

시간 지연을 갖는 2차 시스템 모델링 기법을 이용한 외란 관측기 설계

論 文

58-1-29

Design of a Disturbance Observer Using a Second-Order System Plus Dead Time Modeling Technique

鄭 求 種* · 孫 瑛 翼[†]
(Goo-jong Jeong · Young-Ik Son)

Abstract - This paper presents a method for designing a robust controller that alleviates disturbance effects and compensates performance degradation owing to the time-delay. Disturbance observer(DOB) approach as a tool of robust control has been widely employed in industry. However, since the Pade approximation of time-delay makes the plant non-minimum phase, the classical DOB cannot be applied directly to the system with time-delay. By using a new DOB structure for non-minimum phase systems together with the Smith Predictor, we propose a new controller for reducing the both effects of disturbance and time-delay. Moreover, the closed-loop system can be made robust against uncertain time-delay with the help of a PID controller tuning method that is based on a second-order plus dead time modeling technique.

Key Words : Disturbance Observer, Smith Predictor, Non-minimum Phase, Time Delay, PID Control

1. 서 론

시간 지연이 존재하는 시스템의 안정성과 제어 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대표적으로 스미스 예측기를 사용한 제어 알고리즘을 생각할 수 있다[1]. 스미스 예측기를 사용하면 시간 지연 요소를 페루프 시스템의 특성방정식에서 분리하여 생각할 수 있으므로 시스템을 효과적으로 제어할 수 있다. 하지만 시간 지연 값을 정확하게 알고 있어야 하는 단점이 있고, 시간 지연과 함께 외란이 존재하는 경우에 대해서는 추가적인 제어 알고리즘 없이 그 성능을 보장할 수 없다[2-4].

본 논문에서는 시간 지연이 존재하는 시스템에 대해 외란을 보상하는 제어기 설계 방법을 제안한다. 이는 참고문헌 [2-4]에서와 같이 스미스 예측기와 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)를 함께 사용하는 방법이다. 외란 관측기를 사용하는 제어 기법의 장점은 기존에 설계된 제어기에 관측기를 추가적으로 사용함으로써 외란과 시스템의 불확실성에 대처할 수 있다는 것이다. 다만 시간 지연 시스템에 대한 앞선 논문들의 외란 관측기는 시스템의 동특성에 외란의 동특성을 추가하여 얻어진 확장 시스템에 Luenberger 관측기를 사용하는 방법이며 상수 값을 갖는 외란만을 고려하고 있다. 즉, $d(t) = 0$ 이다[2-4]. 따라서 시변 외란에 대해서는 외란 제거 성능을 보장할 수 없는 한계가 있다.

위에서 언급한 외란 관측기와는 달리 가장 활발하게 연구

되고 사용되는 외란 관측기는 참고문헌 [5-11]에서와 같이 공칭 시스템의 역을 사용하여 외란을 추정하는 방법이다. 많은 실제적인 문제에 성공적으로 적용되고 있는 이 방법의 단점은 공칭 시스템 전달함수의 역을 사용하는 성질로 인해 그 적용 범위가 영점이 없거나 좌반평면에만 존재하는 최소 위상 시스템으로 제한적인 것이다[12-14]. 본 논문에서와 같이 시간 지연을 갖는 시스템은 공칭 시스템이 최소 위상인 경우에도 시간 지연항을 Pade 근사하면 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템을 얻게 되므로 이러한 외란 관측기를 바로 적용할 수 없다.

본 논문에서는 시간지연이 존재하는 시스템의 외란을 보상하기 위해 전통적인 외란 관측기 설계 방법[5-11]에 추가적으로 참고문헌 [15]에서와 같이 병렬 보상기 설계를 이용하는 방법을 사용한다[13,14]. 이때, 병렬 보상기는 PID 제어기를 설계하여 그 역수를 이용한다.

시간 지연이 존재하는 시스템의 제어기를 구성할 때 반드시 고려해야할 점 중의 하나는 시간 지연이 유동적인 경우이다. 즉, 설계된 제어기가 다소 유동적인 시간 지연에 대해서도 최소한의 성능을 보장할 수 있어야 한다. 참고 논문 [16]에서는 시간 지연항을 갖는 2차 시스템으로 준 시스템을 축소하는 모델링 기법을 통해 유동적인 시간 지연에 대해 강인한 제어기를 제안하였다. 본 논문에서는 가변적인 시간 지연으로 인한 불확실성에 대한 강인성을 향상시키기 위해 논문 [16]에서 제안된 PID 튜닝 방법을 사용하여 병렬 보상기를 설계한다. 이 방법은 시스템의 계수 및 지연 시간 등에 존재하는 불확실성에 대해 강인한 제어기를 설계할 수 있게 한다[16,17].

논문의 구성은 2.1절에서 스미스 예측기를 소개하고 논문에서 사용한 외란 관측기의 기본 구조로서 최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 살펴본다. 2.2절에서는 PID 제어기

[†] 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

* 準 會 員 : 明知大學校 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2008年 8月 19日
最終完了 : 2008年 11月 25日

의 역인 V-필터를 이용한 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 설계 방법을 소개하고, 2.3절에서는 본 논문에서 제안하는 제어기의 설계 과정을 설명한다. 이 때, 시간 지연을 갖는 2차 시스템 근사 기법에 근거한 제어기를 사용한다. 제안된 제어 기법의 성능을 시험하기 위해 논문 [16]의 시스템에 대해 모의실험하고 기존 방법과 외란 제거 성능을 비교한다.

2. 본 론

본 논문에서는 그림 1과 같이 시간 지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템을 고려한다. 시간 지연과 외란의 영향을 감소시키기 위해 스미스 예측기와 외란 관측기가 함께 사용된다. 제안하는 제어기의 소개에 앞서 두 제어 방법의 특징을 간단히 살펴본다.

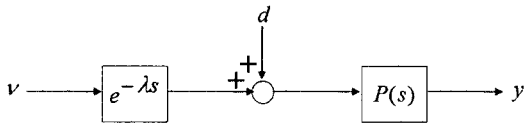


그림 1. 제어 대상 시스템
Fig. 1. System under Consideration

2.1 스미스 예측기 및 외란 관측기의 기본 구조

스미스 예측기는 그림 2와 같은 구조의 제어기 $D(s)$ 를 의미한다[1,2]. 그림에서 $\lambda = \hat{\lambda}$ 이고, $P(s) = \hat{P}(s)$ 일 때, 페루프 시스템 전달함수는 아래 식과 같이 표현되므로 제어기 $D(s)$ 는 시간 지연이 없는 $P(s)$ 에 대해 설계하면 된다.

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

한편, $\lambda \neq \hat{\lambda}$ 이거나 $P(s) \neq \hat{P}(s)$ 인 경우에는 스미스 예측기의 성능을 보장할 수 없고, 제어기 $D(s)$ 의 역할이 더욱 중요하다. 편의를 위해 전달함수 $P^*(s)$ 를 $P(s)$ 와 $e^{-\lambda s}$ 의 곱으로 정의한다. 즉, $P^*(s) = e^{-\lambda s} P(s)$ 이다.

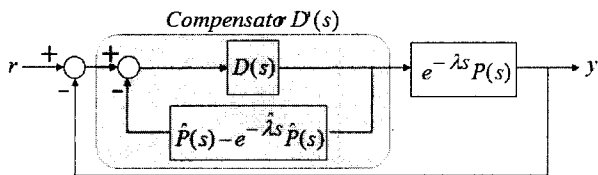


그림 2. 스미스 예측기
Fig. 2. Smith Predictor

일반적인 외란 관측기는 그림 3과 같은 구조를 갖는다. 그림 3은 그림 4의 점선 부분에 해당하며 외란(d) 및 측정 잡음(ξ)을 고려하여 외란 관측기가 추가된 그림이다. 그림에서 $P(s)$ 와 $P_n(s)$ 는 각각 제어 대상 시스템 및 공칭 시스템을 나타내고, $Q(s)$ 는 Q-필터라고 불리는 저주파 통과 필터이다. 입력 v 는 그림 4와 같이 주제어기 $C(s)$ 에서 생성되는 제어 입력 신호이다.

외란 관측기 설계 문제는 $P(s) = P_n(s)$ 일 때 그림 4와 같은 페루프 시스템이 만족할 성능을 갖도록 하는 제어기

$C(s)$ 가 존재함을 먼저 가정한다. 이때 시스템에 존재하는 불확실성($P(s) \neq P_n(s)$)과 외란 d 의 영향으로 그림 4의 페루프 시스템 성능이 저하될 경우, 그림 3과 같이 추가적으로 설계된 외란 관측기는 (외란이 없는) 그림 4의 페루프 시스템과 같은 성능을 유지하도록 한다. 이와 같이 외란 관측기 (내부 루프 제어기)는 주제어기(혹은 외부 루프 제어기)에 독립적으로 설계할 수 있다는 것이 외란 관측기를 사용하는 장점 중 하나이다.

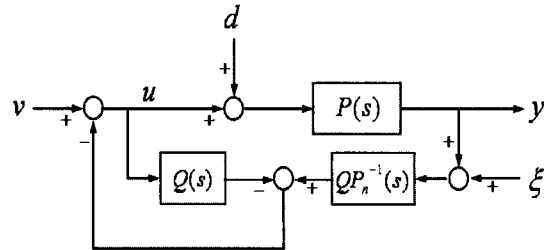


그림 3. 외란 관측기의 구조
Fig. 3. Structure of DOB

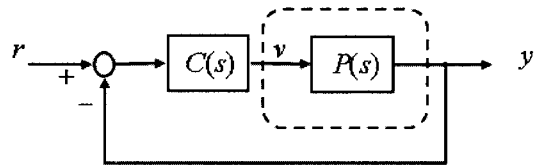


그림 4. 페루프 제어 시스템
Fig. 4. Closed-Loop System

한편, 그림 3에서 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. 필터에 대한 자세한 내용은 논문 [8,9]를 참조한다. 본 논문의 모의실험에서는 아래 식과 같은 Binomial 형태를 사용하였다[9].

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

그림 3에서 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다.

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

플랜트 $P(s)$ 의 성질로 인해 많은 경우 고주파 외란의 영향은 무시할 수 있기 때문에 일반적으로 외란 d 는 저주파 신호이고 측정 잡음 ξ 는 고주파 신호라고 가정한다[2-9]. 식 (3)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, 식 (2)에

서 $\tau \ll 1$ 일 때가 이상적인 경우이다. 이 때, 식 (3)은 아래와 같이 근사될 수 있으며 이는 그림 4와 같다[5-9].

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

다음 절에서는 시간 지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템의 외란 관측기 설계를 위해 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 소개하고 새로운 제어기 설계 방법을 제안한다.

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기

본 절에서는 시스템 전달함수의 영점이 복소평면의 우반 평면에 존재하는 비최소 위상(non-minimum phase) 시스템에 대한 외란 관측기 설계 문제를 생각한다[13,14]. 외란 관측기는 $P_n^{-1}(s)$ 를 사용하므로 준 시스템이 비최소 위상인 경우 $QP_n^{-1}(s)$ 는 불안정한 시스템이다. 결국 그림 3과 같은 외란 관측기의 성능과 안정성을 보장하기 위해서는 준 시스템이 최소 위상이어야 함을 알 수 있다[12]. 본 논문에서 사용한 외란 관측기의 구성은 그림 5와 같다.

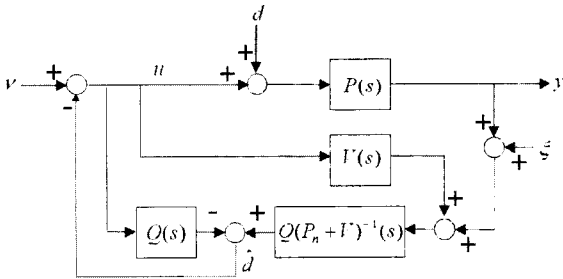


그림 5. 비최소 위상 시스템의 외란 관측기
Fig. 5. DOB for Non-minimum Phase System

잘 알려진 바와 같이 피드백 연결에 의해서는 시스템의 영점을 옮길 수 없으므로, 병렬 보상기 $V(s)$ (V-필터)를 이용한다[15]. 설계 과정은 먼저 시스템 $(P_n + V)(s)$ 가 최소 위상 시스템이 되도록 $V(s)$ 를 설계한다. 이 때, 그림 5의 외란 관측기가 제대로 동작하기 위해서는 설계된 V-필터가 관심을 갖는 외란의 주파수 대역에서 $(P + V)(s) \approx P(s)$ 인 추가적인 성질을 만족해야 한다[13]. 이와 같은 성질을 만족하는 $V(s)$ 를 찾기 위한 방법으로 아래와 같은 PID 제어기를 생각한다.

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (4)$$

시스템 $P(s)$ 가 PID 제어기 (4)에 의해 안정하다면 특성방정식 $1 + P(s)C(s) = 0$ 의 근은 모두 좌반평면(LHP)에 위치하게 된다. 한편, 전달함수 $(P + C^{-1})(s)$ 의 영점은 $1 + P(s)C(s) = 0$ 의 근과 같음에 착안하여 $V(s) = C^{-1}(s)$ 로 결정하면 $(P + V)(s)$ 는 최소 위상 시스템이다. 또한, 식 (4)의 형태에 의해 저주파 대역에서 $V(s) \approx 0$ 이므로 $(P_n + V)(s) \approx P_n(s)$ 을 만족한다. 결국 $P(s)$ 를 안정하게 하는 제어기의 역수로 그림 5와 같은 외란 관측기를 설계할 수 있다.

다음 절에서는 스미스 예측기와 새로운 외란 관측 기법을 이용하여 시간 지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템에 대

한 제어기를 제안한다.

2.3 시간 지연과 외란을 갖는 시스템에 대한 제어기 설계

시간 지연을 갖는 시스템에 대한 외란 관측기를 설계하기 위해 본 논문에서는 시간 지연항의 Pade 근사식을 이용한다. 준 시스템이 최소 위상 시스템이더라도 시간 지연항의 근사로 인해 제어 대상 시스템은 비최소 위상 시스템이 된다. 따라서, 일반적인 외란 관측기는 적용할 수 없으므로 2.2 절에서 소개한 외란 관측기를 활용한다. 이는 시간지연 시스템에 비최소 위상 시스템 외란 관측기를 적용한 첫 결과이다.

외란 관측기와 함께 사용될 그림 4의 주제어기는 시간 지연을 보상하기 위한 스미스 예측기를 이용한다. 그러나 스미스 예측기만으로는 유동적인 시간 지연에 대해서 그 성능을 보장할 수 없으므로, 시간 지연의 불확실성에 대해 강인한 제어기 $D(s)$ 가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 Wang 등에 의해 제안된 PID 제어기 튜닝 방법을 사용한다 [16]. 이 방법은 시간 지연 항을 포함한 2차 근사화 모델링 기법에 기반하며, 시스템의 계수 및 지연 시간 등의 불확실성에 강인한 제어기를 제공한다.

최종적으로 본 논문에서 제안하는 제어기는 그림 6과 같다.

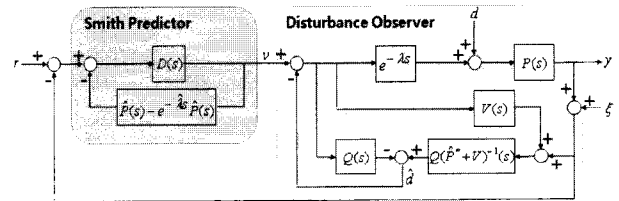


그림 6. 시간 지연 및 외란에 대한 제어기
Fig. 6. Controller for Delay and Disturbance

그림 6에서 $\hat{P}(s)$ 와 λ 는 논문 [16]에서 제안한 방법으로 근사화된 전달함수와 시간 지연 값이다. 즉, 전달함수 $e^{-\lambda s} P(s)$ 를 $e^{-\lambda s} \hat{P}(s)$ 로 근사하며, $\hat{P}(s)$ 는 분모 차수가 2차인 전달함수이다. 본 논문의 제어기는 이와 같이 시간 지연을 갖는 2차 근사식을 기준으로 설계된다.

그림에서 $\hat{P}(s)$ 는 $\hat{P}(s)$ 와 시간 지연항 $e^{-\lambda s}$ 의 Pade 근사식이 결합한 형태이며 외란 관측기의 공칭시스템으로 사용된다. 스미스 예측기의 $D(s)$ 와 외란 관측기의 $V(s)$ 는 2차 근사화 모델링 기법에 기반한 PID 튜닝 방법으로 설계한다. 이때, $V(s)$ 는 $D(s)$ 의 역수이다.

그림 6에서 제안된 폐루프 시스템의 출력 y 는 다음과 같다.

$$y = \frac{(\hat{P} + V)e^{-\lambda s} P}{(\hat{P} + V) - Q(\hat{P} - Pe^{-\lambda s})} v + \frac{P(\hat{P} + V) - Q\hat{P}P}{(\hat{P} + V) - Q(\hat{P} - Pe^{-\lambda s})} d - \frac{Qe^{-\lambda s} P}{(\hat{P} + V) - Q(\hat{P} - Pe^{-\lambda s})} \xi \quad (5)$$

앞 절의 해석과 같이 외란 d 는 저주파 신호이고 측정 잡음 ξ 는 고주파 신호라고 가정한다[2-9]. 위 식을 살펴보면 저주파 영역에서 $V(s) \approx 0$ 이고 $Q(s) \approx 1$ 이므로 외란에 대한 영향은 무시할 수 있고, 고주파 영역에서는 $Q(s) \approx 0$ 이므로 잡음에 대한 영향이 사라진다. 결국, $y \approx \hat{P}(s)v$ 와 같은 식을 얻을 수 있다. 이는 그림 6의 외란 관측기를 통해 외란의 영향을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 따라서, 시간 지연을 갖는 시스템 $\hat{P}(s)$ 를 제어하는 주제어기(즉, 2차 근사화 모델에 기반한 PID 제어기 + 스미스 예측기)의 제어 성능을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

다음 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 적용 가능성을 살펴본다. 2차 근사 모델 기반 제어기를 이용한 스미스 예측기는 시간 지연으로 인한 성능 저하를 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기는 외란에 대한 영향을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 제안된 방법이 외란을 시불변 상수 형태로 가정한 논문 [2,3]의 방법과 비교하여 외란 제거 능력이 우수함을 확인한다.

3. 설계 예 제

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 시험한다. 대상 시스템 $P(s)$ 는 아래와 같다. 0.3초의 시간 지연이 존재하는 경우를 고려한다.

$$P(s) = \frac{1}{(s^2 + 2s + 3)(s + 3)}, \lambda = 0.3[\text{sec}] \quad (6)$$

위 시스템은 아래와 같이 시간 지연을 갖는 2차 근사 모델로 나타낼 수 있다[16]. 만약 준 시스템이 논문 [16]의 조건을 만족하지 않는 경우에는 [18]과 같은 다른 PID 제어기 설계 방법을 사용할 수 있다.

$$\hat{P}(s) = \frac{1}{3.825s^2 + 6.903s + 9.573}, \hat{\lambda} = 0.523[\text{sec}] \quad (7)$$

식 (7)의 근사 모델을 기반으로 하는 PID 튜닝 방법을 사용하여 아래 식 (8)과 같은 제어기를 설계할 수 있다. 이 제어기는 비교적 넓은 범위의 λ (시간 지연)에 대해서 $e^{-\lambda s}P(s)$ 를 안정하게 한다.

$$D(s) = 3.885 + \frac{5.388}{s} + 2.153s \quad (8)$$

외란 관측기 설계에 사용되는 V-필터는 위 제어기의 역을 사용한다. 즉, $V(s) = D^{-1}(s)$ 이다. 또한, 필터 $Q(s)$ 는 식 (2)와 같은 Binomial 형태를 사용하였다. 본 논문의 모의실험에 사용된 환경은 표 1과 같다.

표 1. 모의실험 변수

Table 1. Simulation Parameters

Q-필터	분모(m) : 4	외란	3sin(0.1t)
	분모(n) : 3	측정 잡음	0.5sin(200t)
	시정수(τ) : 0.05	기준입력 값	1

3.1 시간 지연 시스템에 대한 스미스 예측기 적용

그림 7은 외란이 없을 때 스미스 예측기의 성능 개선을 나타낸다. 스미스 예측기를 사용함으로써 시간 지연으로 인한 성능 저하를 보상할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 외란이 존재할 경우 스미스 예측기의 한계를 나타낸다. 스미스 예측기만 사용하면 외란이 존재할 경우 그 영향을 상쇄하기 어렵다.

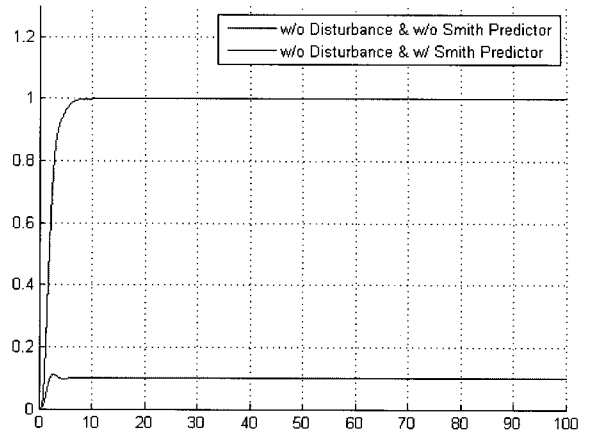


그림 7. 시간 지연에 대한 스미스 예측기의 성능
Fig. 7. Smith Predictor with Time Delay

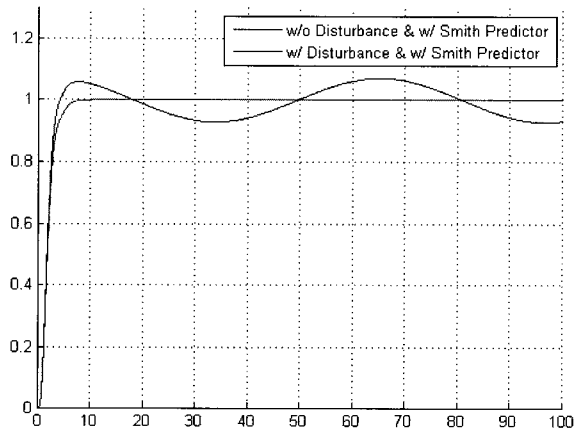


그림 8. 외란에 대한 스미스 예측기의 성능
Fig. 8. Smith Predictor with Disturbance

3.2 시간 지연 시스템에 대한 외란 관측기 설계

외란의 영향을 줄이기 위해 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 추가로 설계하였다. 본 예제에서는 시간 지연 요소를 Pade 1차 근사로 고려하였다. 식 (9)는 시간 지연을 근사한 식을 포함한 공칭 시스템이다.

$$\hat{P}(s) = \frac{1}{3.825s^2 + 6.903s + 9.573} \times \frac{-s + 3.824}{s + 3.824} \quad (9)$$

외란 관측기의 $V(s)$ 는 $D(s)$ 의 역수이므로 식 (10)과 같다.

$$V(s) = \frac{s}{2.153s^2 + 3.885s + 5.388} \quad (10)$$

그림 9는 외란이 있을 때 외란 관측기 유무에 따른 모의 실험 결과이다. 스미스 예측기와 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 사용함으로써 시간 지연 시스템에서의 외

란의 영향을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 상수 외란을 가정한 Luenberger 관측기 방식[2-3]에 비해 외란 제거 성능이 우수함을 알 수 있다.

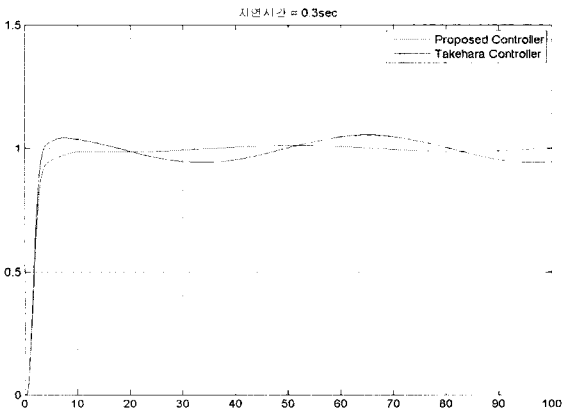
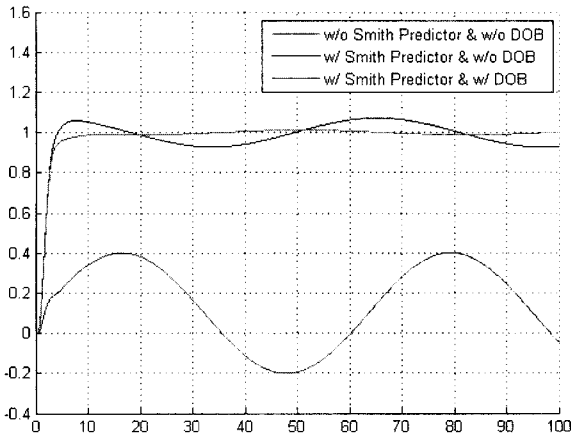
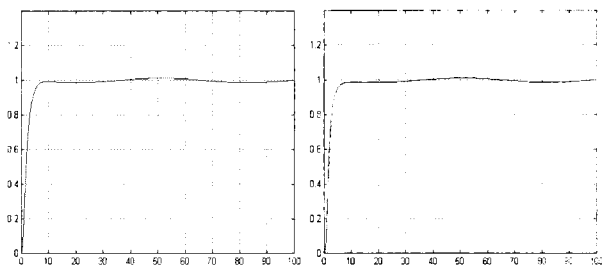


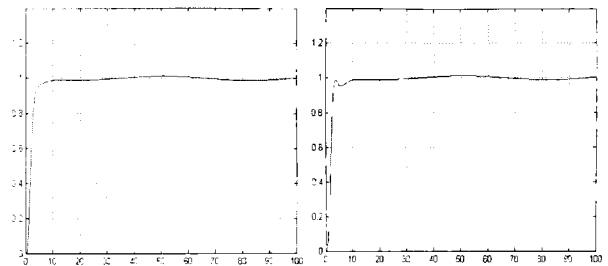
그림 9. 제안된 제어기 및 논문 [2]를 이용한 모의실험 결과
Fig. 9. Simulation Results with Proposed Controller and Reference [2]

3.3 불확실한 지연시간에 대한 시스템의 성능 변화

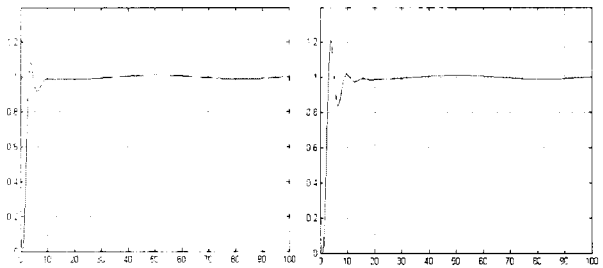
유동적인 시간 지연에 대한 성능 변화를 시험하였다. 그림 10은 지연시간 0.3초에 대해 설계된 제어기의 성능을 나타낸다. 다양한 시간 지연에도 불구하고 안정하게 외란을 제거할 수 있음을 보여주고 있다. 이는 2차 근사화 모델링 기법에 기반한 PID 제어기의 성질에서 기인한다.



(a) 시간 지연 0초 (a) Time Delay 0[Sec]
(b) 시간 지연 0.15초 (b) Time Delay 0.15[Sec]



(c) 시간 지연 0.3초 (c) Time Delay 0.3[Sec]
(d) 시간 지연 0.45초 (d) Time Delay 0.45[Sec]



(e) 시간 지연 0.6초 (e) Time Delay 0.6[Sec]
(f) 시간 지연 0.75초 (f) Time Delay 0.75[Sec]

그림 10. 지연 시간의 변화에 따른 시스템의 성능

Fig. 10. Performance for Various Time Delay

4. 결 론

본 논문에서는 시간 지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템에 대한 외란 제거 문제를 다루었다. 스미스 예측기를 적용하여 시간 지연으로 인한 제어성능의 저하 및 불안정성을 보상함과 동시에 시간 지연으로 사용이 불가능한 기존의 외란 관측기를 대신하는 비최소 위상 시스템 외란 관측기를 설계하였다. 이는 시간지연 시스템에 대해 비최소 위상 시스템 외란 관측기를 적용한 첫 결과이다. 2차 근사화 모델링 기법과 이를 이용한 PID 제어기 설계 방법을 활용함으로써 불확실한 시간 지연에 대해서 제안된 제어기의 강인성을 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통해 확인하였다. 또한, 상수 외란을 가정한 Luenberger 관측기 방식에 비해 외란 제거 성능이 우수함을 관찰할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R11-2001-093-03005-0 (2008))이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-611-D00013)

참 고 문 헌

- [1] O.J.M. Smith, "Closed control of loops with dead time," *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp 217-219, May, 1957.
- [2] T. Takehara, T. Kunitake, H. Hashimoto, F. Harashima,

"The control for the disturbance in the system with time delay," *Proc. of the 4th International Workshop on Advanced Motion Control*, vol. 1, pp. 349-353, March 18-21, 1996.

- [3] K. Natori, K. Ohnishi, "An approach to design of feedback systems with time delay," *Proc. of the 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 1931-1936, Nov. 2005.
- [4] 이순영, "시간지연 시스템 제어를 위한 적응외관측자 설계" *전기학회 논문지*, vol. 56, no. 9, pp. 1676-1679, Sep., 2007.
- [5] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers*, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍, "강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석" *제어·자동화시스템공학 논문지*, vol. 8, no. 8, pp. 655-663, 2002. 8.
- [9] 양광진, 최영진, 정완균 "2차 시스템에 대한 이산시간 외란 관측기의 분석" *제어자동화시스템공학 논문지*, vol. 9, no. 6, pp 425-434, 2003
- [10] 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.
- [11] 김성중, 손영익, 정유석, "단상 DC/AC 인버터 시스템의 부하변동을 고려한 외란 관측기 기반 제어기" *전자공학회 논문지*, vol. 44, SC 편, no. 4, pp. 21-26, July, 2007.
- [12] 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.
- [13] 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, Sep. 17-20, 2007.
- [14] 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.
- [15] H. Kaufman, I. Bar-Kana, and K. Sobel, *Direct Adaptive Control Algorithms*, Springer-Verlag, 2nd Ed., 1998.
- [16] Q.-G. Wang, T.-H. Lee, H.-W. Fung, Q. Bi, Y. Zhang, "PID Tuning for Improved Performance", *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.*, Vol. 7 No. 4, pp. 457-465, 1999
- [17] 양승현, 이석원, "시간지연 시스템의 응답특성 개선을 위한 제어기 설계," *조명.전기설비학회논문지*, 제19권, 제7호, pp. 15-19, 2005. 11.
- [18] 이원혁, 황형수, "모델축소를 이용한 고차계 적분공정의 안

정한 PID 동조" *전기학회 논문지*, vol. 56, no. 11, pp. 2010-2016, Nov., 2007.

저 자 소 개



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



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