

# 시간지연시스템의 외란응답 특성 개선을 위한 외란 관측기 설계에 관한 연구

## A Design of Disturbance Observer to Improve of Disturbance Response for Time Delay Systems

이순영\*

Soon-Young Lee\*

### Abstract

Smith predictor can't be applied to the time delay systems that have poles near the origin or a pure integrator or a modeling error, because of occurring the steady state error for the step disturbance. In this paper, a new Smith predictor controller for these systems is designed to eliminate the effects of the disturbance. A disturbance observer to estimate a disturbance is proposed and a new controller is designed using the estimated disturbance. As a result, the new controller can eliminate the effects of the disturbance and modeling error. The simulation results for the steam superheater and the steam pressure systems verify the efficiency of the proposed controller.

### 요 약

원점이나 원점 근방에 있는 극을 포함하고 있는 시간지연시스템에 대하여 스미스 예측제어기를 적용할 경우 외란에 의한 정상상태 오차가 발생한다. 또한 모델링 오차가 존재할 경우에도 외란에 의한 오차 발생으로 인하여 제어기 구성이 어렵게 된다. 이에, 본 논문에서는 이러한 시스템들에 대한 외란의 영향을 제거하기 위한 새로운 제어기를 구성하였다. 외란을 측정할 수 있는 외란관측자를 제안하였으며, 관측된 외란을 이용하여 외란의 효과를 소거할 수 있는 제어기를 구성하였다. 그 결과, 외란 및 모델링 오차의 영향을 제거할 수 있는 새로운 제어기를 설계할 수 있었다. 구성된 제어기를 발전소 과열기 및 증기압 제어에 적용하여 제안한 시스템의 효용성을 입증하였다.

*Key words* : Smith predictor, time delay, disturbance, disturbance observer, modeling error

### 1. 서론

\* Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University, RIGET

★ Corresponding author

E-mail:leesy@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-1711

※ Acknowledgment

This Work was Supported by Development Fund Foundation, Gyeongsang National University, 2015

Manuscript received Oct. 27, 2017; revised Dec. 8, 2017 ; accepted Dec. 20, 2017

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일반적으로 시간지연시스템의 제어로는 스미스 예측제어기가 주로 사용되고 있다. 이 제어기의 주된 장점은 시간지연 항이 특성방정식에서 소거되어 마치 시간지연이 없는 시스템처럼 제어기를 구성할 수 있는 것이다. 그러나 플랜트 전달함수가 원점이나 혹은 원점에 가까운 극을 포함하고 있을 경우에는 외란에 대하여 정상상태 오차가 발생하게 되고 또한 내부적으로 불안정해진다[1]. 이런 문제들을 해결하기 위하여 많은 연구들이 수행되고 있으나 조정해야 하는 파라메타들이 너무 많아지

거나, 제어기 구성이 너무 복잡하게 되어 실제 적용에 제한이 되고 있다[2]. 특히, 스미스 예측제어기 구성 시 모델링 오차가 존재하게 되면 외란에 의한 정상상태 오차가 발생하게 된다. 실제 시스템 제어에서는 모델링 오차가 항상 존재하므로 스미스 예측제어기 사용에 제약을 받게 된다.

본 논문에서는 모델링 오차를 고려한 새로운 스미스 예측제어기를 구성하였다. 시간지연 플랜트의 입력 측에 인가되는 외란을 검출할 수 있는 외란관측자를 구성하였으며, 검출된 외란을 제어기의 모델부분에 인가시킴으로써 외란의 영향을 소거할 수 있도록 하였다. 그 결과 순수 적분 항이나 큰 시정수를 갖는 플랜트에 대하여 모델링 오차 및 외란이 존재할 경우에도 정상상태오차를 빠르게 0으로 할 수 있는 새로운 형태의 제어기를 구성할 수 있었다. 구성된 제어기를 큰 시간지연과 순수 적분 항을 갖는 화력 발전소 과열기 및 증기압 제어에 적용하여 그 효용성 및 우수성을 확인하였다.

## II. 본론

### 1. 스미스 예측 제어기

모델링 오차를 갖는 시간지연 플랜트에 대한 스미스 예측제어기의 블록선도는 그림 1과 같다. 여기서  $R(s)$ 는 기준입력이고  $D(s)$ 는 계단 함수 형태의 외란이다. 또한  $G_c(s)$ 는 제어기로 PI 혹은 PID 제어기가 주로 사용된다.  $G(s)e^{-Ls}$ 는 플랜트 전달함수를  $G_m(s)e^{-L_m s}$ 는 모델링 전달함수이다.

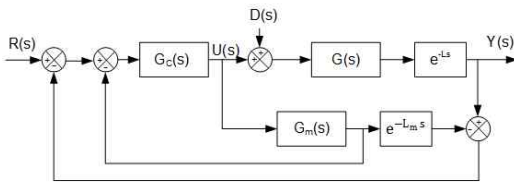


Fig. 1. Smith predictor control system.  
그림 1. 스미스 예측제어기

그림 1로부터 기준입력 및 외란에 의한 출력을 구하면 다음과 같이 된다.

$$Y(s) = H_r(s)R(s) + (H_{d1}(s) + H_{d2}(s))D(s) \quad (1)$$

여기서,

$$H_r(s) = \frac{G_c G e^{-Ls}}{P(s)} \quad (2)$$

$$H_{d1}(s) = \frac{G e^{-Ls} + G_c G e^{-Ls} (G_m - G e^{-Ls})}{P(s)} \quad (3)$$

$$H_{d2}(s) = \frac{G_c G e^{-Ls} (G e^{-Ls} - G_m e^{-L_m s})}{P(s)} \quad (4)$$

$$P(s) = 1 + G_c G_m + G_c (G e^{-Ls} - G_m e^{-L_m s}) \quad (5)$$

위의 식들로부터  $\lim_{s \rightarrow 0} H_r(s) = 1$ ,  $\lim_{s \rightarrow 0} H_{d1}(s) \neq 0$ ,

$\lim_{s \rightarrow 0} H_{d2}(s) \neq 0$  가됨을 알 수 있다. 이는 모델링

오차가 존재할 경우 외란에 대한 정상상태 오차가 발생하게 됨을 의미한다. 특히, 모델링 오차는 어느 정도 존재하는 경우가 많으므로 스미스 예측제어기의 사용에 제약이 따르게 된다. 또한 모델링 오차가 없을 경우에도 플랜트의 전달함수가 순수 적분 항을 포함하고 있거나 허수축에 가까운 극점을 가지고 있는 경우 외란에 대하여 정상상태 오차가 존재하게 되고, 내부적으로 불안정하게 될 수도 있다. 그러나 외란을 측정할 수 있고 측정된 외란을 그림 2와 같이 모델에 인가시킬 수 있다면 외란의 영향을 상쇄시킬 수 있다[3].

그림 2로부터 외란에 대한 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$Y_d(s) = H_d(s)D(s) = \frac{G e^{-Ls}}{P(s)} D(s) \quad (6)$$

이 전달함수로부터  $\lim_{s \rightarrow 0} H_d(s) = 0$ 이 되어 계단입

력 형태의 외란에 대한 출력이 0이 됨을 알 수 있다. 이는 외란을 검출하여 제어기에 인가시킴으로써 외란의 영향을 제거할 수 있으며, 또한 전체계의 안정도 또한 보장할 수 있음을 의미한다.

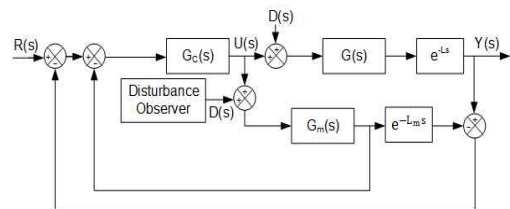


Fig. 2. Smith predictor control system using estimated disturbance.

그림 2. 검출된 외란을 이용한 스미스 예측 제어기

2. 외란 관측자를 이용한 제어기 설계

본 논문에서는 외란을 측정하기 위한 외란 관측자를 그림 3과 같이 구성하였다. 그림 3으로 부터 외란관측자 출력  $O(s)$ 는,

$$O(s) = \frac{F(Ge^{-Ls} - G_m e^{-L_m s})U(s) + GFe^{-Ls}D(s)}{1 + G_m F} \quad (7)$$

여기서  $F(s)$ 는 외란관측자의 안정도와 수렴 속도를 조절할 수 있는 임의의 전달함수이다.

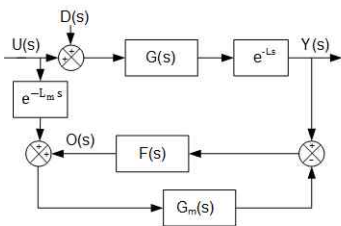


Fig. 3. Disturbance observer.  
그림 3. 외란 관측자

외란 관측자를 포함한 전체 제어기를 구성하면 그림 4와 같이 된다.

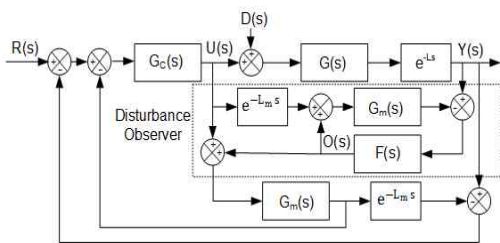


Fig. 4. Control system using a disturbance observer.  
그림 4. 외란 관측자를 이용한 제어시스템

이 블록선도로부터 제어신호  $U(s)$ 를 구하면,

$$U(s) = \frac{G_c G_m (e^{-L_m s} - 1)O(s) - G_c G e^{-Ls} D(s)}{P(s)} \quad (8)$$

위의 식 (7)과 (8)로부터  $G(s)$ 가 적분 항을 포함하고 있을 경우에는 임의의 1차 지연요소를 갖는  $F(s)$ 에 대하여  $\lim_{t \rightarrow \infty} o(t) = d$ 가 된다. 적분 항을 포함하고 있지 않은  $G(s)$ 의 경우에  $F(s)$ 를 적분 항을 포함하는 임의의 함수로 택하면  $\lim_{t \rightarrow \infty} o(t) = d$ 가 되어 외란을 검출 할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 검토

본 절에서는 구성된 제어기의 효용성을 알아보기 위하여 화력발전소 과열기 제어와 증기압 제어에 적용하여 보았다.

(가) 과열기 제어

화력발전소의 과열기 전달함수는 다음과 같이 주어진다[4].

$$G(s) = \frac{9}{56s + 1} e^{-53s} \quad (9)$$

이 시스템은 큰 지연시간과 큰 시정수를 가지고 있다. 전체계의 안정도를 고려하여 제어기는  $G_c(s) = (0.4s + 0.015)/s$ 로  $F(s) = 0.5/s(s + 200)$ 로 가정하였다. 입력으로는 단위계단 입력을 사용하였으며 외란은 200[sec]에서  $d = 0.6$ 을 인가하였다. 출력과 검출된 외란을 그림 5에 나타내었다.

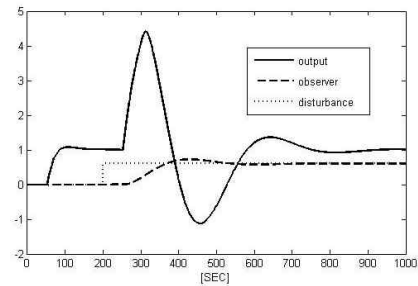


Fig. 5. Superheater output and estimated disturbance.  
그림 5. 과열기 출력 및 외란

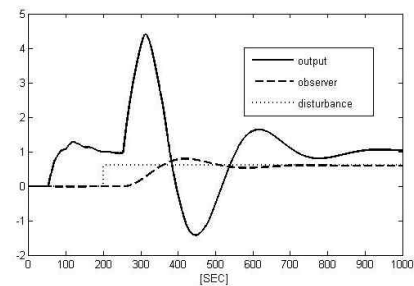


Fig. 6. Superheater output and estimated disturbance with parameter mismatch.  
그림 6. 모델링 오차 존재 시 과열기 출력 및 외란

그림 6은 모델링 파라메타가 다음과 같이 변하여 모델링 오차가 존재할 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

$$G_m(s) = \frac{10}{65s + 1} e^{-45s} \quad (10)$$

위의 시뮬레이션 결과에서 보듯이 외란의 검출로 인하여 원하는 출력 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

(나) 증기압 제어

증기압 제어기 모델은 다음과 같다[5].

$$G(s) = \frac{0.2}{s} e^{-7.8s} \quad (11)$$

이 시스템은 순수 적분 항을 포함하고 있다. 입력, 외란, 제어기는 과열기 제어의 경우와 같이 가정하였으며  $F(s) = 0.4/(s+1)$ 로 선정하였다.

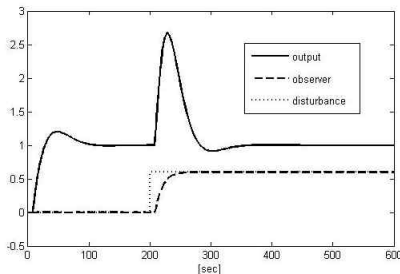


Fig. 7. Pressure output and estimated disturbance.  
그림 7. 증기압 및 외란

출력과 검출된 외란을 그림 7에 나타냈으며, 그림 8은 모델링 파라메타가 약 40 % 변해 다음과 같은 경우의 결과를 나타낸다.

$$G_m(s) = \frac{0.28}{s} e^{-10.9s} \quad (12)$$

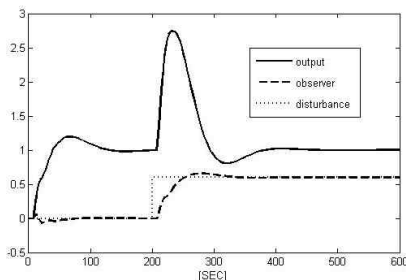


Fig. 8. Pressure output and estimated disturbance with parameter mismatch  
그림 8. 모델링 오차 존재 시 증기압 및 외란

### III 결론

본 논문에서는 모델링오차를 갖는 시간지연시스템 제어를 위한 새로운 스미스 예측제어기를 제안하였다. 플랜트에 인가된 외란을 검출하기 위한 외란 관측자를 구성하였으며, 검출된 외란을 사용하여 스미스 예측 제어기를 구성하였다. 그 결과 모델링 오차 존재 시에도 안정하며 외란에 대한 정상상태 오차를 0으로 할 수 있는 새로운 형태의 스미스 예측제어기를 구성할 수 있었다.

또한 화력발전소 과열기 및 증기압 제어기를 구성하여 시뮬레이션 한 결과 제안한 시스템의 효용성 및 우수성을 확인할 수 있었다.

### References

- [1] S. Majhi and D. P. Atherton, "Modified Smith predictor and controller for process with time delay," *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* . Vol. 146, No. 5, pp. 359-366, Sep. 1999.  
DOI: 10.1049/ip-cta:19990502
- [2] Kenji Natory and Kouhei Ohnishi, " A Design Method of Communication Disturbance Observer for Time Delay Compensation, Taking the Dynamic Property of Network Disturbance Into Account," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. Vol.55,No.5,pp.2152 - 2168, May.2008  
DOI: 10.1109/TIE.2008.918635
- [3] Soon-Young Lee, " Development of the Adaptive Algorithm for Time Delay Systems," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, Vol. 13, No. 1, pp. 36-40, Mar. 2009
- [4] X.L. Song, C.Y. Liu, Z.Y.Song, X.F. Song, "Robust PID control for steam superheater," *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2004, pp. 26-29.  
DOI: 10.1109/ICMLC.2004.1382331
- [5] C. Zhang, Y. Huang, J. Xue, F. Dong, "The compound control of load disturbance compensator and predictive PI for the boiler steam pressure," *Proceeding of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006, pp. 21-23.  
DOI: 10.1109/WCICA.2006.1713446