

# 외란관측기를 이용한 자기부상시스템의 제어기 설계에 관한 연구

## A Study on the Controller Design for EMS System using Disturbance Observer

강 남 숙\* · 조 남 훈†  
(Nam-Sook Kang · Nam-Hoon Jo)

**Abstract** - In this paper, we study a disturbance observer (DOB) based controller for an EMS(Electro-Magnetic Suspension) system in presence of mass uncertainty and input disturbance. The DOB based controller is employed in order to compensate the modeling uncertainty and attenuate disturbance signals. For the design of DOB based controller, the Jacobian linearization of nonlinear system model equation is used. Computer simulation is carried out for nonlinear model in order to compare the performance of the proposed DOB controller with that of the conventional PID controller. The simulation results show that the substantial improvement in the performance can be achieved by the proposed DOB controller.

**Key Words** : EMS system, Mass uncertainty, Disturbance attenuation, Disturbance observer, Q filter

### 1. 서 론

자기부상시스템은 입력전압을 통해 자기력을 발생시켜, 코일에서의 전류 조정에 의해 쇠공의 공극을 제어하는 비선형 시스템이다. 이러한 자기부상시스템을 표현하는 모델식은 비선형 방정식으로 주어지며, 무게 변화와 같은 파라미터 변화가 항상 존재하여 적절한 제어기 개발이 매우 중요하다. 또한 대부분의 제어기법들은 제어하고자 하는 시스템의 모델에 의존하기 때문에 자기부상시스템과 같이 불확실한 시스템 모델로 제어기를 설계하는 것은 쉽지 않다. 이러한 특성 때문에 자기부상 시스템을 효과적으로 제어하기 위한 다양한 제어기법이 제안되어 왔다[1-3]. 하지만 일반적인 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상 문제가 되는 외란, 모델링 오차 등의 영향에 효과적으로 대응하는 것이 쉽지 않다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있어서, 저가로 고급 제어사양을 만족하는 제어 시스템을 구현하기는 쉽지 않다[4].

자기부상시스템의 대표적인 예인 자기부상열차는 환경 친화적이며 안전하고 열차 내외 소음도 적고 진동이 거의 없어 승차감이 좋다. 또한 마찰에 의한 마모도 거의 없어 유지 및 보수비용이 저렴하고 전자석이 레일을 감싸기 때문에 탈선의 위험이 없다. 그리고 하중이 레일 전체에 분산되기 때문에 레일 구조물의 건설비가 적게 든다. 현재 자기부상열차를 상용화한 나라는 독일과 일본뿐이며, 우리나라는 자기부상열차의 상용화를 국책사업으로 선정해 국내 기술로 자기부상열차 개발을 진행하고 있다[5]. 하지만 자기부상열

차와 같은 자기부상시스템을 제어하려면, 열차의 속도변화와 경사도, 타고내리는 승객의 무게변화, 날씨와 같은 외부환경 요인 등과 같은 외란에 효과적으로 대처할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 자기부상시스템을 효과적으로 제어하기 위한 방법으로 외란관측기 기반 제어기 설계에 대한 연구를 수행한다. 외란관측기 기반 제어기는 비선형 모델을 선형화한 근사 선형시스템에 기초하여 설계하지만, 모의실험을 통하여 원래의 비선형 모델에 대해서도 제어성능이 우수함을 보이고자 한다. 또한, 외란관측기 기반 제어기를 설계할 때 기준에 주로 사용하던 공칭모델 선정 방법뿐만 아니라 과도 응답을 개선하기 위한 새로운 공칭모델 설계방법에 대해서도 알아본다. 특히, 시정수가 너무 작아지면 노이즈에 대한 시스템 민감도가 증가하는 문제가 발생할 수 있는데, 이를 방지하기 위한 대책에 대해서도 알아본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 자기부상시스템을 기술하는 비선형 모델을 소개한다. 3장에서는 외란 제거에 뛰어난 성능을 보이는 외란관측기에 대해 설명하고 그 특징에 대해 기술한다. 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해, 제안된 외란관측기 기반 제어기가 일반적으로 많이 사용되는 PID 제어기보다 우수한 제어 성능을 나타낸다는 것을 보인다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

### 2. 자기부상시스템 모델링

자기부상시스템이란 입력전압을 통해 코일에서의 전류 조정에 의해 쇠공의 공극을 제어하는 비선형 시스템이다. 그림 1은 본 논문에서 사용한 Quanser사의 자기부상시스템을 도식화한 것이다[6].

그림 1에서  $x_b$ 는 쇠공의 위치,  $R_c$ 는 전자석 코일의 저항,  $R_s$ 는 전류측정기의 저항,  $I_c$ 는 코일의 전류,  $L_c$ 는 코일의 인덕턴스,  $m$ 은 쇠공의 질량,  $g$ 는 중력 가속도이다. 자기부상시스템의 상태변수와 입력변수를  $x_1 = x_b, x_2 = \dot{x}_b, x_3 = I_c, u = V$

\* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea  
† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea

E-mail : professor.jo@gmail.com

Received : August 13, 2013; Accepted : August 30, 2013

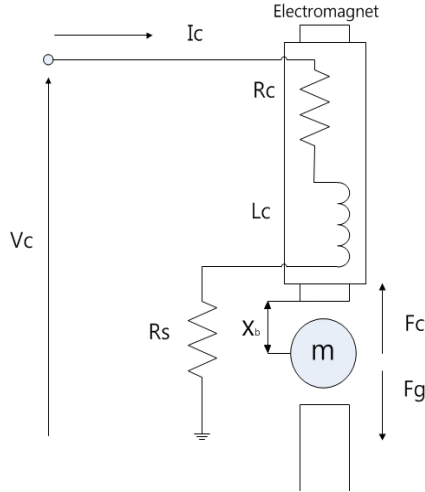


그림 1 자기부상시스템의 개략도  
Fig. 1 Schematics of magnetic levitation system

로 선정하면 비선형 미분방정식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= g - \frac{G_i}{m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ \dot{x}_3 &= -\frac{R_c + R_s}{L_c} x_3 + \frac{1}{L_c} u \end{aligned} \quad (1)$$

자기부상시스템의 제어목적이 전자석과 쇠공의 일정한 거리 유지이기 때문에 출력 변수  $y$ 는 쇠공의 위치  $x_b$ 로 정하는 것이 타당하다. 우리의 제어목적은 쇠공의 위치를  $x_{b0}$ 로 제어하는 것으로 가정한다. 제어 목적을 달성하기 위하여,  $x_1 = x_{b0}$ 를 만족하는 평형점  $(x_{10}, x_{20}, x_{30})$ 과 정상상태 입력  $u_0$ 을 구하면  $x_{10} = x_{b0}, x_{20} = 0, x_{30} = x_{10} \sqrt{mg/G_i} (= i_0)$ 과  $u_0 = (R_s + R_c)x_{30}$ 이다. 이제, 비선형 모델식 (1)을 위 평형점에서 자코비안 선형화로 근사시키면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{x}_1 \\ \delta \dot{x}_2 \\ \delta \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 2 \frac{G_i i_0^2}{m x_{10}^3} & 0 & -2 \frac{G_i i_0}{m x_{10}^2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_c + R_s}{L_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L_c} \end{bmatrix} \delta u \quad (2)$$

여기서,  $\delta x = [x_1 - x_{10}, x_2 - x_{20}, x_3 - x_{30}]^T$ ,  $\delta u = u - u_0$  이다.

### 3. 외란 관측기

자기부상열차는 자기부상시스템의 대표적인 예이다. 자기부상열차를 제어할 때 타고내리는 승객의 무게 변화에 적절히 대응하는 것은 매우 중요하다. 이러한 무게 변화는 외란 또는 모델링 오차로 간주할 수 있기 때문에, 외란에 효과적으로 대처할 수 있는 제어기의 개발이 필요하다. 하지만, 일반적인 PID 제어기 설계방법만으로는 제어 시스템에서 항상

문제가 되는 외란, 모델링 오차 등을 다루기 어렵다. 따라서 적응 제어, 최적 제어와 같은 고급제어기법들의 적절한 응용이 필요하지만, 이러한 기법들은 그 구조가 복잡하여 구현하는데 어려움이 있다. 이에 비해서 외란 관측기(Disturbance Observer; DOB)는 그 구조가 간단하면서도 외란 제거에 뛰어난 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다[7-8].

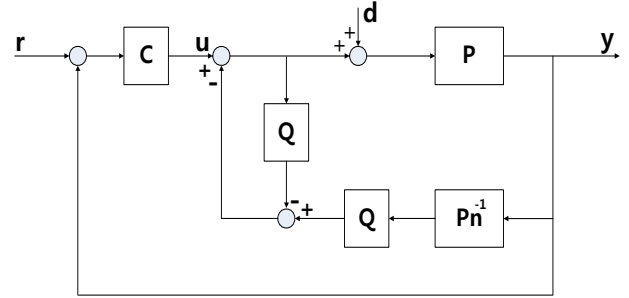


그림 2 외란관측기 기반 제어시스템  
Fig. 2 The disturbance observer based control system

외란 관측기는 관측된 외란을 피드백에 의해서 효과적으로 보상해주는 특징을 갖고 있다. 그림 2는 외란 관측기에 기초한 제어 시스템 구조를 보여주고 있다. 여기서  $P$ 는 실제 플랜트,  $P_n$ 은 플랜트의 공칭 모델,  $Q$ 는 저역 통과 필터로 일반적으로  $Q$  필터라고 칭한다. 신호  $u$ 는 시스템에 인가되는 제어입력, 신호  $d$ 는 입력외란, 신호  $y$ 는 시스템의 출력이다. 그림 2로부터 플랜트의 출력을 계산하면 다음과 같다.

$$y(s) = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} u(s) + \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d(s) \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 외란관측기 피드백에 의해서 입력외란이 효과적으로 보상된다는 것을 알 수 있다. 입력외란은 저주파 신호이고, 저주파 영역에서는  $Q(s) \approx 1$ 로 근사할 수 있기 때문에 (4)와 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$\frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} \approx P_n, \quad \frac{PP_n(1 - Q)}{P_n + (P - P_n)Q} \approx 0 \quad (4)$$

따라서  $Q(s) \approx 1$ 를 만족하는 저주파 영역에서는  $y(s) \approx P_n u(s)$ 를 얻을 수 있고 다음을 추론할 수 있다: 외란관측기를 사용하는 경우 1) 입력외란  $d$ 가 시스템 출력에 영향을 미치지 않으며, 2) 시스템 출력은 공칭모델  $P_n$ 에 의해 결정되고 불확실한 실제 플랜트  $P$ 의 영향을 받지 않는다. 이러한 외란관측기의 우수한 제어특성을 이용하기 위해서는 전체 시스템이 반드시 안정해지도록  $Q$  필터와 공칭모델  $P_n$ 을 선정하여야 한다.

외란관측기 제어시스템의 안정도를 보장하기 위한 조건은 참고문헌[9]에서 연구되었는데, 그 내용을 간단히 소개하도록 한다. 먼저  $Q$  필터는 일반적으로 식 (5)와 같은 형태로 선정한다.

$$Q(s) = \frac{a_0}{(\tau s)^r + a_{r-1}(\tau s)^{r-1} + \dots + a_1(\tau s) + a_0} \quad (5)$$

여기서,  $r$ 은 공칭모델의 상대차수(relative degree)이고  $\tau$ 는  $Q$  필터의 시정수인데 보통 1보다 작은 값으로 선정한다. 또한,  $Q(s)$ 의 분모 다항식의 계수  $a_{r-1}, \dots, a_1, a_0$ 는 다항식  $s^r + a_{r-1}s^{r-1} + \dots + a_1s + a_0$ 이 안정해지도록 임의로 선정한다. 이제, 그림 2와 같은 외란관측기 제어시스템의 안정성을 분석하기 위해서 다항식 (6)을 고려하자.

$$\delta(s; \tau) := (DD_c + NV_c)N_n D_Q + N_Q D_c (ND_n - N_n D) \quad (6)$$

여기서,  $N, N_c, N_n, D, D_c, D_n$ 는  $P(s), P_n(s), C(s)$ 로부터  $P(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, P_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)}, C(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)}$ 로 정의되는 서로 소 다항식(coprime polynomial)이다. 마찬가지로,  $N_Q, D_Q$ 도  $Q(s) = \frac{N_Q(s; \tau)}{D_Q(s; \tau)}$ 로 정의되는데, 여기서  $\tau$ 를 함수의 인자로 명시적으로 표시한 이유는  $Q$  필터가  $s$  뿐만 아니라, 시정수  $\tau$ 의 함수임을 나타내기 위해서다. 이때, 전체 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 주어진  $\tau > 0$ 에 대해서 다항식 (6)의 모든 근이 LHP에 존재해야 한다[9]. 하지만, (6)을 이용하여 시스템의 안정성을 보장하는  $Q$  필터와 공칭모델을 구하는 것은 어렵기 때문에, DOB 설계를 위해서는 다음과 같은 조건을 이용한다.

**정리 1 [9]:** 그림 2와 같은 외란관측기 제어 시스템에 대해서 다음을 만족한다고 하자.

- (i)  $P_n C / (1 + P_n C)$ 가 안정하다.
- (ii)  $P(s)$ 가 최소위상(minimum phase) 시스템이다.
- (iii) 다항식  $p_f(s) := D_Q(s; 1) + \left( \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{P(s)}{P_n(s)} - 1 \right) N_Q(s; 1)$ 의 모든 근이 LHP 평면에 존재한다.

그러면, 충분히 작은  $\tau > 0$ 에 대해서 외란관측기 기반 제어 시스템은 안정하다. ■

지금까지 기술된 DOB 제어기의 특징들은 본 논문에서 고려하는 자기부상시스템 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 보인다. 이에, 4장에서는 자기부상시스템 제어를 위한 DOB 제어기를 설계하고 그 효과를 모의실험을 통하여 입증할 것이다.

#### 4. 모의실험

본 장에서는 Matlab/Simulink을 이용한 모의실험을 통하여 외란관측기 기반 제어기가 자기부상시스템 제어에 우수한 성능을 가짐을 검증해 보도록 한다. 전술한 바와 같이 자기부상시스템의 제어 목적은 쇄공의 위치가 우리가 미리 정한 일정한 값을 추종하는 것이다. 본 논문에서는 이러한 기준 입력을  $7mm (= 0.007m)$ 로 설정하고, 외란이 존재하더라도 기준입력을 적절히 추종하는 제어기를 설계하는 것을 목적으로 한다. DOB 제어기 설계시에는 자코비안 선형화로 얻은

(2)식을 사용하고, 설계된 DOB 제어기의 성능은 비선형 모델 (1)에 대해서 분석하도록 한다. 우선, 3장에서 계산한 자기부상시스템의 평형점은 아래와 같이 계산된다.

$$x_{10} = 0.007, \quad x_{20} = 0, \quad x_{30} = 1, \quad u_0 = 11.$$

**표 1** 자기부상시스템의 시스템 파라미터

**Table 1** Parameters of Magnetic levitation system

Symbol	Description	Nominal value
$m$	Ball mass	68[g]
$g$	Gravitation Constant	9.8[m/s <sup>2</sup> ]
$G_i$	Magnet Force Constant	3.2654 × 10 <sup>-5</sup> [Nm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> ]
$R_c$	Coil Resistance	10[Ω]
$L_c$	Coil Induction	0.4125[H]
$R_s$	Current Sense Resistance	1[Ω]

표 1은 Quanser사의 자기부상시스템의 사양을 나타내는데, 이를 이용하여 (2)식을 계산한 결과는 (7)과 같다

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta x}_1 \\ \dot{\delta x}_2 \\ \dot{\delta x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 2800 & 0 & -19.6 \\ 0 & 0 & -26.7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.42 \end{bmatrix} \delta u \quad (7)$$

이를 이용하여 자기부상시스템의 전달함수를 구하면 (8)과 같다.

$$P(s) = \frac{-47.5157}{s^3 + 26.67s^2 - 2800s - 74667} \quad (8)$$

따라서,  $P(s)$ 가 최소위상 시스템이기 때문에 정리 1의 조건 (ii)를 만족함을 알 수 있다. 이제, 본 논문에서 제시한 DOB 제어기를 구성하기 위해서 그림 2에서 표시된 공칭모델  $P_n(s)$ 와  $Q$  필터  $Q(s)$ 를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 2개의 공칭모델을 사용한 DOB 제어기를 설계하고 그 성능을 비교해 본다.

#### 4.1 공칭모델과 시스템 모델이 같은 경우 ( $P_n = P$ )

일반적으로 공칭모델은 시스템 전달함수와 동일하게 선정하므로 (9)와 같이 정하였다.

$$P_n(s) = P(s) = \frac{-47.5157}{s^3 + 26.67s^2 - 2800s - 74667} \quad (9)$$

또한, 공칭모델로 주어지는 시스템을 제어하기 위한 PID 제어기를 다음과 같이 선정하였다.

$$C(s) = -3000 \frac{(s/5+1)(s+1)}{s(s/10000+1)} \quad (10)$$

한편,  $Q$  필터는 (5)와 같은 형태인데, 몇 가지 모의실험을 통해서 다음과 같이 선정하였다.

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s)^3 + 5(\tau s)^2 + \tau s + 1} \quad (11)$$

(9)와 (10)으로부터 정리 1의 조건 (i)이 만족됨을 알 수 있다. 마지막으로 다항식  $p_f(s) = s^3 + 5s^2 + s + 1$ 의 모든 근이 LHP에 존재해서 정리 1의 조건 (iii)도 만족됨을 알 수 있다. 따라서,  $\tau > 0$ 을 충분히 작은 실수로 정하면 DOB 제어시스템은 안정하게 되는데, 모의실험을 위해서  $\tau = 0.01$ 로 선정하였다. 모의실험에서는 외란의 영향을 분석하기 위하여 외란이  $d(t) = 2\sin(\pi t)$ 로 주어진다고 가정하였다. 그림 3은 선형화된 모델 (8)을 대상으로 PID 제어기와 DOB 제어기의 모의실험 결과를 비교한 것이다. 정상상태에 도달한 3초 이후의 파형을 비교하면, DOB 제어기의 경우, 출력이 외란의

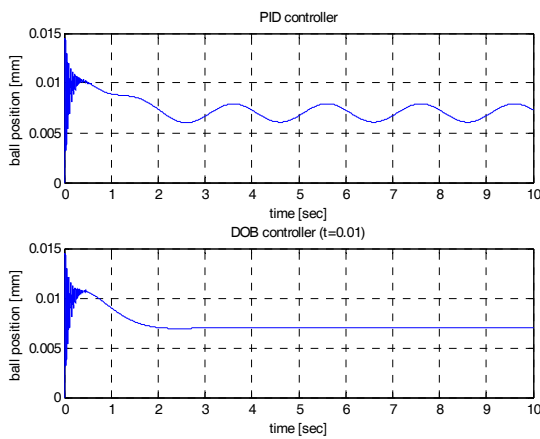


그림 3 선형화 모델 (8)에 대한 모의실험 결과. DOB 제어기의  $P_n, C, Q$ 는 (9), (10), (11)로 선정함.

Fig. 3 Simulation results for linearized model (8).  $P_n, C, Q$  of DOB controller are chosen as (9), (10), and (11).

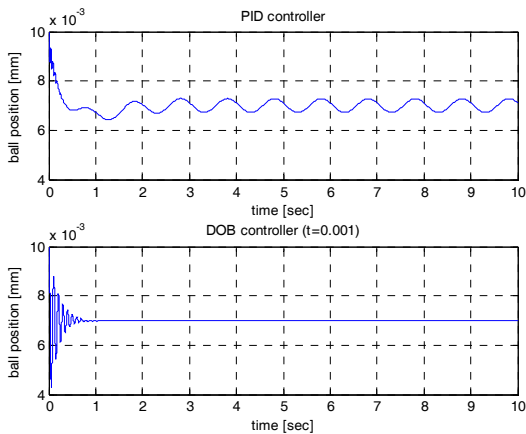


그림 4 비선형 모델 (1)에 대한 모의실험 결과. DOB 제어기의  $P_n, C, Q$ 는 (9), (10), (11)로 선정함.

Fig. 4 Simulation results for nonlinear model (1).  $P_n, C, Q$  of DOB controller are chosen as (9), (10), and (11).

영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

실제 자기부상 시스템은 비선형 모델 (1)로 표현되기 때문에, 이에 대한 모의실험 및 분석이 필요하다. 이를 위해서 비선형 모델 (1)을 대상으로 모의실험을 수행하였으며, 그 결과 그림 3과 다르게 불안정한 결과를 얻었다. 이는 비선형 모델을 선형모델로 자코비안 선형화하면서 발생한 모델링 오차에 기인하는 것으로 보인다. DOB 제어기에서 모델링 오차의 영향을 더욱 줄이기 위해서는 3장에서 기술한 바와 같이  $\tau$ 를 좀 더 줄이는 것이 필요하다. 그림 4는  $\tau = 0.001$ 로 재선정하여 수행한 모의실험 결과를 나타낸다. 그림 3과 마찬가지로 PID 제어기는 외란에 상당한 영향을 받고 있지만 외란관측기 기반 제어기는 외란에 거의 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다.

한편, 공칭모델을 시스템 모델과 같게 선택한 경우, DOB 제어기의 초기 과도응답이 좋지 않음을 알 수 있다. 특히, 초반의 오버슈트는 자기부상열차의 경우, 열차가 매우 심하게 진동하는 것을 의미하므로 반드시 해결되어야 할 문제이다. 이를 해결하기 위하여 다음 절에서는 DOB 제어기의 성능을 향상시키는 방법에 대해서 기술한다.

#### 4.2 제어성능향상을 위한 공칭모델 선정

이제, 초기의 오버슈트를 제거할 수 있는 DOB 제어기 설계를 위해서 공칭모델을 아래와 같이 변경하여 보자.

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{-47.5157}{s^3 + 26.67s^2 - 2800s - 74667} \quad (12)$$

$$P_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)} = \frac{-1}{s^3 + 30s^2 + 200s} \quad (13)$$

또한, 정리 1의 조건 (i)이 만족되도록

$$C(s) = -300 \quad (14)$$

으로 선정하였고  $Q$  필터  $Q(s)$ 는 (11)과 동일하게 정하였다. 앞서와 같이  $\tau = 0.01$ 로 선정하고 선형모델을 대상으로 모의실험을 수행한 결과 시스템 출력이 발산하여 불안정해지는 결과를 얻었다. 시스템이 불안정해지는 원인을 분석하기 위하여 다항식  $p_f(s) := s^3 + 5s^2 + s + 47.5157$ 의 근을 구하면  $s = 0.5547 \pm j2.7331, -6.1094$ 이다. 따라서 2개의 근이 RHP에 존재하여 정리 1의 조건 (iii)이 만족되지 않는다. 즉, 정리 1에 의해서 전체시스템의 안정성은 보장되지 않고 시스템 출력이 발산하였던 것이다. 이제, 정리 1의 조건 (iii)을 만족하기 위해서 공칭모델을 추가로 수정해 보자. 조건 (iii)을 만족하기 위해서는  $\frac{P(s)}{P_n(s)} = 1$ 이 되는 것이 유리하다는 사실에 착안하여 (13)의  $N_n(s)$ 에 47.5157을 곱해주고 (14)의  $C(s)$ 는 47.5157로 나누어서 새로운  $P_n(s)$ 과  $C(s)$ 를 (15), (16)과 같이 선정하자.

$$P_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)} = \frac{-47.5157}{s^3 + 30s^2 + 200s} \quad (15)$$

$$C(s) = -300/47.5157 \quad (16)$$

그 결과,  $p_f(s) := s^3 + 5s^2 + s + 1$  이 되고 모든 근이 LHP에 존재한다. ( $s = -4.836, -0.082 \pm j0.4473$ .) 하지만, 4.1절과 동일한  $\tau$  ( $\tau = 0.01$ )를 이용하여 모의 실험한 결과, 시스템이 여전히 불안정하여 발산하는 결과를 얻었다. 불안정해지는 이유를 추가로 분석하기 위해서 다항식  $\delta(s; \tau)$ 의 근을 구한 결과  $0.3717, 0.0053, -0.2114, -4.8362, -0.298 \pm j0.2464$  이어서 2개의 근이 RHP 평면에 존재하였다. 정리 1의 모든 조건을 만족하기 때문에 이는 예상치 못한 결과로 볼 수도 있다. 하지만, 정리 1이 의미하는 것은 세 가지 조건을 모두 만족하는 경우,  $\tau$ 를 충분히 작게 선택하면 안정성이 보장된다는 것이다. 이점에 착안하여 이전에 사용한  $\tau = 0.01$ 보다 더 작은  $\tau$ 를 선정할 필요가 있고, 우리는  $\tau = 0.0001$ 로 재선정하였다. 재선정된  $\tau$ 로 다시  $\delta(s; \tau)$ 의 근을 모두 계산한 결과,  $-0.0002, -0.0006, -0.0021, -4.836, -0.0819 \pm j0.4472$ 로 모든 근이 LHP에 존재하여 DOB 제어기의 안정성이 보장된다.

제어성능 검증을 위해서 외란  $d(t) = 2\sin(\pi t)$ 이 존재하고, 쇄공의 무게가 공칭값의 3배인 경우를 가정하고 모의실험을 수행하였다. 그림 5는 비선형 모델 (1)을 대상으로 PID 제어기와 DOB 제어기의 모의실험 결과를 비교한 것이다. PID 제어기의 경우, 무게 변화에 의해서 제어성능이 그림 4보다 더 나빠졌음을 볼 수 있다. 하지만, DOB 제어기의 경우, 시스템 출력이 기준입력  $7mm$ 를 잘 추종하고 있으며, 외란의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. 또한, 무게변화에도 불구하고 4.1절에서 설계한 DOB 제어기 결과(그림 4)와 비교할 때, 초기의 오버슈트가 거의 사라져서 과도응답이 매우 개선되었음을 알 수 있다.

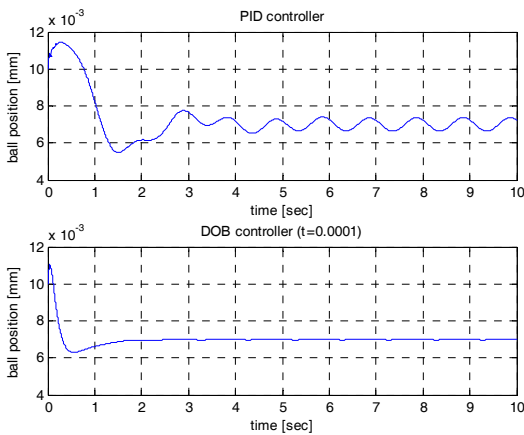


그림 5 비선형 모델 (1)에 대한 모의실험 결과. DOB 제어기의  $P_n, C, Q$ 는 (15), (16), (11)로 선정함.

Fig. 5 Simulation results for nonlinear model (1).  $P_n, C, Q$  of DOB controller are chosen as (15), (16), and (11).

한편, DOB 제어기의 응답특성은 PID 제어기보다 우수하다는 것을 그림 5로부터 알 수 있었지만, Q 필터의 시정수  $\tau = 1/10000$ 는 너무 작아서 실제 실험적으로 구현은 어려울 수 있다. 이는 제어시스템의 대역폭이 너무 커져서 작은 노이즈에도 시스템이 민감하게 반응하여 큰 영향을 받을 수 있기 때문이다. 다음 절에서는 시정수  $\tau$ 의 값을 증가시킬 수 있는 방안에 대해서 기술한다.

### 4.3 시스템 민감도를 고려한 Q 필터 선정

4.2절에서 설계한 제어시스템의 응답특성은 유지하면서  $\tau$  값을 키울 수 있는 방법은 Q 필터를 새로 설계하는 것이다. Q 필터는 상대차수가 3인 안정한 시스템으로 선택하여야 하는데, 몇 가지 시행착오를 거쳐서 아래와 같이 정하였다.

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s)^3 + 5(\tau s)^2 + 0.37\tau s + 1} \quad (17)$$

이제, (15), (16), (17)을 이용한 DOB 시스템의 안정도를 앞서와 같이 분석해보면  $\tau = 0.001$ 과  $\tau = 0.002$ 의 경우 모두 안정하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 4.2절에서와 동일한 조건하에서 모의실험을 수행한 결과이다.  $\tau = 0.001$ 인 경우(그림 6의 위 그림) 시스템 출력이 외란의 영향을 별로 받지 않는다는 것을 알 수 있으며, 그림 5에서의 결과와 비슷함을 알 수 있다. 이는 Q 필터의 선택에 따라서  $\tau$ 를 좀 더 키울 수 있고, 노이즈에 대한 영향을 조절할 수 있음을 의미한다. 한편, 그림 6의 아래 그림에서는  $\tau = 0.002$ 인 경우의 실험결과인데,  $\tau = 0.001$  경우보다 외란의 영향을 좀 더 받고 있음을 알 수 있다. 결국, 너무 작은  $\tau$ 는 노이즈에 대한 민감도를 증가시키며, 반대로 적절한 값보다 큰  $\tau$ 는 외란의 영향을 제거하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 실제 상황에서는 여러 번의 실험을 통하여 적절한  $\tau$ 를 선택하여야 할 것이다.

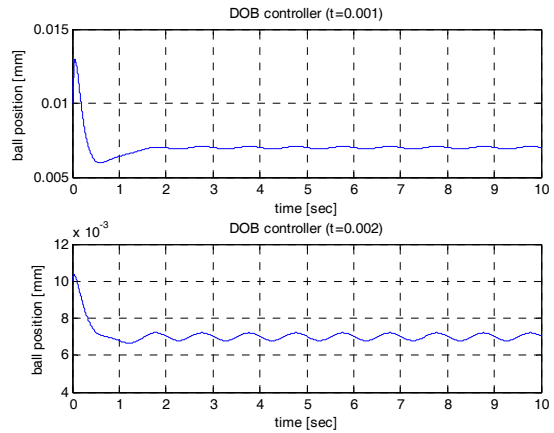


그림 6 비선형 모델 (1)에 대한 모의실험 결과. DOB 제어기의  $P_n, C, Q$ 는 (15), (16), (17)로 선정함. 위 그림은  $\tau = 0.001$ 인 경우이고, 아래 그림은  $\tau = 0.002$ 인 경우임.

Fig. 6 Simulation results for nonlinear model (1).  $P_n, C, Q$  of DOB controller are chosen as (15), (16), and (17). In the upper and lower figures,  $\tau = 0.001$  and  $\tau = 0.002$  are used, respectively.

## 5. 결 론

본 논문에서는 비선형 상태방정식으로 표현되는 자기부상 시스템을 제어하는데 DOB 제어기가 효과적으로 사용될 수 있음을 보였다. 이를 위해서, 평형점에서 자코비안 선형화를 수행하여 선형화된 시스템 모델을 얻고, 이를 기초로 DOB

제어기를 설계하였다. 모의실험 결과, 기존에 주로 사용하던 PID 제어기보다 우수한 제어성능을 얻을 수 있었으며, 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 첫째, 비선형 플랜트에 사용할 Q 필터의 시정수 값은 자코비안 선형화 플랜트를 대상으로 구한 값보다 더 작은 값을 사용해야 할 수도 있다. 둘째, 과도응답을 개선하기 위해서는 DOB 제어기의 설계변수 중 하나인 공칭모델을 적절히 선정하여야 한다. 셋째, 시정수가 너무 작아지는 문제를 방지하기 위해서는 Q 필터 선정이 중요하다.

**감사의 글**

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0010233)

**References**

[1] D. Cho, Y. Kato, and D. Spilman, "Sliding mode and classical control magnetic levitations systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 13, pp. 42-48, Feb. 1993.

[2] A. E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 48, no. 4, pp. 831-838, Aug. 2001.

[3] Z. J. Yang, Y. Fukushima, S. Kanae, and K. Wada, "Adaptive robust output-feedback control of a magnetic levitation system by k-filter approach," *IEEE Trans. Industrial*, vol. 55, no. 1, pp. 390-399, Jan. 2008.

[4] Y. Park, M. R. Nam, I. H. Seo, S. H. Lee, J. T. Lim, and M.-J. Tahk, "Least squares based PID control of an electromagnetic suspension system," *KSAS Int. Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 69-78, 2003.

[5] B. Shin, W. Kim, D. Kim, J. Paik, and H. Kang, "On commercialization business of city type magnetic levitation train," *Journal of railway*, vol. 14, no. 2, pp. 26-32, 2011.

[6] Quanser, *Maglev user manuals*, 2008.

[7] Y. Choi, K. Yang, W.K. Chung, H.R. Kim, and I.H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 48, pp. 315-320, 2003

[8] M.T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 2, pp. 63-76, 1997

[9] H. Shim, and Nam H. Jo, "An Almost Necessary and Sufficient Conditions for Robust Stability of Closed-loop Systems with Disturbance Observer", *Automatica*, Vol. 45, No. 1, pp. 296-299, Jan., 2009.

**저 자 소 개**



**강 남 속 (姜 南 淑)**

2012년 숭실대 공대 전기공학부 졸업, 2012년~현재, 숭실대 공대 전기공학부 석사과정. 연구분야는 강인제어, 풍력 제어 시스템 설계.

Tel : 02-824-0640

E-mail : nskang0513@naver.com



**조 남 훈 (趙 南 熏)**

1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박사), 2002년~현재 숭실대학교 전기공학부 부교수, 2006년~현재 J. Electrical Engineering & Technology 편집위원, 2012년~현재 Int. J. Control, Automation and Systems 편집위원. 연구분야는 강인제어, 비선형 시스템 제어, 풍력터빈 제어시스템, 제어 시스템 및 시스템 생물학에의 응용.

Tel : 02-820-0643

E-mail : professor.jo@gmail.com, nhjo@ssu.ac.kr

Homepage : <http://ee.ssu.ac.kr/~nhjo>