

논문 2008-45SC-6-14

포화 함수를 이용한 PI 제어기 설계

(The Design of PI Controller Using Saturation Function)

오승록*

(Seungrohk Oh)

요약

플랜트의 정보를 알지 못하는 경우 시험신호로 포화함수와 시간지연 요소를 이용하여 플랜트의 정보를 찾아내고 찾아낸 정보로 PI 제어기를 설계하는 방법을 제시하였다. 시간 지연요소를 이용함으로서 PI 제어기의 I 요소로부터 발생되는 위상 감소로 인해 발생되는 불안정성이 발생하지 않도록 플랜트의 Nyquist 그림에서 3/4 분면에 있는 한 점의 정보를 찾아내는 것이 가능하였다. 제안된 된 방법은 포화함수의 이용으로 정확성이 높고 한 개의 포화함수만을 이용하여 구조가 간단하다. 또한 모의시험을 통해 제안된 방법의 타당성을 보였다.

Abstract

We propose an autotuning algorithm for PI controller with unknown plant. The proposed algorithm uses a saturation function and time delay element as a test signal. Since the integral element of PI controller reduces a phase margin in the closed loop system, the closed loop system could be resulted in unstable with PI controller. To avoid unstable in the closed loop system with PI controller, the proposed algorithm identifies one point information in the 3rd quadrant of Nyquist plot with a time delay element. The proposed method improves an accuracy of one point identified information with one saturation function. We demonstrate a performance of the proposed method via a simulation.

Keywords: autotuning, time delay, saturation function, PI controller

I. 서론

PID(Propotional Integral Derivative) 제어기는 구조가 간단하고 현장 기술자들에게 익숙한 제어기로 산업체에서 사용되는 대부분의 제어기가 PID 제어기로 되어 있다. PID 제어기는 상수, 미분, 적분항으로 구성되어 있으며 각항의 계수들을 조정하여 사용하고 있다.

PID 제어기의 계수들은 플랜트의 전달함수를 알고 있는 경우 분석적인 방법으로 결정이 가능하다^[1]. 플랜트의 전달함수를 알지 못하는 경우 경험이 많은 현장 기술자에 의해 제어기의 계수값을 결정하여 사용하여 왔다. 제어기의 계수값을 결정하는 방법으로 시험신호를 이용하여 플랜트의 정보를 알아내고 알아낸 플랜트의 정보를 이용하여 제어기 값을 결정하는 방법을 자동

동조(autotuning)라 하며 편리성 때문에 많은 연구 진행되었으며 상용화 된 제품들이 출시되어 사용되고 있다^[2]. PID 자동 동조 시스템 중 시험신호로 릴레이를 이용한 방법^[3]은 릴레이가 갖고 있는 비 선형성으로 인해 플랜트의 출력에 발생하는 극한 사이클(limit cycle)의 크기와 주기를 측정하여 플랜트의 주파수영역에서의 한 점인 교차점(crossover point)을 찾아내고 이 한 점의 정보로 부터 제어기의 계수값을 결정하는 방법이다. 릴레이를 이용한 자동 동조 방법이 제안된 이후 이와 관련된 연구^[3~8]들이 이루어 졌다. [8]은 릴레이 사용으로 인한 고주파 발생으로 발생되는 교차점 정보의 오차를 줄이기 위해 포화함수를 사용하였다. 또한 [7]은 한 개의 릴레이 사용으로는 PI 제어기 설계가 불가능하여 크기가 다른 두개의 릴레이를 병렬로 연결한 시험신호를 사용하여 플랜트의 Nyquist 그림에서 3/4 분면의 한점을 찾아내어 PI 제어기를 설계하였다. 그러나 [7]의 방법은 두개의 릴레이의 사용으로 인한 구조가 복잡하고

* 정희원, 단국대학교 공학대학 전자공학과
(Dankook University, Dept. of Electronics Eng.)
접수일자:2008년9월10일, 수정완료일:2008년11월12일

릴레이 동작 시간이 동일해야 한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 두개의 릴레이를 병렬로 연결하는 대신 시간 지연 요소와 포화함수를 직렬로 연결하여 Nyquist 그림에서 3/4 분면의 한점을 찾아내어 PI 제어기를 설계하였다. 시간지연 요소는 [8]에서도 사용되었으나 플랜트 출력에 주기신호가 발생하지 않는 경우 사용되었다. 제안된 방법은 포화함수와 시간지연요소 사용으로 자동동조 시스템의 구조가 간단하고 정확성이 높은 자동 동조 시스템을 제안하였다. 또한 모의시험을 통해 제안된 방법의 타당성을 보였다.

II. 본 론

1. 포화 함수를 이용한 PID 제어기 자동동조

릴레이를 이용한 자동동조 시스템은 미지의 플랜트의 정보를 얻기 위해 시험신호로 릴레이를 사용하며 시험신호 사용시 그림 1에서 폐루프 구성도는 X 점에 위치한다. 제어기의 파라메타 값은 출력신호의 크기와 주기를 이용하여 결정하며 파라메타 값이 결정되면 제어기를 연결하여 제어하게 된다. 즉 폐루프 구성도는 그림 1의 X점으로부터 Y으로 이동시켜 사용한다. 릴레이는 그림 1의 폐루프 출력에 극한 사이클(limit cycle)이 존재하는 조건을 만족하면^[9] 출력에 주기신호를 발생하게 한다.

비선형 요소인 릴레이는 등가의 선형요소인 묘사함수(describing function)로 대치할 수 있으며 다음식을 만족한다^[9].

$$1 + G(jw)N(a) = 0 \quad (1)$$

여기서 $G(jw)$ 는 플랜트의 주파수 응답, 묘사함수 $N(a) = \frac{4h}{\pi a}$, h 는 릴레이의 크기, a 는 출력의 크기, $w = \frac{2\pi}{T}$ 로 T 는 플랜트 출력의 주기이다. 식(1)를 다시

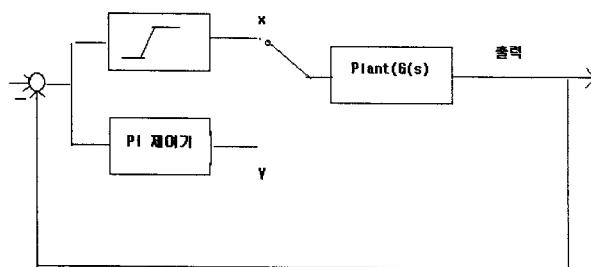


그림 1 자동 동조시스템의 구조

Fig. 1. Structure of autotuning system.

쓰면

$$G(jw) = -\frac{1}{N(a)} \quad (2)$$

이며 플랜트 전달함수 $G(s)$ 의 Nyquist 그림에서 음의 실수축을 통과하는 점의 값을 나타낸다. 즉 플랜트의 전달함수에 대한 정보가 없어도 릴레이의 크기, 출력의 크기와 주기만을 이용하여 플랜트의 Nyquist 그림에서 음의 실수축을 통과하는 값을 계산 할 수 있다. 이와 같이 계산된 한 점의 정보를 이용하여 PID제어기의 파라메타 값을 구할 수 있다^[3]. 시험신호로서 릴레이의 사용은 릴레이가 발생시키는 고주파 성분으로 인해 주파수 영역에서의 한점의 정보에 대한 오차가 크게 발생할 수 있으며 오차를 줄이기 위해 다음 식으로 표현되는 포화함수(saturation function)를 시험신호로 사용하여 오차를 줄였다^[8].

$$sat(x) = \begin{cases} -h & x < -h/s \\ sx & -h/s \leq x \leq h/s \\ h & x > h/s \end{cases} \quad (3)$$

식(3)으로 주어지는 포화 함수의 묘사 함수는 다음 식으로 주어진다.

$$N_{sat}(a) = \begin{cases} s & \text{if } h > sa \\ p(a) & \text{if } h \leq sa \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $p(a) = \frac{2s}{\pi} \left[\sin^{-1}\left(\frac{h}{sa}\right) + \frac{h}{sa} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{sa}\right)^2} \right]$ 이다.

2. 지연 요소를 이용한 PI 제어기 자동동조

가. PI 제어기의 특성

PID 제어기는 구조가 간단하고 산업계에서 오랜 기간 동안 사용하여 현장 기술자들이 매우 익숙해 있어 가장 선호하는 제어기 구조이다. 그러나 PID 제어기의 D성분은 오차신호를 미분하는 항으로 잡음을 증폭시켜 제어 목표를 달성하기 어려워 현장 기술자들은 D값을 영인 상태에서 사용하는 PI 제어기 사용을 선호한다. PID 제어기에서는 그림 2와 같이 P 성분은 위상마진에 영향을 주지 않으며 D성분은 위상마진을 추가하고 I 성분은 위상 마진을 감소시키는 역할을 한다^[3].

따라서 포화함수 또는 릴레이를 이용한 PI 제어기 설계시 위상 마진을 만족하는 PI제어기 설계가 어렵다. 예를 들어 그림 1의 플랜트 전달함수가 $G(s)$ 이고 PI 제어기의 구조가 $C(s) = k(1 + \frac{1}{Ts})$ 인 경우, 포화함

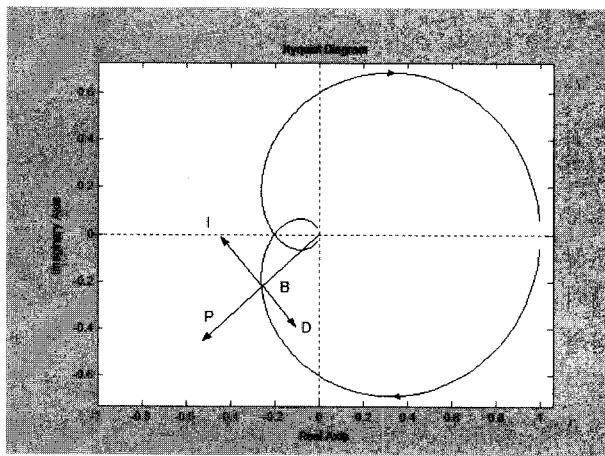


그림 2. Nyquist 그림에서 PID 제어기의 영향^[3]
Fig. 2. The effect of PID controller in Nyquist plot^[3].

수를 이용하여 구한 교차점이 $(-l, 0)$ 이고 플랜트 출력의 주기가 T 인 경우 Nyquist 그림에서 교차점의 주파수는 $w_1 = 2\pi/T$ 이 된다. 위상 마진의 사양이 θ_m 인 경우 $C(jw_1)G(jw_1) = e^{i(\pi + \theta_m)}$ 이 되어야 하고

$$G(jw_1) = le^{j\pi} \circ \text{과 } C(jw_1) = k \frac{\sqrt{(w_1 T)^2 + 1}}{w_1 T} e^{-j\pi \tan^{-1}(1/w_1 T)}$$

이므로 $\pi - \tan^{-1}(1/w_1 T) = \pi + \theta_m$ 을 만족하는 T 값을 구하여 하나 T 가 양수이므로 구할 수 없다. 그러나 PID 제어기의 경우 D 요소로 부터 위상을 추가할 수 있어 위상마진을 만족하는 PID 제어기 설계가 가능하다.

나. 지연 요소를 이용한 자동 동조 시스템 분석

지연시간이 d 인 지연 요소를 그림 3과 같이 추가하고 포화함수를 시험신호로 하는 자동 동조 시스템에서 출력 신호의 크기가 a_2 이고 주기가 T_2 인 경우 $1 + e^{-jw_2 d} G(jw_2) N_{sat}(a_2) = 0$ 을 만족한다. 여기서 $w_2 = 2\pi/T_2$ 이다. 지연요소 d , w_2 , a_2 는 알고 있는 값이므로

$$G(jw_2) = -\frac{1}{N_{sat}(a_2)} e^{jw_2 d} \quad (5)$$

를 이용하여 플랜트의 Nyquist 그림에서 3/4분면의 한점의 좌표를 계산할 수 있다.

즉 그림 3에서 지연시간이 0인 경우는 플랜트 출력 신호의 크기와 주기를 이용하여 그림 4의 A점의 좌표값을 구하는 것이며 지연 시간이 d 인 경우 그림 4의 B 점의 좌표값을 구할 수 있다. 지연 시간이 0인 경우 A

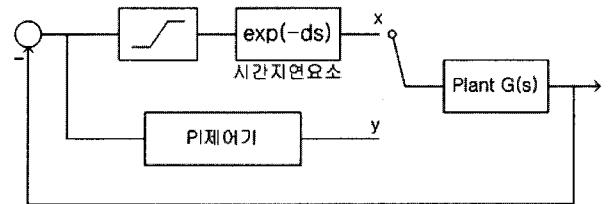


그림 3. 시간지연 요소를 포함한 자동 동조시스템의 구조
Fig. 3. Structure of autotuning system with time delay element.

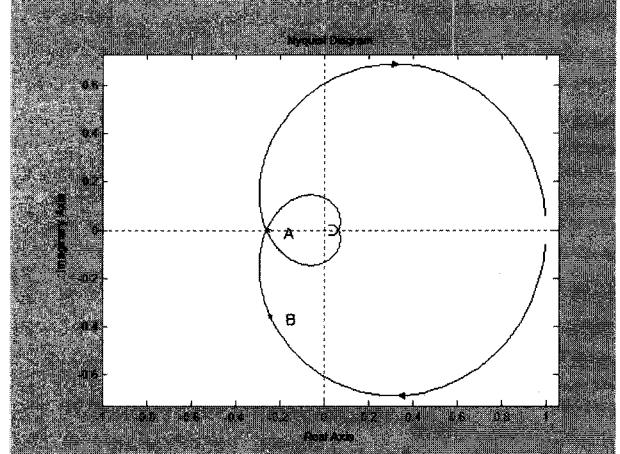


그림 4. $G(s)$ 의 Nyquist 그림
Fig. 4. The Nyquist plot of $G(s)$.

점에서 PI제어기를 설계할 경우 PI 제어기의 I 요소로 인해 발생되는 위상 마진 감소부분에 해당 여유마진이 없어 PI 제어기 설계가 불가능한 반면 지연요소를 이용한 자동동조 시스템에서는 B 점의 정보를 시험 신호를 이용하여 찾아내고 B점에서 PI 제어기를 설계하는 경우 B점은 위상마진의 여유가 있어 I 요소에 의한 위상 마진 감소분이 있는 경우에도 PI 제어기 설계가 가능하다.

또한 지연 시간이 d 인 지연 요소에 의한 위상 변화는 $w_2 d$ 이므로 d 를 크게 하면 위상변화를 크게 할 수 있어 위상 마진으로 주어진 사양을 만족하는 PI 제어기 설계가 가능하다.

다. 지연 시간 결정 및 PI 제어기 설계

지연요소의 지연시간 값 결정방법을 유도하기 위해 플랜트의 전달함수가 $G(s)$, 사양으로 주어진 위상마진이 θ_m 인 경우를 고려하였다. 주어진 위상 마진을 만족하는 PI 제어기의 설계가 가능하려면 플랜트의 위상이 $\pi + \theta_m$ 보다 큰 위상을 갖는 플랜트의 한 점을 찾아야 하며 이를 위해 지연시간이 0인 경우에 대해 포화

함수를 시험신호로 이용하여 플랜트의 출력의 크기 (a_1)와 주기(T_1)를 구하여 그림 4의 A 점의 값과 해당 주파수를 구한다. 즉 교차점인 A의 값은 식(2)으로부터 $(-\frac{1}{N_{sat}(a)}, 0)$ 이며 해당 주파수 $w_1 = 2\pi/T_1$ 이 된다.

점 A의 위상이 π 이므로 시간지연이 d 인 지연요소를 추가하는 경우 시간지연 요소로부터 추가되는 위상은 식(5)으로부터 $w_1 d$ 된다. 따라서 제어기의 I 요소로부터 감소하는 위상 감소분을 고려하여

$$d > \theta_m/w_1 \quad (6)$$

가 되는 d 로 선택하면 된다. 시간 지연이 d 인 지연요소의 추가 후 시험 신호인 포화함수를 이용하여 플랜트의 출력의 크기 및 주기를 이용하여 그림 4에서 3/4 분면에 있는 $G(s)$ 의 한점의 주파수영역 정보를 식(5)를 이용하여 구할 수 있다. $G(s)$ 의 한점의 주파수 영역 정보로부터 위상마진을 만족하는 PI 제어기 설계는 다음 식을 만족하는 $k, T\ddot{t}$ 값을 구하면 된다.

$$C(jw_2)G(jw_2) = e^{i(\pi + \theta_m)} \quad (7)$$

여기서 $w_2 = 2\pi/T_2$ 이고 T_2 는 시간지연 요소가 있는 경우의 출력의 주기이다. 플랜트 출력으로부터 관측된 출력의 크기와 주기가 a_2, T_2 인 경우 식(5)으로부터

$$G(jw_2) = -\frac{1}{N_{sat}(a_2)} e^{jw_2 d} = \frac{1}{N_{sat}(a_2)} e^{j(\pi + w_2 d)}$$

이며

$$\begin{aligned} C(jw_2) &= k \left(1 + \frac{1}{jw_2 T\ddot{t}}\right) \\ &= k \frac{\sqrt{(w_2 T\ddot{t})^2 + 1}}{w_2 T\ddot{t}} e^{-j\tan^{-1}(\frac{1}{w_2 T\ddot{t}})} \end{aligned} \quad (8)$$

가 된다.

제어기값은 식(7)과 식(8)로 부터

$$\begin{aligned} w_2 d - \tan^{-1}\left(\frac{1}{w_2 T\ddot{t}}\right) &= \theta_m \\ \Rightarrow T\ddot{t} &= \frac{1}{w_2 \tan(w_2 d - \theta_m)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} k \frac{\sqrt{(w_2 T\ddot{t})^2 + 1}}{w_2 T\ddot{t} N_{sat}(a_2)} &= 1 \\ \Rightarrow k &= \frac{w_2 T\ddot{t} N_{sat}(a_2)}{\sqrt{(w_2 T\ddot{t})^2 + 1}} \end{aligned} \quad (10)$$

로 구할 수 있다.

위상 마진 사양이 θ_m 인 경우 시간지연 요소와 포화 함수를 이용한 PI 제어기 설계에 대한 절차를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 그림 3에서 $d = 0$ 인 경우의 포화함수를 이용하여 플랜트 출력의 주기(T_1)측정
- 2) 지연요소의 자연시간 설정: $d > \frac{\theta_m}{w_1}$ 가 되는 d 로 선정. 여기서 $w_1 = 2\pi/T_1$
- 3) 그림 3에서 자연시간이 d 인 경우에 대해 포화함수를 이용하여 플랜트 출력의 주기(T_2) 및 크기(a_2) 측정
- 4) 식(9),식(10)을 이용하여 PI 제어기의 $k, T\ddot{t}$ 값 계산

III. 모의 실험

그림 3에서 플랜트 전달함수가 $G(s) = \frac{1}{4s+1} e^{-2s}$ 이고 위상마진이 25° 인 경우 고려하였다. 본 논문에서 제안된 방법과 기존의 방법[7]의 성능을 비교하기 위해 먼저 [7]의 방법을 이용하여 제어기를 설계하였다. 그림 5는 [7]에서 사용한 릴레이의 구성을 그림으로 나타낸 것이다.

그림 5와 같이 구성된 2개의 릴레이에 대한 묘사함수는 $\frac{4h_1}{\pi a} - j\frac{4h_2}{\pi a}$ 이며 a 는 플랜트 출력의 크기이다. 식(1)에 따라 플랜트의 위상을 계산하면

$$\theta_p = -\tan^{-1}(h_2/h_1) \quad (11)$$

I 요소에 의한 위상감소분을 고려하여 $\theta_p = 38^\circ$, $h_1 + h_2 = 1$ 인 경우 식 (11)을 이용하면 $h_1 = 0.56$, $h_2 = 0.44$ 이 된다. 그림 6은 $h_1 = 0.56$, $h_2 = 0.44$ 인 경우의 플랜트의 출력을 나타낸다.

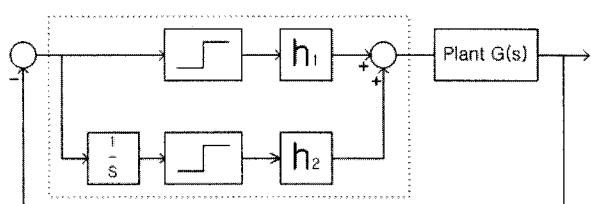


그림 5. 두개의 릴레이를 이용한 자동동조시스템^[7]
Fig. 5. The autotuning system with two relays^[7].

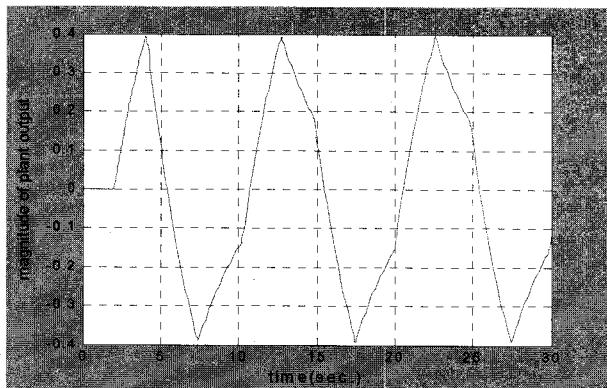


그림 6. 두개의 릴레이를 사용한 경우의 플랜트 출력
Fig. 6. The plot of plant output with 2 relays

$$2\text{개의 릴레이에 대한 묘사함수 } \frac{4h_1}{\pi a} - j \frac{4h_2}{\pi a}$$

(1)를 이용하여 Nyquist 그림에서 한점의 좌표를 계산하면 $G(j0.63) = -0.34 - j0.26$ 가 된다. 여기서 $a = 0.39$ 를 사용하였다. 플랜트의 실제 좌표값은 $G_{real}(j0.63) = -0.28 - j0.24$ 이다. 위상 마진 사양이 25° 인 경우 찾아낸 한점의 좌표값을 이용하여 제어기를 설계하면 $k = 2.26$, $T_i = 6.89$ 로 계산되었다. 계산된 PI 제어기값과 실제 플랜트 $G(s) = \frac{1}{4s+1}e^{-2s}$ 가 포함된 폐루프의 위상 마진을 계산하기 위해 $|C(jw)G(jw)| = 1$ 를 만족하는 w 값을 계산하면 $w = 0.53^\circ$ 이 된다.

$w = 0.53$ 에서 $\angle C(j0.53)G(j0.53) = -141^\circ$ 가 되어 위상 마진은 39° 로 계산된다. 위상 마진의 오차는 시험 신호에 의해 찾아낸 주파수 영역의 한점의 좌표값의 오차로 인해 발생된다. 그림 7은 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 지연 시간 $d = 0$, 포화함수의 기울기가 4인 경우의 플랜트 출력을 나타낸다. 그림에서 하단의

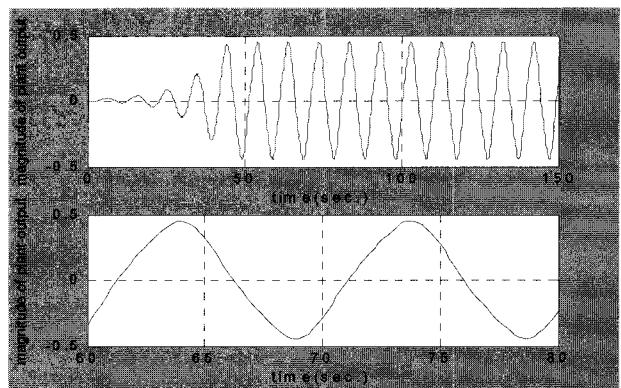


그림 8. 지연 시간이 1.07인 경우의 플랜트 출력
Fig. 8. The plot of plant output with delay time=1.07.

그림은 상단의 그림을 확대한 그림이다.

그림 7로부터 플랜트 출력의 주기 $T_1 = 7(\text{sec})$ 임을 관찰할 수 있다. 부등식 (6)을 만족하는 지연시간을 $d = 1.07$ 로 선택하였다. 그림 8은 지연시간이 $d = 1.07$ 인 경우 포화함수를 이용한 경우의 플랜트 출력값을 나타낸 것이다.

그림 8에서 플랜트 출력값의 크기 $a_2 = 0.45$, 주기 $T_2 = 9.8$ 이며 식 (5)를 이용하여 Nyquist 선도에서 한점의 좌표값을 계산하면 $G(j0.64) = -0.29 - j0.24$ 됨을 확인할 수 있다. 플랜트의 실제 좌표값은 $G_{real}(j0.64) = -0.29 - j0.22$ 임을 고려하면 본 논문에서 제안한 방법의 결과가 [7]의 방법을 이용한 결과보다 시험신호를 이용하여 찾아낸 플랜트의 좌표값에 대한 오차가 감소하였음을 확인할 수 있다. 플랜트의 좌표값의 계산을 위해 사용된 식 (1) 또는 식 (5)에서 사용한 묘사함수는 플랜트 출력에 나타나는 주기신호의 기본파만 있다는 가정 하에서 사용되는 근사적인 방법 [9]이다. 따라서 플랜트 출력에 고주파성분이 많이 포함되어 있으면 오차가 많이 발생할 수 있고 포화함수는 릴레이와 비교하여 고주파 성분을 감소시킬 수 있기 때문에 더 정확한 플랜트 좌표값을 찾을 수 있었다. 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 PI 제어기의 제어기 값을 구하면 $k=2.59$, $T_i = 6.13$ 로 계산되며 계산된 PI 제어기 값과 실제 플랜트 $G(s) = \frac{1}{4s+1}e^{-2s}$ 가 포함된 폐루프의 위상 마진을 계산하기 위해 $|C(jw)G(jw)| = 1$ 를 만족하는 w 값을 계산하면 $w = 0.62^\circ$ 이 된다. $w = 0.62$ 에서 $\angle C(j0.62)G(j0.62) = -154.1^\circ$ 가 되어 위상 마진은 25.9° 로 계산된다. 위상마진의 결과 또한 [7]의 방법보다 정확함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안

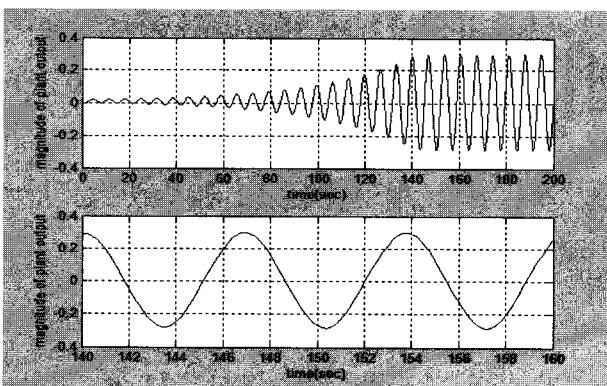


그림 7. 지연 시간이 0인 경우의 플랜트 출력
Fig. 7. The plot of plant output with delay time=0.

된 방법이 [7]의 방법 보다 더 정확하게 플랜트의 한점의 좌표를 찾아 낼 수 있기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자동 동조시스템에서 PI 제어기 사용 시 I 성분에 의해 발생되는 위상 감소시에도 PI 제어기 설계가 가능하도록 시간 자연요소와 포화함수를 이용하여 플랜트의 Nyquist 그림의 3/4 분면의 한점의 좌표값을 찾아내는 알고리즘을 제안하였다. 기준의 방법^[7]은 두개의 릴레이를 사용하지 않고 시간지연 요소와 포화함수를 이용하여 PI 제어기 자동동조 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 포화함수의 사용으로 기존의 방법인 릴레이 사용에 따른 고주파 발생을 감소시켜 PI 제어기 설계의 기준이 되는 플랜트의 한점의 좌표값을 기준의 방법에 비해 정확하게 찾을 수 있어 주어진 사양을 더 정확하게 만족할 수 있는 PI 제어기 설계가 가능함을 보였으며 예제를 통해 비교 분석하였다. 또한 제안된 방법은 한 개의 포화함수 만을 이용하는 방법이어서 구조가 간단한 자동 동조 방법이다.

참 고 문 헌

- [1] G. Franklin, J. Powell and M. Workman. "Digital Control of Dynamic Systems," Addison Wesley, New York, second edition, 1990.
- [2] K. Ang, G. Chong, Y. Li, "PID Control System Analysis, Design, and Technology," IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 13, no. 4: 559-576, 2005.
- [3] K. J. Astrom and T. Hagglund. "Automatic tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1988.
- [4] K. J. Astrom and T. Hagglund, and A. Wallenborg. "Automatic tuning of digital controllers with application to HVAC plants," *Automatica*, 29(5):1333-1343, 1993.
- [5] M. Zhuang and D. P. Atherton. "PID controller design for a TITO system," *IEE Proc-Control Theory Appl.*, 141(2):111-120, March 1994.
- [6] D. Gu, Y Cai, P. Wang, W. Zhang, "Relay based feedback with PD controller for identification of unstable processes with large time delay," Proceeding of the 2007 ACC, 112-117, New York, U.S.A., 2007.
- [7] Mats Friman and Kurt V. Waller, "A Two Channel relay for autotuning," Report 96-6, Abo

- Academy, 1996.
- [8] Seung-Rohk Oh. "PID Autotuning Algorithm Based on Saturation Function Feedback," *Journal of IEEE Korea Council*, 2(2):98-104, 1998.
- [9] H. K. Khalil. "Nonlinear Systems, second edition," Prentice Hall, New Jersey, 1996.

저 자 소 개



오승록(정회원)
1980년 한양대학교
전기공학과 학사.
1988년 Polytechnic University
(NewYork) Electrical
Eng. 석사.
1994년 Michigan State Univ.
Electrical Eng. 박사.
1982년 ~ 1996년 한국전력공사 원자력발전소,
전력연구원.
1996년 ~ 2008년 현재 단국대학교
전자공학과 교수
<주관심분야 : 자동제어>