

플랜트 PPI 제어기의 모델 불일치를 위한 제어변수 추정

(The Control Parameter Estimation for Model Mismatch of Plant's PPI Controller)

신강욱 · 박준열*

(Gang-Wook Shin · Joon-Yeal Park)

요 약

공정제어에 있어서, 긴 시간지연은 시스템의 효과적인 제어성능을 기대하기 어렵기 때문에 공정의 모델을 이용한 스미스 예측기와 이를 이용한 PPI 제어기 등이 제안되었다. 그러나, 이들 제어기는 실 플랜트와 모델간에 존재하는 오차 때문에 실제 플랜트에서는 원하는 제어성능을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 모델 불일치에 의해 발생하는 오차를 보상할 수 있도록 새로운 제어변수 추정전략을 제시하였다. 또한, 이러한 추정전략은 다양한 사례를 통하여 유용한 결과를 얻었다.

Abstract

In process control, PPI controller including smith predictor was proposed for efficient control method because of the weak performance by the effect of long dead-time. But, PPI controller can not guarantee of control performance at real plant because of sensitivity to model mismatch. Thus, In this paper, we presented new control parameter estimation strategy for compensating of model mismatch. The proposed strategy obtained useful result through various cases.

Key Words : Smith Predictor, PPI controller, Time Delay

1. 서 론

많은 공정제어에 있어서 플랜트의 제어 문제를 해결하기 위하여 PID 제어기를 주로 사용하고 있다. 그러나, 긴 지연시간을 갖는 공정을 효과적으로 제어하기 위해서는 공정에 대한 예측 제어가 필요하나, PID 제어기의 미분항으로 공정제어출력의 예측이 가능한 것으로 해석될 수 있지만 측정신호의 편차에

의한 영향으로 실제 공정에 적용하기에는 적절하지 못하다. 이러한 단점으로 인하여 많은 산업 현장에서는 단지 PI제어 만을 주로 사용하고 있다. PI 제어는 직관적이며 쉬운 제어구조를 가지고 있어서 제어변수를 선정하기가 상대적으로 쉽지만, 긴 지연시간을 갖는 공정제어를 위한 예측성분이 빠져있어, 효과적인 제어성능을 기대할 수 없다[1][2].

시간지연은 제어성능과 시스템 안정성 등에 많은 제한을 주기 때문에, 좋은 공정모델을 가진 시간지연에 대한 보상기능을 갖는 스미스 예측기가 제안되었다[3]. 스미스 예측기에서는 공정 모델이 양호한 경우 페루프 시스템의 특성방정식으로부터 지연 시간을 무시할 수 있고, 제어성능을 개선할 수 있는 장

* 주저자 : 홍익대학교, 전자전기공학부 교수
Tel : 02-320-1636, Fax : 02-320-1636

E-mail : parkjy@hongik.ac.kr
접수일자 : 2003년 7월 23일
1차심사 : 2003년 8월 5일
심사완료 : 2003년 9월 3일

점을 가지고 있다. 그러나, 안정적인 스미스 예측기의 적용을 위해서는 공정모델에 대한 양호한 모델 변수를 선정하여야 하며, 또한 PI제어기의 제어변수를 포함하면 모두 5개의 변수를 선정하여야 한다. 따라서, 최적화 되어야 할 변수의 수가 많은 단점을 해결하여 실제공정에 적용할 수 있도록 전체 변수 중 3개의 변수만을 추정하도록 설계된 예측-비례-적분제어기(Predictive Proportional Integral Controller : PPIC)가 제안되었다[4].

스미스 예측기와 PPIC는 공정모델과 공정의 동특성간의 편차가 발생할 경우 제어성능을 저하시키고 불안정한 결과를 초래한다. 지연시간 보상이 없는 일반적인 PI제어기가 어떤 일부 조건하에서는 지연시간 보상기능을 갖는 스미스 예측기보다 더 나은 제어성능을 제공할 수도 있다[5]. 그리고, 만약 추정된 지연시간이 공정의 지연에 대해 30%이상의 편차를 갖는다면, 스미스 예측기가 지연시간 보상이 없는 PI제어기 보다 성능이 떨어질 수 있음을 보였다 [6]. 그러므로 공정의 동특성이 변하거나 잘 알지 못하는 경우에 있어서 스미스 예측기를 적용하는 것은 한계가 있다.

그러나, PPIC는 단순화된 변수 선정을 근간으로 제안되었기 때문에 산업현장에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 장점들을 가지면서 한편으로는 공정모델의 불일치에 따른 편차에 강인한 제어성능을 갖는 새로운 변수 선정방법에 대하여 제안하고자 한다.

본 논문은 2장에서 PPIC에 대하여 기술하고, 3장에서는 기존의 PPIC 단점인 모델 불일치 문제를 해결할 수 있는 파라메타 선정방법에 대하여 논하고, 4장에서는 기존 방식과 비교한 사례연구의 시험 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 방법의 성능 향상을 확인할 수 있도록 하였다.

2. PPI 제어기

시간 지연을 갖는 공정에 대하여 일반적으로 사용되고 있는 예측기로서 스미스 예측기가 1957년 소개된 이후, Tore Hagglund는 공정 운영자의 쉬운 이해와 산업의 적용 용의성을 실현하기 위하여 스미스

예측기를 이용한 PPIC를 제안하였다. 일반적인 스미스 예측기의 구조는 그림 1과 같으며, 그림에서와 같이 제어기의 출력은 공정과, 공정모델, 그리고 지연시간을 제외한 공정 모델의 입력이 된다.

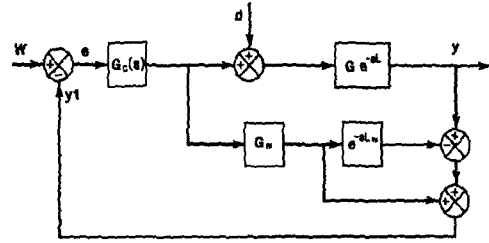


그림 1. 스미스 예측기
Fig. 1. The Smith Predictor

그림 1에서, 제어기 G_c 는 PI 제어기로 단순화 하여 G_{PI} 로 나타내며, 지연이 없는 공정모델은 G_m , 그리고 추정된 시간 지연항은 e^{-sL_m} 으로 나타낼 수 있다. 그림 1에서 설계된 PI 제어기의 기본적인 구조는 식 (1)과 같다.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$

여기서, K_c , T_i 는 각각 제어기 이득 및 적분 시간을 각각 나타낸다. 그리고, 시간지연을 갖는 공정에 대한 전달함수는 $P(s) = G e^{-sL}$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 L 은 지연시간을 나타내고, G 는 지연항이 배제된 공정의 동특성을 나타낸다.

따라서, 폐루프 전달함수는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$G_{SP_m}(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{PI} G e^{-sL}}{1 + G_{PI}(G_m + G e^{-sL} - G_m e^{-sL_m})} \quad (2)$$

$$G_{SP_w}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{(1 + G_{PI}(G_m - G_m e^{-sL_m})) G e^{-sL}}{1 + G_{PI}(G_m + G e^{-sL} - G_m e^{-sL_m})} \quad (3)$$

여기서, y , w , 그리고 d 는 각각 공정 출력, 기준값, 그리고 외란을 각각 나타낸다. 만약 공정 모델 $G_m e^{-sL_m}$ 이 실제 공정 $G e^{-sL}$ 과 일치한다면 스미스 예측기를 갖는 폐루프 시스템의 특성방정식으로부터 시간지연은 사라지게 된다. 따라서, 스미스 예측기는 실제 공정에 대한 모델을 필요로 하며, 공정의 모델로는 지금까지 가장 많이 사용되고 있는 이득 K_p , 시정수 T_p , 그리고 지연시간 L 을 갖는 FOPDT(First Order Plus Dead Time) 시스템을 근간으로 하며, 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$P(s) = G e^{-sL} = \frac{K_p}{1 + T_p s} e^{-sL} \quad (4)$$

PI 제어기를 갖는 FOPDT 시스템의 스미스 예측기는 K_c , T_i , K_p , T_p , 그리고 L 을 포함하는 다섯개의 변수가 결정되어야 한다. 그러나 Tore Hagglund는 단지 세 개의 파라메타 추정으로 시간지연을 보상할 수 있는 제어기를 제시하였다. PPIC에서 파라메타 K_c , T_i 그리고 L 는 사용자에게 의해 제공되고, K_p 와 T_p 는 K_c , T_i , L 로 이루어진 다음의 함수들에 의해 계산된다.

$$K_p = f_1(K_c, T_i, L) \quad (5)$$

$$T_p = f_2(K_c, T_i, L) \quad (6)$$

위 식에서 함수 f_1 과 f_2 가 시간 지연 L 에 대해 독립적이며, K_c 는 T_p 에 대해, T_i 는 K_p 에 대해 각각 독립적이다. 따라서, 위 식은 다음 (7)과 (8)식과 같이 간소화될 수 있다.

$$K_p = \frac{x}{K_c} \quad (7)$$

$$T_p = \tau T_i \quad (8)$$

여기서, x 와 τ 는 상수이다. 공정제어시스템에서 대부분의 설계 목표는 가능한 빠른 임계감쇠 폐루프 시스템을 얻는 것으로서, 이러한 시스템을 만족하기

위하여 $s=-1/T_p$ 에서 중근을 갖도록 하며, x 와 τ 를 1로 선택함으로써 이 조건에 만족할 수 있다.

제어변수 선정에 있어서 PPIC는 PID 제어기와 근본적인 차이점을 갖고 있다. Ziegler - Nichols 그리고 Cohen-Coon 방법과 같은 PID 제어기에 대한 시스템적 튜닝에 있어서는, 제어기 변수의 결정이 근본적으로 공정의 지연시간 L 와 큰 시정수 T_p 사이의 관계에 따라 달라진다. 그러나, PPIC에 있어서는, 지연 시간의 영향은 K_c 와 T_i 의 선택에 따라 소거된다. 지연 시간을 제외한 동일한 동특성을 갖는 두 개의 공정은 같은 이득 K_c 와 적분시간 T_i 를 가져야 하지만 시간 지연 L 은 다른 값을 갖는다.

PPIC의 정상상태 이득과 지연시간, 그리고 시상수를 얻기 위해서는 그림 2와 같이 개루프의 단위입력에 대한 공정의 응답특성을 이용하여 얻어지며, 제어기의 미분시간은 응답특성의 최종치 63%에 도달할때까지 걸리는 시간 $T_{63\%}$ 과 같다.

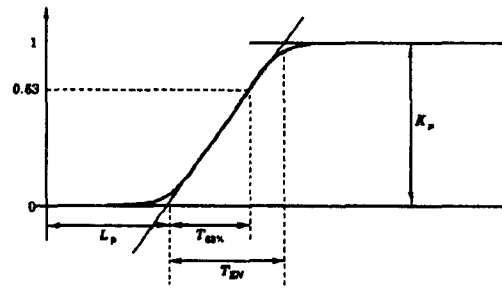


그림 2. 개루프 스텝응답 곡선
Fig. 2. Open-Loop Step-Response Curve

따라서, 개루프 스텝응답 실험을 통하여 구해진 제어변수는 다음 식과 같다.

$$K_c = 1/K_p, T_i = T_{63\%}, L = L_p \quad (9)$$

3. 제안된 제어변수 추정전략

지금까지 살펴본 PPIC에서는, 모델과 공정 사이의 불일치로 인하여 발생하는 오차에 대한 보상능은 추정치가 실제값의 $\pm 20\%$ 의 오차에 대해서도 만

족할 만한 성능을 기대하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 강인성을 갖는 PPIC의 최적 파라메타를 선정의 새로운 방법을 제안하였다. 먼저, Haalman[7]은 지연시간을 갖는 공정에 대하여 적분항이 존재하는 제어기를 이용한 PID 파라메타 선정방식을 제안하였다. 그러나 성능평가 방식에 있어서 시간개념과 공정의 이득을 포함하지 않아 최적의 변수 선정이 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 시간개념과 공정의 이득을 포함한 성능평가 방식을 이용하여 PPIC의 최적변수를 선정하였다.

다음과 같은 시간지연 공정과 적분항을 갖는 제어기를 선정하였으며,

$$\text{공정 : } e^{-sL} \quad \text{제어기 : } \frac{1}{T_i s}$$

선정된 공정에 대하여 단위 계단 입력을 인가하여 나타난 출력값을 이용하여 ITSE(Integral of the Time-weighted Square Error)법으로 성능평가를 실시하였다. ITSE법에 의한 실험결과, 에러의 최소값으로 수렴하는 것은 적분시간 T_i 값이 공정의 지연시간 L 보다 1.25배인 경우임을 그림 3을 통하여 알 수 있다. 따라서, T_i 와 L 과의 관계식을 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_i = \frac{5}{4} L \quad (10)$$

일단 순수 지연공정의 경우에 대한 이상적인 특성값을 알게되면, 다른 유형의 공정에 대한 설정값도 전달함수로부터 쉽게 구할 수 있다.

식 (10)은, 공정의 전달함수가 $\frac{K_p e^{-sL}}{1 + T_p s}$ 이며, 제어기 전달함수는 $K_c(1 + \frac{1}{T_i s})$ 를 갖는 PPI 시스템에 대해 적용할 수 있으며, 전체 개루프 전달함수는 $\frac{K_p e^{-sL}}{T_p s / K_c}$ 와 같다.

따라서, (10)식을 이용하여 제어기 변수를 구하면 다음과 같이 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$K_c = \frac{4 T_p}{5 K_p L}, T_i = T_p \quad (11)$$

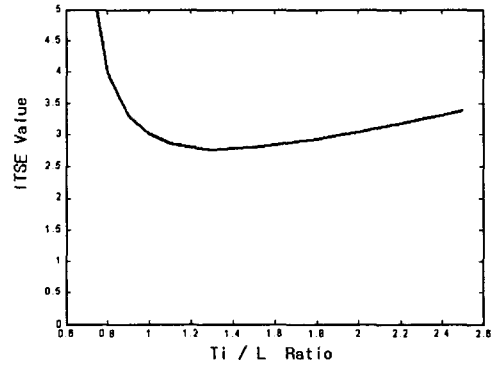


그림 3. ITSE와 제어변수 설정
Fig. 3. ITSE and Control Parameter

4. 사례연구

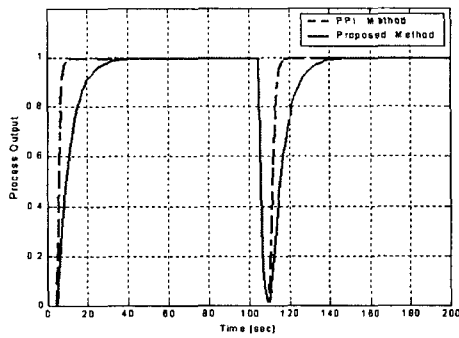
본 절에서는 모의실험을 통하여 기존의 PPIC를 통한 파라메타 선정기법을 검토하고, 정확한 모델 매칭이 이루어지지 못한 경우에 있어서의 공정응답 특성을 파악하였다. 모의실험을 위한 공정 모델은 실제 플랜트를 대표하는 두가지 모델을 선정하였으며, 하나는 지연시간이 공정의 시정수 보다 큰 경우, 나머지 하나는 그 반대로 시정수가 지연시간보다 큰 경우에 대하여 모의실험을 하였다. 두가지 모델의 경우에 있어서, 공정 모델의 불일치에 대한 응답 특성을 알아보기 위하여 지연시간과 시정수의 오차를 기준값에 대하여 각각 +20%와 -20% 되도록 하였다. 그리고, 플랜트의 입력은 단위 계단입력을 인가하였으며, 외란은 100초 경과 후 음의 단위 계단입력을 인가하였다.

$$\text{공정 I : } G_1(s) = \frac{e^{-5s}}{1 + s}$$

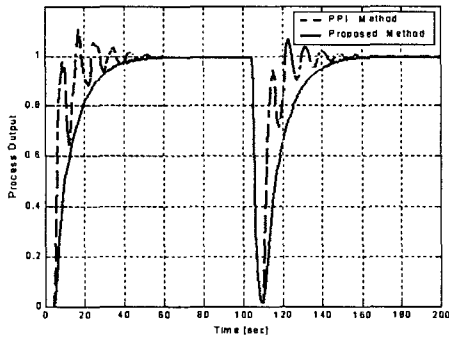
$$\text{공정 II : } G_2(s) = \frac{e^{-3s}}{1 + 10s}$$

먼저, 지연시간이 시정수보다 큰 모델, 즉 공정 I에 대하여 살펴보면, 그림 4 (a)는 모델의 추정 파라메타가 실제 공정과 일치한 경우로서 기존의 PPIC의 응답특성이 본 논문에서 제안한 방법보다 양호함을

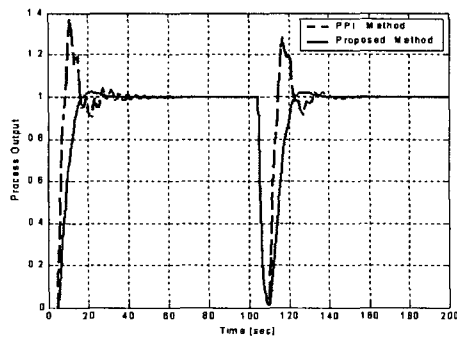
알 수 있다. 그러나 공정의 모델이 불일치한 경우 그림 (b)와 (c)에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 방법이 PPIC의 특성보다 안정됨을 확인할 수 있었다. 지연시간과 시정수가 각각 +20%의 오차가 발



(a) 모델이 일치한 경우

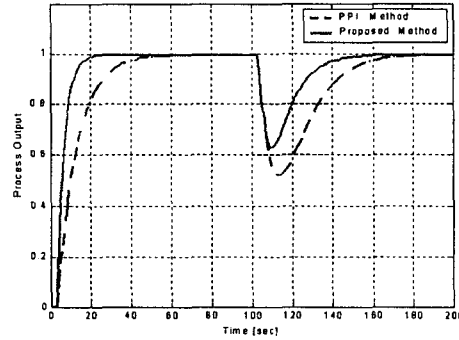


(b) 지연시간과 시정수가 +20% 오차 발생한 경우

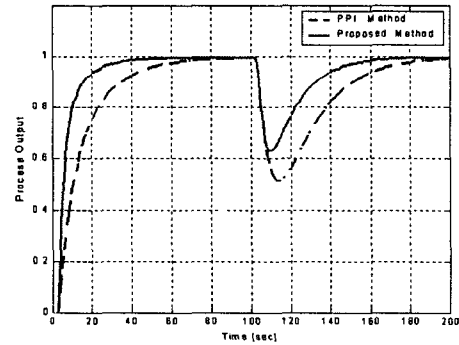


(c) 지연시간과 시정수가 -20% 오차 발생한 경우

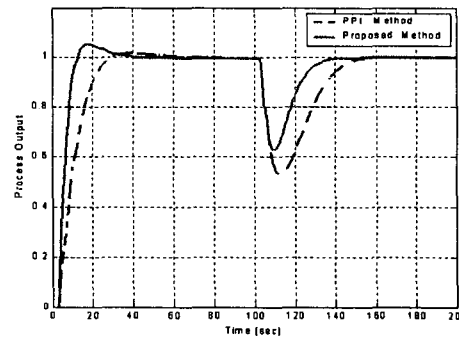
그림 4. 공정 I 모델 응답특성
Fig. 4. The response of process model I



(a) 모델이 일치한 경우



(b) 지연시간과 시정수가 +20% 오차 발생한 경우



(c) 지연시간과 시정수가 -20% 오차 발생한 경우

그림 5. 공정 II 모델 응답특성
Fig. 5. The response of process model II

생된 경우에 있어서, PPIC는 제안된 제어기의 특성과 달리 단위 입력과 외란에 대해 불안정한 응답 특성을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 지연시간과 시정수가 -20% 오차가 발생한 경우, PPIC는 과도 응답시 약 40%의 오버슈트가 발생된 반면, 제안된 제어기에서는 약 2%의 오버슈트가 발생되었으며, 100초 경과후에 발생한 외란에 대해서도 PPIC의 경우에는 약 30%의 오버슈트가 발생하였으나 제안된 제어기에서는 양호한 특성을 나타남을 확인할 수 있다.

공정 II의 지연시간이 시정수보다 작은 모델에 대하여 적용한 경우, 그림 5 (a)에서 알 수 있듯이 모델의 추정 파라메타가 일치한 경우에 있어서 제안된 방법이 PPIC 보다 목표치 수렴특성이 양호함을 알 수 있다. 또한, 모델이 불일치한 경우에 있어서도 마찬가지로 그림 (b)와 (c)에서 제안된 방법이 더욱 강한 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 특히, 지연시간과 시정수가 각각 +20% 오차가 발생한 경우에 있어서, 목표치에 수렴하는 시간은 약 30초의 차이가 발생하며, 외란에 대한 언더슈트 또한 약 10%의 안정성을 갖는 것으로 확인되었다.

5. 결 론

생산공정을 포함한 공정제어에 있어서, 긴 지연시간에 대한 문제해결을 위한 노력들이 지속되어왔지만, 실제 공정에 적용하기 쉬운 제어기법의 제안이 흔하지 않았다. 그리고, 스미스 예측기를 비롯한 모델기반의 지연시간 보상기들이 제시되었지만, 실제 공정에서의 모델 불일치에 따른 오차에 민감한 응답 특성을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 공정모델의 불일치에 대한 강인성을 확보하기 위한 파라메타 선정기법에 대해 제안하고, 실제 공정에 쉽게 응용할 수 있는 PPIC에 적용하였다.

모의 실험의 결과에서와 같이 본 논문에서 제시된 제어변수 추정방법이 모델 불일치에 대한 동특성은 물론 부가적인 외란에 대한 강인성에 대해 양호한 결과를 얻었다.

References

- [1] Astrom,K.J. and T.Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", ISA, 1988.
- [2] Y.Nishikawa, et al., "A method for auto-tuning of PID control parameters", Automatica, Vol. 20, No. 3, pp. 321-332, 1984.
- [3] Smith, O. J. M. "Closed control of loops with dead time", Chemical Engineering Progress, 53, May, pp. 217-219, 1957.
- [4] T. Hagglund, "An industrial dead-time compensating PI controller", Control Eng. Practice, Vol. 4, No. 6, pp. 749-756, 1996.
- [5] Meyer, C., Seborg,D.E., and Wood,R.K. "A comparison of the smith predictor and conventional feedback control", Chem. Eng. Sci., 31., pp. 775, 1976.
- [6] S chleck,J.R., and Hanesian, D. "An evaluation of the smith predictor technique for controlling deadtime dominated processes", ISA Trans., 17, (4), pp. 39, 1978.
- [7] AHaalman, "Adjusting Controllers for a Deadtime Process", Control Engineering,Vol. 12, pp. 71-73, 1965.

이 논문은 2003학년도 홍익대학교 교내 연구비에 의하여 지원되었음.

◇ 저자소개 ◇

신강욱 (辛康旭)

1987년 동국대학교(학사). 1993년 홍익대학교(석사). 2001년~현재 홍익대학교 전기공학과 대학원 박사수료. 1993년~현재 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원.

박준열 (朴俊烈)

1974년 서울대학교(이학사). 1977년 서울대학교(석사). 1987년 서울대학교(박사). 1988년~1989년 City University(London) 객원교수. 1980년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.