

시간 지연을 갖는 시스템에 대한 외란 관측기 기반 강인 제어기 설계

정구종*, 손영익*, 정유석*

* 명지대학교 전기공학과 (E-mail: (gold85, sonyi, jeong)@mju.ac.kr)

Design of Disturbance Observer-Based Robust Controller for a Time-Delay System

Goo-jong Jeong*, Young-ik Son*, Yu-seok Jeong*

* Department of Electrical Engineering, Myongji University (E-mail: (gold85, sonyi, jeong)@mju.ac.kr)

Abstract - This paper considers design of a robust controller that alleviates disturbance effects and compensates performance degradation of plants with time-delay. Disturbance observer(DOB) approach as a tool of robust control has been widely employed in industry. However, since the time-delay makes the plant non-minimum phase, classical DOB cannot be applied directly to the time-delay system. By using a new DOB structure for non-minimum phase systems together with the Smith Predictor, we propose a new control algorithm for reducing the effects of disturbance and time-delay of the system.

1. 서 론

시간지연이 존재하는 시스템의 안정성과 제어 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대표적으로 스미스 예측기를 사용한 제어 알고리즘을 생각할 수 있다.[1] 스미스 예측기를 사용하면 시간지연 요소를 페루프 시스템의 특성방정식에서 제거할 수 있어 시스템을 효과적으로 제어할 수 있다. 하지만 시간지연과 함께 외란이 존재하는 경우에 대해서는 일반적으로 그 성능을 보장할 수 없다.

한편, 외란으로 인한 시스템 성능 저하를 보상하는 방법으로 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)를 적용한 제어기법이 활발하게 연구되고 있다.[2] 다만 외란 관측기는 공칭 시스템 전달함수의 역을 사용하기 때문에 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템에 대해서는 직접 적용할 수 없다는 단점이 있다.[3] 공칭 시스템이 최소 위상인 경우에도 시간 지연항 $e^{-\lambda s}$ 을 Pade 근사하면 비최소 위상 시스템을 얻게 되며, 이로 인해 시간지연이 존재하는 시스템에 대한 외란 관측기 적용 연구는 매우 제한적으로 진행되고 있다.

본 논문에서는 시간지연이 존재하는 시스템에 대한 외란을 보상하기 위한 제어 기법을 제안한다. 먼저, 스미스 예측기를 이용하여 시간지연으로 인한 제어성능의 저하 및 불안정성을 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 최근 연구 결과를 활용하여 외란의 영향을 감소시킨다.[4] 간단한 시스템에 대한 모의실험을 통해 제안된 방법의 적용 가능성을 확인한다.

2. 본 론

2.1 스미스 예측기의 구조

시간지연을 갖는 시스템의 전달함수 $P^*(s)$ 는 시간지연을 가지지 않는 시스템의 전달함수 $P(s)$ 와 시간지연 전달함수 $e^{-\lambda s}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 스미스 예측기는 시간지연 요소를 루프 밖으로 빼내고 유한한 상태공간 표현이 가능한 $P(s)$ 만을 기초로 제어 시스템을 설계할 수 있는 구조이다.[1]. 그림 1에서 $D(s)$ 는 시간 지연이 없는 $P(s)$ 에 대하여 설계된 제어기이다. 페루프 시스템의 전달함수는 아래 식과 같다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{D(s)P(s)}{1 + D(s)P(s)} e^{-\lambda s} \quad (1)$$

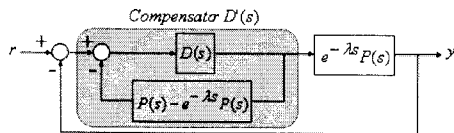


그림 1. 스미스 예측기의 구조

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기 구조

본 논문에서 사용한 외란 관측기의 구성은 그림 2와 같다. $P(s)$ 는 실제 시스템 전달함수, $P_n(s)$ 는 공칭 시스템 전달함수, $Q(s)$ 는 Q -필터의 전달함수, d 는 외란, ξ 는 측정 잡음이다. Q -필터는 저주파 통과필터로써 아래 식과 같은 Binomial 형태를 사용한다[2].

$$Q_{nm}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n m C_i (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (2)$$

최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기에서 $V(s) = 0$ 이다. 공칭시스템

$P_n(s)$ 이 비최소 위상 시스템일 경우에는 $P_n^{-1}(s)$ 의 극점이 우반평면에 존재하므로 이 시스템은 발산하기 쉽다. 이 문제점을 해결하기 위해 그림 2와 같이 $V(s)$ 를 병렬 연결한다. $V(s)$ 는 $(P_n + V)(s)$ 를 최소 위상 시스템으로 만들어 외란 관측기를 적용할 수 있게 만든다.[4]

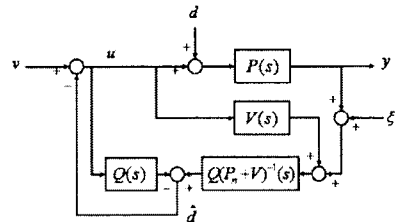


그림 2. 비최소 위상 시스템의 외란 관측기

추정된 외란 \hat{d} 과 실제 외란 d 의 오차를 줄이기 위해서는 외란의 주파수에서 $V(s) \approx 0$ 이 되도록 $V(s)$ 를 설계한다[3]. 그림 2에 대한 출력 y 의 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{P(P_n + V)}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} \nu + \frac{P(P_n + V)(1 - Q) + PVQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} d - \frac{PQ}{(P_n + V)(1 - Q) + (P + V)Q} \xi \quad (3)$$

저주파 영역에서 $Q(s) \approx 1$ 이고 $V(s) = 0$ 이므로, 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s) \approx 0$ 이면 잡음에 대한 영향이 사라진다. 따라서, $y \approx P_n(s)\nu$ 임을 알 수 있다.

2.3 시간지연 시스템에 대한 외란 관측기 적용

본 논문에서는 외란이 존재하는 시간지연 시스템에 대해 그림 3과 같은 제어 방법을 제안한다. 새로운 외란 관측기와 스미스 예측기를 함께 적용함으로써 외란에 대한 영향을 줄이고 시간지연으로 인한 성능 저하를 보상할 수 있다.

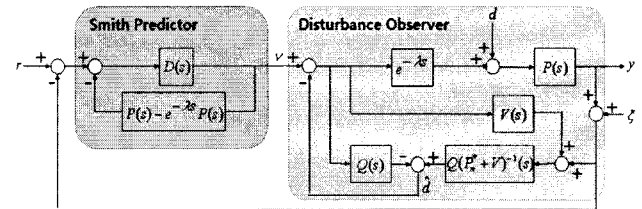


그림 3. 외란 관측기 및 스미스 예측기 적용 구조

그림 3에서 $P_n^*(s)$ 는 공칭 시스템에 시간 지연항의 Pade 근사식을 결합한 형태이다. 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{(P_n^* + V)e^{-\lambda s} P}{(P_n^* + V) - Q(P_n^* - Pe^{-\lambda s})} \nu + \frac{P(P_n^* + V) - QP_n^* P}{(P_n^* + V) - Q(P_n^* - Pe^{-\lambda s})} d - \frac{Qe^{-\lambda s} P}{(P_n^* + V) - Q(P_n^* - Pe^{-\lambda s})} \xi \quad (4)$$

저주파 영역에서 $V(s) \approx 0$ 이므로, $Q(s) \approx 1$ 이면 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s) \approx 0$ 이면 잡음에 대한 영향이 사라진다. 따라서, $y \approx P_n^*(s)\nu$ 임을 알 수 있다.

3. 설계 예제

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 시험한다. 제어 대상 시스템은 아래 식 (5)로 주어진 시스템이며 0.5초의 시간 지연이 발생하는 경우를 고려한다. 사용된 모의실험 환경은 표 1과 같다.

$$P(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (5)$$

표 1. 모의실험 변수

Q-필터	분모 (m) : 4	외란	$\sin(0.01t)$
	분모 (n) : 2	측정 잡음	$0.5\sin(200t)$
	시정수 (τ) : 0.1	기준입력 값	1

3.1 시간지연 시스템에 대한 스미스 예측기 적용

시간지연을 갖지 않는 시스템 $P(s)$ 는 아래 식의 진상제어기에 의해 안정화됨을 알 수 있다.

$$D(s) = \frac{8s + 3}{s + 1} \quad (6)$$

또한, 과도현상을 개선하기 위해 스미스 예측기 앞에 아래 지상 제어기를 추가로 사용하였다.

$$C_2(s) = \frac{0.2s + 0.4}{s + 1} \quad (7)$$

그림 4는 외란이 없는 경우에 대한 스미스 예측기의 성능 개선과 외란이 존재할 때 스미스 예측기의 모의실험 결과를 나타낸다. 과도현상은 개선되었으나, 외란의 영향을 감소시키기 어려운 경우를 나타낸다.

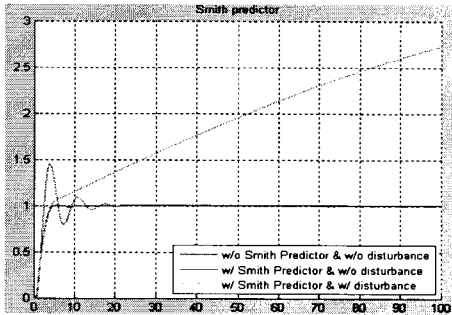


그림 4. 시간지연 시스템에 스미스 예측기 적용

3.2 시간 지연 시스템에 대한 기존의 외란 관측기 적용

제안된 외란 관측기를 적용하기에 앞서 먼저 시간 지연을 무시하고 기존의 외란 관측기를 적용하였다. 그림 5는 기존의 외란 관측기가 시간지연으로 인해 시스템을 불안정하게 하고 있음을 나타낸다.

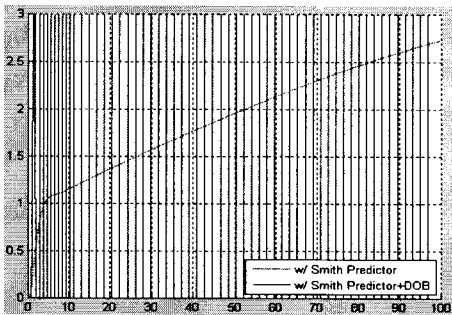


그림 5. 시간지연 시스템에 기존의 외란 관측기 적용

3.3 시간지연 시스템에 외란 관측기 설계

본 절에서는 그림 2와 같은 새로운 외란 관측기의 적용을 고려한다. 새로운 외란 관측기는 [4]에서 제안한 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기이다.

시간지연을 갖는 시스템에 대한 외란 관측기 설계를 위해 본 논문에서는 시간지연 요소 $e^{-s\tau}$ 를 Pade 1차 근사로 고려하였다. 아래 식과 같이 시간지연된 공칭 시스템을 이용한다.

$$P_n^*(s) = \frac{-s + 4}{s + 4} \times \frac{1}{s(s + 1)} \quad (8)$$

시스템 (8)은 아래와 같은 PI제어기에 의해 안정화됨을 알 수 있다.

$$C(s) = \frac{1.485s + 0.101}{s} \quad (9)$$

따라서, $V(s)$ 는 식(10)과 같이 설계할 수 있다[4].

$$V(s) = \frac{s}{1.485s + 0.101} \quad (10)$$

그림 6은 외란이 있을 때 외란 관측기 유무에 따른 모의실험 결과이다. 스미스 예측기에 비최소 위상 시스템을 위한 외란 관측기를 추가로 사용함으로써 외란의 효과를 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 스미스 예측기를 사용했을 때의 시간지연 요소 보상과 외란 관측기를 사용했을 때의 외란 제거 성능이 모두 나타난다.

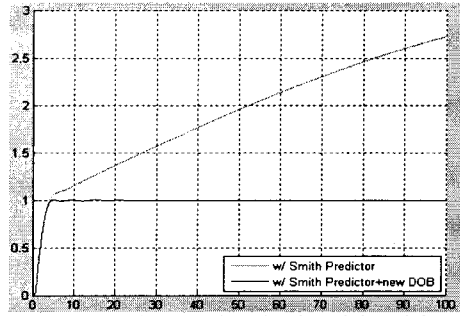


그림 6. 제안된 제어기를 이용한 모의실험 결과

아래 그림은 제안한 방법의 외란 제거 성능을 확인하기 위한 보드 선도이다. 스미스 예측기만 사용하였을 경우, 새로운 외란 관측기만 사용하였을 경우, 둘 다 사용하였을 경우에 대해서 외란에서 출력까지 전달함수의 보드 선도를 나타낸다.

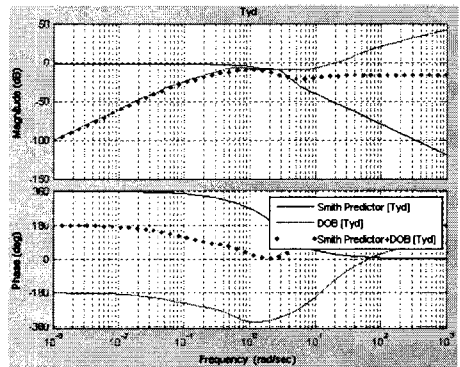


그림 7. 외란에 대한 전달함수 보드선도

스미스 예측기를 적용하면 외란의 주파수에서 -1.59dB 이고, 새로운 외란 관측기를 적용하면 외란의 주파수에서 -60.7dB 이다. 즉, 새로운 외란관측기를 적용하였을 때 외란의 영향을 감소시키는 성능이 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템에 대한 새로운 제어 방법을 제안하였다. 기존의 스미스 예측기를 적용하여 시간지연으로 인한 제어성능의 저하 및 불안정성을 보상함과 동시에 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 기반으로 시간지연 시스템에서 외란을 제거하는 방법을 제안하였다. 2차 시스템에 대한 모의실험 결과 그 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R11-2001-093-03005-0 (2008))

[참 고 문 헌]

- [1] Smith, O.J.M. "Closed control of loops with dead time". Chemical Engineering Progress, 53, May, pp 217-219, 1957
- [2] 양광진, 최영진, 정완균 "2차 시스템에 대한 이산시간 외란 관측기의 분석" 제어자동화시스템공학 논문지, 9권 6호, pp 425-434, 2003
- [3] 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.
- [4] Y.I. Son, H. Shim, N.H. Jo, and S.J. Kim, "Design of Disturbance Observer for Non-minimum Phase Systems Using PID Controllers", Proc. of SICE2007, pp. 196-201, Kagawa University, Japan, Sep. 17-20, 2007.