

비구조적 불확실성이 존재하는 DC모터에 대한 외란관측기 기반 제어기의 강인성에 대한 연구

On the Robustness of Disturbance Observer based Controller for DC Motor with Unstructured Uncertainty

조 남 훈*
(Nam-Hoon Jo)

Abstract - In this paper, we study the robustness of disturbance observer based controller for DC motor in the presence of unmodeled dynamics. It is well known that the robustness property usually becomes weaker as the control gain becomes larger. On the contrary to this expectation, it is shown that the phase margin of DOB controller remains quite a large value even though the time constant of Q-filter becomes smaller. The computer simulation results show that DOB controller is able to stabilize the motor system even in the presence of unmodeled dynamics. On the contrary, the unity-feedback system fails to maintain stability when a high gain feedback is employed for the purpose of achieving better disturbance attenuation performance.

Key Words : Disturbance observer(DOB), Unmodeled dynamics, DC motor, Unstructured uncertainty

1. 서 론

외란관측기(Disturbance Observer; DOB) 기반 제어기는 탁월한 외란감쇠 능력과 모델링오차 보상능력 때문에 실제 산업현장에서 매우 활발히 사용되고 있는 제어기법 중의 하나이다 [1-7]. 대부분의 제어기는 플랜트 모델에 기초하여 설계되는데, 플랜트 모델에는 모델링 오차가 존재할 수 있다. 이러한 모델링 오차에 의한 모델 불확실성(uncertainty)은 구조적(structured) 불확실성과 비구조적(unstructured) 확실성으로 분류할 수 있다. 2000년대 초반까지 DOB 제어기의 강인안정성에 대한 연구는 주로 소이득정리(small gain theorem)를 적용하여 충분조건을 구하는 연구가 대부분이었다 [1-4]. 이에 비해서, 최근에 DOB 제어 시스템의 강인안정성을 위한 필요충분조건이 [5-7]에서 제시되었다. 특히, 구조적 불확실성에 대해서는 그 크기가 유한하지만 하면 전체 시스템을 안정하게 만들 수 있는 Q-필터를 항상 설계할 수 있다는 것이 참고문헌 [5]에서 처음으로 밝혀졌다. 또한, 이 결과를 기초로, 다양한 제어기와외의 강인안정성 비교 연구를 통하여 [5]에서 제안한 설계기법을 이용한 DOB 제어기가 매우 우수한 강인안정성을 갖는다는 것이 보고되었다 [7]. 하지만, [5]에서 설계한 Q-필터를 사용할 때의 비구조적 불확실성에 대한 강인안정성에 대한 일반적인 연구결과는 존재하지 않는다. 특히, 제어성을 향상시키기 위하여 제어이득을 증가시키면 일반적으로 강인

안정성 성능은 감소된다고 알려져 있다. 이를 바탕으로 DOB 제어기의 제어성을 향상시키기 위하여 시정수를 감소시키면, 비구조적 불확실성에 대한 강인안정성이 매우 약해질 수 있다고 생각할 수 있다.

본 논문에서는 모터 위치제어기 설계 시 존재할 수 있는 비구조적 불확실성에 대한 DOB 제어기의 강인안정성에 대해서 연구하고자 한다. 이를 위해서 다양한 시정수에 대해서 DOB 제어 시스템의 위상여유를 계산하고, 이를 바탕으로 시정수가 점점 감소하더라도 강인안정성 성능이 저하되지 않는다는 것을 보이고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 DOB 제어기의 기본 성질과 본 논문에서 사용되는 모터의 전달함수를 소개한다. 3장에서는 기본적인 단위궤환 시스템의 경우, 고이득을 사용하면 위상여유가 점점 감소하여 강인안정성이 매우 취약해질 수 있다는 점을 알아본다. 4장에서는 참고문헌 [5]에서 제시한 설계기법을 통하여 다양한 시정수에 대해서 DOB 제어기의 강인안정성을 고찰해 본다. 5장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 3장과 4장에서 고찰한 내용을 검증해 보고, 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 외란 관측기 (Disturbance Observer)

그림 1은 외란 관측기 기반 제어 시스템 구조이다. 여기서 신호 r , u 는 시스템의 기준입력과 시스템에 인가되는 제어입력을 나타내며, 신호 d 와 y 는 입력외란과 시스템의 출력을 나타낸다.

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Soongsil University, Korea
E-mail : nhjo@ssu.ac.kr
Received : August 29, 2016; Accepted : December 21, 2016

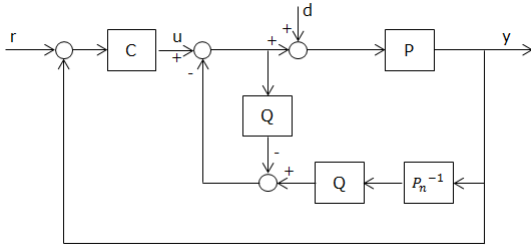


그림 1 외란관측기 기반 제어시스템
 Fig. 1 The disturbance observer based control system

또한, P 는 실제 플랜트, P_n 은 시스템의 공칭 모델, Q 는 Q 필터를 나타낸다. Q 필터는 식 (1)과 같은 형태로 선정하는데,

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

r 은 공칭모델의 상대차수(relative degree)이고 τ 는 Q 필터의 시정수이다. 또한, 분모에 나타난 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 안정하도록 임의로 선정하면 된다. 그림 1로부터 전체 시스템의 전달함수를 구하면 식 (2)와 같다.

$$y(s) = T_{yr}(s)r(s) + T_{yd}(s)d(s) \quad (2)$$

여기서,

$$T_{yr}(s) = \frac{P_n PC}{P_n(1+PC) + Q(P-P_n)}$$

$$T_{yd}(s) = \frac{P_n P(1-Q)}{P_n(1+PC) + Q(P-P_n)}$$

이다. Q 필터는 (1)과 같이 표현된 저역 통과 필터로서 고주파 영역에서는 $Q(s) \approx 0$, 저주파 영역에서는 $Q(s) \approx 1$ 로 근사할 수 있다. 또한, 기준입력과 외란은 대부분 저주파 성분이고 저주파 영역에서는 $T_{yr}(s) \approx \frac{P_n C}{1+P_n C}$, $T_{yd}(s) \approx 0$ 로 근사되기 때문에, 저주파 영역에서 출력은 (2)로부터 다음과 같이 근사가능하다.

$$y(j\omega) \approx P_n(j\omega)r(j\omega)$$

즉, $Q(s) \approx 1$ 인 주파수 영역에서는 외란의 영향은 거의 소거되고, 실제 시스템의 출력은 공칭 페루프 시스템(nominal closed-loop system) 출력과 거의 비슷한 특성을 갖게 된다. 여기서, τ 가 작아질수록 $Q(s) \approx 1$ 인 주파수 영역은 더욱 커지기 때문에, DOB 성능을 향상시키기 위해서는 τ 를 감소시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

한편, 외란관측기 기반 제어가 위와 같은 동작을 수행하기 위해서는 시스템의 안정성이 반드시 보장되어야 한다. 외란관측기 제어시스템의 안정도에 대한 필요충분조건은 참고문헌 [5]에서 연구되었는데, 그 내용을 간단히 소개하면 다음과 같다. Q -필터 (1)에 대해서 서로소 다항식(coprime polynomial) $N_Q D_Q$ 를 $Q(s) = \frac{N_Q(s;\tau)}{D_Q(s;\tau)}$ 로 정의하자. 여기서 τ 를 함수의 인자로 명시적으로 표시한 이유는 Q 필터가 s 뿐만 아니라, 시정수 τ 의 함수임을 나타내기 위해서다. 이때, 전체 DOB 시스템의 안정성을 보장하기 위한 조건은 다음과 같이 주어진다.

정리 1 [5]: 그림 1과 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 좌반평면(Left Halp Plane)에 존재한다.

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

모델링 오차 등에 의한 불확실성이 존재하는 경우, 강인 안정성을 만족하기 위해서는 정리 1의 조건 (iii)을 만족해야 한다. 만약 모델 불확실성이 구조적 불확실성(structured uncertainty)으로 존재하고 그 불확실성의 크기가 유한하다면, 조건 (iii)을 만족할 수 있는 Q -필터를 항상 설계할 수 있다는 것이 참고문헌 [5]에서 밝혀졌다. 하지만, 비구조적 불확실성이 존재하는 경우의 강인 안정성에 대해서는 일반적인 연구결과가 존재하지 않는다.

이에, 본 논문에서는 DC 모터의 위치제어에 DOB 제어를 사용할 경우에 대해서 비구조적 불확실성에 대한 강인 안정성을 연구하고자 한다. 연구에 사용된 DC 모터의 전달함수는 아래와 같이 주어진다 [8].

$$P(s) = \frac{K_t}{s[(Js+b)(Ls+R) + K_t K_e]} \quad (3)$$

여기서, J 는 모터의 관성모멘트, b 는 마찰력 계수, L 과 R 은 전기자회로의 인덕턴스와 저항, K_t 는 토크상수, K_e 는 역기전력 상수이다. 전달함수 (3)에 사용되는 파라미터의 공칭값은 표 1과 같이 주어진다 가정한다 [8].

인덕턴스 L 이 작기 때문에, 제어기 설계 시에는 주로 $L=0$ 으로 가정한 다음과 같은 공칭모델을 사용한다.

$$P_n(s) = \frac{K_t}{s[(Js+b)R + K_t K_e]}$$

표 1의 값을 이용하면 DC 모터의 공칭모델은 (4)와 같이 계산된다.

표 1 DC 모터 모델의 공칭 파라미터

Table 1 Nominal parameters of DC motor model

Parameter	Value	Unit
J	$1.13 \cdot 10^{-2}$	$N \cdot m \cdot sec^2 / rad$
b	0.028	$N \cdot m \cdot sec / rad$
L	0.01	henry
R	0.45	ohms
K_t	0.067	$N \cdot m / amp$
K_e	0.067	$volt \cdot sec / rad$

$$P_n(s) = \frac{13.18}{s^2 + 1.131s} \quad (4)$$

한편, 제어기 설계 목적은 단위계단 기준입력에 대한 정상상태 오차는 0, 오버슈트 10%이내, 정착시간 3초 이내라고 가정하자. 이러한 제어목적은 달성하기 위한 제어기를 (5)와 같이 설계한다.

$$C(s) = \frac{0.25s + 0.5}{0.05s + 1} \quad (5)$$

3. 고이득 궤환 사용 시 위상여유

이제 플랜트 $P(s)$ 와 제어기 $C(s)$ 만으로 구성된 단위궤환 (unity feedback) 시스템을 고려해 보자. (그림 1에서 두 개의 $Q(s)$ 가 모두 0인 경우가 단위궤환 시스템이다.) 이 시스템의 강인안정성을 주파수 영역에서 분석하기 위하여 루프전달함수(Loop transfer function)를 계산하고 위상여유를 계산해보자. 제어기의 위상여유 계산 시에는 $P(s) = P_n(s)$ 를 가정하기 때문에, 루프 전달함수는 $L(s) = P_n(s)C(s)$ 이며 Bode 진폭선도와 Nyquist 선도를 도시해 보면 그림 2의 왼쪽과 같다.

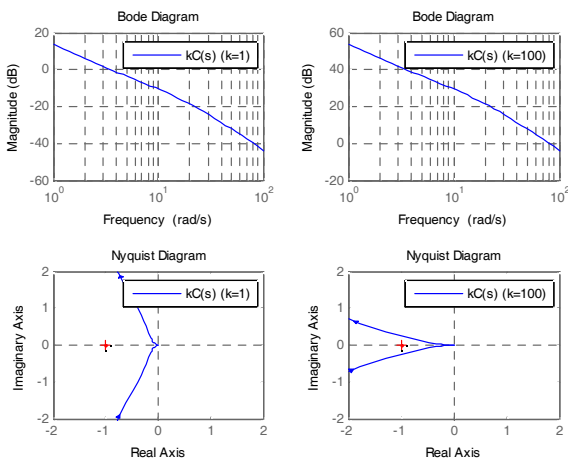


그림 2 $C(s)$ 와 $100C(s)$ 에 대한 Bode 선도와 Nyquist 선도
Fig. 2 Bode plots and Nyquist plots for $C(s)$ and $100C(s)$

표 2 다양한 이득 값 k 를 사용한 단위궤환 시스템의 교차주파수와 위상여유

Table 2 Crossover frequencies and phase margins for unity-feedback systems using various values of k

k	1	10	100	1000
w_c (rad/s)	3.55	22.1	79.9	256
PM($^\circ$)	68.1	39.9	13.5	4.3

Nyquist 선도로부터 위상여유가 68.1° 이어서 강인 안정성이 매우 우수한 상태라는 것을 알 수 있다. 또한, Bode 선도로부터 교차주파수(crossover frequency)는 3.55 rad/sec 정도임을 알 수 있다. 만약, 응답속도를 개선하고 외란감쇠성능을 개선시킬 필요가 있다면, 폐루프(closed-loop) 시스템의 대역폭(bandwidth)을 증가시키면 되는데, 이를 위해서는 개루프(open-loop) 시스템의 교차주파수를 증가시키면 된다 [8]. 그림 2의 오른쪽은 제어기를

$$kC(s), k = 100$$

으로 변경하고 Bode 선도와 Nyquist 선도를 도시한 것이다. 교차주파수는 79.9 rad/sec 로 크게 증가하였고, 결과적으로 응답속도와 외란감쇠성능이 모두 향상될 것으로 예상된다. 하지만, Nyquist 선도로부터 위상여유가 13.5° 로 크게 감소하였고, 모델 불확실성에 대한 강인 안정성이 매우 저하될 수 있다는 것을 알 수 있다. $k = 10$ 과 $k = 1000$ 에 대해서도 마찬가지로 교차주파수와 위상여유를 계산할 수 있는데, 이를 정리한 것이 표 2이다. 표 2에서 w_c 와 PM 은 교차주파수와 위상여유를 나타낸다. 표 2로부터 제어성능을 향상시키기 위하여 제어이득 k 를 증가시키면, 위상여유가 계속 줄어드는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 고이득 궤환 제어기를 사용할 경우 일반적으로 강인 안정성이 매우 저하되는 것으로 알려져 있다. 이러한 사실을 바탕으로, DOB 제어기에 대해서도 DOB의 시정수를 증가시켜서 성능을 향상시키면 DOB의 강인 안정성 성능도 점점 약해질 것으로 생각하기 쉽다. 하지만, DOB 제어기에 대해서는 이러한 현상이 나타나지 않는데, 이에 대해서는 다음 장에서 상세히 고찰해 보도록 하자.

4. DOB 제어기의 위상여유

이제, DOB 제어기의 위상여유를 계산하여 강인안정성을 분석해 보도록 하자. 먼저, 그림 1의 DOB 제어기에서 $P_n(s)$ 와 $C(s)$ 는 (4), (5)와 같이 선정하였다. 또한, Q-필터는 공칭모델의 상대차수가 2 임을 고려하여 기본적인 형태인 (6)과 같이 선정하였다.

$$Q(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^2} \quad (6)$$

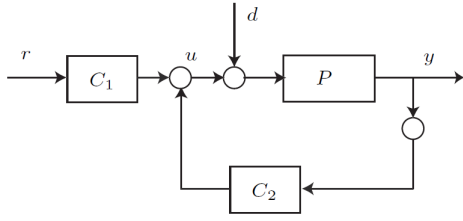


그림 3 외란관측기 제어시스템의 등가 구조
 Fig. 3 An equivalent structure of DOB control system

DOB 제어기의 교차주파수와 위상여유를 계산하기 위해서는 그림 1로 주어진 DOB 제어시스템 구조를 그림 3과 같이 변경할 필요가 있다. 그림 3에서 $C_1(s)$ 와 $C_2(s)$ 는 Mason 법칙[8]을 적용하면 아래와 같이 쉽게 계산할 수 있다.

$$C_1 = \frac{C}{1-Q}, \quad C_2 = -\frac{P_n^{-1}Q+C}{1-Q}$$

따라서, DOB 제어시스템의 루프전달함수는 (7)과 같이 주어진다.

$$L = (-C_2)P = \frac{P_n^{-1}Q+C}{1-Q} P \quad (7)$$

Q-필터의 시정수가 $\tau=0.1$ 인 경우에 대해서 루프전달함수 (7)을 계산하면 아래와 같다

$$L(s) = \frac{165.9s^3 + 3562s^2 + 1.148e04s + 1.318e04}{(s^3 + 41.13s^2 + 445.2s + 452.2)s^2}$$

그 Bode 진폭선도와 Nyquist 선도를 도시해 보면 그림 4의 왼쪽과 같다. Bode 선도로부터 교차주파수는 7.27 rad/sec이고 Nyquist 선도로부터 위상여유는 52.4°임을 알 수 있다. 이제, 제어 성능을 향상시키기 위하여 $\tau=0.01$ 로 감소시킨 DOB 제어기를 고려해 보자. 그림 4의 오른쪽 그림은 $\tau=0.01$ 로 변경한 DOB 제어기의 Bode 선도와 Nyquist 선도를 도시한 것이다. 그림으로부터 교차주파수는 48.1 rad/sec 로 증가하였고, 위상여유는 74.5°가 되어 $\tau=0.1$ 인 경우보다 더욱 증가한 것을 알 수 있다. 즉, τ 를 줄이면 제어성능도 향상될 뿐만 아니라 위상여유도 더욱 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 3장에서 고려한 기본적인 단위궤환 제어시스템의 경우와 비교할 때, DOB 제어기의 주요 장점 중의 하나라고 할 수 있다.

Q-필터의 시정수가 더욱 작아지는 경우에 대해서도 비슷한 현상이 나타나는지 확인하기 위하여 $\tau=10^{-3}$ 와 $\tau=10^{-4}$ 인 경우의 DOB 제어기의 Bode 진폭선도와 Nyquist 선도를 그림 5에 나타내었고, 교차주파수와 위상여유를 표 3에 정리하였다. 표 3으로부터 Q-필터 시정수가 점점 작아지더라도 위상여유는 76.3° 근처의 값을 계속 유지한다는 것을 알 수 있다. 즉 교차주파수가 증가하게 되면, 단위궤환 시스템에서는 위상여유가 점점 작아져

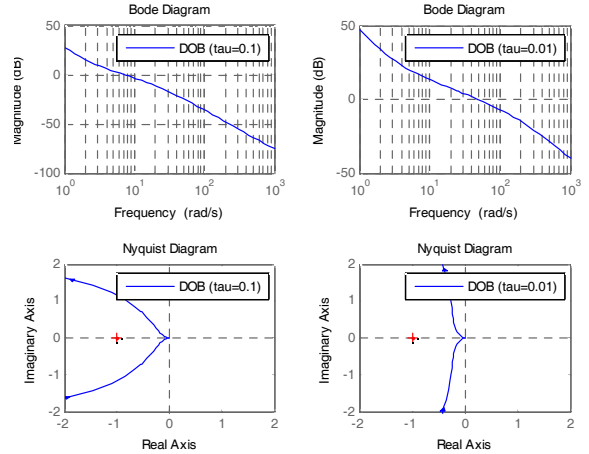


그림 4 DOB 제어기 ($\tau=0.1$ 와 $\tau=0.01$)에 대한 Bode 선도와 Nyquist 선도

Fig. 4 Bode plots and Nyquist plots for DOB controller ($\tau=0.1$ and $\tau=0.01$)

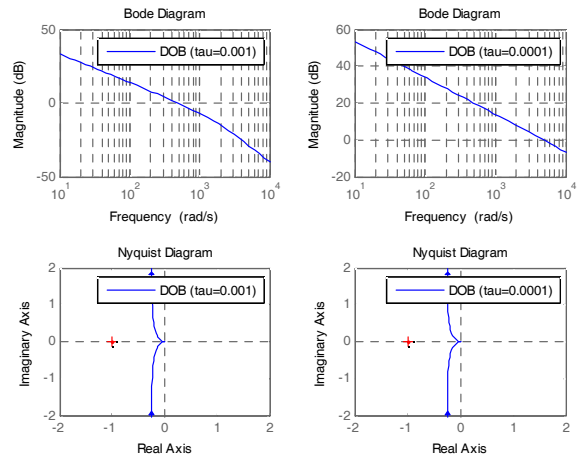


그림 5 DOB 제어기 ($\tau=0.001$ 와 $\tau=0.0001$)에 대한 Bode 선도와 Nyquist 선도

Fig. 5 Bode plots and Nyquist plots for DOB controller ($\tau=0.001$ and $\tau=0.0001$)

서 0으로 수렴하는 것처럼 보였지만, DOB 제어기에서는 위상여유가 76.3° 근처로 수렴하면서 매우 큰 값을 계속 유지하고 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 DOB 제어기의 경우 성능향상을 위해서 시정수를 계속 감소시키더라도 강인안정성이 매우 우수한 수준을 유지할 수 있을 것으로 보인다.

5. 모의실험

이제, $L=0$ 으로 가정하고 설계한 제어기를 실제 모터 (즉, $L \neq 0$ 인 경우)에 적용할 때의 제어성능을 알아보기 위하여 모의

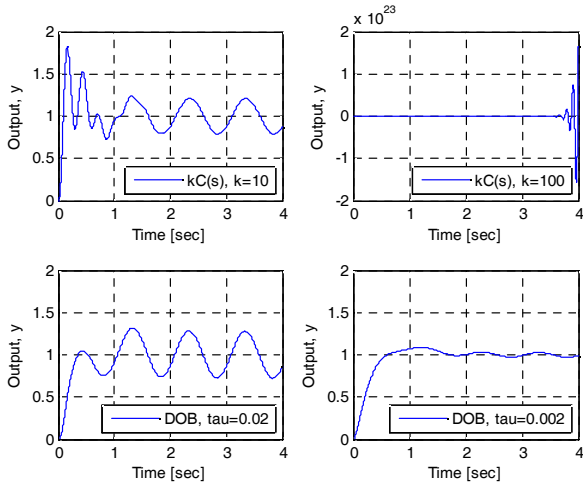


그림 6 모델링 오차가 존재하는 경우의 모의실험 결과. 위: 단위 궤환 시스템; 아래: DOB 제어기

Fig. 6 Simulation results in the presence of modeling error. Upper: unity feedback control system; Lower: DOB controller

실험을 수행해 보았다. $L \neq 0$ 인 플랜트 전달함수는 (3)으로 주어 지는데, 표 1을 이용하여 계산하면 (8)과 같은 3차 시스템이며

$$P(s) = \frac{593}{s(s^2 + 45.2s + 50.9)} \quad (8)$$

제어기 설계에 사용되는 공칭모델은 (4)와 같은 2차 시스템으로 주어진다. 이제, 그림 1에서 기준 입력과 입력 외란이 (9)과 같이 주어진다고 가정하자.

$$r(t) = 1, \quad d(t) = 3\sin(2\pi t) \quad (9)$$

먼저, $kC(s)$, $k=10$ 인 단위궤환 시스템에 대한 실험결과를 그림 6의 위 왼쪽 그림에서 볼 수 있다. 외란의 영향으로 정상상태에 도달한 이후에도 기준입력과 오차가 대략 ± 0.2 정도 나타남을 알 수 있다. 이제, 외란의 영향을 감소시키기 위하여 이득 값 k 를 증가시켜보자. 그림 6의 위 오른쪽 그림은 $k=100$ 로 증가시킨 것인데, 출력이 발산하여 시스템이 불안정하다는 것을 알 수 있다. 이는 표 2로부터 $k=10$ 에서 $k=100$ 로 증가시키면 위상여유가 39.9° 에서 13.5° 로 감소하여 강인안정성이 저하되기 때문으로 이해할 수 있다.

이제, DOB제어기의 성능을 알아보도록 하자. 단위궤환 시스템에서 $kC(s)$, $k=10$ 인 경우의 교차주파수는 22.1 rad/sec 인데, 이와 비슷한 성능을 갖는 DOB 제어기를 우선 고려해 보자. 교차주파수가 22.1 rad/sec 인 DOB 제어기의 시정수 τ 를 찾아보면 0.02 임을 알 수 있고, 이에 대한 모의실험 결과를 그림 6의 아래 왼쪽에서 볼 수 있다. 예상대로, $kC(s)$, $k=10$ 제어기와 거의 유사한 외란감쇠성능을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 이제, 외란감

표 3 다양한 τ 를 사용한 DOB 제어기의 교차주파수와 위상여유

Table 3 Crossover frequencies and phase margins for DOB controller using various values of τ

τ	0.1	0.01	0.001	0.0001
$w_c \text{ (rad/s)}$	7.27	48.1	485	4855
PM($^\circ$)	52.4	74.5	76.3	76.3

쇠성능을 개선시키기 위하여 시정수를 $\tau=0.002$ 로 감소시켜서 모의실험을 수행하였고, 그 결과를 그림 6의 아래 오른쪽에서 볼 수 있다. 출력에서 외란의 영향이 거의 사라진 것을 확인할 수 있으며 안정성도 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 표 3에서 볼 수 있는 것처럼 시정수 τ 를 계속 줄여나가더라도 위상여유가 계속 76° 정도로 유지되기 때문에 가능한 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 모터의 위치제어를 위한 외란관측기 제어기의 강인안정성에 대한 연구를 수행하였다. DOB 제어기의 시정수를 줄여나가면 제어성능은 향상되는데, 비구조적 불확실성에 대한 강인안정성은 오히려 저하될 수 있다는 의견이 있었다. 본 논문에서는 이러한 주장이 타당한지를 알아보기 위하여 DOB 제어기 시정수를 점점 줄여나가면서 위상여유의 변동 추이를 분석해 보았다. 그 결과, DOB 제어기의 시정수가 계속 감소하더라도, 위상여유는 충분히 큰 값을 유지한다는 것을 알 수 있었고, 결과적으로 비구조적 불확실성에 대한 강인안정성 성능이 우수한 수준을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 컴퓨터 모의실험을 통하여, 충분히 작은 시정수에 대해서도 DOB 제어기가 적절한 강인안정성 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164010201010)

References

[1] S. Endo, H. Kobayashi, C.J. Kempf, S.Kobayashi, M. Tomizuka, and Y. Hori, "Robust digital tracking controller design for high-speed positioning systems", Control Engineering Practice, Vol. 4, pp. 527-536, 1996.
 [2] B. K. Kim and W. K. Chung, "Advanced disturbance observer design for mechanical positioning systems",

- IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 50, pp. 1207-1216, 2003.
- [3] 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.
- [4] J. R. Ryoo, T. Y. Doh, and M. J. Chung, "Robust disturbance observer for the track-following control system of an optical disk drive", Control Engineering Practice, Vol. 12, pp. 577-585, 2004.
- [5] 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, pp. 296-299, 2009.
- [6] 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.
- [7] N. H. Jo, C. Jeon, and H. Shim, "Noise reduction disturbance observer for disturbance attenuation and noise suppression", to appear in IEEE Trans. Ind. Electron.
- [8] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic Systems, 4th Ed., Prentice-Hall, 2000.

저 자 소 개



조 남 훈 (Nam-Hoon Jo)

1992년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
2000년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2002년~현재 송실대학교 전기공학부 부교수. 연구분야는 강인제어, 비선형 시스템 제어, 모터 제어 시스템

Tel : 02-820-0643

E-mail : nhjo@ssu.ac.kr