

시간 지연을 갖는 적분 공정 시스템에 대한 외란 관측기 기반 강인 제어기 설계

정구중*, 손영익*
*명지대학교 전기공학과

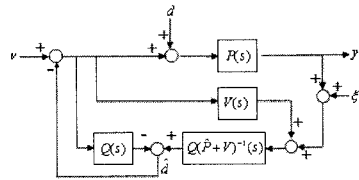
Design of Disturbance Observer-Based Robust Controller for a Integrating Process System with Time-Delay

Goo-jong Jeong*, Young-ik Son*

*NPTC, Department of Electrical Engineering, Myoungji University

Abstract - 제어대상 시스템에 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우, 스미스 예측기와 외란 관측기를 함께 사용하면 시간지연과 외란으로 인한 시스템의 성능저하를 완화할 수 있다. 또한 유동적인 시간지연에 대비하여 시간지연을 갖는 2차 시스템 모델링 기법으로 설계된 PID 제어기를 이용하면 시간지연에 대해 강인한 제어 시스템을 얻을 수 있다. 한편, 이전에 사용된 2차 시스템 모델링 기법의 적용범위가 한정되어 있어 이 방법은 적분 공정을 포함하는 시스템의 제어 문제에는 적용되지 못하였다. 본 논문에서는 적분공정을 포함하는 시스템에 적용될 수 있는 새로운 2차 시스템 모델링 기법의 PID 제어기를 통해 외란과 시간지연에 강인한 제어기 설계 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 이전의 방법과 그 성능을 비교한다.

는 그림 2와 같은 외란 관측기를 사용한다.[3,4]



〈그림 2〉 비최소 위상 시스템의 외란 관측기

1. 서 론

시간지연이 존재하는 시스템의 안정성과 제어 성능을 향상시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 한편, 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우 이를 보상하기 위하여 스미스 예측기와 외란 관측기를 함께 사용하는 제어 기법이 제안되었다.[1] 이는 스미스 예측기를 이용하여 시간지연으로 인한 제어성능의 저하 및 불안정성을 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기를 사용하여 외란의 영향을 감소시키는 방법이다.[2~4]

또한, 유동적인 시간지연에 대한 강인성을 향상시키기 위해 Wang 등에 의해 제안된 PID 튜닝기법[5]을 적용한 스미스 예측기 및 외란관측기 기반 강인 제어기가 제안되었다.[5] 이 튜닝기법은 시간지연 항을 포함한 2차 근사화 모델링 기법을 기반으로 설계하며 시스템의 계수 및 지연시간의 불확실성에 우수한 성능을 보인다.[5,6] 하지만, 2차 근사화 과정에서 위상이 $-\pi/2, -\pi$ 인 두 점만을 고려하기 때문에 실제의 모델과 축소모델 사이에 정상상태오차가 발생할 뿐만 아니라, 두 점을 지나지 않는 적분 공정에 대해서는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다.[7]

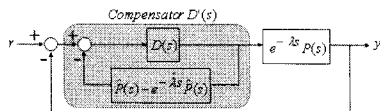
본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하고 적분 공정 시스템에 적용하기 위해 논문 [7]에서 제안한 고차계 적분공정에 대한 2차 근사화 모델링 기법을 사용한다. 이 기법은 적분 공정으로부터 적분 인자를 분리한 상태로 근사화한 후 적분 인자를 다시 결합하여 축소모델을 구한다. 이 때 0, $-\pi/2, -\pi$ 인 세 개의 점을 고려하여 근사화함으로써 정상상태 오차를 줄일 수 있다. 나아가 이를 기반으로 PID제어기를 설계한다.[7]

본 논문에서는 시간지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템에 대해 새로운 2차 근사화 모델링 기법 PID제어기를 적용하여 시간지연이 있는 적분공정 시스템에 대한 외란 관측기 기반 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 모의 실험을 통해 그 성능을 확인해 본다.

2. 본 론

2.1 스미스 예측기의 구조

스미스 예측기는 그림 1과 같으며 시간지연 요소를 루프 밖으로 빼내고 유한한 상태 공간 표현이 가능한 $P(s)$ 만을 기초로 제어 시스템을 설계할 수 있는 구조이다.[1] $D(s)$ 는 시간 지연이 없는 $P(s)$ 에 대하여 설계된 제어기이다.



〈그림 1〉 스미스 예측기의 구조

그림 1에서 폐루프 시스템의 전달함수는 아래 식과 같다.

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

본 논문에서는 제어기 설계 시 그림 1과 같이 실제 시스템 $e^{-\lambda s}P(s)$ 대신 시간지연을 갖는 2차 시스템으로 근사된 $e^{-\lambda s}\hat{P}(s)$ 를 사용한다. 이 때, 제어기 $D(s)$ 는 2차 근사화 모델링 기법에 기반한 PID 튜닝 방법으로 설계한다.[7]

2.2 비최소 위상 시스템의 외란 관측기 구조

시간지연으로 인한 비최소 위상 시스템의 외란 제거를 위해 본 논문에서

$P(s)$ 는 실제 시스템 전달함수이고, $\hat{P}(s)$ 는 2차 근사된 공정 시스템 전달함수이다, $Q(s)$ 는 Q -필터. d 는 외란, ξ 는 측정 잡음이다. 외란 관측기는 공정시스템의 역함수를 사용하기 때문에 $\hat{P}(s)$ 가 비최소 위상 시스템일 경우에는 폐루프 시스템의 불안정을 초래하기 쉽다. 본 논문에서는 $V(s)$ 를 설계하여 $(\hat{P}+V)(s)$ 를 최소 위상 시스템으로 만들어 적용한다[4]. 시간지연을 갖는 시스템은 항상 비최소 위상 시스템이 되기 때문에 위의 구조와 같은 외란관측기를 사용하였다.

일반적으로 $V(s)$ 는 $P(s)$ 를 안정화시키는 제어기의 역수를 사용하며, 추정된 외란 \hat{d} 과 실제 외란 d 의 오차를 줄이기 위해서는 외란의 주파수에서 $(\hat{P}(s)+V(s)) \approx \hat{P}(s)$ 혹은 $V(s) \approx 0$ 이 되도록 설계한다. 본 논문에서는 적분 공정을 포함한 시스템을 다루기 위해 논문 [6] 대신 [7]에서 제안한 PID 제어기의 역수를 사용한다.

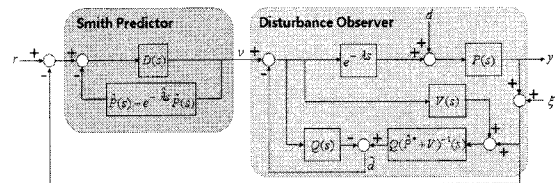
그림 2의 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{P(\hat{P}+V)}{(\hat{P}+V)(1-Q)+(P+V)Q} v + \frac{P(\hat{P}+V)(1-Q)+PVQ}{(\hat{P}+V)(1-Q)+(P+V)Q} d \quad (2)$$

저주파 영역에서 $Q(s)=1$ 이고 $|\hat{P}(s)-V(s)| \approx |\hat{P}(s)|=0$ 이면, 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s)=0$ 이면 잡음에 대한 영향이 사라진다. 따라서, $y \approx \hat{P}(s)v$ 임을 알 수 있다.[4]

2.3 시간 지연 시스템에 대한 외란 관측기 적용

시간지연과 외란이 동시에 존재하는 경우에 대해 본 논문에서는 그림 3과 같은 제어기를 제안한다. 주제어기로 사용된 스미스 예측기는 시간지연으로 인한 성능 저하를 보상하고, 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기는 외란에 대한 영향을 줄일 수 있다. 이때, 제어기 $D(s)$ 와 외란관측기의 $V(s)$ 에 따라 시간지연에 대한 강인성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.



〈그림 3〉 외란 관측기 및 스미스 예측기 적용

그림 3에서 $\hat{P}^*(s)$ 는 공정 시스템 $\hat{P}(s)$ 에 시간 지연항의 Pade 근사식을 결합한 형태이다. 위 그림에서 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다. $D'(s)$ 는 스미스 예측기의 전달함수로 $D'(s) = \frac{D(\hat{P}-\hat{P}e^{-\lambda s})}{1+D(\hat{P}-\hat{P}e^{-\lambda s})}$ 이다.

$$y = \frac{Pe^{-\lambda s}D'(\hat{P}+V)}{(1-Pe^{-\lambda s}D')(\hat{P}+V)-Q(\hat{P}^*-Pe^{-\lambda s})} r + \frac{Pe^{-\lambda s}(\hat{P}^*(1-Q)+V)}{(1+Pe^{-\lambda s}D')(\hat{P}+V)-Q(\hat{P}^*-Pe^{-\lambda s})} d - \frac{Pe^{-\lambda s}(Q+D'(\hat{P}+V))}{(1+Pe^{-\lambda s}D')(\hat{P}+V)-Q(\hat{P}^*-Pe^{-\lambda s})} \xi \quad (3)$$

위 식에서도 앞 절과 같은 해석으로 $y \approx \frac{\hat{P}^*(s)D'}{1 + \hat{P}^*(s)D'}$ 임을 알 수 있다.

3. 설계 예제

본 장에서는 모의실험을 통해 제안된 방법의 성능을 시험한다. 제어 대상 시스템은 식 (4)와 같은 적분공정을 포함한 시스템이며, 0.2초의 시간 지연이 발생한다고 가정한다.

$$P(s) = \frac{1}{s(0.1s+1)(s+1.2)}, \quad \lambda = 0.2(\text{sec}) \quad (4)$$

위 시스템을 시간지연을 갖는 2차 근사 모델로 나타내면 식(5)과 같다.[7]

$$\hat{P}(s) = \frac{1}{s(1.1202s+1.2)}, \quad \hat{\lambda} = 0.1997(\text{sec}) \quad (5)$$

위의 축소 모델을 기반으로 설계된 제어기는 식 (6)과 같다.[7]

$$D(s) = \frac{2.5538s^2 + 3.0083s + 0.5}{s} \quad (6)$$

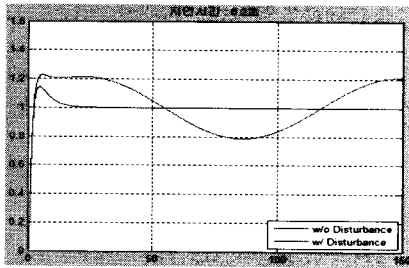
논문의 모의 실험에서 사용된 환경은 표1과 같다.

〈표 1〉 모의실험 변수

Q-필터	분모(m) : 4	외란	$\sin(0.05t)$
	분모(n) : 3	기준입력 값	1
	시정수(τ) : 0.01	-	-

3.1 시간 지연 시스템에 대한 스미스 예측기 적용

그림 4는 외란이 존재할 때 스미스 예측기만을 사용한 모의실험 결과이다. 외란으로 인해 정상상태 값이 크게 달라진다. 스미스 예측기는 시간지연으로 인한 성능 저하는 개선되는 반면 외란의 영향을 받음을 알 수 있다.



〈그림 4〉 스미스 예측기 적용 모의 실험2

3.2 시간 지연 시스템에 대한 외란 관측기 설계

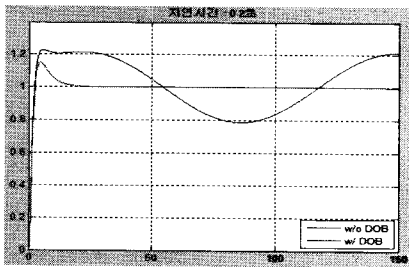
외란의 영향을 감소시키기 위해 외란관측기를 설계한다. 본 논문에서는 시간지연 요소를 Pade 1차 근사로 고려하였다. 식 (7)은 시간 지연을 포함한 공칭시스템이다.

$$\hat{P}^*(s) = \frac{1}{s(1.1202s+1.2)} \times \frac{-s+10.015}{s+10.015} \quad (7)$$

외란 관측기의 $V(s)$ 는 $D(s)$ 의 역수이므로 식 (8)과 같다.

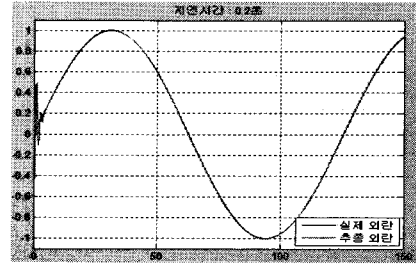
$$V(s) = \frac{s}{2.5538s^2 + 3.0083s + 0.5} \quad (8)$$

그림 5는 외란이 존재할 때 외란 관측기 유무에 따른 모의실험 결과이다. 스미스 예측기와 비최소 위상시스템에 대한 외란관측기를 사용함으로써 시간지연 시스템에서의 외란에 대한 영향을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 5〉 제안된 제어기를 이용한 모의 실험

그림 6은 제안된 외란 관측기의 외란 추종 성능이다. 외란 관측기가 실제 외란을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

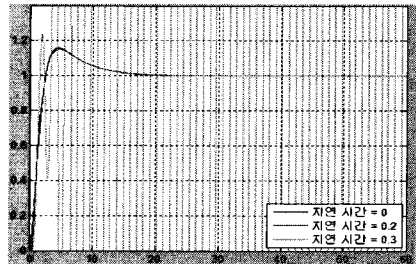


〈그림 6〉 외란 관측기의 외란 추종 성능

3.3 불확실한 시간에 대한 시스템의 성능 변화

적분공정 시스템이 아닌 경우, Wang[5]이 제안한 PID 튜닝기법을 적용하여 설계된 제어기는 불확실한 시간지연에 강인함을 보인다.[6] 본 절에서는 적분 공정 시스템에 적용된 앞 절의 제어기에 대해 불확실한 시간지연 모의 실험을 수행한다.

그림 7은 지연시간의 변화에 따른 시스템의 성능 변화를 나타낸다. 제어 시스템이 견딜 수 있는 지연시간의 범위가 크지 않음을 볼 수 있다.



〈그림 7〉 지연 시간 변화에 따른 시스템의 성능 변화

4. 결 론

본 논문에서는 시간 지연과 외란이 동시에 존재하는 시스템을 다룬다. 적분공정 시스템에 적용 가능한 제어기 설계법을 활용함으로써 모의 실험을 통하여 제안된 제어기가 시간지연과 외란에 대한 영향을 감소시키는 성능이 우수함을 확인하였다.

하지만 적용한 PID 제어기법이 적분공정인 아닌 일반적인 시스템에 적용된 기존의 PID 제어기법[5]에 비해 유동적인 지연 시간에 비교적 강인성이 크지 않음을 확인할 수 있었다. 이 점에 대해 추가적인 연구와 분석이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R11-2001-093-03005-0 (2008)) 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았다

참고 문헌

- [1] 정구중, 손영익, 정유석, "시간 지연을 갖는 시스템에 대한 외란 관측기 기반 강인 제어기 설계", 2008 정보 및 제어 심포지엄 논문집, pp. 213-214, 2008
- [2] O.J.M. Smith, "Closed control of loops with dead time". *Chemical Engineering Progress*, 53, May, pp. 217-219, 1957
- [3] 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, Japan, Sep. 2007.
- [4] 손영익, 김성중, 정구중, 심형보, "PID 제어기로 안정화 가능한 비최소 위상 시스템에 대한 외란 관측기 설계", *대한전기학회 논문지*, Vol. 57, No. 9, pp. 1612-1617, Sep, 2008
- [5] 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
- [6] 정구중, 손영익, 정유석, "시간 지연을 갖는 2차 시스템 근사를 이용한 외란 관측기 설계", 2008 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1501-1502, 2008
- [7] 이원혁, 황형수, "모델축소를 이용한 고체계 적분 공정의 안정한 PID 동조", *대한전기학회 논문지*, Vol. 56, No. 11, pp. 2010-2016, Nov, 2007