. 이 전달함수는 마그네트와 레일 사이의 흡인력 $f_a(t)$ 을 입력으로 하고, 그 레일의 위치 $z_r(t)$ 을 출력으로 하는 다음의 식 (6)으로 표현된다.

$$f_a(t) = M_r \ddot{z}_r(t) + C_r \dot{z}_r(t) + K_r z_r(t) \quad (6)$$

이것을 라플라스 변환에 의해 주파수 영역에서 표시하면

$$Z_r(s) = G_r(s) F_a(s) = \frac{1}{M_r s^2 + C_r s + K_r} F_a(s) \quad (7)$$

가 되고, 레일의 파라미터 C_r 과 K_r 는 각각 댐핑 상수 및 스프링 상수이며, 스프링 상수는 정상상태에서 마그네트의 흡인력에 의한 레일의 변위와 밀접한 관계가 있다. 레일 감쇠계수 ζ_r 과 레일 자연각주파수 w_{nr} 에 의해 구해진다.

$$C_r = 2\zeta_r w_{nr} M_r, \quad K_r = w_{nr}^2 M_r \quad (8)$$

이 논문에서 사용된 레일은 자기부상 시스템에서의 레일의 유연성을 충분히 모의할 수 있도록 설계되었으며, 레일의 길이는 약 2.5m, 폭 0.1m, 두께 0.02m이고, 그 감쇠비는 일반적인 구조물에서 나타나는 약 0.02 정도이다. 그림 3은 레일의 한 가운데에서 임펄스 해머로 충격을 주었을 때의 레일의 위치를 보여주는 파형이며, 댐핑이 매우 작아서 레일이 유연하다는 것을 보여 준다.

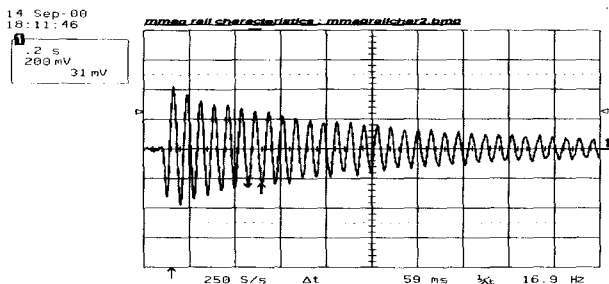


그림 3 임펄스 힘에 대한 레일 위치 (2mm/div)
Fig. 3 Rail position for impulse force (2mm/div)

3. 부상 제어기 설계

3.1 H_∞ 제어기

이 절에서는 H_∞ 제어기를 자기부상 시스템에 적용하기 위해서, 먼저 그 제어이론에 대해 언급하고, H_∞ 제어기의 가중함수 튜닝에 의해 부상제어기를 설계하고자 한다.

먼저 그림 4와 같은 피드백 제어기를 포함한 폐루프 시스템을 고려한다. 여기서 플랜트와 제어기 전달함수행렬 $G(s)$, $K(s)$, 가중함수 $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ 모두 정방행렬이다.

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

$$\|G\|_\infty = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(j\omega)) \quad (9)$$

$W_1(s)$, $W_3(s)$ 는 각각 오차 신호, 출력 신호에 대한 가중함수이고, 감도 행렬 $S(s)$ 와 상보 감도 행렬 $T(s)$ 는 다음과 같다.

$$S = \frac{e}{r} = (I + GK)^{-1} \quad (10)$$

$$R = \frac{u}{r} = K(I + GK)^{-1} \quad (11)$$

$$T = \frac{y}{r} = GK(I + GK)^{-1} = I - S \quad (12)$$

전달함수 R , S , T 의 주파수 특성은 저주파 대역에서는

$$S = (I + GK)^{-1} \approx (GK)^{-1} \quad (13)$$

$$T = GKS \approx I \quad (14)$$

$$R = KS \approx G^{-1} \quad (15)$$

이 되고, 고주파 대역에서는

$$S = (I + GK)^{-1} \approx I \quad (16)$$

$$R = KS \approx K \quad (17)$$

$$T = GKS \approx GK \quad (18)$$

와 같이 근사화 된다.

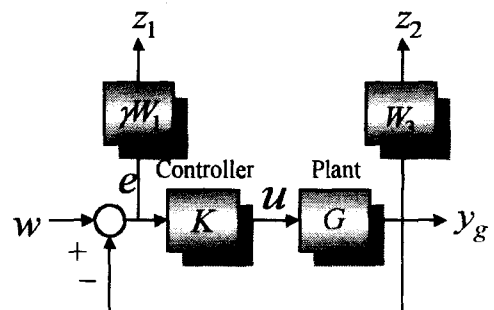


그림 4 플랜트, 제어기 및 가중함수
Fig. 4 Plant, controller, and weighting functions

$S(s)$ 와 $T(s)$ 는 항상 위의 조건을 만족시켜야 하므로, 전주파수 영역에서 추종성능과 모델링 오차에 대한 강인성을 함께 개선시킬 수는 없다. 그리고 외란 제거 성능과 강인성 안정에 대한 주파수 영역에서의 특성은 다음의 식 (19), (20)에 의해 결정된다. 이 식에서 알 수 있듯이, 튜닝 파라미터인 γ 와 가중함수 $W_1(s)$, $W_3(s)$ 를 변화시키면 이 두 식을 만족하는 최적의 전달함수 $S(s)$ 와 $T(s)$ 가 결정되고, $S(s)$ 는 저주파 대역에서는 작고, 고주파 대역에서는 커야만 하기 때문에 $W_1(s)$ 는 오히려 저주파 대역에서는 크고, 고주파 대역에서는 작아야만 한다. 그리고 $W_3(s)$ 는 반대로 저주파 대역에서는 작고, 고주파 대역에서는 작아야만 식 (20)의 조건을 만족할 수 있다.

$$\overline{\sigma}(S(j\omega)) < |\gamma^{-1}W_1(j\omega)| \quad \text{for all } \omega \quad (19)$$

$$\overline{\sigma}(T(j\omega)) < |W_3(j\omega)| \quad \text{for all } \omega \quad (20)$$

H_∞ 제어기 설계문제는 식 (21)의 T_{zw} 를 내부적으로 안정화시키면서 다음과 같이 강인성과 성능에 대한 H_∞ 노음을 최소화하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 문제로 간략화될 수 있다.

$$\|T_{zw}\|_\infty \leq 1 \quad (21)$$

여기서 $T_{zw} = \begin{bmatrix} \gamma W_1 S \\ W_3 T \end{bmatrix}$ 이다.

식 (21)의 T_{zw} 는 외부 입력 w 와 외부 출력 z 를 각각 입력 및 출력으로 하는 페루프 전달함수로서, 가중 혼합감도함수라 일컫는다.

부상제어기를 설계하기 위한 가중함수에서 파라미터 γ 는 튜닝 파라미터이고, 계수 k_1 는 저주파 영역에서의 추종성능을 결정하는 데, γ 와 k_1 는 정상상태 오차에 대한 설계사양과 관계가 있고, 계수 k_3 는 고주파 영역에서의 모델링 오차에 대한 강인성과 관계가 있으면서 페루프 전달함수의 대역폭의 roll-off를 결정한다. 여기서 정상상태 오차를 줄이기 위하여 γ 값을 크게 하면 안정도와 강인성이 나빠지게 된다. 이 논문에서는 정상상태 오차를 약 2% 이내로 하고, 페루프 전달함수의 대역폭을 약 40 Hz 정도로 하기 위하여 가중함수 $W_1(s)$ 및 $W_3(s)$ 을 식 (22)와 같이 정하였다.

$$W_1(s) = \frac{\gamma}{k_1} \frac{(t_n s + 1)^2}{(t_d s + 1)^2} \quad (22)$$

$$W_3(s) = k_3 s^3$$

여기서 각 가중함수의 파라미터는 $\gamma = 1$, $k_1 = 0.015$, $t_n = 0.0159$, $t_d = 0.159$, $k_3 = 10^{-8}$ 이다. 가중함수의 튜닝에 의해 외란 제거 및 강인-안정도 향상을 꾀할 수 있으며, 설계자가 의도한대로 목적을 달성하기 위해서는 자기부상 실험 장치의 실제 파라미터를 정확히 구해서 이를 공칭 모델로 하여 부상제어기를 설계해야만 한다.

3.2 PID 제어기 설계

이 논문에서는 앞서 설계한 H_∞ 부상제어기의 제어 성능을 확인하기 위해서, 기존에 자기부상 제어에서 주로 사용하던 PID 제어기와 비교, 분석하기로 한다.

PID 제어기는 자기부상 뿐 만 아니라 산업 현장에서 많이 사용되고 있고, 각 계인을 온라인으로 튜닝이 가능하고, 그 구조가 간단하다는 것이 장점이라 할 수 있다. 앞서 언급하였듯이 자기부상 시스템의 입출력 전달함수에서 분모와 분자의 차수의 차이가 3인데 PID 제어기를 사용하면 페루프 시스템의 분모와 분자의 차수의 차이는 미분 영역에서는 2가 된다. PID 제어기는 미분 동작에 의해 주파수 영역에서 보드선도의 이득곡선의 기울기가 최대 20dB/dec인데, 자기부상에서 레일이 유연하거나 외란이 발생했을 때 PID 제어기는 구조적인 문제 때문에 페루프 안정성을 확신할 수 없다.

그림 5와 같이 구현된 단일 입출력 PID 제어기의 구조는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s + \tau_i} + \frac{K_d s}{\tau_d s + 1} \quad (23)$$

위 식을 상태공간으로 표현하면

$$A_c = \begin{bmatrix} -\tau_i & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_d} \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau_d} \\ \frac{1}{\tau_d} \end{bmatrix}$$

$$C_c = \left[K_i \quad -\frac{K_d}{\tau_d} \right], D_c = K_p + \frac{K_d}{\tau_d}$$

여기서 τ_i 와 τ_d 는 각각 적분값과 미분값의 크기를 제한하기 위한 상수로 고정된 값을 가진다.

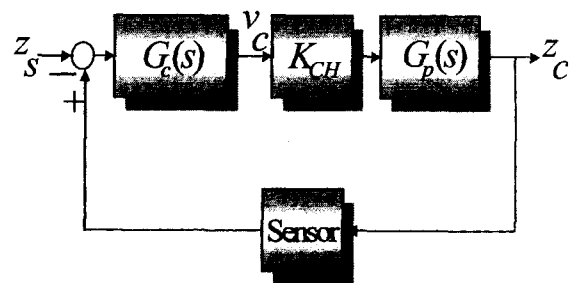


그림 5 PID 제어기 및 자기부상 시스템
Fig. 5 PID controller and MagLev system

이 논문에서 구현된 PID 제어기의 미분기의 입력은 입출력 간의 오차가 아닌 출력 신호만이다. 이것은 기준 공극입력에 대한 출력 공극의 전달함수는 달라지게 되지만 기준 입력이 바뀔 때 미분 항에 의해 진동이 발생하는 것을 방지해주는 역할을 하면서 플랜트 입력단 및 출력단에서 발생하는 각종 외란에 대한 출력 공극의 전달함수의 크기는 변하지 않게 되어 외란 특성에는 차이가 없다. 자기부상 시스템에서는 기준 입력에 대한 특성도 중요하지만 실제로는 외

부 외란에 대한 저감 대책이 더 중요하며, 이 크기는 H_{∞} 노움에 의해 표시된다. 따라서 외란에 대한 H_{∞} 노움은 부상제어기의 특성을 결정하는 기준이 된다.

4. 부상 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

이 장에서는 자기부상 시스템의 모델과 설계된 부상제어기를 이용하여 미리 시뮬레이션을 하여 그 부상특성을 살펴보기로 한다.

그림 6은 제작된 자기부상 시스템에 대한 흡인력-전류-공극 간의 특성 곡선을 보여 준다. 이 그림에서 알 수 있는 것처럼 A 지점은 초기 공극 6mm에서 약 3.4A 이상 흘러야만 부상이 가능하다는 것을 의미하며, B 지점은 기준 공극 4mm에서 동작점 전류가 약 2.2A라는 것을 알 수 있다.

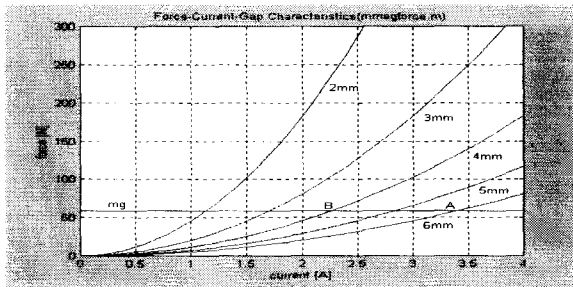


그림 6 힘, 전류 및 공극간의 특성 곡선
Fig. 6 Force, current and gap characteristics

이 논문에서 사용된 단일자석 자기부상 시스템의 각 파라미터는 표 1과 같다.

그림 7, 8은 시뮬레이션을 하기 위한 Matlab/Simulink 모(5)[6]을 보여 준다. 시뮬레이션을 통하여 각각의 부상제어기 설계할 수 있었고, 설계된 제어기의 전달함수는 즉시 부상제어 하드웨어로 구현이 가능하다.

4.2 시뮬레이션 결과[5]

이 논문에서는 자기부상 시스템의 부상제어에서 기존의 일반적인 제어기로 사용되어 왔던 PID 제어기의 제어 특성 한계를 확인하기 위한 것이 제일 큰 목적이다. 즉 레일이 강제일 때, 비교적 양호한 제어 성능을 보여 주는 PID 제어기가 레일이 유연해질 때에도 전과 같은 제어 성능을 유지할 수 있는지가 관건이 된다.

4.2.1 PID 제어

먼저, PID 제어기를 자기부상 시스템에 적용했을 때의 결과로써, 레일이 강제일 경우와 유연체인 경우에 대한 결과를 보여 준다. 입력추종성능과 플랜트 입력 외란제거에 관한

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

자석 무게 m	6.0	kg
전류 계수 k_i	38	N/A
공극 계수 k_z	35615	N/m
저항 R	3.4	Ω
공칭 인덕턴스 L_o	0.09	H
마그네트 극 단면적 A	0.085x0.013	m^2
코일 권선수 N	726	회
공칭 공극 z_o	0.004	m
공칭 전류 i_o	2.2	A

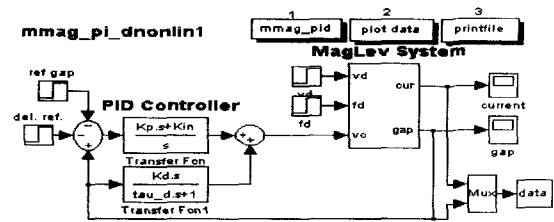


그림 7 PID 제어용 Simulink 모델
Fig. 7 Simulink model for PID control

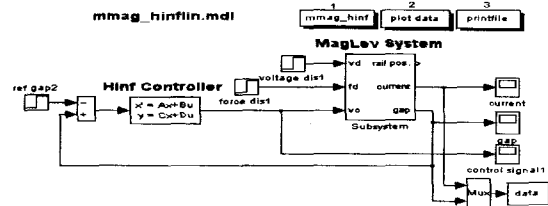


그림 8 H_{∞} 제어용 Simulink 모델
Fig. 8 Simulink model for H_{∞} control

시뮬레이션을 하였으며, 입력추종의 경우 기준입력을 4mm에서 5mm로 1mm 증가시켰고, 외란 제거성능은 마그네트에 가해지는 제어전압에 80msec 동안 +4.0V를 더해 그 성능을 확인하였다.

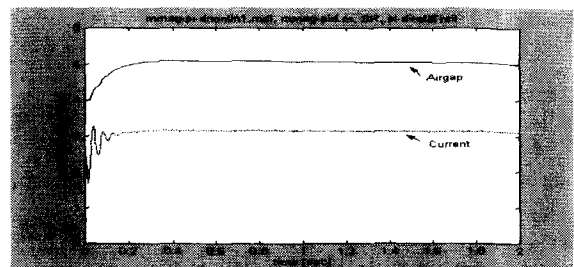


그림 9 강제 레일에서의 PID 스텝 응답
Fig. 9 PID step response for stiff rail

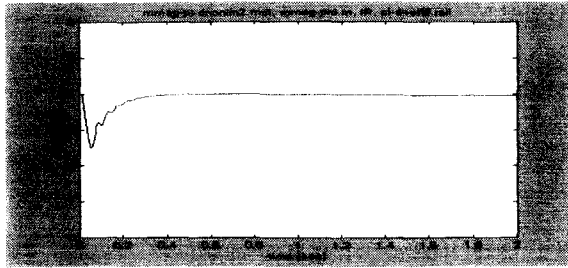


그림 10 강체 레일에서의 PID 임펄스 응답
Fig. 10 PID impulse response for stiff rail

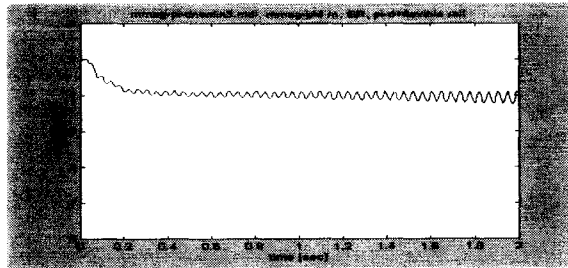


그림 11 유연 레일에서의 PID 스텝 응답
Fig. 11 PID step response for flexible rail

PID 제어기 구조는 식 (23)과 같고, 각 계인은 $K_p=2000$, $K_i=300$, $K_d=70$, $\tau_i=0$, $\tau_d=10^{-4}$ 이다. 이 계인은 여러 번의 시행착오로 구했으며, 가장 양호한 부상 결과를 보일 때의 값이다. 그림 11, 12는 레일이 강체인 경우의 PID 제어기를 적용했을 때의 시뮬레이션 결과이다. 입력 추종 성능과 외란제거 성능 모두 비교적 양호한 결과를 보인다. 레일이 강체이면 1차 부상계와 PID 제어기에 의해 페루프 시스템이 결정되므로 페루프 특성은 댐핑이 양호하다. 그림 13은 레일이 유연할 때의 스텝 응답으로서, 시간이 흐를수록 진동이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 나중에 언급할 부상 실험 결과에서도 확인할 수 있으며, PID 제어기는 댐핑이 매우 작은 유연한 레일에 의한 새로운 모드 때문에 제어의 한계를 보인다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 H_∞ 제어

여기서는 레일이 강체라고 가정하고 H_∞ 제어기를 설계 하였다. 레일의 동역학이 무시되므로, 플랜트는 3차 시스템이 되며, 그림 14는 설계된 H_∞ 제어기의 보드 선도이다. 이 제어기의 분모는 4차, 분자는 3차이며, 6Hz에서 100Hz 사이에서는 약 40dB/dec의 기울기를 갖고 있으며, 이 영역에서 미분 동작을 하여 부상 시스템의 안정도에 결정적인 기여를 한다. 자기부상열차에서 레일이 유연할 때의 필요조건이 주파수 영역에서 중간 대역에서 40dB/dec의 기울기를 가져야만 한다는 것이며, 여기서 설계된 H_∞ 제어기는 이것을 만족한다고 볼 수 있다. 반면에 앞서 설계된 PID 제어기는 미분 항에 의해 기울기가 최대 20dB/dec이므로 댐핑에서 한계가 있다고 볼 수 있다.

식 (11)에서 k_1 이 0.015이므로 제어기의 저주파 영역에서

일정한 크기를 유지하게 됨으로써, 기준입력에 대한 정상상태 오차를 약 1.5% 정도로 유지할 수 있으면서 또한 6~100 Hz 영역에서 미분 동작이 있어서 댐핑 특성이 양호하다. 그림 15는 설계된 H_∞ 제어기를 레일이 강체인 자기부상 시스템에 적용한 시뮬레이션 결과이다. 명령 추종 성능을 확인하기 위하여 기준 공극을 4mm에서 5mm로 변화시켰을 때의 공극과 전류 응답이며, 공극은 약간의 오버슈우트를 있지만 댐핑은 비교적 양호하다고 볼 수 있다. 그림 16은 PID 제어기와 마찬가지로 H_∞ 제어기 출력 값에 80msec 동안 4.0V를 더해서 마그네트에 적용한 임펄스 응답이다. 약 0.3초 이후에 댐핑이 가능하다는 것을 알 수 있었고, 이러한 결과는 부상 실험에서도 확인할 수 있었다.

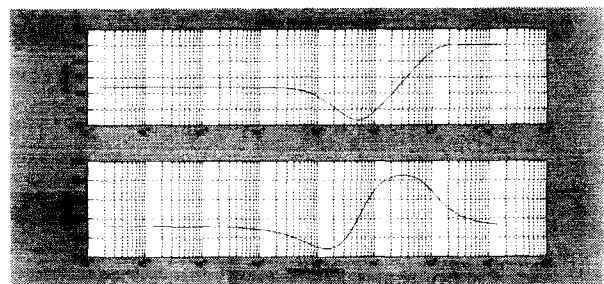


그림 12 설계된 H_∞ 제어기의 보드 선도
Fig. 12 Bode diagram of the designed H_∞ controller.

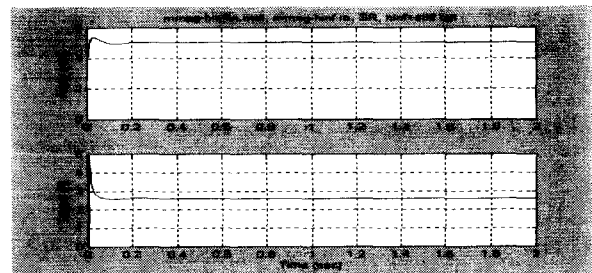


그림 13 강체 레일에서의 H_∞ 스텝 응답
Fig. 13 H_∞ step response for stiff rail

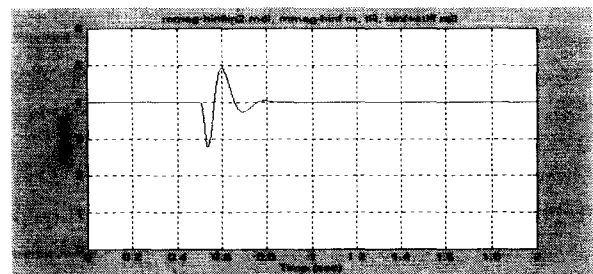


그림 14 강체 레일에서의 H_∞ 임펄스 응답
Fig. 14 H_∞ impulse response for stiff rail

5. 부상 실험

5.1 실험 장치 설명

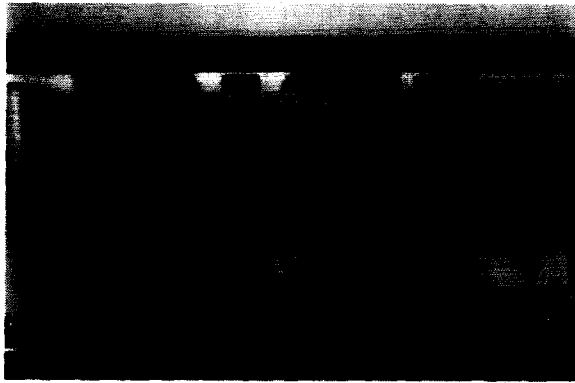


그림 15 자기부상 실험장치사진
Fig. 15 Photo of MagLev test-rig

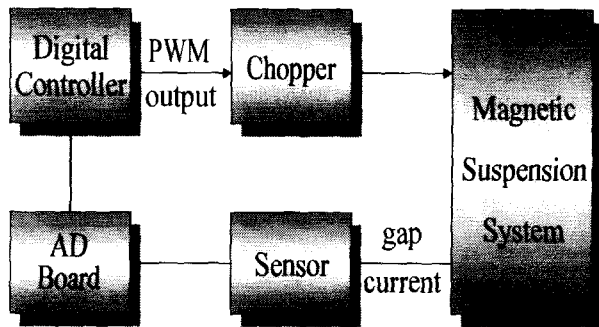


그림 16 디지털 부상제어 시스템
Fig. 16 Digital suspension control system

이 절에서는 제작된 자기부상 시스템의 하드웨어 시스템에 대하여 설명한다. 그림15는 제작된 자기부상 시스템에 대한 사진이며, U자형 상전도 마그네트와 갭 센서, 그리고 1 자유도 부상을 위하여 마그네트 양단에 LM 가이드 등으로 이루어져 있다. 가속도 센서는 모니터링 용으로만 설치를 하였고, 부상 후에는 별도로 설치된 모터와 볼 스크류에 의해 추진이 가능하게 하였다. 이 장치에서 레일의 길이는 2.5m이며, 레일 양단에서는 비교적 강체처럼 단단하고, 레일 지지대의 한 가운데에서는 댐핑이 매우 작은 유연한 레일 특성을 보인다. 이것은 자기부상 시스템을 적용한 자기부상 열차 또는 고속형 자기베어링 시스템에서 흔히 나타날 수 있는 현상을 모의한 것이다.

그림 16은 구현된 디지털 자기부상 시스템에 대한 블록 다이어그램으로서, VME 버스 기반의 미국 Digital Equipment Cooperation(DEC)사의 160[MHz] 클럭주파수의 Alpha-160 CPU 보드를 사용하였다. 이 보드는 이더넷 포트와 시리얼 포트가 각각 하나씩 있고, 메모리는 메인 보드 위의 소켓에 꽂을 수 있도록 되어 있다. 제어 프로그램에서 샘플링 주파수는 4[kHz]이고, 실시간 운영체제인 VxWorks[7] 환경에서 C 코드로 구성되어 있다. 또한 타스크 형태로 프로그램 되

어 있어서 여러 타스크가 병렬로 처리가 가능하며, 여러 타스크 중에서 제어 루틴은 4 [kHz] 마다 call된다. 이 제어 프로그램은 DEC 워크스테이션에서 먼저 개발되어 컴파일된 후, 이더넷을 통하여 VME CPU 보드에 다운로드 된 후, 실행된다. 제어 프로그램에서 피드백 센서는 미국 KAMAN사의 갭 센서 및 전류 센서를 사용하였다. VME AD 보드는 12[bit]의 정밀도를 가지며, -5~+5[V]까지 변환이 가능하고, 최대 32채널까지 변환이 가능하다. 디지털 제어기는 AD 보드로부터 읽은 디지털 값을 이용하여 제어 알고리즘을 계산한 후, 제어기 출력 신호를 초퍼에 PWM 형태로 광케이블을 통하여 전송된다. 초퍼는 1-4상한 방식으로, 스위칭 소자는 IGBT, 스위칭 주파수는 10[kHz], DC 입력전압은 60[V]이다. 이 초퍼방식은 전력소비가 작아 효율은 좋지만, 잡음이 많이 발생하는 단점이 있어서, 자기부상을 정밀 위치 제어에 적용을 할 때에는 선형 증폭기를 사용하는 것이 바람직하다.

5.2 실험 결과

제3장에서 설계된 H_{∞} 제어기를 구현하기 위해 아날로그 영역의 제어기를 디지털 영역으로 변환하기 위하여 다음과 같은 일반적인 bilinear transformation을 사용하였다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (24) \text{ 여기서 } T_s \text{는 샘플링 주기이다.}$$

실험은 먼저, 강체 레일인 경우 PID 제어기가 안정된 부상을 유지할 수 있다는 것을 스텝 응답과 임펄스 응답을 통하여 보여주고, 이 제어기를 다시 유연 레일에 적용한 결과를 보인다. 또 H_{∞} 제어기에 대해서도 동일한 방법으로 실험을 하여 서로의 차이를 비교한다.

그림 17은 강체 레일에 PID 제어를 한 경우 공극의 기준 값을 4에서 5mm로 변화시켰을 때의 공극 및 전류 응답이며, 비교적 안정된 부상 특성을 보여 준다. 그림 18은 같은 조건에서의 임펄스 응답이며 역시 비교적 양호한 결과를 보여 준다. 여기서 임펄스 외란 입력은 제어 전압에 폭 80msec, 크기 4V를 더하여 만들었다. 그리고 그림 19는 PID 제어를 강체 레일이 아닌 유연 레일에 적용한 부상 특성이며 정상상태 공극 4mm를 유지하지 못하고 큰 진동을 한다는 것을 볼 수 있다. 이것은 유연 레일에 의해 댐핑이 작은 모드가 발생되어 페루프 전달함수의 성능이 크게 저하되었다는 것을 알 수 있다.

한편 그림 20과 21은 H_{∞} 제어기를 강체 레일의 부상 시스템에 적용했을 때의 스텝 응답과 임펄스 응답이며, 모두 0.2초 이내에 수렴하지만, 스텝 응답에서는 H_{∞} 제어가 PID 제어보다 오버슈트가 오히려 약간 크다. 그림 22와 23은 H_{∞} 제어기를 유연 레일이 있는 자기부상 시스템에 적용했을 때의 스텝 응답과 임펄스 응답이다. 앞서 보인 PID 제어기의 결과에서는 레일이 강체이면 안정한 부상 특성을 보이더라도 레일이 유연하면 진동을 유발한다. 반면에 H_{∞} 제어기는 비록 레일이 유연하다고 할지라도 댐핑 특성이 매우 우수하다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 볼 때, H_{∞} 제어기가 유연 모드 및 외부 외란에 대해 매우 강인하다는 것을 알 수 있다.

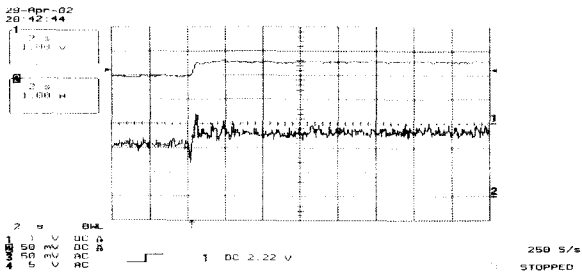


그림 17 PID 제어시 강체레일의 스텝응답
 위: 공극(2mm/div.), 아래: 전류(1A/div.)
 Fig. 17 PID step response for stiff rail
 top: gap(2mm/div.), bottom: current(1A/div.)

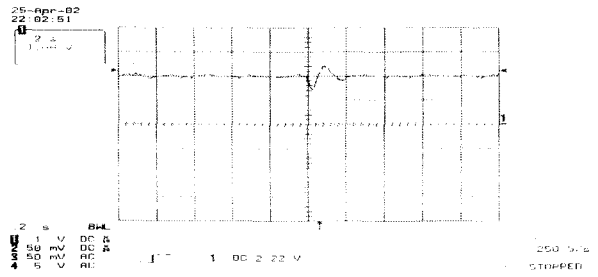


그림 21 H_{∞} 제어시 강체레일의 임펄스 응답
 공극(2mm/div.)
 Fig. 21 H_{∞} impulse response for stiff rail,
 gap(2mm/div.)

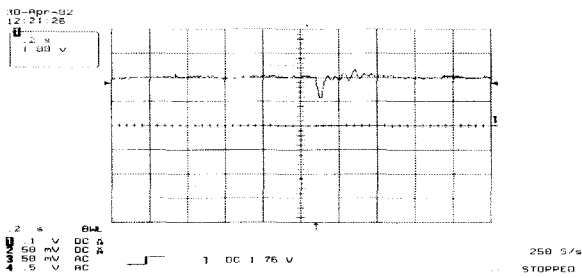


그림 18 PID 제어시 강체레일의 임펄스 응답(2mm/div.)
 Fig. 18 PID impulse response for stiff rail (2mm/div.)

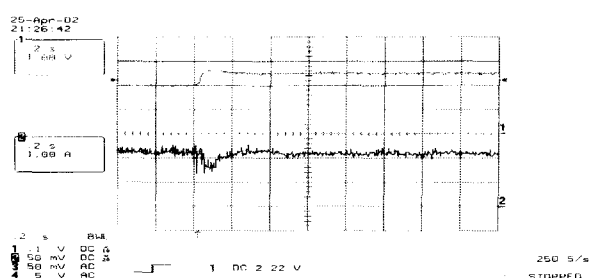


그림 22 H_{∞} 제어시 유연레일의 스텝응답
 위: 공극(2mm/div.), 아래: 전류(1A/div.)
 Fig. 22 H_{∞} step response for flexible rail
 top: gap(2mm/div.), bottom: current(1A/div.)

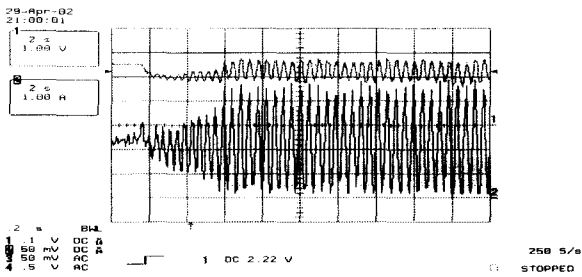


그림 19 PID 제어시 유연 레일의 스텝 응답 :
 위: 공극(2mm/div.), 아래: 전류(1A/div.)
 Fig. 19 PID step response for flexible rail
 top: gap(2mm/div.), bottom: current(1A/div.)

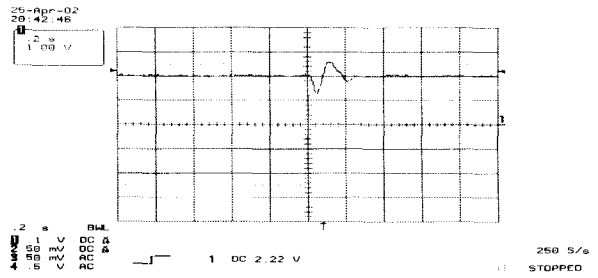


그림 23 H_{∞} 제어시 유연레일의 임펄스 응답
 공극(2mm/div.)
 Fig. 23 H_{∞} impulse response for flexible rail
 gap(2mm/div.)

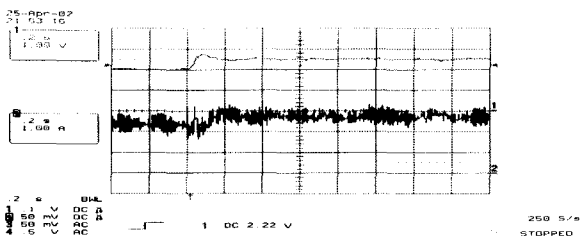


그림 20 H_{∞} 제어시 강체레일의 스텝응답
 위: 공극(2mm/div.), 아래: 전류(1A/div.)
 Fig. 20 H_{∞} step response for stiff rail
 top: gap(2mm/div.), bottom: current(1A/div.)

6. 결 론

지금까지 유연한 레일을 갖는 흡인식 자기부상 시스템에 대한 추종 성능과 외란 제거 성능을 개선하기 위해 기존의 PID 제어기 외에 강인성 제어기 일종인 H_{∞} 제어기를 설계 하였으며, 이 제어기의 성능을 확인하기 위해 디지털 제어기, 센서, U자형 마그네트 및 레일로 이루어진 실험 장치를 제작하고, 이것에 실제로 적용하여 여러 가지 실험 결과를 얻었다.

그 결과, PID 제어기는 레일이 강제인 경우에는 비교적 제어성능이 우수하지만 레일이 유연하면 댐핑 특성이 나빠지게 된다. 이것은 PID 제어기가 유연한 레일로 인해 발생한 새로운 고차항의 모드를 능동적으로 제어할 수 없다는 것을 보여 주며 그 이유는 앞에서 언급을 한 바 있다. 반면에 레일이 강제라고 가정하여 설계한 H_{∞} 제어기는 강제 레일과 유연 레일 모두 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서 중요한 점은, 자기부상열차와 같은 실제 시스템에서는 레일의 형상이 다양하더라도 부상 결과는 큰 차이가 없어야만 한다. 설계된 H_{∞} 제어기를 적용하면 레일이 강제이든 유연하든 안정도가 저하되지 않으면서도 유연 모드를 잘 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 자기부상 시스템에서 요구하는 부상제어기는 여러 제어문제 즉, 비선형성, 불안정성 및 파라미터 변화 등의 문제에 대해 항상 안정되고, 우수한 성능을 지녀야 하기 때문에 앞의 H_{∞} 제어기는 그 가능성을 보였다고 할 수 있다.

앞으로는 H_{∞} 제어기와 PID 제어기의 제어 성능을 해석적으로 더 자세히 분석하여 궁극적으로는 실제의 자기부상 시스템에서 발생하는 각종 외란에도 더욱 더 강인한 부상제어기를 설계하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [2] Dick de Roover, *Motion control of a wafer stage*, Delft University Press, 1997.
- [3] M. Fujita, F. Matsumura, and M. Shimizu, " H_{∞} robust control design for a magnetic suspension system," *2nd International Symposium on Magnetic Bearing*, pp.349-356, July 12-14, 1990, Tokyo, Japan.
- [4] K. Glover and J.C. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_{∞} -norm bound and relations to risk sensitivity", *Syst. Control Letter*, vol.11, pp.167-172, 1988.
- [5] B. Shahian and M. Hassul, *Control system design using MATLAB*, Prentice-Hall Inc, 1993.
- [6] *Robust control toolbox, ver 2.0.6*, The Mathworks, 1998.
- [7] *VxWorks User's Guide*, The WindRiver, 1996.

저 자 소 개



김 종 문 (金鍾文)
 1965년 6월 6일생. 1988년 인하대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~현재 한국전기연구원 선임연구원.
 Tel:(055) 280-1443, Fax:(055) 280-1476
 E-mail: jmkim@keri.re.kr



김 석 주 (金碩柱)
 1961년 12월 8일생. 1984년 연세대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1987년~현재 한국전기연구원 선임연구원.
 Tel:(055) 280-1472, Fax:(055) 280-1476
 E-mail: sjkim@keri.re.kr



박 민 국 (朴民國)
 1962년 1월 10일생. 1999년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1985년~현재 한국전기연구원 선임연구원.
 Tel:(055) 280-1444, Fax:(055) 280-1476
 E-mail: mkpark@keri.re.kr



최 영 규 (崔榮奎)
 1957년 6월 18일 생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990~1991년 CALTECH Visiting Scholar. 1998~1999년 Univ. of Southwestern Louisiana Visiting Professor. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수
 Tel : 051-510-2371, Fax : 051-513-0212
 E-Mail : ykichoi@pusan.ac.kr