

최소분산 자기동조 PID제어기

A Self Tuning PID Controller with Minimum Variance

조원철, 전기준

(Won Chul Cho and Gi Joon Jeon)

Abstract : This paper presents a self tuning method of a velocity type PID controller for minimum or non-minimum phase systems with time delays. The velocity type PID control structure is determined in the process of minimizing the variance of the auxilliary output, and self tuning effect is achieved through the recursive least square algorithm at the parameter estimation stage and also through the Robbins-Monro algorithm at the stage of optimizing a design parameter. This method is simple and effective compared with other existing methods[1,2]. Numerical examples are included to illustrate the procedure and to show the performance of the control system.

Keywords : velocity type PID controller, generalizd minimum variance control, design parameter, Robbins-Monro algorithm

I. 서론

그동안 제어이론이 꾸준히 발전되어 고급 제어법칙이 많이 발견되었지만 아직까지 산업현장에 널리 이용되는 제어 루프는 주로 PID제어기로 구성되어 있다[3]. PID제어기가 애용되고 있는 이유는 그 구조가 간단하고 광범위한 프로세스에 대해서도 동작이 안정되어 제어성능을 효율적으로 유지할 수 있다는 점과 현장 엔지니어들에게 익숙하다는 점이다. 이러한 추세는 당분간 계속될 전망이다. PID제어기를 설계할 때 가장 중요한 문제는 비례, 적분, 미분이득을 결정하고 조정하는 것이다. 오래 전부터 많은 연구자들이 이 부분에 대해 여러 가지 방법을 제시하였으나 아직도 개선의 여지는 많다. PID제어기 이득을 결정할 때 조정절차가 간단한 Ziegler-Nichols방법[4]이 지금까지 널리 사용되고 있으나 이 방법으로는 자동화가 어려우며, 진동의 진폭을 어떤 한계 내로 유지하기가 힘들다[5]. 특히 플랜트의 파라미터를 모르거나 제어환경이 변화하는 경우에는 단순히 여러 가지 규칙으로 PID제어기 계수를 조정하는 것만으로 만족할 만한 성능을 얻을 수 없다[6].

위와 같이 파라미터를 모르거나 제어환경이 변하는 경우는 제어기의 파라미터를 온-라인으로 자동 조절하는 자기동조 제어기가 다른 방식의 제어기에 비해 효과적이다. Åström과 Wittenmark[7]가 처음 제안한 자기동조 제어기는 시스템의 파라미터를 모르거나 시스템 내부에 램프잡음이 존재하는 환경에서, 매 제어 주기마다 파라미터와 제어 입력을 계산한다. 그리고 그 결과를 진리치로보고 제어기의 파라미터를 온-라인으로 조정하여 시스템의 동특성변화에 적용하는 것으로 체계적이고 융통성이 있다. 이 자기동조 제어기는 제어루프 내에서 적절히 선택한 평가 함수가 최적 이 되는 조건에서 제어법칙을 결정한다[8,9]. 그러나 이 구조가 이상적인 제어성능은 갖지만 PID구조에 비해 복잡하여 플랜트에 직접 적용하기에는 여러 가지 문제점이 예견된다. 얼마 전부터 PID제어기처럼 구조가 간단하고 계통을 정밀하게 제어하는 자기동조 제어기의 특성을 그대로 유지할 수 있는 제어기 연구가 진행되고 있다[1,10]. 이 PID형 자기동조 제어기는 조정자로서 동작하는 설계계수의 설정이 불가피하다. 이 설계계수는 자기동조 제어기를 동조시키는 데 편리한 수단을 제공하는 것으로, 제어성능에 지대한 영향을 미친다. 그러므로 PID형 자기동조 제어기를 설계할 때는 설

계수를 적절히 선택하는 것이 대단히 중요하다.

본 논문에서는 잡음이 존재하는 모형에서도 만족스러운 제어성능을 얻기 위해, PID형 자기동조 제어기의 설계계수를 온-라인으로 조정하는 방법을 제안한다. 기존의 PID형 자기동조 제어기는 숙련된 운전자의 경험을 바탕으로 하는 시행착오 방법[1]이나 전문가 시스템[2]을 이용하여 설계계수를 설정한다. 전자는 설계계수의 값을 설정하기 위해 작은 설계계수의 값에서 시작하여 원하는 응답특성을 얻을 때까지 설계계수의 값을 증가하는 방법인데 최적의 값을 선택하기가 어렵다. 후자는 전문가 지식에 의존하는 전문가형 제어기로 제어기의 성능은 전적으로 지식의 정확도에 좌우되며 모든 상황에 대처할 수 있는 지식을 만든다는 것은 거의 불가능하고 특히 잡음이 존재하면 전문가 시스템에 필요한 지식 기반을 구성하는데 어려움이 있어 제어법칙을 얻기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해 Robbins-Monro 알고리즘[11]을 이용하여, 설계계수의 값을 자동 조절하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 구조가 간단하고 설계계수와 제어기 계수의 초기치를 설정하는데 제약점이 없으며, 최소위상 시스템 뿐만 아니라 비최소 위상 시스템에도 잘 동작한다. 한편 제안한 방법으로 구한 설계계수를 기준입력이 적분항에만 포함되는 경우와 출력의 미분 구조의 자기동조 PID제어기에 각각 적용하였다. 적용한 결과 각각의 자기동조 PID제어기가 잘 동작하였다. 아울러 출력의 미분 구조를 갖는 경우가 기준입력이 적분항에만 포함되는 구조로 구성된 자기동조 PID제어기보다 성능이 좋음을 비최소위상 시스템에 적용하여 확인하였다.

II. 일반화 최소분산 자기동조 제어

제어할 단일 입출력 시스템을

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d-1}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})\xi(t) \quad (1)$$

과 같은 모형으로 가정한다. 여기서 $y(t)$ 는 출력, $u(t)$ 는 제어 입력, $\xi(t)$ 는 백색잡음, d 는 프로세스의 지연시간, t 는 이산시간을 의미한다. $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ 와 $C(z^{-1})$ 는

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}, \quad b_0 \neq 0 \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1z^{-1} + \dots + c_lz^{-l} \end{aligned} \quad (2)$$

와 같다. $A(z^{-1})$ 와 $C(z^{-1})$ 의 모든 근은 단위원 내에 존재한다고 가정하며, 앞으로는 표기를 단순화하기 위해 다항식과 전달함수에서 z^{-1} 의 표현을 빼기로 한다.

접수일자 : 1995. 7. 19., 수정완료 : 1996. 2. 16.

조원철 : 경북대학교 전자·전기공학부

전기준 : 경북대학교 전자·전기공학부, 제어계측신기술연구센터

일반화 최소분산 자기동조 제어기는 보조출력

$$\psi(t) = Py(t) + Qu(t-d-1) - Ry_r(t-d-1) \quad (3)$$

의 분산이 최소가 되도록 설계하는 것이다. 여기서 $y_r(t)$ 는 기준입력, P, Q 와 R 은 하중 유리식이며

$$P = P_n/P_d, \quad Q = Q_n/Q_d, \quad R = R_n/R_d \quad (4)$$

의 전달함수로 나타낸다. (3)의 보조출력 분산을 최소화하는 제어법칙은

$$u(t) = \frac{CRy_r(t) - (F/P_d)y(t)}{EB + CQ} \quad (5)$$

이다[12]. 여기서 E 와 F 를 얻기 위하여

$$CP_n/AP_d = E + z^{-d-1}(F/AP_d) \quad (6)$$

의 diophantine 방정식을 이용한다.

만약, 시스템의 파라미터 A, B 와 C 를 안다면 E 와 F 는 (6)에서 구하고 이를 (5)의 제어법칙에 대입하면 제어 입력을 얻을 수 있다. 그러나 시스템의 파라미터를 모르는 경우에는 제어기에 사용되는 파라미터를 직접 추정해야 한다. 이 파라미터를 추정하기 위해 보조출력 $\psi(t+d+1)$ 을 예측해야 하며 $Qu(t)$ 와 $Ry_r(t)$ 는 알고 있으므로, 보조출력 $\psi(t+d+1)$ 을 예측하는 문제는 t 까지의 입력력 데이터가 주어졌을 때

$$\psi_y(t+d+1) = Py(t+d+1) \quad (7)$$

을 예측하는 문제이다. 그리고 $\psi_y(t+d+1)$ 은 (1)과 (6)으로부터

$$\psi_y(t+d+1) = (F/CP_d)y(t) + (EB/C)u(t) + E\xi(t+d+1) \quad (8)$$

을 구할 수 있으며, 만약 $C=1$ 이고 $G=EB$ 로 놓으면 (8)은

$$\psi_y(t+d+1) = Fy_r(t) + Gu(t) + \varepsilon(t+d+1) \quad (9)$$

이다. 여기서 $y_r(t) = (1/P_d)y(t)$, $\varepsilon(t+d+1) = E\xi(t+d+1)$ 이고 F 와 G 는 z^{-1} 로 표시되는 다항식이며 그 차수는 각각

$$L = n + \deg P_d - 1 \quad (10)$$

$$J = m + d \quad (11)$$

이다. 또한, (9)는 입력력 데이터의 선형식으로서 시스템의 파라미터 F 와 G 를 표준 최소자승법으로 추정하면 추정치 \hat{F} 과 \hat{G} 을 얻을 수 있다. 따라서, 추정치 \hat{F} 과 \hat{G} 을 (5)에 대입하여 일반화 최소분산 자기동조 제어기의 제어법칙

$$u(t) = \frac{Ry_r(t) - \hat{F}y_f(t)}{\hat{G} + Q} \quad (12)$$

를 얻을 수 있다.

III. PID형 자기동조 제어기

일반적인 이산 속도형 PID제어기의 출력은

$$\Delta u(t) = K_p [e(t) - e(t-1)] + K_i e(t) + K_d [e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)] \quad (13)$$

이고, 여기서 Δ 는 $(1-z^{-1})$, $e(t) = y_r(t) - y(t)$ 이며 K_p 는 비례이득, K_i 는 적분이득, K_d 는 미분이득이다. (13)의 이상적인 속도형 PID제어기는 여러 형태가 유용하게 사용될 수 있는데, 여기서 다루고자 하는 PID제어기 구조는 기준입력이 적분항에만 포함되는(set-point-on-I-only)제어기와 출력의 미분(derivative of output)제어기 구조이다.

먼저 기준입력이 적분항에만 포함되는 제어기를 구성하기 위해 (13)을 정리하면, 제어기의 출력은

$$\Delta u(t) = K_i y_r(t) - [K_p + K_i + K_d] y_r(t) + [K_p + 2K_d] y_r(t-1) - K_d y_r(t-2) \quad (14)$$

이고, 여기서 출력 $y(t)$ 는 필터링한 출력 $y_f(t)$ 를 사용하였다. (12)의 제어법칙은

$$(\hat{G} + Q)u(t) = -\hat{F}y_f(t) + Ry_r(t) \quad (15)$$

로 표현할 수 있고 다항식 \hat{F} 의 차수는 (15)의 제어법칙이 (14)의 PID구조를 갖기 위해 2가 되도록

$$\hat{F} = \hat{f}_0 + \hat{f}_1 z^{-1} + \hat{f}_2 z^{-2} \quad (16)$$

으로 선정하여야 한다. 또한 다항식 R 은 설계시 임의로 선택할 수 있으며 출력 $y(t)$ 와 기준입력 $y_r(t)$ 가 정상상태에서 일치하도록 R 을 \hat{H} 으로 선정하면

$$\hat{H} = [\hat{F}/P_d] |_{z=1} = \sum_{i=0}^L \hat{f}_i \quad (17)$$

이다. 여기서 \hat{f}_i 는 다항식 \hat{F} 의 계수이며 P_d 는 임의로 선택할 수 있는 다항식이다. 다항식 Q 는 다항식 R 과 마찬가지로 설계자가 임의로 지정할 수 있으며 자기동조 제어법칙에 적분동작이 들어가도록

$$\hat{G} + Q = (1-z^{-1})/\nu \quad (18)$$

로 선택한다. 여기서 ν 는 제어기를 동조시키는 데 편리한 수단을 제공해 주는 설계계수로서 이 값을 결정하는 알고리즘에 대하여는 뒤에 기술한다.

하중 유리식 $P(=P_n/P_d)$ 는 제어기 파라미터에 영향을 주는 요소로 기준입력의 변화에 대해 페루프의 응답 특성을 좋게 하기 위하여 사용된다. P_d 와 P_n 의 계수를 부적절하게 선택하면 오버슈트가 커지거나 진동이 일어날 수 있으므로 이들 요소의 적절한 선택이 필요하다. 특히 P_d 의 근이 그림 1의 빗금친 영역에 있을 경우 시스템의 응답 특성을 좋게할 수 있다[13].

본 연구에서는 시스템의 발산을 방지하고 정상상태 오차를 제거하기 위해 다항식 P_d 는

$$P_d = \frac{1+z^{-1}P_{d1}}{1+P_{d1}}, \quad (-1 < P_{d1} \leq 0) \quad (19)$$

로 선택한다[14].

이제 속도형 PID제어기의 출력은 (17)과 (18)을 (15)에 대입하면

$$\Delta u(t) = \nu [\hat{H}y_r(t) - \hat{F}y_f(t)] \quad (20)$$

이다. 따라서 속도형 PID제어기 계수는 (14)와 (16), (20)을 서로 비교하면

$$\begin{aligned} K_p &= -\nu(\hat{f}_1 + 2\hat{f}_2) \\ K_i &= \nu(\hat{f}_0 + \hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_d &= \nu\hat{f}_2 \end{aligned} \quad (21)$$

이다.

다음은 자기동조 PID제어기를 구성하기 위해 출력의 미분 제어기구조를 이용하여 (13)을 전개하면, 제어기의 출력은

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= (K_i + K_p)y_r(t) - K_p y_r(t-1) \\ &\quad - [K_p + K_i + K_d] y_f(t) \\ &\quad + [K_p + 2K_d] y_f(t-1) \\ &\quad - K_d y_f(t-2) \end{aligned} \quad (22)$$

이고, \hat{H} 은

$$\hat{H} = [\hat{f}_0 - \hat{f}_1 + (2\hat{f}_1 + \hat{f}_2)z^{-1}] \quad (23)$$

으로 선택한다. 이 구조의 속도형 PID제어기의 출력은 (19)

와 (23)을 (15)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= \nu [[(\hat{f}_0 - \hat{f}_1)y_r(t) + (2\hat{f}_1 + \hat{f}_2)y_r(t-1)] \\ &\quad - \hat{F}y_f(t)] \\ &= \nu [\hat{H}y_r(t) - \hat{F}y_f(t)] \end{aligned} \quad (24)$$

이다. 따라서 (22)와 (24)를 서로 비교하면 속도형 PID제어 기 계수는

$$\begin{aligned} K_p &= -\nu(2\hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_i &= \nu(\hat{f}_0 + \hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_d &= \nu\hat{f}_2 \end{aligned} \quad (25)$$

이다. (21)과 (25)의 K_p 로부터 자기동조 제어기의 설계계수 ν 는 고전적인 제어기의 비례이득과 비슷한 역할을 할 뿐만 아니라 적분과 미분이득에도 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있다. 즉 ν 값이 크면 결과적으로 과도한 제어가 되어 부족감쇄 응답이 나타나고 반면에 ν 값이 작으면 보다 완만한 제어로 과도감쇄 응답이 나타난다.

기존의 방법[1,2]은 설계계수 ν 의 값을 사용자 임의로 지정하는 것과 전문가 시스템을 이용하여 선택하는 것이다. 전자가 가진 시행착오의 문제점과 후자의 전문가 시스템에 필요한 지식기반을 구성하는 어려움으로 최적의 값을 선택하기가 힘들다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 확률 근사(stochastic approximation)법 중 구조와 원리가 간단한 Robbins-Monro 알고리즘을 이용하여 설계계수 ν 의 값을 자동 조정하고자 한다.

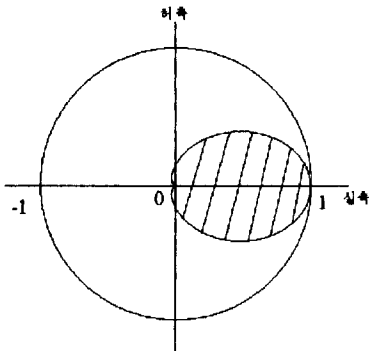


그림 1. P_d 의 근 영역.
Fig. 1. Region of a root of P_d .

Robbins-Monro 알고리즘[11]의 목적은

$$\varepsilon [Q(\theta, e(t))] = M(\theta) = 0 \quad (26)$$

의 해 θ 를 얻고자 하는 것이다. 여기서 $\{e(t)\}$ 는 확률변수의 수열이며 ε 는 $e(t)$ 에 대한 기대치이다. (26)의 해를 구하는 Robbins-Monro 알고리즘은

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \eta(t)Q(\hat{\theta}(t-1), e(t)) \quad (27)$$

이며, 여기서 $\{\eta(t)\}$ 는

$$\sum_{t=1}^{\infty} \eta(t) = \infty, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \eta(t) = 0 \quad (28)$$

의 조건을 만족하는 양의 수열이다.

일반화 자기동조 최소분산 제어기는 보조출력의 분산 즉

$$J = \varepsilon [\frac{1}{2} l^2(\psi_y, y_r)]$$

$$l(\psi_y, y_r) = [(\psi_y(t+d+1) - Py_r(t+d+1))] \quad (29)$$

를 최소가 되도록 제어 입력을 결정하는 방법이다. (29)를 최소로 하는 ν 의 값은

$$\frac{\partial J}{\partial \nu} = \varepsilon [\frac{\partial l(\psi_y, y_r)}{\partial \nu}] = 0 \quad (30)$$

의 해를 구하는 것이다. 한편 $\partial l(\psi_y, y_r) / \partial \nu$ 는 Chain rule을 이용하여 구하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \nu} &= \varepsilon [\frac{\partial l(\psi_y, y_r)}{\partial \psi_y(t+d+1)} \frac{\partial \psi_y(t+d+1)}{\partial u(t)} \\ &\quad - \frac{\partial u(t)}{\partial \nu}] \end{aligned} \quad (31)$$

과 같고 여기서

$$\begin{aligned} \frac{\partial l(\psi_y, y_r)}{\partial \psi_y(t+d+1)} &= (\psi_y(t+d+1) \\ &\quad - Py_r(t+d+1)) \end{aligned} \quad (32)$$

이고, (9)의 추정 식으로부터

$$\frac{\partial \psi_y(t+d+1)}{\partial u(t)} = \hat{g}_0 \quad (33)$$

과 같이 얻을 수 있다. 여기서 \hat{g}_0 은 \hat{G} 의 0차항의 계수이다. 또한, 시간 t 에서 추정된 H 와 F 를 각각 \hat{H}_t 와 \hat{F}_t 로 두고 (20)을 다시 쓰면

$$(1-z^{-1})u(t) = \nu [\hat{H}_t y_r(k) - \hat{F}_t y_f(k)] \quad (34)$$

이므로 $\partial u(t) / \partial \nu$ 는

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(t)}{\partial \nu} &= \frac{1}{1-z^{-1}} [\hat{H}_t y_r(k) - \hat{F}_t y_f(k)] \\ &= \sum_{k=1}^t [\hat{H}_k y_r(k) - \hat{F}_k y_f(k)] \end{aligned} \quad (35)$$

이다. 따라서, 이 성능지수 J 를 최소로 하는 Robbins-Monro 알고리즘은

$$\begin{aligned} \nu(t) &= \nu(t-1) + \mu(t) [\varepsilon \frac{\partial J}{\partial \nu}] \\ &= \nu(t-1) + \mu(t) [(\psi_y(t+d+1) - Py_r(t+d+1)) \hat{g}_0 \\ &\quad \sum_{k=1}^t [\hat{H}_k y_r(k) - \hat{F}_k y_f(k)]] \end{aligned} \quad (36)$$

이고,¹⁾ 여기서

$$\mu(t) = \frac{\mu_0}{t}, \quad 0 < \mu_0 < 1 \quad (37)$$

로 설정하면 (28)의 조건을 만족시킨다.

이렇게 구한 설계계수 ν 를 (20)에 대입하여 제어 입력을 얻는다. 이 일반화 최소분산 PID 자기동조 제어 시스템의 블록 도는 그림 2에 보였다.

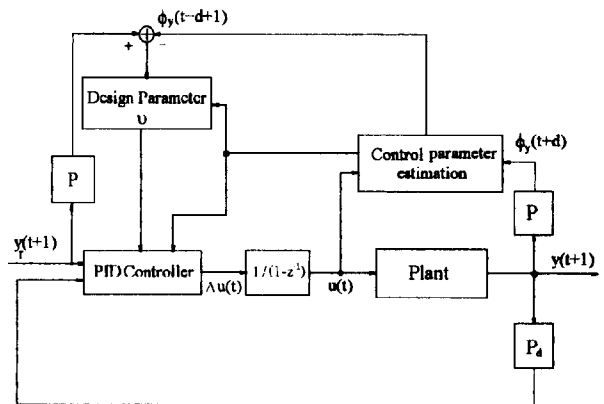


그림 2. PID형 자기동조 제어기의 구조도.
Fig. 2. Structure of a PID-like self tuning controller.

1) $\frac{\partial J}{\partial \nu}$ 에 쓰인 추정된 값을 그 기대값으로 보았다. (참고문헌 [11] p.312 참조)

설계계수 ν 를 자동 조정하는 PID형 자기동조 제어기의 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- 단계 1 : 하중 유리식 P 의 값을 선택한다.
- 단계 2 : 제어기에 사용하는 다항식 F, G 을 순환 최소 자승법을 이용하여 추정한다.
- 단계 3 : Robbins-Monro방법을 이용하여 설계계수 ν 구한다.
- 단계 4 : PID제어기 계수를 결정한다.

1) 기준입력이 적분항에만 포함되는(set-point-on-I-only)제어기의 경우

$$\begin{aligned} K_p &= -\nu(\hat{f}_1 + 2\hat{f}_2) \\ K_i &= \nu(\hat{f}_0 + \hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_d &= \nu\hat{f}_2 \end{aligned}$$

2) 출력의 미분(derivative of output)제어기의 경우

$$\begin{aligned} K_p &= -\nu(2\hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_i &= \nu(\hat{f}_0 + \hat{f}_1 + \hat{f}_2) \\ K_d &= \nu\hat{f}_2 \end{aligned}$$

단계 5 : $(t+1)$ 로 하여 단계 2로 간다.

IV. 시뮬레이션 결과와 검토

제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 기준입력이 적분항에만 포함되는 구조와 출력의 미분 구조로 구성된 자기동조 PID제어기에 적용하여 다음의 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션으로 두 구조의 자기동조 PID제어기의 성능을 비교 검토하고자 한다.

예제 1: 시간 지연이 있는 비최소위상 연속시스템이다.

$$G(s) = \frac{\exp(-s)(0.25s^2 + 0.724s + 1.02)}{s^2 + 0.43s + 1.15}$$

이 시스템의 샘플링 시간을 1.0초로 하고 잡음신호를 첨가하면 이산시간 시스템

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{z^{-2}(0.25 + 0.5z^{-1})}{1 - 0.8z^{-1} + 0.65z^{-2}} u(t) \\ &+ \frac{1 - 0.47z^{-1}}{1 - 0.8z^{-1} + 0.65z^{-2}} \xi(t) \end{aligned}$$

가 된다. $\xi(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 0.1인 가우스 백색 잡음이며, 기준입력은 1과 -1사이에서 50초마다 변하는 구형파로 500초까지 수행하였다. 제어기에 사용하는 파라미터의 초기치 $\theta(0)$ 은 0으로 하였으며, 설계계수의 초기치 $\nu(0)$ 역시 0으로 하였다. μ_0 의 값은 0.2로 정하였다. P_d 의 1차 계수는 -0.43이고 P_n 의 1차 계수는 0.46으로 하였으며 기준입력이 적분항에만 포함된 경우의 결과는 그림 3에 그리고 출력의 미분제어기경우는 그림 4에 보였다.

예제 2: 이번에는 프로세스 자체에 적분항이 존재하는 비최소위상 연속시간 선형시스템을 시뮬레이션 하였다[15].

$$G(s) = \frac{-0.1s + 1.0}{s^2 + 1.0s}$$

여기서 샘플링 시간을 1.0초로 하고 잡음신호를 첨가하면 이산시간 시스템

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{z^{-1}(0.3047 + 0.3275z^{-1})}{1 - 1.37z^{-1} + 0.37z^{-2}} u(t) \\ &+ \frac{1 + 0.4z^{-1}}{1 - 1.37z^{-1} + 0.37z^{-2}} \xi(t) \end{aligned}$$

가 된다. $\xi(t)$ 의 분산을 0.05로 하였으며, μ_0 의 값은 0.7으로 정하였다. P_d 의 1차 계수는 -0.05이고 P_n 의 1차 계수는 -0.2로 하였으며 기준입력이 적분항에만 포함된 경우의 결과는 그림 5에 그리고 출력의 미분제어기경우는 그림

6에 보였다.

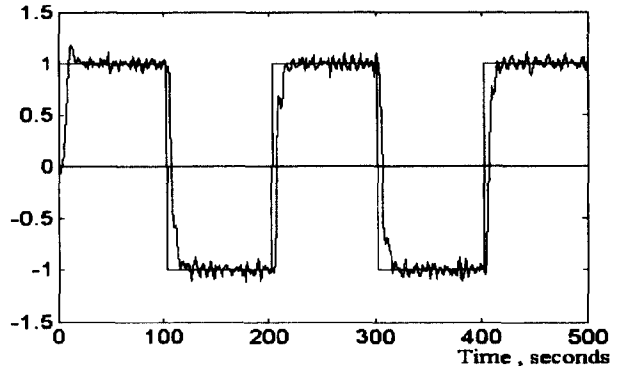


그림 3a. 시스템 출력.
Fig. 3a. System output, $y(t)$.

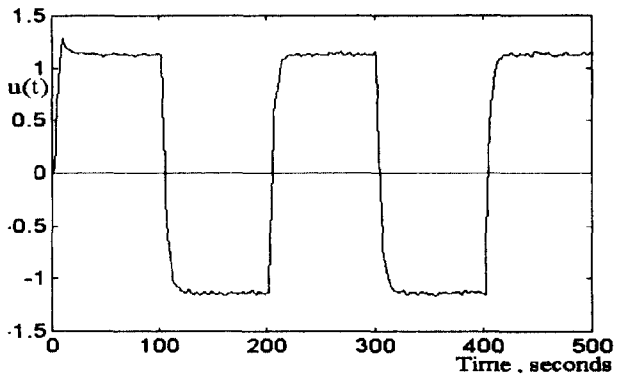


그림 3b. 제어 입력.
Fig. 3b. Control input, $u(t)$.

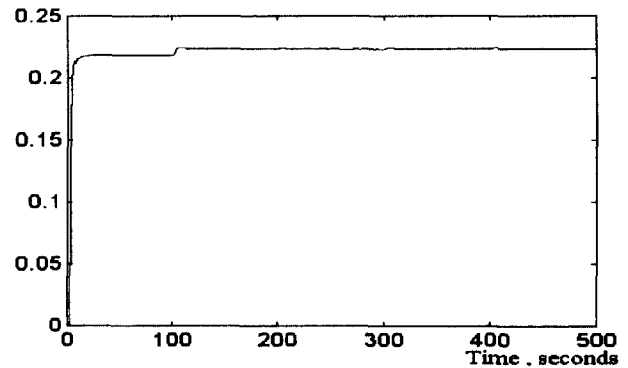


그림 3c. 설계계수.
Fig. 3c. Design parameter, ν .

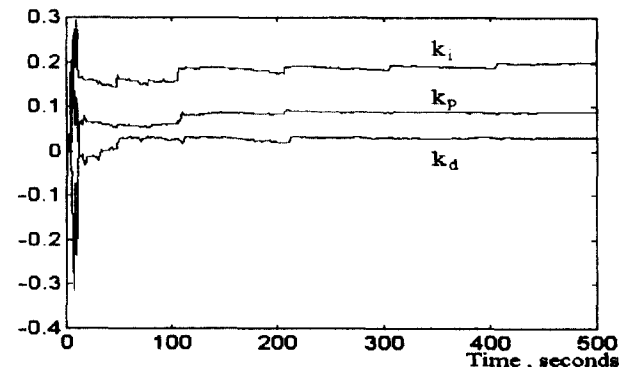


그림 3d. PID제어기의 K_p, K_i 와 K_d .
Fig. 3d. K_p, K_i and K_d of the PID controller.

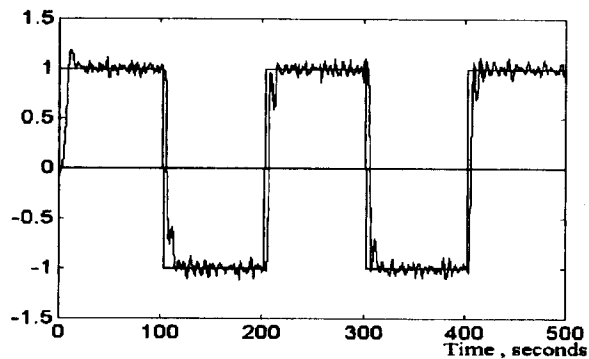


그림 4a. 시스템 출력.
Fig. 4a. System output, $y(t)$.

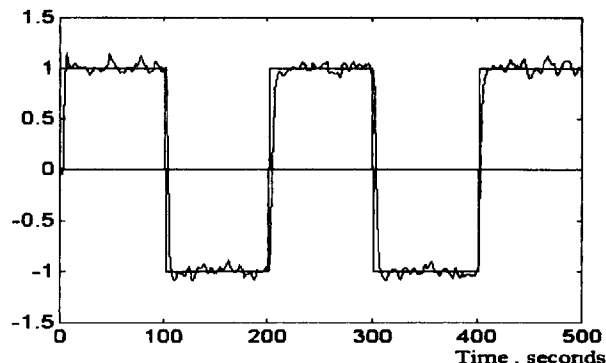


그림 5a. 시스템 출력.
Fig. 5a. System output, $y(t)$.

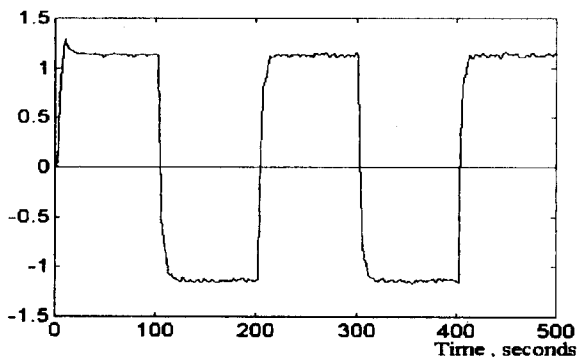


그림 4b. 제어 입력.
Fig. 4b. Control input, $u(t)$.

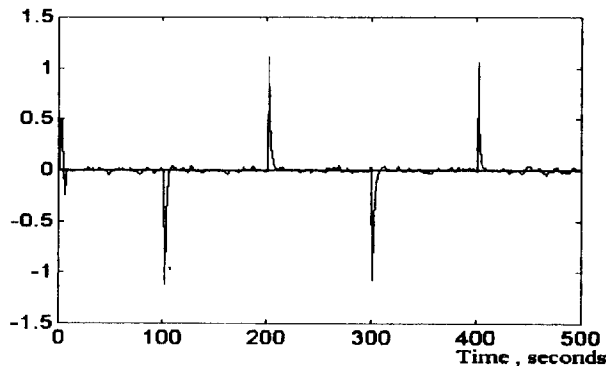


그림 5b. 제어 입력.
Fig. 5b. Control input, $u(t)$.

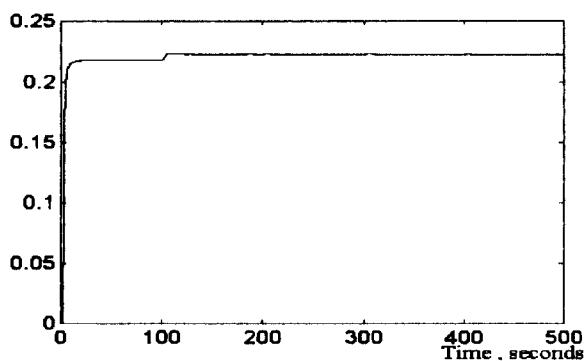


그림 4c. 설계계수.
Fig. 4c. Design parameter, ν .

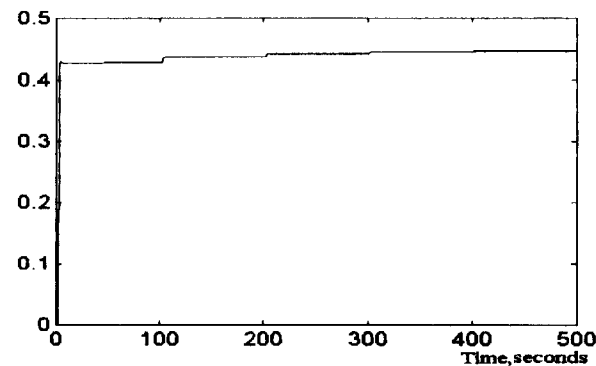


그림 5c. 설계계수.
Fig. 5c. Design parameter, ν .

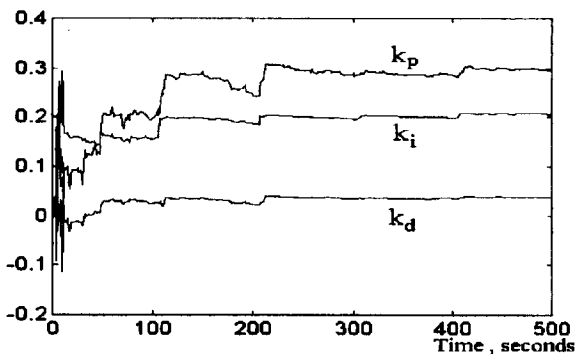


그림 4d. PID제어기의 K_p, K_i 와 K_d .
Fig. 4d. K_p, K_i and K_d of the PID controller.

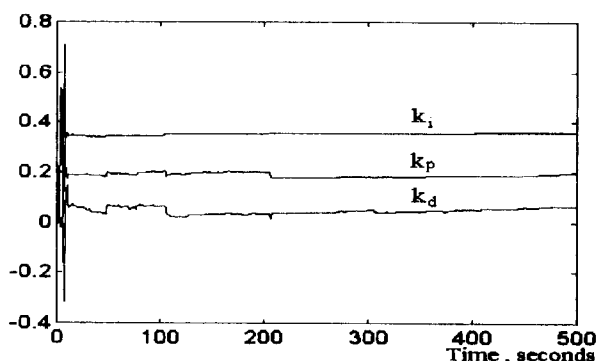


그림 5d. PID제어기의 K_p, K_i 와 K_d .
Fig. 5d. K_p, K_i and K_d of the PID controller.

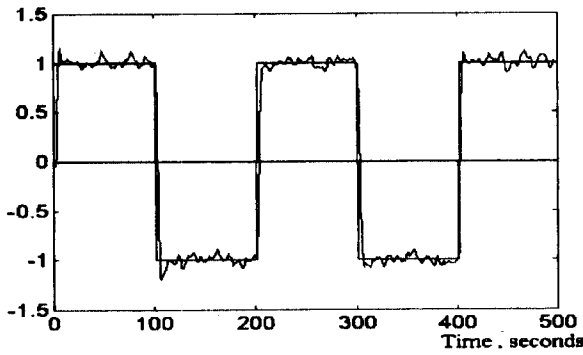


그림 6a. 시스템 출력.
Fig. 6a. System output, $y(t)$.

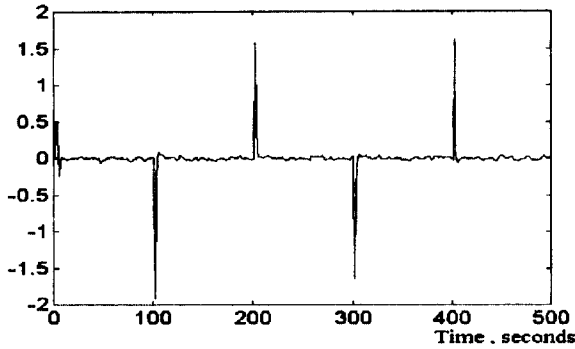


그림 6b. 제어 입력.
Fig. 6b. Control input, $u(t)$.

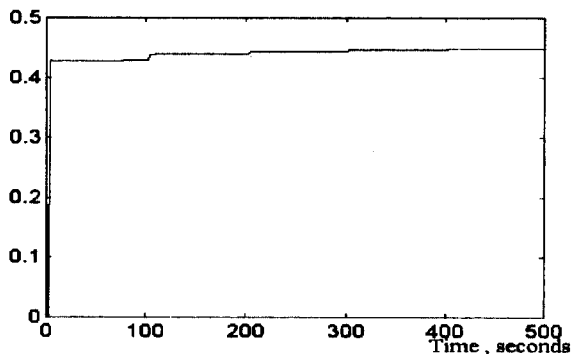


그림 6c. 설계계수.
Fig. 6c. Design parameter, ν .

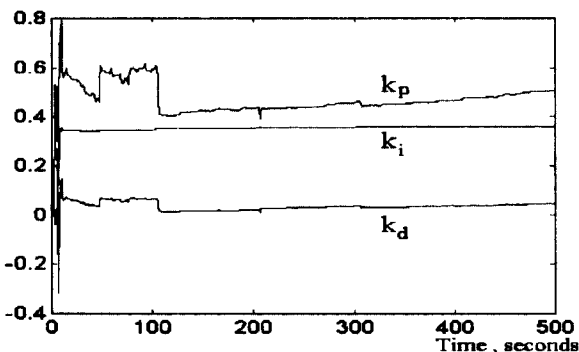


그림 6d. PID제어기의 K_p, K_i 와 K_d .
Fig. 6d. K_p, K_i and K_d of the PID controller.

시간 지연이 있는 비최소위상 시스템의 시뮬레이션 결과는 그림 3과 그림 4에서와 같이 만족할 만한 성능을 보여주며 K_p, K_i, K_d 와 설계계수 ν 도 수렴함을 알 수 있다. 그림 5와 그림 6과 같이 시스템에 적분항이 존재할 경우에도 결과는 만족할 만하다. 이와 같이 시스템에 적분항이 존재하는 경우에는 그림 2의 제어 시스템 블록 도에서 $1/(1-z^{-1})$ 블록을 제거하여야 한다. 따라서 이 제어방법을 적용하기 전에 반드시 프로세스에 적분기능이 존재하는가를 먼저 알아내어야 한다. 그리고 그림 4와 그림 6의 출력의 미분 PID구조의 제어성능은 그림 3과 그림 5의 기준 입력이 적분항에만 포함되는 PID구조보다 개선됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 잡음이 존재하는 비최소위상 시스템에 대해서 PID구조를 갖는 자기동조 제어기의 설계계수를 온라인으로 조정하는 방법을 제안하였다. 또한 기준입력의 급격한 변화에 영향을 미치지 않는 특징을 가진 기준입력이 적분항에만 포함되는 경우와 출력의 미분 속도형 PID구조를 제안하였다. 먼저 일반화 최소분산 제어기법으로 PID형 제어기를 추정한 다음 설계계수를 Robbins-Monro 알고리즘으로 최적화하므로써 PID이득을 결정하였다. 두 가지 속도형 PID구조에 제안한 방법으로 구한 설계계수를 적용한 결과 각각의 자기동조 PID제어기가 잘 동작하였으며, 출력의 미분제어기 구조를 갖는 경우가 기준입력이 적분항만에 포함되는 PID구조로 구성된 자기동조 PID제어기보다 성능이 좋을 수 있었다. 이 방법은 시간 지연이 있는 최소위상이나 비최소위상 시스템에 적용 가능하며 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다. 앞으로 남은 과제는 이 방법을 실제 프로세스에 실험하는 것과, 프로세스에 적분기능의 존재 유무가 제어 시스템의 구조를 결정하므로 이를 판별하여 일관된 공정의 자동화를 이루는 것이다.

참고 문헌

- [1] F. Cameron and D. E. Seborg, "PID structured self tuning controller," *International Journal of Control*, vol. 38, no. 2, pp. 401-417, 1983.
- [2] 채창현, 이창훈, 임은빈, 우광방 "Expert형 제어 기법에 의한 자기동조 제어기에 관한 연구," 전기공학회 논문지, 38권, 8호, pp. 617-628, 1989년 8월.
- [3] D. E. Seborg, "A perspective on advanced strategies for process control," *Modeling Identification and Control*, vol. 15, no. 3, pp. 179-189, 1994.
- [4] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for Automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [5] K. J. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 645-651, 1984.
- [6] P. J. Gawthrop and P. E. Nomikos, "Automatic tuning of commercial PID controllers for single-loop and multiloop applications," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 34-42, 1990.
- [7] K. J. Åström and B. Wittenmark, "On self-tuning regulators," *Automatica*, vol. 9, no. 2, pp. 185-199, 1973.
- [8] D. W. Clarke and P. Gawthrop, "A self-tuning controller," *Proc. IEE*, vol. 122, no. 9, pp. 929-934,

- 1975.
- [9] K. J. Åström, "Theory and Applications of Adaptive control-A Survey," *Automatica*, vol. 19, no. 5, pp. 471-486, 1983.
- [10] R. Yusof and S. Omatu, "A multivariable self tuning PID controller," *International Journal of control*, vol. 57, no. 6, pp. 1387-1403, 1993.
- [11] G. C. Goodwin and K. S. Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- [12] V. V. Chalam, *Adaptive Control Systems Techniques and Applications*, Marcel Dekker, Inc., 1987.
- [13] R. Soeterboek, *Predictive Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [14] 김준현, 이상근, "자기동조 적응제어를 이용한 전력계통 안정화장치의 다기계통적용," 전기공학회논문지, 42권, 11호, pp. 78-84, 1993년 11월.
- [15] K. J. Åström, C. C. Hang, P. Persson and W. K. Ho, "Towards intelligent PID control," *Automatica*, vol. 28, no. 1, pp. 1-9, 1992.



조 원 철

1964년 2월 7일생. 1986년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1989년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1991년 ~ 현재 동 대학원 박사과정. 주관심분야는 적응제어, 퍼지제어 등임.



전 기 준

1945년 12월 28일 생. 1969년 2월 서울대학교 금속공학과(공학사). 1978년 8월 미국 Houston대 전기공학과(공학석사). 1983년 12월 Houston대 전기공학과(공학박사). 1971-1976년 국방과학연구소 연구원. 1983년 12월 ~ 현재 경북대학교 전자·전기공학부 교수. 주관심분야는 제어이론, 퍼지·신경망·GA를 이용한 제어, 공장자동화 등임.