

자기부상시스템의 외란관측기 제어기에 Q 필터가 미치는 영향에 관한 연구

(A Study on the Influence of Q-filter on Disturbance Observer Controller for
Electro-Magnetic Suspension Systems)

전찬영* · 장소현 · 조남훈**

(Chanyoung Jeon · Sohyun Jang · Nam-Hoon Jo)

Abstract

The disturbance observer (DOB) controller has been widely used in various industrial applications since it is capable of achieving robust stability and disturbance rejection. In this paper, we study the effect of Q-filter on disturbance observer controller for Electro-Magnetic suspension (EMS) systems. We consider three Q-filters and analyze their effects on the robust stability against parameter uncertainties due to mass variation. Moreover, we investigate the influence of sensor noise for three Q-filters. According to our study, robust stability improves as the order of Q-filter decreases. On the other hand, the larger the order of Q-filter, the more the effect of sensor noise can be removed.

Key Words : Electro-Magnetic suspension system, Disturbance Observer, Model uncertainties,
Disburbance Rejection

1. 서 론

자기부상시스템은 입력전압을 적절히 조절하여 쇠공의 공극을 일정하게 유지되도록 제어하는 시스템으로 자기부상열차나 자기부상베어링이 대표적인 예이다. 자기부상시스템은 무게 변화와 같은 파라미터 변화가 항상 존재하기 때문에 이러한 무게변동에도 항

상 일정한 공극을 유지시켜주는 제어기의 개발은 매우 중요하며, 이를 효과적으로 제어하기 위한 다양한 제어기법이 연구되어 왔다[1-3]. 하지만 일반적인 제어기 설계방법만으로는 이러한 외란의 영향을 감소시키거나 모델링 오차를 보상하여 고급 제어사양을 만족하는 제어시스템을 구현하는 것은 쉽지 않다[4-5]. 이와 같이 외란감소나 불확실성 보상에 매우 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있는 외란관측기 제어기에 대한 연구가 최근 매우 활발히 진행되고 있다[6-9]. 특히 기존의 외란관측기 연구결과가 안정성을 보장하는 조건이 충분조건이어서 매우 제한적이었던데 비해, 최근 연구결과[8]에서는 외란관측기를 적용했을 때 안정하기 위한 필요충분조건이 제시되었다. 그 결과 보다 다

* Main author : Graduate student, Soongsil University, Dept. Electrical Engineering

** Corresponding author : Professor, Soongsil University, Dept. Electrical Engineering

Tel : 02-820-0643, Fax : 02-817-7961

E-mail : nhjo@ssu.ac.kr

Received : 2015. 9. 2

Accepted : 2015. 9. 15

양한 모델 불확실성에 대해서도 외란관측기를 적용할 수 있는 토대가 마련되었다. 또한 기존의 외란관측기 연구결과에서는 제어기 설계를 위해서 H_∞ 설계기법을 적용하여야 하기 때문에 설계방법이 간단하지 않고 이를 구하는 과정에서 수치오차가 발생하는 등의 문제점이 있었다. 이에 비해서 [8]의 연구결과는 Q-필터의 시정수를 서서히 줄여 가면 시스템을 안정하게 만들 수 있고 원하는 외란제거 성능을 얻을 수 있기 때문에 그 설계방법이 기존 기법과 비교하여 매우 간단하다는 장점도 존재한다. 참고문헌[9]에서는 플랜트의 상대차수를 정확하게 알 수 없는 경우의 외란관측기 설계에 대한 연구결과가 제시되었다.

본 논문에서는 자기부상시스템을 효과적으로 제어하기 위한 외란관측기 제어기 설계에 대해서 논한다. 참고문헌[8]에서 외란관측기를 적용할 때 시스템을 안정화시킬 수 있는 Q-필터에 대한 일반적인 조건만 제시되었을뿐, 그 구체적인 설계기법에 대해서는 토의되지 않았다. 본 논문에서는 여러 가지 Q-필터를 사용할 경우의 강인안정성과 외란관측 성능, 잡음제거성능에 대해서 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 자기부상시스템의 모델식을 설명하고 전달함수를 소개한다. 3장에서는 DOB 제어기의 구조와 안정성을 보장하는 조건을 소개한다. 4장에서는 Q-필터 선정에 따른 강인 안정성을 비교 분석하며 5장에서는 외란감소성능과 잡음제거 성능을 분석한다. 6장에서는 도출된 결과를 토대로 결론을 제시한 뒤 향후 연구방향에 대해 논의한다.

2. 자기부상 시스템

그림 1은 본 논문에서 사용한 Quanser 사의 자기부상 시스템 구조를 나타낸다[10]. 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 제어입력을 $x_1 = x_b$, $x_2 = \dot{x}_b$, $x_3 = I_c$, $u = V$ 로 선정하면 (1)과 같은 상태방정식으로 근사하

여 표현가능하다[10].

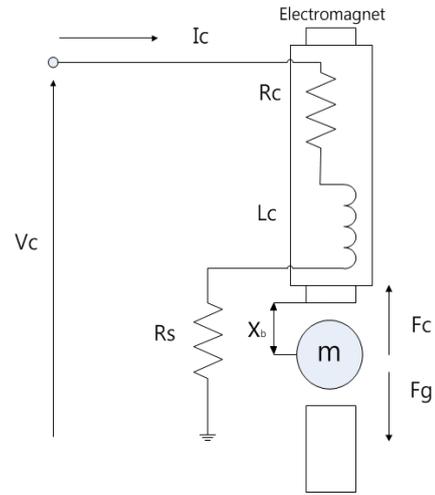


Fig. 1. Schematics of magnetic levitation system

Table 1. Nominal Parameters of Magnetic levitation system

Symbol	Description	Nominal value
m	Ball mass	68[g]
g	Gravitation constant	9.8m/s ²
G_i	Magnet Force constant	3.2654 × 10 ⁻⁵ Nm ² /A ²
R_c	Coil Resistance	10Ω
L_c	Coil Inductance	0.4125 H
R_s	Current Sense Resistance	1 Ω

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

여기서 x_{10} , i_0 는 x_1 , x_3 의 평형상태에서의 값이다. 참고문헌[10]에서 제시한 공칭 파라미터는 표 1과 같이 주어지는데, 이를 이용하여 계산하면

$$x_{10} = 7mm, \quad i_0 = 1A$$

이다. 한편, 외란관측기 제어기를 설계하기 위해서는 자기부상시스템의 전달함수를 계산하여야 한다. 쇠공

의 위치를 제어하는 것이 목적이기 때문에 시스템 출력을 $y = x_1$ 으로 정하고 자기부상시스템의 전달함수를 계산하면 아래와 같다.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2G_i x_0 i_0}{(-m x_0^3 s^2 + 2G_i i_0^2)(Ls + R_c + R_s)} \quad (2)$$

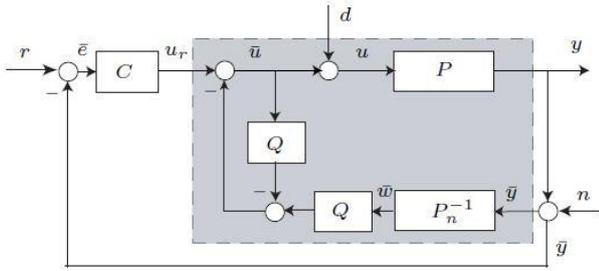


Fig. 2. Structure of Disturbance Observer(DOB) Controller

3. DOB 제어기

자기부상열차와 같은 자기부상시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 타고내리는 승객의 무게변화와 같은 외란의 영향을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 구조가 간단하지만 외란 제거 성능이 뛰어나다고 알려져 있는 외란관측기(Disturbance Observer; DOB) 제어를 사용하고자 한다[6-9]. 그림 2는 DOB 제어기의 구조를 나타내는데, P 는 실제 플랜트, P_n 은 공칭 모델, Q 는 저역통과 필터이다. 또한 y 는 시스템의 출력을 나타내며, 신호 u, d, n 은 각각 시스템에 인가되는 제어 입력, 입력 외란, 센서잡음을 나타낸다. 여기서 Q 필터는 아래와 같은 형태를 사용하는데,

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

r 은 양의정수로서 시스템의 상대차수와 같거나 크게 선정하여야 하며, τ 는 Q 필터의 시정수인데 보통 1보다 작은 값으로 선정한다. 또한 $a_{r-1}, a_{r-2}, \dots, a_1, a_0$ 는 양의실수로서 $Q(s)$ 의 분모 부분이 안정하게 선정하면 된다. 그림 2로부터 플랜트 출력은 다음과 같이

구할 수 있다[8].

$$y(s) = T_{yr}(s)r(s) + T_{yd}(s)d(s) + T_{yn}(s)n(s)$$

여기서

$$T_{yr} = \frac{P_n P C}{\Delta}, \quad T_{yd} = \frac{-P(Q + P_n C)}{\Delta}$$

$$T_{yd} = \frac{P_n P(1-Q)}{\Delta} \quad (3)$$

이고

$$\Delta = P_n(1 + PC) + Q(P - P_n) \quad (4)$$

이다. 저주파 영역에서는 $Q(s) \approx 1$ 을 만족하므로

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

이 되고, $y(s)$ 는 다음과 같이 근사된다.

$$y(s) \approx P_n u(s)$$

따라서 DOB를 사용하게 될 경우 저주파 외란 d 가 시스템 출력에 거의 영향을 주지 않게 되며, 동시에 시스템 출력이 공칭모델 P_n 에 의해 결정되고 실제 플랜트 P 의 영향을 받지 않게 됨을 알 수 있다. 한편 제어 입력 \bar{u} 를 그림 2로부터 계산하면 다음과 같다.

$$\bar{u}(s) = T_{ur}^-(s)r(s) + T_{ud}^-(s)d(s) + T_{un}^-(s)n(s)$$

여기서

$$T_{ur}^- = \frac{P_n C}{\Delta}, \quad T_{ud}^- = -\frac{P(P_n C + Q)}{\Delta},$$

$$T_{un}^- = \frac{-Q - P_n C}{\Delta} \quad (5)$$

이다. 고주파 영역에서는 $Q(s) \approx 0$ 이고 기준입력과 입력외란은 거의 무시할 수 있기 때문에 결국

$$\bar{u} \approx T_{un}^{-1} n(s)$$

로 근사할 수 있다. 따라서 센서잡음이 제어입력에 미치는 영향은 고주파에서의 $|T_{un}^{-1}(j\omega)|$ 의 값이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

DOB 제어기의 장점을 이용하기 위해서는 먼저 전체 시스템의 안정성이 보장되어야 한다. 그림 2와 같은 DOB 제어기의 안정성을 분석하기 위해서 N, N_c, N_n, D, D_c, D_n 를 $P(s) = \frac{N(s)}{D(s)}, P_n(s) = \frac{N_n(s)}{D_n(s)}, C(s) = \frac{N_c(s)}{D_c(s)}$ 를 만족하는 서로소 다항식(coprime polynomial)으로 정의하자. 마찬가지로, N_Q, D_Q 도 $Q(s) = \frac{N_Q(s;\tau)}{D_Q(s;\tau)}$ 로 정의되는데, 여기서 τ 를 함수의 인자로 명시적으로 표시한 이유는 Q 필터가 s 뿐만 아니라, 시정수 τ 의 함수임을 나타내기 위해서다. 이제 아래와 같은 다항식 $\delta(s;\tau)$ 를 고려하자.

$$\delta(s;\tau) = (DD_c + NN_c)N_nD_Q + N_QD_c(ND_n - N_nD) \quad (6)$$

이때 전체 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 주어진 $\tau > 0$ 에 대해서 다항식 (6)의 모든 근이 LHP에 존재해야 한다[8]. 하지만 (6)을 이용하여 시스템의 안정성을 보장하는 Q 필터와 공칭모델을 구하는 것은 어렵기 때문에, DOB 설계를 위해서는 다음과 같은 조건을 이용한다.

정리 1[8] : 그림 2와 같은 DOB 제어시스템에 대해서 다음이 만족된다고 하자.

- (i) $P_n C / (1 + P_n C)$ 가 안정해야 한다.
- (ii) $P(s)$ 가 최소 위상 시스템이어야 한다.
- (iii) $p_f(s) := D_Q(s;1) + \left(\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{P(s)}{P_n(s)} - 1 \right) N_Q(s;1)$

의 모든 근이 LHP에 존재한다.

그러면 충분히 작은 $\tau > 0$ 에 대해서 DOB 전체 시스템은 안정하다.

본 논문에서는 DOB 제어기에 사용되는 Q 필터를 3가지 방법으로 설계하고 그 장단점을 고찰하고자 한다. (2)식에서 알 수 있는 것처럼 $P(s)$ 에는 영점(zero)

가 존재하지 않기 때문에 정리 1의 조건 (ii)는 자동으로 만족된다. 한편 공칭모델 P_n 과 공칭 제어기 $C(s)$ 를 선정하여야 하는데, 공칭 시스템(nominal system)의 오버슈트가 10% 미만, 정착시간이 2초 이내가 되도록 아래와 같이 선정하였다:

$$P_n(s) = -\frac{47.5}{s(s^2 + 30s + 200)}, \quad C(s) = -6.31$$

(본 논문에서는 Q -필터의 설계에 따른 성능 차이를 분석하는 것이 목적이기 때문에 위의 $P_n(s)$ 와 $C(s)$ 의 선택은 사실 중요하지 않다.) 이제 Q -필터의 상대차수는 공칭모델의 상대차수보다 크면 되기 때문에 본 논문에서는 다음과 같이 3차, 4차, 5차의 Q -필터를 고려하고, 장단점을 비교 분석하고자 한다.

$$Q_3(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^3}, \quad Q_4(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^4}$$

$$Q_5(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^5}$$

4. 강인 안정성 분석

자기부상열차와 같은 자기부상시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 타고내리는 승객의 무게변화와 같은 외란의 영향을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 이를 고려하여 실제 무게 \tilde{m} 가 $m/\kappa < \tilde{m} < m \times \kappa$ 사이의 값으로 변할 수 있을 때 안정화 가능한 최대 κ 를 계산해 보도록 하자. 무게가 \tilde{m} 으로 바뀌면 실제 플랜트의 전달함수는 (2)에서

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2G_t x_0 i_0}{(-\tilde{m} x_0^3 s^2 + 2G_t i_0^2)(Ls + R_c + R_s)} \quad (7)$$

로 바뀌게 되고 $\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{P(s)}{P_n(s)} = \frac{m}{\tilde{m}}$ 이다. 따라서 다항식

$p_f(s)$ 는 Q -필터에 따라 다음과 같다.

$$p_{f,Q3}(s) = s^3 + 3s^2 + 3s + m/\tilde{m}$$

$$p_{f,Q4}(s) = s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + m/\tilde{m}$$

$$p_{f,Q_3}(s) = s^5 + 5s^4 + 104s^3 + 10s^2 + 5s + m/\tilde{m}$$

Q-필터 $Q_3(s)$ 에 대해서 $1/\kappa < \tilde{m}/m < \kappa$ 인 경우의 강인 안정성을 판정하기 위해서는 Kharitonov 정리를 적용할 수 있다[11]. 즉

$$p_{f,Q_3,U} = s^3 + 3s^2 + 3s + 1/\kappa$$

$$p_{f,Q_3,L} = s^3 + 3s^2 + 3s + \kappa$$

의 근이 모두 LHP에 존재하면 $1/\kappa < \tilde{m}/m < \kappa$ 사이의 어떠한 무게 변동에 대해서도 시스템이 항상 안정하다. 이러한 방식으로 계산해 보면 실제무게가 $m/9 < \tilde{m} < m \times 9$ 사이에서 변동하는 경우, 충분히 작은 τ 에 대해서 DOB 시스템의 안정성이 보장된다. 마찬가지로 방식으로 $Q_4(s)$ 와 $Q_5(s)$ 에 대해서는 실제 무게가 각각 $m/5 < \tilde{m} < m \times 5$ 와 $m/3.88 < \tilde{m} < m \times 3.88$ 사이의 값을 취하는 경우, 충분히 작은 τ 에 대해서 DOB 시스템의 안정성이 보장됨을 확인할 수 있다. 한편, 안정성을 보장하는 τ^* 의 값을 구해보도록 하자. DOB 시스템의 안정성은 다항식 $\delta(s;\tau)$ 의 근을 구하여 알 수 있는데, 여기서는 $\tilde{m}=3 \times m$ 인 경우와 $\tilde{m}=m/3$ 인 두 가지 경우를 고려하였다. 정리 1로부터 τ 를 점점 줄여나가면서 $\delta(s;\tau)$ 의 모든 근이 LHP에 존재하게 되는 값을 계산하면 되는데, 그 결과를 표 2에서 볼 수 있다. 표 2로부터 Q-필터의 차수가 높아질수록 안정성이 보장되는 실제 무게의 범위가 줄어들고 있으며, 안정하게 만드는 τ^* 의 값도 점점 감소함을 알 수 있다.

Table 2. Robust stability performance for three Q-filters

Q-filter	Allowable Uncertainty	τ^* ($\tilde{m}=m \times 3$)	τ^* ($\tilde{m}=m/3$)
Q_3	$m/9 < \tilde{m} < m \times 9$	8.26×10^{-4}	8.37×10^{-4}
Q_4	$m/5 < \tilde{m} < m \times 5$	6.20×10^{-4}	6.27×10^{-4}
Q_5	$m/3.88 < \tilde{m} < m \times 3.88$	4.96×10^{-4}	5.02×10^{-4}

5. 외란 및 잡음 제거성능 분석

본장에서는 Q-필터의 변동에 따른 시스템 성능을 분석해 보고자 한다. 특히 외란이 시스템 출력에 미치는 영향과 센서잡음이 제어입력에 미치는 영향을 주

로 다루도록 한다. 먼저 외란 d 가 시스템 출력 y 에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 (3)식의 $T_{yd}(s)$ 의 진폭응답 크기를 계산해볼 필요가 있다. 외란은 저주파 성분으로 구성되어 있기 때문에 저주파에서의 $|T_{yd}(j\omega)|$ 의 크기가 작을수록 외란제거 성능이 우수한데, 본 논문에서는 $10^{-2} < \omega < 10^1$ 주파수 범위를 분석해 보도록 한다. (3)식에 의하면 τ 가 작아질수록 $|T_{yd}(j\omega)|$ 의 크기도 점점 감소함을 알 수 있다. 따라서 동일한 외란감소 성능을 얻을 수 있도록 $\omega=1 \text{ rad/s}$ 에서 $|T_{yd}(j\omega)|=-80 \text{ dB}$ 가 되도록 $Q_3(s)$, $Q_4(s)$, $Q_5(s)$ 에 대한 τ 를 정하였는데 그 결과는 다음과 같다: $\tau_3 = 2.1 \times 10^{-4}$, $\tau_4 = 1.6 \times 10^{-4}$, $\tau_5 = 1.3 \times 10^{-4}$. 이러한 τ 를 사용하였을 때의 $|T_{yd}(j\omega)|$ 보드 선도를 그림 3, 4, 5의 왼쪽에서 볼 수 있는데, 거의 유사한 형태임을 알 수 있다. 따라서 Q-필터에 따른 외란제거 성능 차이는 거의 없음을 알 수 있다.

한편 위와 같이 얻은 τ 를 이용하여 센서잡음 제거성능을 알아 보기 위해서는 고주파에서의 $|T_{un}(j\omega)|$ 의 크기를 구해볼 필요가 있다. 그림 3, 4, 5의 오른쪽 그림은 $10^3 < \omega < 10^6$ 범위에서 세 가지 Q-필터에 대한 보드선도를 보여주는데, 역시 $|T_{un}(j\omega)|$ 가 작을수록 잡음 제거 성능이 우수하다. 대략 $10^3 < \omega < 10^4$ 범위에서는 $|T_{un}(j\omega)|$ 크기가 모두 비슷하지만, 주파수가 10^4 rad/s 이상으로 커지면 Q_5 의 $|T_{un}(j\omega)|$ 가 가장 작아짐을 알 수 있다. 따라서 주파수가 10^4 rad/s 이상인 센서잡음이 존재하는 경우에는 Q_5 를 사용하여 DOB 제어를 설계하는 것이 유리하다. 제어시스템의 실제 성능을 검증하기 위하여 기준입력은 $y_{ref}(t) = 1 \text{ mm}$, 입력외란은 $d(t) = \sin(\omega_d t)$, 센서잡음은 $n(t) = \sin(\omega_n t)$ 인 경우에 대해서 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 여기서 외란과 잡음 주파수는 $\omega_d = 3\pi$, $\omega_n = 10^5$ 로 가정하였으며, 모델링 오차를 고려하기 위하여 실제 무게 $\tilde{m}=m/3$ 인 경우에 대해서 모의실험을 수행하였다. 그림 6과 그림 7은 $Q_3(s)$ 와 $Q_5(s)$ 를 사용한 경우의 모의실험 결과를 보여주는데, 전술한 바와 같이 외란제거성능은 거의 같지만 잡음제거성능은 Q_5 를 사용한 경우가 훨씬 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

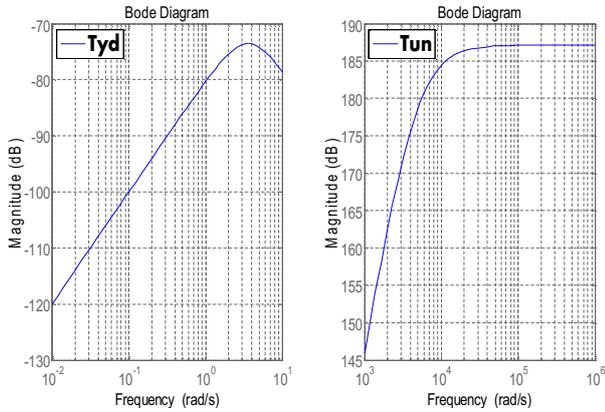


Fig. 3. Bode plots of T_{yd} and T_{un} when DOB controller is used with Q-filter $Q_3(s)$

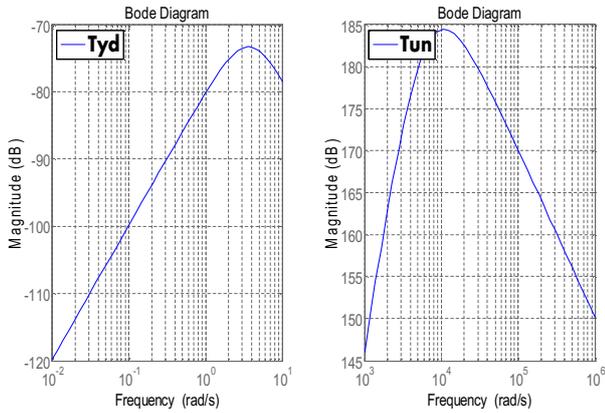


Fig. 4. Bode plots of T_{yd} and T_{un} when DOB controller is used with Q-filter $Q_4(s)$

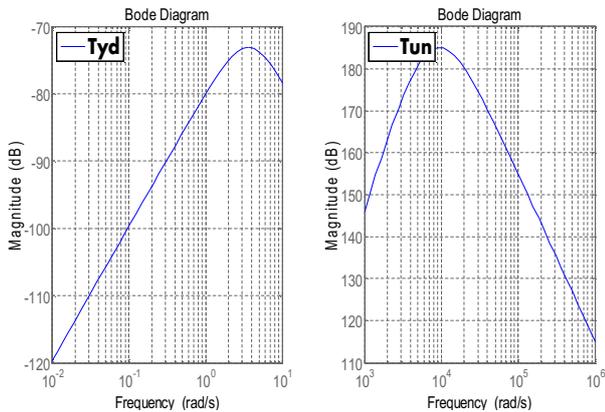


Fig. 5. Bode plots of T_{yd} and T_{un} when DOB controller is used with Q-filter $Q_5(s)$

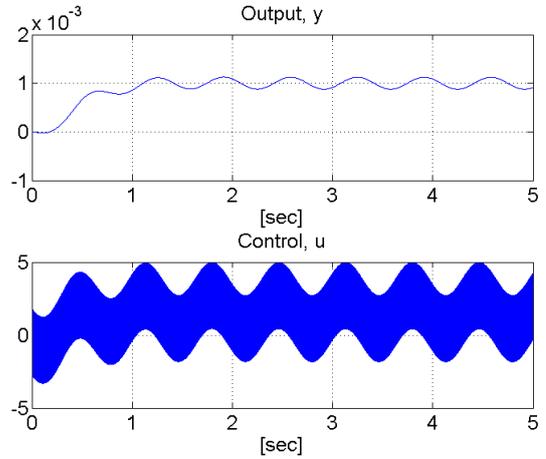


Fig. 6. Simulation results using DOB controller with Q-filter $Q_3(s)$

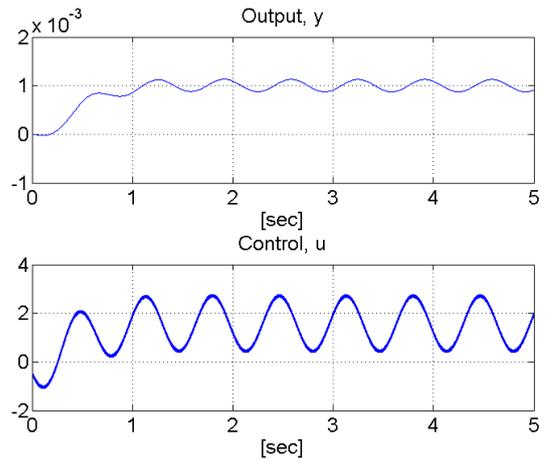


Fig. 7. Simulation results using DOB controller with Q-filter $Q_5(s)$

6. 결 론

본 논문에서는 자기부상시스템의 DOB 제어기 설계 기법에 대해서 논하였다. DOB 제어기 설계시 Q-필터 설계가 매우 중요한데, 3차, 4차, 5차의 Q-필터를 고려하고 장단점을 분석하였다. 무게변화에 따른 강인안정성 분석결과, 3차 Q-필터를 사용하였을 때 가장 큰 무게변화에도 시스템의 안정성을 유지할 수 있었다. 반면에 센서잡음 제거성능을 분석한 결과 주파수가 $10^4 rad/s$ 이상인 경우에 대해서는 5차 Q-필터를 사용

하는 경우가 가장 우수한 성능을 보여주었다. 따라서 센서잡음이 잘 억제되어 있지만 무게변동이 심한 경우에는 가능한 작은 차수의 Q-필터를 사용하는 것이 유리하며, 반대로 무게변동은 크지 않지만 센서잡음이 상당한 경우에는 큰 차수의 Q-필터를 사용할 것을 제안한다. 향후 연구에서는 보다 다양한 형태의 Q-필터를 사용한 외란관측기 제어기 성능에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (NO. 20134010200570)

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, 1993.
- [2] A. E. Hajjaji and M. Ouladsine, "Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems," IEEE Transactions on industrial Electronics, vol. 48, pp. 831-838, 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, pp. 390-399, 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, pp. 69-78, 2003.
- [5] G.F. Franklin, J.D. Powell, A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice-Hall, 2000.
- [6] E. Schrijver and J. van Dijk, "Disturbance observers for rigid mechanical systems: equivalence, stability, and design," J. of Dynamical Systems, Measurement, and Control, vol. 124, pp. 539-548, 2002.

- [7] H. Kobayashi, S. Katsura, and K. Ohnishi, "An analysis of parameter variations of disturbance observer for motion control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, pp. 3413-3421, 2007.
- [8] H. Shim, N.H. Jo, "An almost necessary and sufficient condition for robust stability of closed-loop systems with disturbance observer", Automatica, vol 45, pp 296-299, 2009.
- [9] N.H. Jo, Y. Joo, and H. Shim, "A study of disturbance observers with unknown relative degree of the plant," Automatica, vol 50, pp. 1730-1734, 2014.
- [10] Quanser, Maglev user manuals, 2008.
- [11] V.L. Kharitonov, "Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations," Differential'nye Uraveniya, Vol 14, pp 1483~1485, 1978.

◆ 저자소개 ◆



전찬영 (全燦永)

1988년 6월 22일생. 2014년 숭실대 공대 기계공학과 졸업. 현재 숭실대 전기공학과 석사과정 재학중.



장소현 (張韶賢)

2014년 숭실대 공대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 숭실대 공대 전기공학부 석사과정. 연구분야는 강인제어, 모터 제어시스템 설계.



조남훈 (趙南熏)

1970년 3월 18일생. 1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(박사). 2002년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수.