

논문 2005-42SC-6-3

아핀 집합의 특성을 이용한 변형된 PID 제어기의 최적 동조

(Optimum Tuning of Modified PID Controller using Properties of the Affine Set)

김 창 현*, 임 동 균**, 서 병 설***

(Chang-Hyun Kim, Dong-Kyun Lim, and Byung-Suhl Suh)

요 약

본 논문에서는 PID 제어기와 PI-PD 제어기 사이의 관계를 분석하여 이 두 제어기의 affine 집합을 구성하는 PID 제어기의 변형된 형태인 PID-PD 제어기와 그 동조 방법을 새롭게 제안한다. 제안된 설계 방법은 PID와 PI-PD 제어기를 이용한 전체 폐루프 시스템의 시간 응답을 경계로 그 사이의 응답을 보이도록 설계할 수 있다. 그 동조 방법으로 특정한 가격함수를 선정하여 이를 최소화하는 최적 동조법을 적용하여 제어기를 설계하였다. 제안된 제어기의 유용성을 사례 연구와 분석을 통해 검토했다.

Abstract

In this paper, we propose a PID-PD controller and its tuning method to be modified form of PID controller that consist of the affine set of PID and PI-PD controller by analyzing relation between these controllers. The proposed tuning method controls the closed-loop system to locate between the step responses of system controlled by PID and PI-PD controller. The controller is designed by the optimum tuning method to minimize the proposed specific cost functions. Its effectiveness is examined by the case studies and their analysis.

Keywords : PID-PD, PID, PI-PD, affine set, optimum tuning, ISE

I. 서 론

시스템의 제어에 있어 PID 제어기는 그 성능의 우수성과 설계에 있어서의 간편성 때문에 현재에 이르기까지 실 산업에서 널리 응용 되어 왔다. 하지만 PID 제어기만으로는 충분한 성능을 발휘할 수 없는 경우가 있다. 그래서 Åström 와 Hägglund^[1]는 2차 이상의 복잡한 시스템, 긴 시간 지연을 갖는 시스템 그리고 진동 모드를 갖는 시스템 등에서 PID 제어기보다 더 복잡한

구조의 제어기가 필요하다고 언급한 바 있다. 또한 특별히 Kwak^[2], Atherton 과 Majhi^[3], Park^[4]는 적분항을 갖는 시스템과 개루프 불안정 시스템에서 PID제어기의 구조적인 한계점을 지적하였다. 그래서 Atherton과 Majhi는 이를 극복하기 위해 변형된 PID 제어기를 제안하였고^{[3][5][6]} 이 제안된 PI-PD 제어기와 PID 제어기 사이의 구조적 관계로부터 동조 방법을 유도하여 비교적 간편하면서 우수한 성능을 보이는 설계 방법이 연구 되어 왔다.^{[5][7]} 본 논문에서는 변형된 PID 제어기로 PID-PD제어기를 제안하고 이 제어기와 PID, PI-PD 제어기간의 관계가 affine 집합을 이루도록 PID-PD 제어기를 설정할 수 있음을 보여 affine 집합의 특성을 이용한 제어기 설계를 제안한다. 이 제어기는 affine 집합의 특성상 경계가 되는 PID제어기와 PI-PD 제어기의 사이의 응답을 보이도록 설계하기 때문에 과도한 오버슈트를 보이는 PID 제어 응답과 큰 상승시간을 보이는

* 학생회원, 한양대학교 전기공학과
(Dep. of Electrical Eng., Graduate School, Hanyang University)

** 정회원, 한양사이버대학교 컴퓨터학과
(Dep. of Computer, Hanyang Cyber University)

*** 정회원, 한양대학교 전기제어생체공학부(교신책임자)
(Div. of Electricity, Control and Biomedical Eng., Hanyang University)

접수일자: 2005년8월4일, 수정완료일: 2005년11월7일

PI-PD 제어 응답을 절충할 수 있는 장점이 있다. 또한 이런 affine 집합의 특성을 제어기 설계에 이용하고자 처음 제안한 Boyd^{[8][9]}는 시스템에 따라 제어기의 형태와 차수가 변하는 문제를 갖고 있었으나 본 논문에서 제안하는 제어기는 산업계에서 널리 사용되는 PID 제어기와 변형된 PID 제어기로 그 형태를 일치시켜 제어기의 적용에 있어 용이함을 갖고 있다. 동조 방법으로는 시간영역의 여러 성능에 가중치를 부여하여 이를 합한 가격함수와 일반적인 ISE를 가격함수로 하여 최적 동조하는 방법을 적용하여 설계 변수 값을 선정하였다. affine 집합의 특성상 최초 경계를 형성하는 PID 제어 응답과 PI-PD 제어 응답이 안정하면 이 두 응답의 사이의 응답을 보이는 제안된 PID-PD 제어 응답 역시 안정하게 된다. 이후에 구체적인 제어기 설정과 설계 절차를 기술하고 사례 연구를 통해 그 결과를 검토하였다.

II. 변형된 PID 제어기 설계

1. 변형된 PID 제어기의 구조와 설계

그림 1에서 변형된 PID 제어기의 구조를 나타내었고 본 논문에서 논의될 제어기의 형태는 다음과 같다.

$$C_1(s) = K_p^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s \right) \quad (1)$$

$$C_1(s) = K_{p1}^* \left(1 + \frac{1}{T_{i1}^* s} \right) \text{ and } C_2(s) = K_{p2}^* (1 + T_{d2}^* s) \quad (2)$$

$$C_1(s) = K_{p1}^* \left(1 + \frac{1}{T_{i1}^* s} + T_{d1}^* s \right) \text{ and } C_2(s) = K_{p2}^* (1 + T_{d2}^* s) \quad (3)$$

식 (1)에서와 같이 $C_2(s)$ 가 없는 제어기는 일반적인 PID 제어기의 형태이고 식 (2)와 (3)은 PID 제어기의 변형된 형태로 각각 PI-PD, PID-PD 제어기이다. 본 논문에서 고려하는 제어기는 PID-PD 제어기이고 이 제어

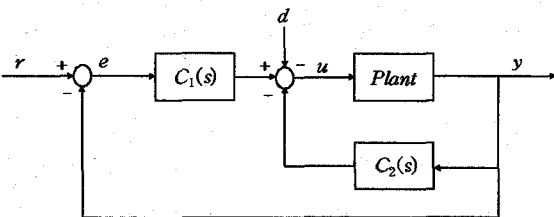


그림 1. 변형된 PID 제어기 구조
Fig. 1. Structure of modified PID control system.

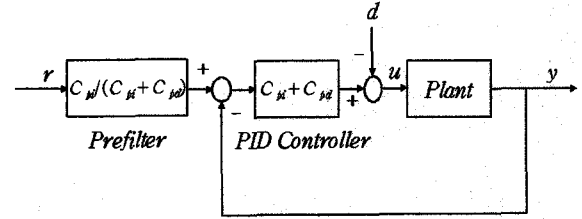


그림 2. PI-PD 제어기와 PID 제어기의 동가 구조
Fig. 2. Equivalent PID structure of PI-PD control structure.

기와 PID, PI-PD 제어기의 관계가 affine 집합을 이루도록 각 설계 변수를 구성하여 동조하는 방법을 새롭게 제안한다.

Majhi 와 Atherton^[5], Kaya^[7]가 보인 PI-PD 제어기와 PID 제어기의 구조적인 상관관계를 나타내는 블록 선도는 그림 2와 같다.

각 블록은 식 (2)로부터 식 (4)와 (5)로 표현되고 그림 2의 PID 제어기는 PI 제어기와 PD 제어기의 합이므로 식 (6)과 같고 여기에 일반적인 PID 제어기인 식 (1)을 적용하면 식 (7)으로 다시 표현될 수 있다.

$$C_{pi}(s) = K_{p1}^* \left(1 + \frac{1}{T_{i1}^* s} \right) \quad (4)$$

$$C_{pd}(s) = K_{p2}^* (1 + T_{d2}^* s) \quad (5)$$

$$C_{pid}(s) = C_{pi}(s) + C_{pd}(s) \quad (6)$$

$$C_{pid}(s) = K_p^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s \right) = (K_{p1}^* + K_{p2}^*) \left(1 + \frac{K_{p1}^*}{(K_{p1}^* + K_{p2}^*) T_{i1}^* s} + \frac{K_{p2}^*}{(K_{p1}^* + K_{p2}^*)} T_{d2}^* s \right) \quad (7)$$

식 (7)로부터 PID 제어기와 PI-PD 제어기의 각 파라미터간의 관계는 식 (8), (9)와 (10)으로 유도 되고 Prefilter는 식 (11)이 된다.

$$K_p^* = K_{p1}^* + K_{p2}^* \quad (8)$$

$$T_i^* = \frac{(K_{p1}^* + K_{p2}^*) T_{i1}^*}{K_{p1}^*} \quad (9)$$

$$T_d^* = \frac{K_{p2}^* T_{d2}^*}{(K_{p1}^* + K_{p2}^*)} \quad (10)$$

$$C_{prefilter}(s) = \frac{C_{pi}}{C_{pi} + C_{pd}} = \frac{K_{p1}^* (T_{i1}^* s + 1)}{T_{i1}^* K_{p2}^* T_{d2}^* s^2 + T_{i1}^* (K_{p1}^* + K_{p2}^*) s + K_{p1}^*} \quad (11)$$

Kaya^[7]는 Åström 와 Hägglund^[10]에 의해 간편한 PID 제어기 동조를 위해 사용된 $T_i^* = \alpha T_d^*$ 의 개념을 이용해 $K_{p1}^* = \beta K_{p2}^*$ 를 적용함으로써 PID 제어기의 3개의 설계 변수로부터 PI-PD 제어기의 설계 변수를 얻는 간편한 설계방법을 제시하였고 이 PI-PD 제어기의 설계 변수는 식 (12), (13)과 같다.

$$C_{pi}(s) = \frac{\beta}{1+\beta} K_p^* \left(1 + \frac{1+\beta}{\beta T_i^* s}\right) \quad (12)$$

$$C_{pd}(s) = \frac{1}{1+\beta} K_p^* (1 + (1+\beta) T_d^* s) \quad (13)$$

Kaya 는 동조 방법으로 두 제어기 간의 상관관계를 이용해 PID 계수 값은 기존의 동조방법에 의해 얻어진 값을 그대로 사용하고 $\beta=0.2$ 로 선정하는 방법을 제안하여 전형적인 PID 제어보다 시간영역 성능에서 우수함을 보였다.^[7] 하지만 이것은 경험적인 방법을 제시한 것으로 일반화하여 적용하기에는 다소 무리가 있어 본 논문에서는 원하는 성능의 경계치를 형성하는 β 값을 선정하여 시뮬레이션에 적용하였다. 이는 다음절에서 구체적으로 언급하겠다.

2. Affine 집합을 이루는 PID-PD 제어기의 구조

본 논문에서 고려하는 PID-PD 제어 시스템은 그림 1에 식 (3)을 적용한 제어기로 $C_1(s)$ 과 $C_2(s)$ 는 식 (14)와 (15)로 표기하겠다.

$$PID-PD : C_1(s) = C_{PID}(s) = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}s} + T_{d1}s\right) \quad (14)$$

$$C_2(s) = C_{PD}(s) = K_{p2}(1 + T_{d2}s) \quad (15)$$

PID, PI-PD, PID-PD 제어 시스템의 폐루프 전달 함수는 각각 식 (16), (17), (18)이다. 여기서 플랜트는 $G(s)$ 이다.

$$PID : G_{pid} = \frac{C_{pid}(s)G(s)}{1 + C_{pid}(s)G(s)} \quad (16)$$

$$PI-PD : G_{pid} = \frac{C_{pi}(s)G(s)}{1 + (C_{pi}(s) + C_{pd}(s))G(s)} \quad (17)$$

$$PID-PD : G_{pidpd} = \frac{C_{PID}(s)G(s)}{1 + (C_{PID}(s) + C_{PD}(s))G(s)} \quad (18)$$

affine 집합 C 은 그 정의에 의해 다음과 같다.^[11]

i) $C \subseteq R^n$ 인 집합 C 에서 $x_1, x_2 \in C$ 와 $\lambda \in R$ 이 라면, $\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2 \in C$ 이다.

i)에서 특별히 $0 \leq \lambda \leq 1$ 이면 convex 집합이고 ii)를 만족한다.

ii) $\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2$ 은 두 점 x_1, x_2 의 사이에 위치한다.

이는 시스템의 시간영역 응답에서도 동일하게 적용되어 $0 \leq \lambda \leq 1$ 를 만족하는 식 (19)의 시스템 $G_\lambda(s)$ 의 단위 계단응답은 우변의 두 시스템 $G(s)$ 과 $\tilde{G}(s)$ 이 이루는 각 응답을 경계로 하여 그 사이의 응답을 보인다.

$$G_\lambda(s) = \lambda G(s) + (1-\lambda)\tilde{G}(s) \quad (19)$$

이 특성은 Boyd, Barratt, 그리고 Norman^[8]에 의해 증명되어 제어기 설계에 응용되어 왔다. 하지만 이 제어기는 affine 집합을 이루는 두 시스템 $G(s)$ 과 $\tilde{G}(s)$ 에 의존적이기 때문에 제어기의 차수와 형태가 일정하지 못하다는 문제점이 있다. 그래서 본 논문에서는 이런 문제점을 개선하기 위해 현재 가장 널리 이용되는 PID 제어기에 위의 개념을 적용하여 변형된 PID제어기를 제안한다. PID 제어 시스템과 PI-PD 제어 시스템이 이루는 affine 집합을 PID-PD 제어 시스템으로 나타낼 수 있음을 다음의 과정에서 구체적으로 증명하겠다.

일반적인 PID 제어 시스템과 PI-PD 제어 시스템이 이루는 affine 집합은 식 (16)과 (17)로부터 다음 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda \frac{C_{pi}(s)G(s)}{1 + (C_{pi}(s) + C_{pd}(s))G(s)} + (1-\lambda) \frac{C_{pid}(s)G(s)}{1 + C_{pid}(s)G(s)} \in C \quad (20)$$

식 (6) $C_{pid}(s) = C_{pi}(s) + C_{pd}(s)$ 을 적용하면 위 식은 식 (21)로 재정리 할 수 있다.

$$(\lambda C_{pi}(s) + (1-\lambda)C_{pid}(s)) \left(\frac{G(s)}{1 + (C_{pi}(s) + C_{pd}(s))G(s)} \right) \quad (21)$$

여기서 $C_{pid}(s)$ 를 $C_{pi}(s) + C_{pd}(s)$ 로 보면 식 (22)가 된다.

$$\frac{(C_{pi}(s) + C_{pd}(s) - \lambda C_{pd}(s))G(s)}{1 + (C_{pi}(s) + C_{pd}(s))G(s)} \quad (22)$$

식 (22)는 PID-PD 제어 시스템의 페루프 전달함수인 식 (18)과 동일한 구조이다. 즉 PID-PD제어기를 식 (23), (24)과 같이 설정하면 이 제어 시스템은 PID 제어 시스템과 PI-PD 제어 시스템의 affine 집합을 이룬다.

$$C_{PID}(s) = C_{pi}(s) + C_{pd}(s) - \lambda C_{pd}(s) \quad (23)$$

$$C_{PID}(s) + C_{PD}(s) = C_{pi}(s) + C_{pd}(s) \quad (24)$$

위의 PID-PD 제어기의 각 파라미터는 식 (23)과 (24)에 식 (12), (13)을 대입하여 다음 식 (25), (26)과 같이 얻어진다.

$$C_{PD}(s) = \frac{K_p^* + \beta K_p^* - \lambda K_p^*}{1 + \beta} \left(1 + \frac{(1 + \beta)(K_p^* T_d^* - \lambda K_p^* T_d^*)s}{K_p^* + \beta K_p^* - \lambda K_p^*} + \frac{1 + \beta}{(1 + \beta - \lambda)T_i^* s} \right) \quad (25)$$

$$C_{PD}(s) = \frac{K_p^* \lambda}{1 + \beta} (1 + (1 + \beta)T_i^* s) \quad (26)$$

위의 PID-PD 제어기의 설계를 위해 λ 의 값만을 선정하면 되는데 이때 응답은 PI-PD 제어와 PID 제어 시스템의 시간 영역의 응답을 경계로 하여 그 사이의 응답을 보인다.

3. PID-PD 제어기 동조 방법

본 논문에서는 PID-PD 제어기를 설계하기 위한 적정한 λ 값 선정을 위해 가격함수를 최소화 하는 최적 동조 방법을 제시한다. 그 가격함수로 오버슈트와 상승시간의 합을 고려하는 것과 PID 제어기의 최적 동조 방법에 널리 사용되는 ISE 표준법을 적용하여 이를 최소화하는 λ 를 선정하는 두 가지 최적 동조 방법을 통해 본 논문에서 제시된 affine 집합을 이루는 PID-PD 제어기를 설계 하겠다.

동조 방법 1) 시간영역의 설계 사양인 오버슈트와 상승시간을 가격함수의 구성 요소로 고려한 동조 방법을 보면 다음과 같다. 먼저 Boyd가 제어 시스템의 함수적 관계로부터 시간 응답과의 관계를 유도 했던 것을 근거로 PID-PD 제어 시스템의 함수적 관계는 PID 제어기와 PI-PD 제어기 사이의 convex 함수이지만 오버슈트는 quasiconvex 의 관계임을 알 수 있다.^[9] 하지만 상승 시간은 그 정의에 따라 다르다. 그 정의를 식(28)과 같이 한다면 상승시간은 quasiconvex이지만 식(29)과 같다면 이는 quasiconvex를 보장하지 않는다.^[9] 그래

서 본 논문에서는 식 (28)로 상승시간을 정의한다.

$$\phi_{OS}(G_{pidpd}) \triangleq \sup g_{pidpd}(t) - 1 \text{ for } t \geq 0 \quad (27)$$

$$\phi_{rise}(G_{pidpd}) \triangleq \inf \{ T g_{pidpd}(t) > \alpha \text{ for } t \geq T \} \quad (28)$$

$$\phi_{rise}(G_{pidpd}) \triangleq \inf \{ T g_{pidpd}(T) > \alpha \} - \inf \{ T g_{pidpd}(T) > \beta \} \quad (29)$$

본 논문에서 정의한 오버슈트와 상승시간은 각각 식 (27)과 (28)로 이는 시스템의 시간응답에서 quasiconvex이기 때문에 PI-PD 제어 시스템과 PID 제어 시스템의 오버슈트와 상승시간을 경계로 하여 제어기의 시간 응답을 고려한 제어기 설계가 가능하다.^[9] $\phi_{OS}(G_{pidpd})$, $\phi_{rise}(G_{pidpd})$ 은 모두 그 정의에 의해 제어기에 대한 함수로 표현 할 수 있다. 이때 본 논문의 제어기인 PID-PD 제어기는 λ 에 대한 함수이기 때문에 오버슈트와 상승시간은 식 (30)과 (31)로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{OS}(\lambda) \triangleq \sup g_{pidpd}(t) - 1 \text{ for } t \geq 0 \quad (30)$$

$$\phi_{rise}(\lambda) \triangleq \inf \{ T g_{pidpd}(t) > \alpha \text{ for } t \geq T \} \quad (31)$$

이 두 함수는 모두 가능한 작은 값이 요구되지만 상호 trade-off 관계임을 이용하여 식 (32)를 가격함수로 하여 식(33)에서와 같이 이 가격함수를 최소화 하는 λ 값을 선정하는 방법을 본 논문에서 제어기 설계 방법으로 제안한다.

$$J = \phi_{OS}(\lambda) + \gamma \phi_{rise}(\lambda) \quad (32)$$

$$\min_{\lambda} (\phi_{OS}(\lambda) + \gamma \phi_{rise}(\lambda)) \quad (33)$$

여기서 γ 는 가중치 함수로 두 함수간의 측정단위를 맞추고 비교 가중치를 두는 역할을 한다. 본 논문에서는 주어진 설계 변수 λ 의 범위 내에서 $\phi_{OS}(\lambda)$ 와 $\phi_{rise}(\lambda)$ 의 최대치와 최소치의 차이에 동일한 가중치를 부여하는 가중치 선정 방법을 적용하며 이는 식 (34)와 같고 가격함수는 식 (35)이다. 이때 $\phi_{OS}(\lambda)$ 와 $\phi_{rise}(\lambda)$ 이 λ 의 변화에 대해 quasiconvex 이기 때문에 $\alpha \leq \lambda \leq \beta$ 의 범위에서 가격함수는 다음의 식 (36)를 만족한다.

$$\gamma = \frac{\max(\phi_{OS}(\lambda)) - \min(\phi_{OS}(\lambda))}{\max(\phi_{rise}(\lambda)) - \min(\phi_{rise}(\lambda))} \quad (34)$$

$$J = \phi_{OS}(\lambda) + \frac{\max(\phi_{OS}(\lambda)) - \min(\phi_{OS}(\lambda))}{\max(\phi_{rise}(\lambda)) - \min(\phi_{rise}(\lambda))} \phi_{rise}(\lambda) \quad (35)$$

$$J(\alpha) = J(\beta) = \frac{\max(\phi_{OS})\max(\phi_{rise}) - \min(\phi_{OS})\max(\phi_{rise})}{\max(\phi_{rise}) - \min(\phi_{rise})} \quad (36)$$

여기서 가격함수인 식 (35)를 최소화하는 λ 를 선정하면 식 (25)과 (26)에 의해 PID-PD 제어기가 설계 된다.

동조방법 2) 또 다른 가격함수로 최적 동조 표준 중의 하나인 식 (37)의 ISE를 최소화하는 λ 를 선정한다.

General Integral Squared Error criteria

$$J_i(\lambda) = \int_0^\infty t e^2(t) dt \quad (37)$$

ISE는 시간에 대해 가중치를 가지고 에러를 최소화하도록 설계 변수를 동조 할 수 있게 한다. 본 논문에서는 일반적인 ISE 표준에서 시간에 대한 가중치를 위해 $i=1$ 을 선정하여 실험하였다. 이것은 ITSE로 알려져 있다.^[1] 여기서 시간에 대한 가중치를 높이고자 할 때 i 를 조정할 수 있다.

III. 실험

Example 1)

사례연구1에서는 Kaya^[7], Atherton^[3], 그리고 Park^[4] 등에 의해 PID와 변형된 PID 제어기의 설계에서 시뮬레이션 상 서로의 우수성을 입증하기 위해 비교대상이 되어온 대표적인 시스템으로 식 (38)과 같은 시스템을 선정하였다.

$$G(s) = \frac{4}{4s-1} e^{-2s} \quad (38)$$

여기서 affine 집합의 경계치를 형성하는 제어기로 가격함수를 ITSE로 하여 최적동조 된 PID 제어기와 Kaya^[7]가 제시한 간편한 PI-PD 동조 방법에 $\beta=0.1$ 을 적용한 시스템을 선정하였다. PID 제어기인 식 (1)의 설계 변수는 각각 $K_p^* = 0.627, T_i^* = 8.143$ 그리고 $T_d^* = 0.978$ 이다. 식 (2)와 같은 PI-PD 제어기의 설계 변수는 $K_{p1}^* = 0.057, T_{i1}^* = 0.7403, K_{p2}^* = 0.570$ 그리고 $T_{d2}^* = 1.0758$ 이다. 이 두 제어기의 affine 집합을 이루는 PID-PD 제어기는 식 (25), (26)에 의해 다음의 식 (39), (40)과 같다.

$$C_{PID}(s) = (0.627 - 0.570\lambda) \left(1 + \frac{(0.6745 - 0.6745\lambda)s}{0.6897 - 0.627\lambda} + \frac{1}{(8.143 - 7.403\lambda)s} \right) \quad (39)$$

$$C_{PD}(s) = 0.57\lambda (1 + 1.0758s) \quad (40)$$

$0 \leq \lambda \leq 1$ 의 범위 내에서 최적동조 방법 1과 2의 각 가격함수는 식 (41)과 (42)이다. 설계 범위 내에서 설계 변수와 가격함수의 관계는 그림 3에 나타내었다.

$$J_0(\lambda) = \phi_{OS}(\lambda) + 0.4672 \phi_{rise}(\lambda) \quad (41)$$

$$J_1(\lambda) = \int_0^\infty t e^2(t) dt \quad (42)$$

그림 4는 λ 의 변화에 따른 시스템의 단위 계단 응답

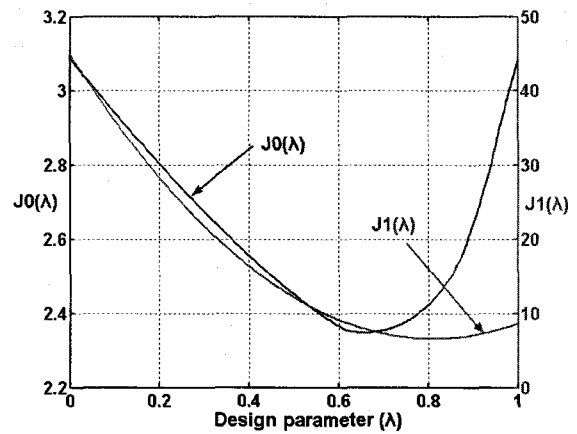


그림 3. 설계 변수 λ 에 따른 가격함수 J_0 와 J_1 의 값
Fig. 3. The value of cost function J_0 and J_1 by design parameter λ .

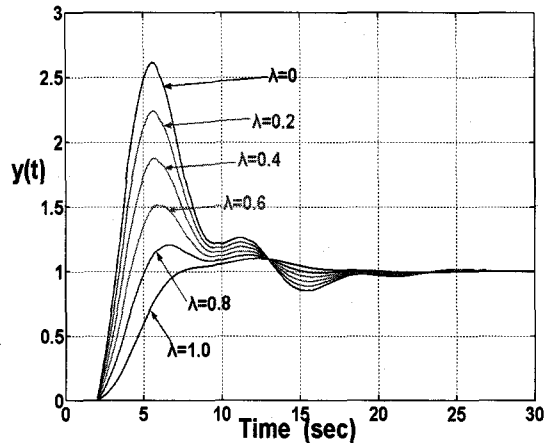


그림 4. 설계 변수 λ 에 따른 단위 계단 응답
Fig. 4. Step responses by design parameter λ .

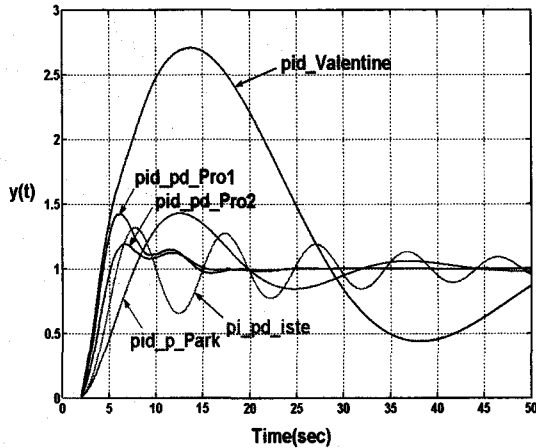


그림 5. 예제 1의 단위 계단 응답 비교
Fig. 5. Step responses of Example 1.

이 affine 집합을 이룸을 보여준다. 그림 3에 나타난바와 같이 가격함수를 최소화 하는 설계변수 값은 동조방법 1에서는 $\lambda=0.655$ 이고 동조방법 2에서는 $\lambda=0.81$ 이다.

제안된 동조방법의 결과와 다른 동조방법의 결과를 비교하여 그림 5에 나타내었다.

여기서 pid_Valentine와 pid_p_Park는 각각 참고문헌 [12], [4]의 동조 방법이고 pi_pd_iste는 참고문헌 [3]의 동조 방법이다. 제안된 방법 1, 2의 시간 응답은 다른 동조 결과들에 비해 빠른 상승시간과 정착시간을 보이고 특히 제안된 동조 방법 2는 오버슈트에 있어서도 훌륭한 결과를 보임을 그림 5를 통해 확인 할 수 있다.

Example 2)

사례연구 2에서는 비교적 큰 지연 시간을 갖는 시스템으로 Yuwana와 Seborg^[13], Chen^[14], Lee^[15]등에 의해서로의 우수성을 입증하기 위하여 비교 대상이 되어 온 대표적인 시스템을 선정하였다. 제어대상 플랜트는 식 (43)과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^2(2s+1)} e^{-3s} \quad (43)$$

여기서 affine 집합의 경계치를 형성하는 제어기로 식 (44)과 같이 가격함수를 IAE로 하여 최적동조된 PID 제어기와 Kaya^[7]가 제시한 PI-PD 제어기를 선정하였다. PID 제어기의 설계 변수는 $K_p^* = 0.7712$, $T_i^* = 4.8020$ 그리고 $T_d^* = 1.6308$ 이고 PI-PD 제어기의 설계 변수는 $K_{p1}^* = 0.1285$, $T_{i1}^* = 0.8003$, $K_{p2}^* = 0.6427$ 그리고 $T_{d2}^* = 1.9570$ 이다. 이 두 제어기의 affine 집합을 이루

도록 하는 PID-PD 제어기는 식 (44)와 (45)이다.

$$C_{PD}(s) = (0.7712 - 0.6427\lambda) \left(1 + \frac{(1.5092 - 1.5092\lambda)s}{0.9254 - 0.7712\lambda} + \frac{1}{(4.8020 - 4.0017\lambda)s} \right) \quad (44)$$

$$C_{PD}(s) = 0.6427\lambda(1 + 1.9570s) \quad (45)$$

동조 방법 1과 2의 가격함수는 각각 식 (46)과 (42)이고 설계 변수 λ 에 따른 가격함수는 그림 6에 나타내었다. 이를 통해 동조 방법 1에서의 설계 변수 값은 $\lambda=0.19$ 이고 동조 방법 2에서는 $\lambda=0$ 임을 알 수 있다.

$$J_0(\lambda) = \phi_{OS}(\lambda) + 0.0252 \phi_{rise}(\lambda) \quad (46)$$

그림 7에서 affine 집합을 이루는 PID-PD제어기를 보이고 그림 8에서는 각각 동조 방법과 다른 동조 방법

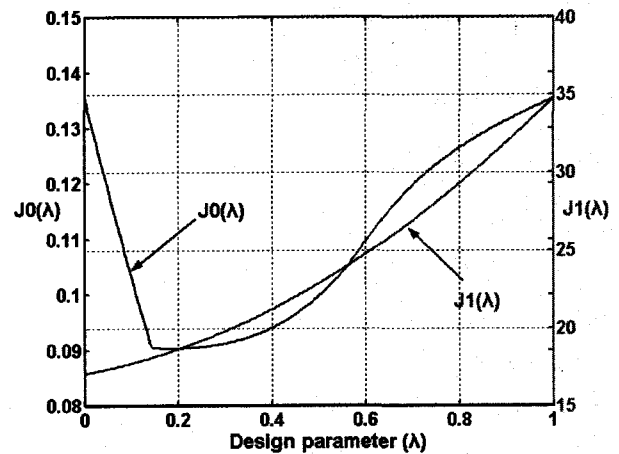


그림 6. 설계 변수 λ 에 따른 가격함수 J_0 와 J_1 의 값
Fig. 6. The value of cost function J_0 and J_1 by design parameter λ .

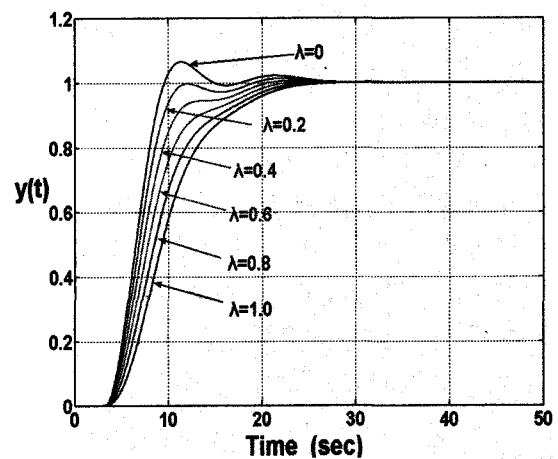


그림 7. 설계 변수 λ 에 따른 단위 계단 응답
Fig. 7. Step responses by design parameter λ .

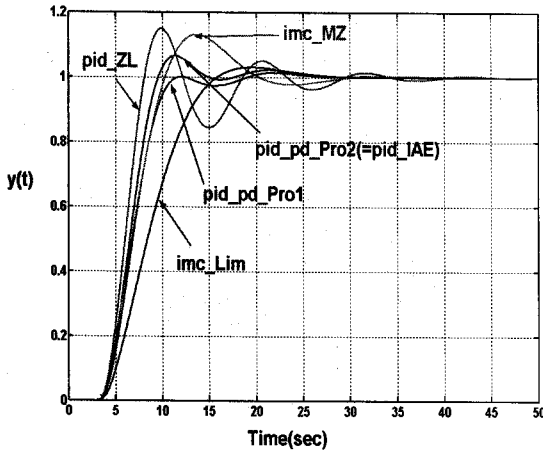


그림 8 예제 2의 단위 계단 응답 비교
Fig. 8. Step responses of Example 2.

을 비교하였다. pid_ZL, imc_MZ 그리고 imc_Lim는 각 참고문헌 [16],[17],[18]의 동조 방법들이다.

그림 8을 통해 동조 방법 1의 시간 응답이 오버슈트와 정착시간 면에서 가장 우수함을 알 수 있다. 본 예제에서 동조 방법 2의 가격함수를 최소화 하는 제어기는 최초 affine 집합의 경계로 선정된 IAE를 가격함수로 최적 동조된 PID제어기와 동일한 제어기이다. 최적 동조 방법 2에서는 경계가 되는 PID 제어기와 동일한 제어기로 동조 되었지만 affine 집합의 특성으로 인해 설계 변수 λ 에 따른 시간 응답이 그림 7과 같이 비교적 명확하게 예측 가능하므로 설계자가 원하는 응답을 내도록 하는 다른 λ 값의 설계가 가능하다.

IV. 결 론

PID 제어는 시스템의 제어에 있어 성능의 우수성과 함께 설계의 간편성 때문에 아직까지 널리 이용되고 있다. 하지만 이 PID 제어만으로 충분한 성능을 발휘 할 수 없는 경우가 있어 이를 위해 내부 피드백이 있는 변형된 PID 제어가 제안 되어 연구되어져 왔다. 본 논문에서는 이 변형된 PID 제어기의 한 형태인 PID-PD제어기를 PID 제어기와 PI-PD 제어기를 경계로 affine 집합을 구성하도록 설정하여 affine 집합의 시간 영역에서의 특성을 이용할 수 있도록 하는 새로운 PID-PD 제어기를 제안한다. 이는 기존의 affine 집합의 특성을 고려한 제어기가 적용 시스템에 따라 제어기의 형태가 가변적인 단점 때문에 적용에 한계가 있었으나 제안된 제어기는 일반적인 제어기 형태 중 하나인 PID-PD 제어기의 형태를 구성하기 때문에 이러한 문제를 개선했다

는데 그 의의가 있으며 PID제어 응답과 PI-PD제어 응답을 경계로 한 affine 집합의 특성을 고려하여 설계 변수에 따른 시간 응답을 예측하기가 용이하던 장점이 있다. 또 플랜트에 상관없이 affine 집합을 구성하므로 경계가 되는 응답만 안정하면 제안된 PID-PD제어 응답은 이 경계 사이의 응답을 보이므로 그 안정도를 보장 받는다. 앞으로의 연구 과제로 주파수 영역에서의 성능까지 고려할 수 있는 방법과 다변수의 경우에서의 적용 방법 등이 남아있다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Åström and T. Hägglund, "PID Controllers : Theory, Design, and Tuning," Instrument Society of America, 1995.
- [2] H. J. Kwak, S. W. Sung and I. B. Lee, "On-line process identification and autotuning for integrating processes," Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 36, pp. 5329-5338, 1997.
- [3] D. P. Atherton and S. Majhi, "Limitations of PID controllers," Proc. of the American Control Conf., Vol. 6, pp. 3843-3847, June 1999.
- [4] J. H. Park, S. W. Sung and I. B. Lee, "An enhanced PID control strategy for unstable processes," Automatica, Vol. 34, no. 6, pp. 751-756, 1998.
- [5] S. Majhi and D. P. Atherton, "Autotuning and controller design for processes with small time delays," IEE proc., Control Theory and Applications, Vol. 146, no. 5, pp. 415-425, 1999.
- [6] A. Datta, M. T. Ho and S. P. Bhattacharyya, "Structure and Synthesis of PID Controllers," Springer, Advances in Industrial Control, 2000.
- [7] I. Kaya, N. Tan and D. P. Atherton, "A simple procedure for improving performance of PID controllers," Control Applications, CCA 2003., Proc. of 2003 IEEE Conf., Vol. 2, pp. 882-885, 2003.
- [8] S. Boyd, C. Barratt and S. Norman, "Linear controller design : limits of performance via convex optimization," Proc. of the IEEE, Vol. 78, no. 3, pp. 529-574, March 1990.
- [9] S. Boyd and C. Barratt, "Linear controller : limits of performance," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1991.
- [10] 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.
- [11] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex

- optimization," Cambridge, UK, NY., 2004.
- [12] C. C. Valentine and M. Chidambaram, "PID control of unstable time delay systems," Chem. Eng. Comm., Vol. 162, pp. 63-74, 1997.
- [13] M. Yuwana and D. E. Seborg, "A new method for on-line controller tuning," Journal of AIChE, Vol. 28, no. 3, pp. 434-440, May 1982.
- [14] C. L. Chen, "A simple method for on-line identification and controller tuning," Journal of AIChE, Vol. 35, no. 12, pp. 2037-2039, Dec 1989.
- [15] J. T. Lee, W. H. Cho and T. F. Edgar, "An improved technique for PID controller tuning from closed-loop tests," Journal of AIChE, Vol. 36, no. 12, pp. 1891-1895, Dec 1990.
- [16] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," Trans. ASME, Vol 64, pp. 759 - 768, 1942.
- [17] M. Morari and E. Zafriou, "Robust process control," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1989.
- [18] 임동균, 김창현, 서병설, "루프 형성 기법을 이용한 IMC-PID 제어기 설계," 전자공학회 논문지, 제42권 SC편, 제3호, 11-16쪽, 2005년 5월

 저 자 소 개



김 창 현(학생회원)
제42권 SC편 제3호 참조
2003년 강남대학교 산업전산전자
공학부 졸업 (공학사)
2004년 ~ 현재 한양대학교 대학원
전기공학과 석사과정
<주관심분야: 강인제어, 최적제어>



임 동 균(정회원)
제42권 SC편 제3호 참조
2001년 한양대학교 전자통신
공학과 (공학박사)
2005년 현재 한양사이버대학교
컴퓨터학과 교수
<주관심분야: 강인제어, 최적제어>



서 병 설(정회원)
제42권 SC편 제 3호 참조
2005년 현재 한양대학교
전기제어생체공학부 교수
<주관심분야: 제어이론, 강인제어,
최적화 기법>