

PID 제어기로 안정화 가능한 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 설계

論 文
57-9-20

Disturbance Observer Design for a Non-minimum Phase System That Is Stabilizable via PID Control

孫 瑛 翼[†] · 金 晟 鍾^{*} · 鄭 求 種^{**} · 沈 亨 輔^{***}
(Young-Ik Son · Sung-Jong Kim · Goo-jong Jeong · Hyungbo Shim)

Abstract - Since most disturbance observer (DOB) approaches have been limited to minimum-phase systems (or systems having no zero dynamics), we propose a new DOB structure that can be applied to non-minimum phase systems. The new structure features an additional system, which is called as V-filter, whose role is to yield a minimum phase system when connected with the plant in parallel. In order to design the V-filter systematically we first consider a class of linear systems that can be stabilized via PID controller. By inverting the controller's transfer function, we can simply construct the filter. A convenient way of designing V-filter is presented by using an iterative linear matrix inequality (LMI) algorithm. With an illustrative example the simulation result shows that substantial improvement in the performance has been achieved compared with the control system without the DOB.

Key Words : Disturbance observer, Non-minimum phase system, Parallel connection, LMI, PID control

1. 서 론

최근에도 외란에 대해 강인한 제어 시스템을 설계하기 위한 많은 제어 기법이 발표되고 있으며, 그 중 로봇 제어, 정밀 제어 등 다양한 분야에서 적용되고 있는 외란 관측기(Disturbance Observer; DOB)는 외란을 관측하여 제어 입력에 보상하여 줌으로써 효과적으로 외란의 영향을 감소시키는 제어 알고리즘이다.[1] 외란 관측기를 사용하는 제어 기법의 장점은 기존에 설계된 제어기에 관측기를 덧붙여 사용함으로써 외란과 시스템의 불확실성에 대처할 수 있다는 점이다. 이와 같이 다른 제어 기법에 비해 편리함과 뛰어난 외란 제거 성능으로 외란 관측기는 실제 제어 문제에 많이 적용되고 있다.[2-7]

하지만 외란의 추정을 위해 대상 시스템(전달함수)의 역을 사용해야 하는 설계과정으로 인해 외란 관측기 설계 기법은 시스템의 영점이 없거나 아니면 영점이 모두 복소평면의 좌 반평면(LHP)에 존재하는 최소 위상(minimum phase) 시스템으로 그 적용 범위가 제한 받아왔다. 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템에 대한 외란 관측기 설계 문제는 소수의 연구 결과들만이 발표되고 있으며, 아직 일반적

인 경우에 대한 해결 방법이 부족한 상태이다.[8-11] 예를 들어 참고논문 [8]에서는 알려진 외부 시스템으로부터의 외란을 고려하는 연구이며, 논문 [10,11]에서는 시스템의 최소 위상 시스템 부분만을 관측기 설계에 이용하고 있다. 또한, 논문 [9]에서는 페루프 시스템의 성능 개선을 위한 외란 관측기가 아닌 외란의 추정에 관한 논문이므로 제어 문제에 바로 적용할 수 없다. 이와 같이 비최소 위상 시스템에 외란 관측기를 적용하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.[11,16]

본 논문에서는 비최소 위상 시스템에 외란 관측기 기반 제어 기법을 적용하기 위한 새로운 방법을 제안한다. 이는 최소 위상 시스템을 얻기 위해 참고문헌 [12]에서와 같이 병렬 보상기(V-필터)를 설계하여 연결함으로써 결합된 시스템이 최소 위상이 되도록 한 이후에 기존의 외란 관측기 설계 기법을 적용하는 방법이다. 본 논문에서는 먼저 새로운 외란 관측기 기반 제어기의 성능을 보장하기 위한 V-필터의 성질을 규정하고, 연구의 첫 단계로서 PID제어기로 안정화 가능한 공칭 시스템에 대한 관측기 설계를 다룬다. 또한, V-필터의 설계 편의를 위해 반복 선형 행렬 부등식(Iterative Linear Matrix Inequality, ILMI)을 이용한 설계 방법을 제시한다.

논문의 구성은 2.1절에서 기존의 최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 소개 및 문제를 정의한다. 2.2절에서는 V-필터를 이용한 비최소 위상 시스템의 외란 관측기 설계 방법을 제안하고, PID 제어기로 안정화 가능한 시스템에 대한 V-필터 설계를 2.3절에서 다룬다. 이 때, 반복 선형 행렬 부등식(ILMI)을 활용할 수 있음을 보인다. 제안된 관측기의 성능을 시험하기 위해 간단한 비최소 위상 시스템에 대해

† 교신저자, 正會員 : 明知大學校 電氣工學科 副教授 · 工博
E-mail : sonyi@mju.ac.kr
* 正會員 : Intech-FA 研究員
** 學生會員 : 明知大學校 電氣工學科 碩士課程
*** 正會員 : 서울大學校 電氣컴퓨터工學部 助教授 · 工博
接受日字 : 2008年 3月 28日
最終完了 : 2008年 7月 30日

새로운 외란 관측기를 설계하고, 모의실험을 통해 제어 시스템의 외란 제거 성능을 확인한다.

2. 본 론

2.1 문제 정의 및 최소위상 시스템의 외란 관측기

일반적으로 외란 관측기 설계 문제는 (외란이 없는) 그림 1과 같은 폐루프 시스템이 만족할 성능을 갖도록 하는 제어기 $C(s)$ 가 존재함을 가정한다 ($P(s)$: 제어 대상 시스템). 이때, 점선 내의 제어 입력 v 와 시스템 $P(s)$ 사이에 외란 d 가 존재하여 폐루프 시스템의 성능이 저하될 경우, 그림 2와 같이 추가적으로 설계된 외란 관측기는 외란의 영향을 상쇄하여 그림 1의 폐루프 시스템과 같은 성능을 유지하도록 한다. (그림 2는 그림 1의 점선 부분에 해당하며 외란 및 측정 잡음을 고려하여 외란 관측기가 추가된 그림이다.) 이와 같이 주제어기(혹은 외부 루프 제어기) $C(s)$ 와 외란 관측기(내부 루프 제어기)를 독립적으로 설계할 수 있다는 것이 외란 관측기 설계 기법의 장점 중 하나이다. 본 논문에서도 기존의 외란 관측기 결과들과에서와 같이 $C(s)$ 의 설계 과정은 다루지 않는다.

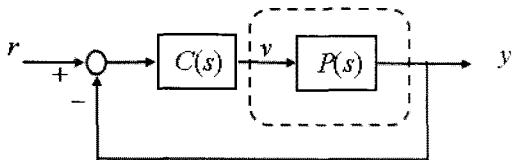


그림 1 폐루프 제어 시스템
Fig. 1 Closed-loop System

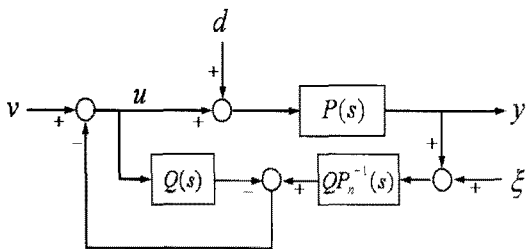


그림 2 외란 관측기의 구조
Fig. 2 Structure of Disturbance Observer

그림 2에서 $P(s)$ 와 $P_n(s)$ 는 각각 제어 대상 시스템 및 공칭 시스템을 나타내고, $Q(s)$ 는 Q -필터라고 불리는 저주파 통과 필터이다.[5] 입력 v 는 주제어기에서 생성되는 제어 입력 신호이며, d 와 ξ 는 각각 외란과 측정 잡음을 나타낸다. 외란의 추정을 위해 $P_n^{-1}(s)$ 가 사용되고 있음에 주목한다. 대부분의 시스템 전달함수는 분모의 차수가 분자의 차수보다 높으므로 $P_n^{-1}(s)$ 의 구현을 위해서는 전달함수 $QP_n^{-1}(s)$ 와 같이 적절한 상대차수를 갖는 필터 $Q(s)$ 가 필요하다. 외란 관측기의 Q -필터는 시스템의 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 그 설계에 관한 내용은 참고 논문 [5]에 나타나 있다. 본 논문의 모의실험에서는 아래 식과 같은 Binomial 형태를 사용하였다.[5]

$$Q(s) = Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n m_i C_i (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m}, \quad Q(0) = 1 \quad (1)$$

그림 2에서 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} v + \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d - \frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q} \xi \quad (2)$$

일반적으로 외란 d 는 저주파 신호이고 측정 잡음 ξ 는 고주파 신호라고 가정한다. 식 (2)을 살펴보면 저주파 영역에서 $Q(s) \approx 1$ 이면 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s) \approx 0$ 이면 측정 잡음에 대한 영향을 무시할 수 있음을 알 수 있다. 즉, $\tau \ll 1$ 일 때 이상적인 경우이다. 이때, 식 (2)는 아래 식과 같이 근사될 수 있다.

$$y \approx P_n(s)v \quad (3)$$

한편, 준 시스템이 비최소 위상인 경우, 그림 2에서 $QP_n^{-1}(s)$ 는 불안정한 시스템이다. 이로 인해 시스템이 발산하는 경우를 해석하기 위해 시스템의 내부 안정도(internal stability)를 간단히 살펴본다.[14,15] 외란 관측기의 내부 안정도는 전달함수 $P_n + (P - P_n)Q$ 의 영점에 의해 결정된다. 즉, 각 시스템들의 전달함수를 다음과 같이 나타낼 때,

$P(s) = N(s)/D(s)$, $P_n(s) = N_n(s)/D_n(s)$, $Q(s) = N_Q(s)/D_Q(s)$,
아래 방정식의 해가 모두 좌 반평면(LHP)에 위치해야 한다.[14]

$$N_n(s)D(s)D_Q(s) + N_Q(s)(N(s)D_n(s) - N_n(s)D(s)) = 0 \quad (4)$$

이 때 위의 식 (4)의 해를 s^* 라고 하면, 아래 식을 만족함을 알 수 있다.

$$N_n D [D_Q - N_Q](s^*) + N D_n [N_Q - 1](s^*) = -N(s^*)D_n(s^*) \quad (5)$$

식 (5)에서 $(D_Q - N_Q)$ 및 $(N_Q - 1)$ 은 상수항이 없는 (τs) 의 다항식이다. 따라서, $\tau = 0$ 일 때, 좌변은 0이며 우변 $N(s^*)D_n(s^*) = 0$ 이 된다. 이는 $\tau = 0$ 일 때, 외란 관측기의 내부 안정성이 시스템 $P(s)$ 의 영점에 의존함을 의미한다. 또한, $\tau > 0$ 인 경우에도 충분히 작은 $\tau \ll 1$ 에 대해서 s^* 가 시스템 $P(s)$ 의 영점 근처에 위치하게 된다. 즉, 그림 2와 같은 외란 관측기의 성능과 안정성을 보장하기 위해서는 준 시스템이 최소 위상이어야 함을 의미한다. 이에 대한 보다 엄밀한 해석은 논문 [15]를 참조한다.

다음 절에서는 위 해석에 근거하여 그림 2의 외란 관측기에 추가로 설계된 필터를 병렬 연결함으로써 비최소 위상 시스템에 적용 가능한 새로운 외란 관측기 형태를 제안한다.

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기 설계

본 절에서는 준 시스템 $P(s)$ 가 비최소 위상임을 가정한다. 잘 알려진 것과 같이 피드백 연결에 의해서는 시스템의 영점을 옮길 수 없으므로, 본 논문에서는 참고문헌 [12]에서와 같이 병렬 보상기(V-필터)를 이용한다. 이를 위해 먼저 그림 2의 구조에서 시스템 $(P_n + V)(s)$ 가 최소 위상 시스템이 되도록 $V(s)$ 를 설계한 후 그림 3과 같이 병렬 연결한다. 다음으로 시스템 $(P_n + V)(s)$ 를 그림 2의 $P_n(s)$ 라 생각하고 최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 기반 제어 기법을 적용한다.

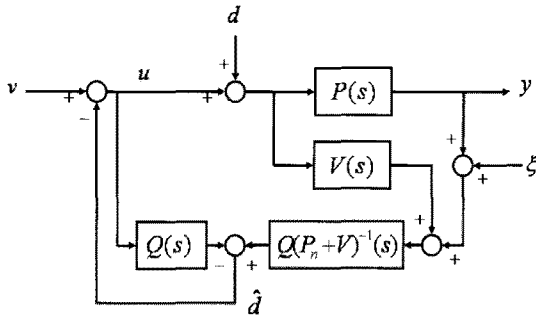


그림 3 새로운 외란 관측기의 구조
Fig. 3 A New Disturbance Observer Structure

한편, 그림 3과 같은 시스템을 구현하기 위해서는 $V(s)$ 의 입력으로 외란을 사용해야하므로, 이 문제점을 해결하기 위해 그림 3을 그림 4와 같이 재구성한다.

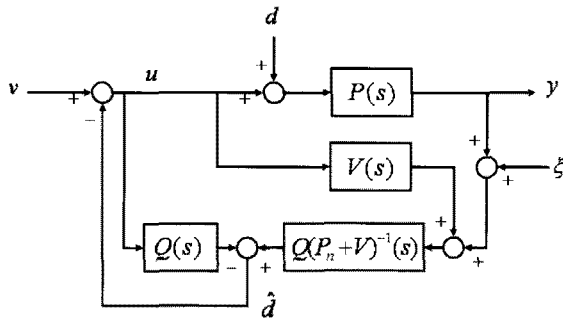


그림 4 제안된 외란 관측기의 구조
Fig. 4 Proposed Disturbance Observer Structure

새로 제안된 그림 4의 외란 관측기가 제대로 동작하기 위해서는 그림 4가 그림 3과 유사하도록 V -필터를 설계해야 한다. 즉, 관심을 갖는 외란의 주파수 대역에서 $(P+V)(s) \approx P(s)$ 라면 그림 4가 그림 3에 근사적임을 알 수 있다. 결국 V -필터의 설계 조건은 다음과 같다.

- 조건 1: 시스템 $(P_n + V)(s)$ 는 최소 위상 시스템이다.
- 조건 2: 저주파 외란의 주파수 대역에서 $(P + V)(s) \approx P(s)$ 이다.

본 논문에서는 V -필터를 설계할 때, 조건 2를 위해 저주파 주파수 대역에서 $V(s) \approx 0$ 이도록 $V(s)$ 를 설계한다. 제안된 그림 4의 외란 관측기에서 출력 y 에 대한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y = \frac{P(P_n + V)}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} v + \frac{P(P_n + V)(1 - Q) + PVQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} d - \frac{PQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} \xi \quad (6)$$

앞 절의 해석과 같이 저주파 영역에서 $Q(s) \approx 1$ 이고, 추가적으로 $V(s) \approx 0$ 이면 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s) \approx 0$ 이면 측정 잡음에 대한 영향이 무시될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 식 (6)는 최소 위상 시스템의 경우처럼 식 (3)과 같이 근사할 수 있다.

다음 절에서는 제안한 방법의 적용을 위해 제어 대상 시스템을 PID (혹은 PI) 제어기로 안정화되는 시스템으로 제한하고, 정적 출력 궤환(Static Output Feedback; SOF) 안정화 문제에 사용된 선형 행렬 부등식 (LMI)을 이용하여 위의 조건을 만족하는 V -필터 $V(s)$ 를 설계한다.

2.3 PID 제어기로 안정화 가능한 비최소 위상 시스템: SOF 알고리즘의 적용

제안된 외란 관측기의 첫 번째 적용으로 본 절에서는 PID (혹은 PI) 제어기로 안정화되는 시스템을 고려한다. 아래와 같이 가정한다.

가정 1. 시스템 $P(s)$ 는 아래와 같은 PID 제어기 $C(s)$ 에 의해 안정화 가능하다.

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (7)$$

위의 가정이 만족되면 조건을 만족하는 V -필터를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$V(s) = C^{-1}(s) = \frac{s}{K_d s^2 + K_p s + K_i} \quad (8)$$

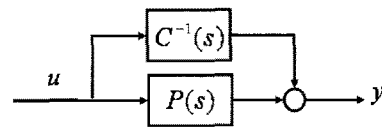


그림 5 병렬 연결된 시스템
Fig. 5 System with Parallel connection

가정 1에 의해 특성방정식 $1 + P(s)C(s) = 0$ 의 근은 모두 좌반평면(LHP)에 위치하게 된다. 이 때, 병렬 연결된 그림 5의 전달함수는 $(P + C^{-1})(s)$ 이므로 이 시스템의 영점은 $1 + P(s)C(s) = 0$ 의 근과 같다. 따라서, 시스템 $P(s)$ 가 PID 제어기 $C(s)$ 로 안정화가 가능하다면 $V(s) = C^{-1}(s)$ 인 $(P + V)(s)$ 는 최소 위상 시스템이다. 또한, 식 (8)의 형태에 의해 저주파 대역에서 $V(s) \approx 0$ 이므로 조건 2를 만족하고, $(P_n + V)(s) \approx P_n(s)$ 이므로 그림 4는 그림 3과 유사하다고 생각할 수 있다. 따라서, 그림 4와 같은 외란 관측기를 구성할 수 있다.

PID 제어기 설계에 관해서는 많은 참고문헌을 찾을 수 있고, 간단한 시스템에 대해서는 비교적 쉽게 V -필터를 설계할 수 있다(3장 예제 1). 본 논문에서는 논문 [13]에서 제안된 반복 선형 행렬 부등식을 이용하여 간단하게 V -필터를 설계할 수 있음을 보인다. 이 때, PID 제어기 설계 문제를 정적 출력 궤환 (SOF) 안정화 문제로 고쳐 생각한다.

시스템의 상태 공간 방정식이 다음과 같다. 식에서 x 는 상태; u 는 제어 입력; y 는 시스템의 출력이다.

$$(P): \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, x \in R^n, u \in R^m \\ y = Cx, y \in R^p. \end{cases} \quad (9)$$

정적 출력 제환(SOF) 안정화 문제란 제어 입력 $u = -Fy$ (단, $F \in R^{m \times p}$)를 이용하여 폐루프 시스템 행렬 ($A - BFC$)의 모든 고유치가 음의 실수부를 갖도록 하는 문제이다. Cao 등은 행렬 부등식을 이용하여 출력 제환 이득 행렬 F 를 계산하는 반복적인 선형 행렬 부등식(LMI) 알고리즘을 제시하였다.[13] 이는 아래와 같은 최적화 문제를 푸는 것이다.

$$\begin{aligned} & \min \alpha_i \\ & \min \text{trace}(P_i) \\ \text{subject to:} & \\ & \begin{bmatrix} A^T P_i + P_i A - X_i B B^T P_i - P_i B B^T X_i + X_i B B^T X_i - \alpha_i P_i & (B^T P_i + FC)^T \\ (B^T P_i + FC) & -I_m \end{bmatrix} < 0 \\ & P_i = P_i^T > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

위의 LMI를 V-필터 설계에 적용하기 위한 과정은 아래와 같다. 다음 PID 제어 규칙을 고려한다.

$$\begin{aligned} u &= - \left(K_i \int y + K_p y + K_d \dot{y} \right) \\ &= -K_i x_i - K_p y - K_d (CAx + CBu) \end{aligned} \quad (11)$$

단, $x_i = \int y dt$ 이다. $J := 1 + K_d CB$ 라고 정의하면 위 식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= -J^{-1} K_i x_i - J^{-1} K_p y - J^{-1} K_d CAx \\ &= -K_1 x_i - K_2 Cx - K_3 CAx \end{aligned} \quad (12)$$

이득 K_1, K_2, K_3 를 얻기 위해 다음과 같은 시스템에 대한 LMI 알고리즘 (8)을 이용한다.

$$(P_\alpha): \begin{cases} \dot{z} = A_\alpha z + B_\alpha u, \\ \bar{y} = C_\alpha z, \end{cases} \quad (13)$$

단, $z = \begin{bmatrix} x_i \\ x \end{bmatrix}$, $A_\alpha = \begin{pmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{pmatrix}$, $B_\alpha = \begin{pmatrix} 0 \\ B \end{pmatrix}$ 이고, $C_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & C \end{pmatrix}$ 혹은 $C_\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & C \\ 0 & CA \end{pmatrix}$ 이다. 행렬 C_α 는 각각 PI 제어기 및 PID 제어기 설계를 위한 가상의 출력 행렬이다.

LMI 알고리즘으로 이득 행렬 K_1, K_2, K_3 를 얻은 후에 $K_d = JK_3 = (1 + K_d CB)K_3$ 에서 $K_d = K_3(1 - CBK_3)^{-1}$ 이고, $K_i = JK_1$ 와 $K_p = JK_2$ 를 얻는다. 즉, 시스템 (10)에 대한 SOF 이득을 통해 PID 이득을 찾아 V-필터를 설계할 수 있다. 알고리즘 (8)과 SOF에 관한 더 자세한 내용은 논문 [13]과 그 참고문헌을 참고한다.

다음 절에서는 간단한 시스템에 대한 설계 예를 통해 위에서 설명한 제어기 설계 방법을 확인하고, 외란에 대한 폐루프 시스템의 성능을 시험한다.

3. 설계 예제

본 절에서는 두 가지 예제를 통해 제안한 외란 관측기 설계 방법을 설명한다. 첫 번째 예제에서는 간단한 시스템에 대해 특별한 과정없이 V-필터를 쉽게 설계할 수 있음을 보이고, 두 번째 예제에서는 다른 비최소 위상 시스템에 대해 본 논문에서 제안된 외란 관측기의 성능을 시험한다.

예제 1. 아래와 같이 주어진 비최소 위상 시스템을 고려한다.

$$P_n(s) = \frac{10-s}{s^2+10s+10} \quad (14)$$

위와 같이 간단한 시스템에 대해서는 앞 절의 조건을 만족하는 V-필터를 비교적 쉽게 찾을 수 있다. 먼저, 전달함수 분자를 살펴보면 아래와 같은 필터 $V_1(s)$ 를 생각할 수 있다.

$$V_1(s) = \frac{2s}{s^2+10s+10} \quad (15)$$

또한, 앞 절의 LMI를 이용하면 아래와 같이 시스템 $(P_n + V_2)(s)$ 가 최소 위상이 되도록 하는 PI 제어기를 구할 수 있다.

$$C(s) = V_2^{-1}(s) = \frac{8.434s+7.482}{s} \quad (16)$$

예제 2. 다음의 비최소 위상 시스템에 대한 외란 제거 문제를 생각한다.

$$P_n(s) = \frac{1}{s(s+1)} \frac{(4-s)}{(4+s)} \quad (17)$$

먼저 최소 위상 시스템에 대한 기존 결과를 이용하기 위해 아래와 같은 최소 위상 시스템인 $P_1(s)$ 혹은 $P_2(s)$ 를 (17)식 대신 고려할 수 있다. 하지만, 모의실험 결과 외란의 영향이 제거되지 않음을 확인하였다.

$$P_1(s) = \frac{1}{s(s+1)} \frac{1}{(4+s)} \quad (18)$$

$$P_2(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (19)$$

이제 앞 절의 LMI (8)을 이용하여 아래와 같은 V-필터를 설계하였다.

$$V(s) = \frac{s}{3.5s^2+3.5s+1} \quad (20)$$

위와 같이 설계된 V-필터의 성능을 해석하기 위해 먼저 $P_n(s)$ 와 $(P_n + V)(s)$ 의 보드선도를 그림 6에서 비교하였다. 그림 6으로부터 저주파 외란의 주파수 대역에서 $(P_n + V)(s) \approx P_n(s)$ 임을 확인할 수 있고, 이는 비최소 위상 시스템인 $P_n(s)$ 대신 최소 위상 시스템인 $(P_n + V)(s)$ 를 외란 관측기 설계에 이용할 수 있음을 뜻한다.

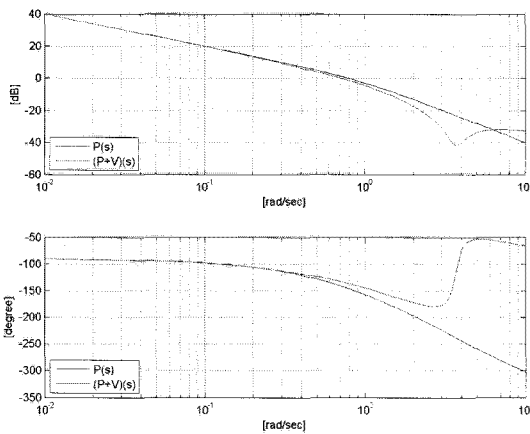


그림 6 P(s)와 (P+V)(s)의 보드
Fig. 6 Bode Plots of P(s) and (P+V)(s)

제어 대상 시스템 $P(s)$ 와 모의실험 환경은 아래 표 1과 같다. 표 1의 주제어기 $C(s)$ 는 계단응답에 대한 정착시간이 4초 이하가 되도록 결정하였다. 모의실험 결과는 그림 7과 같다.

표 1 시뮬레이션 환경
Table 1 Simulation Environment

시스템 P(s)	$\frac{-s+5}{s(s^2+6s+5)}$
주제어기 C(s)	$\frac{s+1}{0.001s+1}$
외란	크기 1, 각 주파수 0.1 (사인파)
Q-필터	m = 4, n = 1, 시상수: 0.01
기준입력	크기 1, 주기 20 (구형파)

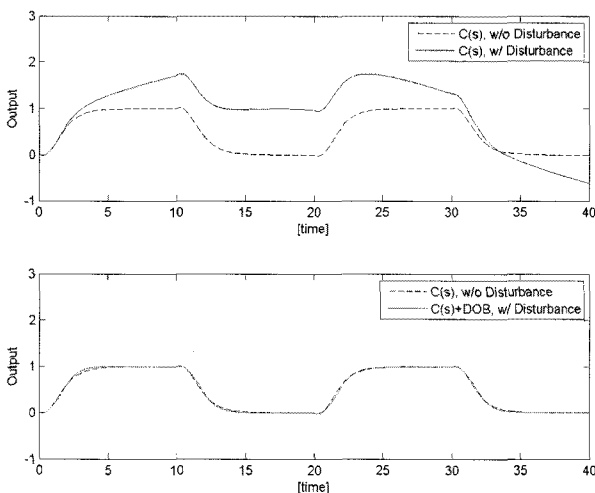


그림 7 제안된 외란 관측기 모의실험 결과
Fig. 7 Simulation Results with Proposed DOB

그림 7의 상단 그림은 외란 관측기를 사용하지 않았을 때 외란의 유무에 따른 성능 비교이다. 그림에서 볼 때 주제어기 만으로는 주어진 외란에 취약함을 알 수 있다.(준 시스템에 대해 과도 응답 특성을 유지하면서 외란에 강인한 주제어기 $C(s)$ 를 설계하기는 쉽지 않다.) 그림 7의 하단 그림에서 볼 때 논문에서 제안된 새로운 외란 관측기의 역할로 외란의 영향이 현격하게 줄어들었음을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 비최소 위상 시스템에 적용할 수 있는 새로운 형태의 외란 관측기 구조를 제안하고, PID 제어기로 안정화 가능한 시스템의 외란 관측기 설계를 위해 선형 행렬 부등식을 이용한 설계 기법을 소개하였다. 수치 예를 통해 새로운 형태의 외란 관측기가 비최소 위상 시스템의 외란 제거에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 외란 관측기의 성능은 V-필터에 의존적이며, 따라서 PID 제어기 외에 다른 방법을 이용한 설계 방법이 계속 연구 중이다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-611-D00013)

참 고 문 헌

- [1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers*, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [2] T. Umeno and Y. Hori, "Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 5, pp. 473-485, 1993.
- [3] H.S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 43, pp. 48-55, 1996.
- [4] C.J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," *IEEE Trans. on Contr. Sys. Tech.*, vol. 7, no. 5, pp. 513-526, 1999.
- [5] 최영진, 양광진, 정완권, 김홍록, 서일홍, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석" *제어·자동화시스템공학 논문지*, 8권 8호, pp. 655-663, 2002. 8.
- [6] P. Mattavelli, "An Improved Deadbeat Control for UPS Using Disturbance Observers," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 52 no. 1, pp. 206-212, 2005. 2.
- [7] 김성중, 손영익, 정유석, "단상 DC/AC 인버터 시스템의 부하변동을 고려한 외란 관측기 기반 제어기" *전*

자공학회 논문지, vol. 44, SC 편, no. 4, pp. 21-26, July, 2007.

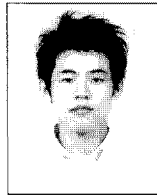
- [8] W. C. Yang and M. Tomizuka, "Disturbance rejection through an external model for nonminimum phase systems," *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 116, no. 1, pp. 39-44, 1994.
- [9] X. Chen, G. Zhai, and T. Fukuda, "An approximate inverse system for nonminimum-phase systems and its application to disturbance observer," *Systems & Control Letters*, vol. 52, pp. 193-207, 2004.
- [10] N. Bajcinca and T. Bunte, "A novel control structure for dynamic inversion and tracking tasks," *Proc. of 16th IFAC World Congress*, 2005.
- [11] M. Yan and Y. Shiu, "Theory and application of a combined feedback-feedforward control and disturbance observer in linear motor drive wire-EDM machines," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, pp. 388-401, 2008.
- [12] H. Kaufman, I. Bar-Kana, and K. Sobel, "Direct Adaptive Control Algorithms," Springer-Verlag, 2nd Ed., 1998.
- [13] Y.-Y. Cao, J. Lam, and Y.-X. Sun, "Static output feedback stabilization: an ILMI approach," *Automatica*, vol. 34, no. 12, pp. 1641-1645, 1998.
- [14] J.C. Doyle, B. Francis, and A. Tannenbaum, *Feedback Control Theory*, Macmillan Publishing, 1992.
- [15] H. Shim and Y. Joo, "State space analysis of disturbance observer and a robust stability condition," *Proc. of Conf. on Decision and Control*, pp. 2193-2198, Dec., 2007.
- [16] H. Shim, N.H. Jo, and Y.I. Son, "A new disturbance observer for non-minimum phase linear systems," *Proc. of American Control Conference 2008*, pp. 3385-3389, June 11-13, 2008.

저 자 소 개



손 영 익 (孫 瑛 翼)

1995년 서울대학교 전기공학과 졸업.
2002년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(공학). 2007년-2008년 Cornell University Visiting Scholar. 2003년~현재 명지대학교 전기공학과 부교수.
Tel : 031-330-6358
E-mail : sonyi@mju.ac.kr



김 성 종 (金 晟 鍾)

2006년 명지대학교 전기공학과 졸업.
2008년 동 대학원 전기공학과 석사. 2008년~현재 Intech-FA 연구원
주관심분야 : 제어이론 및 적용, DSP를 이용한 제어기 설계, 임베디드 시스템
Tel : 031-786-6344
E-mail : sjkim@intech-fa.co.kr



정 구 종 (鄭 求 種)

2008년 명지대학교 전기공학과 졸업.
2008년~현재 명지대학교 전기공학과 석사과정.
주관심분야: 제어이론 및 적용, 임베디드 시스템
Tel : 031-330-6358
E-mail : gold85@mju.ac.kr



심 형 보 (沈 亨 輔)

1993년 서울대학교 전기공학과 졸업.
2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 2003년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 조교수.
Tel : 02-880-1745
E-mail : hshim@snu.ac.kr