

논문 2007-44SC-5-1

개선된 모델 축소 방법에 의한 범용적 제어기 설계

(Design of Generalized Controller by Improved Model Reduction)

조 준 호*, 황 형 수**

(Joon Ho Cho and Hyung Soo Hwang)

요 약

본 논문은 개선된 모델 축소 알고리즘을 이용하여 범용적 제어기 설계에 대해서 제안했다. 개선된 모델 축소 알고리즘은 모델의 과도상태와 정상상태 응답을 고려하여 주파수 영역에서 구하였다. 범용적 제어기 설계는 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID 제어기와 2차 지연 모델에 대하여 최적화 PID 제어기 설계에 대해서 제안 하였다. 시뮬레이션을 통하여 다양한 공정에 대하여 본 논문에서 제안한 방법을 적용하여, 모델축소 방법의 정확성 및 제어기 성능의 개선을 보였다.

Abstract

In this paper, we proposed development of improved model reduction and design of common controller using reduction model. The Algorithm of improved model reduction considered the transient response and the steady-state response in response curve. The generalized controller is designed not only to ensure specified phase margin and iso-damping property also optimized smith-predictor controller about real model using reduction model. Simulation examples are given to show the better performance of the proposed method than convention methods.

Keywords : Model reduction, PID controller, Smith-predictor, Iso-damping, Phase margin

I. 서 론

PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 근래 보다 정교한 현대 제어이론이 개발되었음에도 산업계 현장 엔지니어들이 최적제어, 적응제어 등의 현대 제어 이론들 보다는 PID 제어알고리즘에 친숙하고, PID 제어기의 운전과 동조에 관한 많은 경험을 가지고 있고, 제어기의 구조가 간단하여 현재까지 산업현장에서 가장 널리 운영되고 있는 제어 알고리즘이다.^[1~4]

이러한 몇 가지의 이점들로 인하여 최적의 성능을 얻

을 수 있는 PID 제어기의 파라미터를 결정하는 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 그 중에서 Ziegler-Nichols rules, Cohen-Coon Method, IAE, ISE, ITAE, IMC Method등이 보편적으로 사용되고 있다.^[5~10] 이 방법은 특정 형태의 모델에 맞는 제어기 설계는 대부분 저차 시스템에서 수학적 해석을 바탕으로 연구 되었다. 따라서 이러한 방법들은 특정조건에서는 좋은 성능을 보이거나 특정 조건을 만족하지 못하면 원하는 응답 특성을 얻을 수 없다. 이러한 이유로 고차계나 비선형성이 큰 시스템을 제어하기 위하여 일반적이고 범용성을 갖는 동조법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

범용적 제어기의 설계는 고차 시스템에 대하여 축소 모델을 이용한 연구가 진행 중에 있다. 따라서 범용적인 제어기 설계 방법에 있어 병행해야 하는 것은 실제 모델에 근접하게 축소 모델을 구하는 것이다. 축소 모델에 관한 연구는 시간 영역 및 주파수 영역에서 이루어지고 있으며 많은 성과를 얻고 있다. 시간 영역에서의 모델 축소와 주파수 영역에서의 모델 축소를 비교해

* 정회원, 원광대학교 제어계측공학과
(Department of Control and Instrumentation Engineering, Wonkwang University)

** 평생회원, 원광대학교 전기전자및정보공학부
(School of Electrical, Electronics and Information Engineering, Wonkwang University)

※ 본 연구는 2007년도 원광대학교 지원에 의해서 이루어진 연구입니다.

접수일자: 2006년12월04일, 수정완료일: 2007년9월7일

보면 시간영역에서 구한 축소 모델은 시간영역에서는 비교적 실제 모델의 응답과 일치 하지만 주파수 영역에서는 실제 모델의 응답과 일치 하지 않는 경우가 많다. 주파수 영역에서의 모델 축소 방법은 시간영역에서의 모델 축소 방법보다는 복잡하지만 축소된 모델이 시간영역과 주파수 영역에서 모두 실제 모델의 응답에 비교적 일치함을 보인다. 시간 영역에서 대표적인 모델 축소 방법으로는 Pade 근사법, Routh stability 근사화 방법이 있으며 주파수 영역에서의 대표적인 방법으로는 Wang의 모델 축소 방법이 있다.^[11~16] Wang은 실제 공정을 2차의 지연시간을 갖는 모델(SOPTD)로 축소하여 서로 다른 동특성을 갖는 공정들을 저차 모델로 나타내었다. 범용적 제어기는 이렇게 축소 모델을 이용하여 제어기를 설계하며, Wang의 제어기 설계 방법으로는 SOPTD 형태의 공정에 극배치 기법에 근거한 PID 동조법을 제안을 하였다. 이 방법은 기존의 알고리즘에 비하여 좋은 성능을 갖지만 모델 축소 및 제어기 설계 방법에 있어 개선할 부분이 있다.^[13]

하지만 Wang의 방법은 실제 모델이 Nyquist 선도의 전 영역을 통과하지 않은 경우에는 적용할 수 없고, 모델 축소과정에서 고차 모델과 축소 모델 간의 정상상태 응답이 일치 않는 경우가 존재한다.^[17~19]

이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 참고논문[17]~[19]에서는 단위 궤환 입력에 대한 정상상태 및 과도상태를 고려하기 위해서 Nyquist 선도의 특정점을 추가하여 경사하강법과 유전자 알고리즘을 이용하여 축소 모델을 구하였다. 하지만 이 방법 또한 경사하강법을 이용하여 축소 모델의 계수를 구하기 때문에 단위 궤환 입력에 대한 정상상태 출력 값이 완벽하게 일치하지는 않는다. 따라서 이와 같은 문제점을 개선하기 위해서 축소모델의 계수값을 수치적 계산과 유전자 알고리즘을 이용하여 구하는 방법을 사용하였다.^[20]

제안된 제어기 설계 방법으로는 다양한 제어 성능지수를 만족하기 위해서 수평적 제어구조로 기존의 방법보다 성능이 향상된 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID제어기와 최적화 PID 제어기 설계에 대하여 제안하였다.

첫째, 등 제동의 특성을 고려한 제어기를 설계^[17~18]하기 위해서는 먼저 이득 교차 주파수 w_g 와 공정의 미분값이 필요하다. 기존의 방법은 s 평면에서 Nyquist 선도와 임계점(-1, 0j)을 중심으로 한 특정원이 만나는 변곡점에서의 값을 w_g 으로 정의하여 사용하였다. 하지만 이점은 이득 교차 주파수 w_g 가 아니므로, 등 제동의

특성은 만족할 수 있으나, 원하는 위상여유를 만족할 수 없었다. 본 논문은 이러한 단점을 해결하기 위해서 축소 모델을 이용하여 이득 교차 주파수 w_g 값을 구하여 적용함으로써 위상여유와 등 제동의 특성을 만족시킬 수 있었다. 또한 제안된 이 방법은 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID 제어기의 파라미터값을 자동으로 동조할 수 있다.

둘째, 최적화 PID 제어기의 파라미터 값을 성능지수 ITAE 값이 최소가 되도록 결정해야 한다. 기존의 최적화 PID 제어기 설계 방법은 축소 모델의 계수로부터 수치적인 계산에 의해서 성능지수 ITAE값이 최소가 되는 제어 파라미터값을 직접 구하였고, 비교적 우수한 특성을 보인다. 하지만 이 방법은 제어 파라미터 값이 축소 모델의 특정 계수 값에 의해서 구해지며, 그 축소 모델의 계수 값이 너무 작게 되면, 제어파라미터 값을 구할 수 있으나, 실제 시스템에 적용하기는 어렵다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 기존의 방법과 유전자 알고리즘을 결합하는 방법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID제어기 설계, 최적화 PID 제어기설계, 시뮬레이션 및 고찰, 결론으로 구성되어 있다.

II. 범용적 제어기 설계

다양한 동특성을 갖는 공정들 대부분은 모델 축소 방법을 사용하여 SOPTD 모델로 축소될 수 있으며, 본 논문에서는 범용적 제어기 설계를 위해서 축소 모델을 이용한 위상여유와 등제동의 특성을 만족하는 PID 제어기 설계, 최적화 PID 제어기 설계에 대하여 제안하였다.

1. 위상여유와 등-제동의 특성을 만족하는 PID 제어기 설계 알고리즘

릴레이 동조 실험을 통하여 설계된 PID 제어기는 외부로부터 외란 및 센서 변화 등의 영향에서는 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 없다. 따라서 잡음 등의 영향에 둔감한 제어기에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이와 같이 시스템의 강인성을 보장하는 제어 방법을 강인 제어라 하며, 그 중 한 가지 방법으로 등 제동의 특성을 이용한 방법이다.^[21~22] 이 방법은 루프 전달함수의 특정 주파수 w_g 에서 위상 Bode 선도가 이득의 변화에 둔감한 반응을 보이도록 임의의 구간에서 3

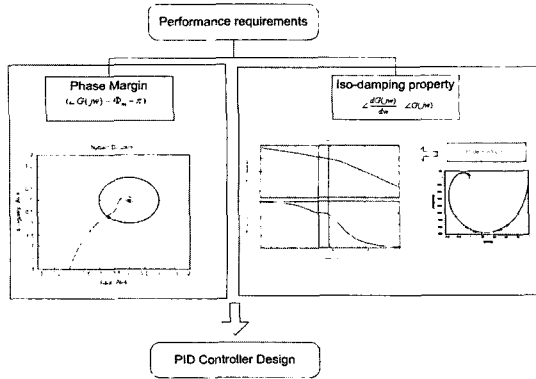


그림 1. 위상여유와 등 제동을 만족하는 PID 제어기 알고리즘

Fig. 1. Algorithm of PID Controller Specified Phase Margin and Iso-Damping.

성능 사양에 맞는 위상여유를 유지하도록 하는 것이다. 등 제동의 특성을 이용한 설계방법의 선결 요소로써 제어 공정의 주파수 전달함수의 특정 주파수 w_g 에서 크기 및 위상에 대한 미분 값이 반드시 필요하다. 이와 같은 이유로 저차 시스템에 대해서는 적용이 용이하나, 고차 시스템에 대해서는 적용하기 어려운 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 2차의 지연시간을 갖는 축소 모델을 이용하여 이득 교차 주파수 w_g 에서 위상여유와 등 제동의 성질을 동시에 만족하는 강인 제어기의 일반화된 설계 방법을 제안하였다.^[9~13] 그림 1은 위상여유와 등 제동을 만족하는 제어 알고리즘을 나타내었다. 2차의 지연시간을 갖는 축소 모델을 이용하여 특정의 위상여유와 등 제동의 특성을 동시에 만족하는 PID 제어기 동조 알고리즘은 아래와 같다.

제어 공정의 전달함수를 $G_p(s)$, 제어기의 전달함수를 $G_c(s)$ 라 하며, 특정의 위상여유를 Φ_m , 등 제동의 특성을 식으로 나타내면 식 (1)~(3)와 같다.

$$|G_c(jw_g) G_p(jw_g)| = 1, \tag{1}$$

$$\Phi_m = \arg[G_c(jw_g) G_p(jw_g)] + \pi \tag{2}$$

$$\angle \frac{dG(s)}{ds} \Big|_{s=jw_g} = \angle G(s) \Big|_{s=jw_g} \tag{3}$$

여기서, w_g 는 Nyquist 곡선의 진폭이 1인 점과 만나는 주파수 즉, 이득 교차 주파수를 의미한다.

PID 제어기의 전달함수 $G_c(s)$ 을 식 (4), 2차의 지연시간을 갖는 제어공정 전달함수를 식 (5)로 나타내었다.

$$G_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} \tag{4}$$

$$G_p(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + s} \tag{5}$$

여기서 $k_i = \frac{k_p}{T_i}$, $k_d = k_p T_d$ 이다.

식 (4)의 주파수 전달함수 $G_c(jw)$ 는 식 (6)과 같으며, 크기와 각도의 값은 식 (7), (8)과 같다.

$$G_c(jw) = k_p \left(1 + \frac{1}{jw T_i} + jw T_d \right) \tag{6}$$

$$|G_c(jw)| = |k_p| \sqrt{1 + \left(\frac{w^2 T_i T_d - 1}{w T_i} \right)^2} \tag{7}$$

$$\angle G_c(jw) = \tan^{-1} \left(\frac{w^2 T_i T_d - 1}{w T_i} \right) \tag{8}$$

개루프 주파수 전달함수 $G(jw)$ 의 w 에 대한 미분함수 $\frac{dG(jw)}{dw}$ 는 식 (9)와 같다.

$$\frac{dG(jw)}{dw} = G_p(jw) \frac{dG_c(jw)}{dw} + G_c(jw) \frac{dG_p(jw)}{dw} \tag{9}$$

제어 공정의 주파수 전달함수 $G_p(jw)$ 는 크기와 각도로 표현하면 아래와 같다

$$G_p(jw) = |G_p(jw)| \angle G_p(jw) \tag{10}$$

식(10) 양변에 자연로그를 취하고, w 에 대하여 미분하면 식(11)과 같다.

$$\frac{dp(w)}{dw} = G(jw)(Fa1 + jFb1) \tag{11}$$

여기서 $Fa1 = \frac{d \ln |G_p(jw)|}{dw}$, $Fb1 = \frac{d \angle G_p(jw)}{dw}$ 이다.

식 (6)를 w 에 대하여 미분하면 식(12)와 같다.

$$\frac{dG_c(jw)}{dw} = jk_p \left(T_d + \frac{1}{w^2 T_i} \right) \tag{12}$$

식 (11),(12)를 식(9)에 대입하여 정리하면 식(13)과 같다.

$$\frac{dG(jw)}{dw} = G_{re} + jG_{im} \tag{13}$$

여기서

$$G_{re} = k_p G_p(jw) \{w^2 T_i F a_1(w) - (w^2 T_i T_d - 1) w F b_1(w)\},$$

$$G_{im} = \{w^2 T_i F a_1(w) + (w^2 T_i T_d - 1) w F a_1(w) + w^2 T_i T_d + 1\}$$

이다.

식(13)에서 각도만을 고려하면 식 (14)와 같다.

$$\angle \frac{dG(jw)}{dw} = \angle G_p(jw) + \angle G_{p1}(jw) \quad (14)$$

여기서,

$$\angle G_{p1}(jw) = \tan^{-1} \left(\frac{w T_i F b(w) + (w^2 T_i T_d - 1) F a(w) + w^2 T_i T_d + 1}{F a(w) w T_i - (w^2 T_i T_d - 1) F b(w)} \right)$$

이며, $F a(w) = w F a_1(w)$, $F b(w) = w F b_1(w)$ 이다.

등 계동 특성인 식 (3)를 식 (14)에 적용하면 식 (15)과 같다.

$$\left(\frac{w^2 T_i T_d - 1}{w T_i} \right) = \left(\frac{w T_i F b(w) + (w^2 T_i T_d - 1) F a(w) + w^2 T_i T_d + 1}{F a(w) w T_i - (w^2 T_i T_d - 1) F b(w)} \right) \quad (15)$$

식 (2)의 위상여유 조건식은 식 (16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\angle G(jw) = \angle G_c(jw) + \angle G_p(jw) = \Phi_m - \pi \quad (16)$$

식 (2)와 식 (16)을 통하여 식 (17)을 구할 수 있다.

$$\left(\frac{w^2 T_i T_d - 1}{w T_i} \right) = \tan(\Phi_m - \angle G_p(jw)) \quad (17)$$

식 (15),(17)를 이용하여 정리하면 제어 파라미터 T_i 값은 식 (18)과 같다.

$$T_i = \frac{-2}{w \{F b(w) + \tan(\Phi_m - \angle G_p(jw)) + \tan^2(\Phi_m - \angle G_p(jw)) F b(w)\}} \quad (18)$$

앞 장에서 설명한 2차 지연시간 축소 모델을 사용하여 $F a(w)$ 를 구하면 식(19)와 같다.

$$F b(w) = w \frac{d \angle |G_p(jw)|}{dw} = w \left\{ -L - \frac{bc + abw^2}{(c - aw^2)^2 + b^2 w^4} \right\} \quad (19)$$

제어 파라미터 값과 축소 모델의 관계에 의해서 식 (20)을 구할 수 있다.

$$\hat{G}(s) G_{c2}(s) = \frac{k e^{-sL}}{s} \quad (20)$$

여기서 $a = K_d/k, b = K_p/k, c = K_i/k$ 이다.

식 (20)의 특정의 위상여유를 Φ_m 이라 놓으면 위상여유의 기본 정의 식은 아래의 식 (21),(22)로 표현된다.

$$k = w_g \quad (21)$$

$$\Phi_m = \frac{\pi}{2} - w_g L \quad (22)$$

식 (22)에 의해서 이득교차 주파수 w_g 값을 구할 수 있으며, 식 (17)에 의해서 위상여유를 만족하는 k 의 값을 구할 수 있다. 위상여유를 만족하는 w_g 의 값은 k 값과 같으며, k 값은 (23)와 같다.

$$k = \frac{\pi - 2P_m}{2L} \quad (23)$$

제어 파라미터 값 중 k_p , T_d 값은 식(1), (17)에 의해서 구할 수 있으며, 아래와 같다.

$$k_p = \frac{\cos(P_m - \angle G_p(jw))}{|G_p(jw)|} \quad (24)$$

$$T_d = \frac{\tan(P_m - \angle G_p(jw)) + \frac{1}{w T_i}}{w} \quad (25)$$

2. 최적화 PID 제어기 설계

본 장에서는 범용적 제어기 설계 방법 중 최적화 PID 제어기 설계 방법으로 기존의 방법의 문제점을 해결하기 위해서 수치적 계산법과 GA을 이용한 방법을 결합한 방법을 제시한다.

2.1 수치적 계산에 의한 PID 파라미터 동조

본 논문에서는 지연시간을 보상해 주기 위해서 스미스 예측기 구조 이므로 PID 파라미터 값을 구할 때도 스미스 예측기 부분을 고려하여 설계해야 한다. 따라서 제어기 파라미터 값은 그림 2와 같은 스미스 예측기 구조에서 구할 수 있다.

그림 2에서 스미스 예측기구조의 페루프 전달함수는 식(26)와 같다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G_m(s) + K(s)[G(s) - G_m(s)]e^{-sL}} \quad (26)$$

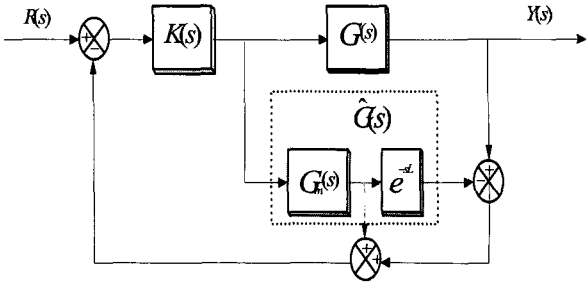


그림 2. 스미스 예측기 구조
Fig. 2. Structure of Smith predictor.

여기서 $G(s)$ 는 실제 공정, $G_m(s)e^{-Ls}$ 는 축소 모델을 의미하며, 위의 구조에서 실제 공정과 축소 모델이 거의 일치한다고 가정하면, $G(s) \approx G_m(s)e^{-sL} = \hat{G}(s)$ 라면, 식(26)은 식(27)처럼 근사화 된다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \approx \frac{K(s)\hat{G}(s)}{1+K(s)G_m(s)} \quad (27)$$

식(27)에서 보면 특성방식의 시간 지연 항이 제거되었으며, 스미스 예측기 구조는 시간 지연을 보상할 수 있다. 여기서 제어기 $K(s)$ 는 식(28)처럼 PID 제어를 사용한다.

$$K(s) = k \frac{As^2 + Bs + C}{s} \quad (28)$$

여기서, $A = K_D/k, B = K_P/k, C = K_I/k$ 이다.

PID 제어기의 파라미터를 극점이 상쇄하도록 축소 모델의 계수와 같게 한다면, 즉 $A = a, B = b$, 그리고 $C = c$ 처럼 설정한다면, 식 (28)는 식 (29)처럼 근사화 된다. 여기서 a, b , 그리고 c 는 축소 모델의 계수이다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \approx \frac{ke^{-sL}}{s+k} \quad (29)$$

결론적으로 스미스 예측기 구조에, 추정 모델로서 SOPTD 모델을 사용하고, PID 제어를 사용한다면 고차계 시스템의 제어문제는 식(29)의 개루프 응답이 최적의 성능을 갖는 k 의 결정 문제로 국한되어지며 본 논문에서는 수치적 계산에 의한 방법과 유전자 알고리즘을 이용한 방법을 결합하여 k 값을 구하는 방법을 제시한다.

2.2 수치적 계산에 의한 제어 파라미터 동조

입력이 단위계단 함수이고 설정치가 y_r 이라 하면, 식 (29)는 식(30)처럼 표현된다.

$$Y(s) = y_r \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{kL}}{s+k} \right) \quad (30)$$

식(30)을 역라플라스 변환하면 식(31)이 얻어진다.

$$y(t) = y_r(1 - e^{-k(t-L)}) \quad (31)$$

여기서 에러함수는 식(32)와 같다.

$$e(t) = y_r - y(t) = y_r e^{-k(t-L)} \quad (32)$$

식(32)에서 y_r 이나 L 은 상수로 간주되므로, 에러는 k 값에 의존하게 된다.

AE 에 대한 정의로부터 식(33)과 같다.

$$ITAE = \frac{y_r}{k^2} e^{kL} \quad (33)$$

미분을 이용하여 AE 을 최소로 하는 k 값을 구할 수 있다. 식(33)을 미분하면 식(34)과 같다.

$$\frac{dITAE}{dk} = (L - \frac{2}{k}) \frac{e^{kL}}{k^2} \quad (34)$$

여기서 $k = 2/L$ 에서 극값을 가지는데, 이 점에서 $ITAE$ 가 최소가 된다. $ITAE$ 가 최소가 되는 k 는 식 (35)처럼 결정된다.

$$k = \frac{2}{L} \quad (35)$$

2.3 GA를 이용한 제어 파라미터 동조

수치적 계산에 의한 k 값은 식 (35)와 같이 지연시간 L 값에 의존함을 알 수 있다. 따라서 L 값이 너무 작아지면 k 값은 너무 커지므로, 이 방법을 실제 공정에서 적용하기 어려운 문제점이 있다. 따라서 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 최적의 값을 구하기 위해서 매우 강력한 비선형 최적화 도구며, 적절한 접합도 함수의 선택, 알고리즘과 관련된 각종 매개

표 1. 유전자 알고리즘의 초기 정보
Table1. A list parameters of genetic algorithms.

No of generation	1000
Population size	50
Crossover rate	70%
Mutation rate	3%
binary bit	10 bit

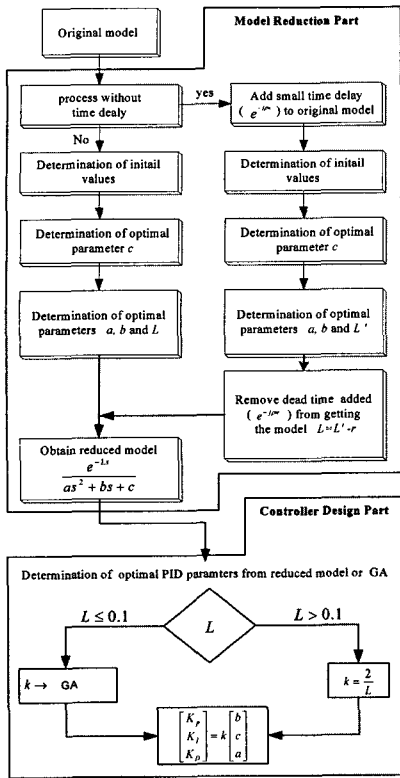


그림 3. 제안된 최적화 PID 동조 알고리즘
Fig. 3. Proposed optimal PID tuning algorithm.

변수의 조정 등 해결하고자 하는 문제에 대해 특별한 제약을 가하지 않고 매우 유연한 탐색 전략을 수립할 수 있으며 지역 극소를 해결할 수 있는 등 많은 장점을 가진 유전자 알고리즘을 사용하였다. 본 논문에서 적용된 유전 알고리즘의 조건은 표 1과 같다. 그림 3은 본 논문에서 제안한 최적화 PID 파라미터 동조 알고리즘을 보인다.

III. 시뮬레이션 및 고찰

1. 축소 모델에 대한 시뮬레이션

본 장에서는 고차 모델 중 지연시간이 포함된 모델 및 포함되어 있지 않는 모델에 대하여 제시된 방법으로 축소 모델을 구하는 것과 축소 모델을 이용하여 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID 제어기 설계 및 수치적 계산과 GA를 결합한 최적화 PID 제어기 설계에 대하여 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법이 우수함을 증명한다. 논문에 적용된 고차 모델과 개선된 모델 축소 방법에 의해 구해진 축소 모델은 표 2와 같다.

$$\text{공정 1 : } \frac{1}{(s+1)^5},$$

$$\text{공정 2 : } \frac{1}{(s+1)^3}e^{-s},$$

표 2. 시뮬레이션 공정 및 축소 모델의 계수 비교
Table 2. Definition of Process and Coefficient of reduced model.

	$\widehat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c}$							
	Conventional method				Proposed method			
	L	a	b	c	L	a	b	c
Process 1	1.48	4.63	3.50	1.09	1.497	4.51	3.59	1
Process 2	1.389	2.09	2.60	1.02	1.376	2.27	2.70	1
Process 3	0.60	7.66	32.34	25.15	0.607	7.77	32.65	25
Process 4					0.002	0.37	3.37	7.5

표 3. 축소 모델들의 성능 비교

Table 3. Performance comparison of reduced models.

	Wang의 방법			제안된 방법		
	W_N	W_T	W_S	P_N	P_T	P_S
Process 1	340.4837	77.0644	0.0205	95.4690	22.9462	0
Process 2	121.5737	30.1804	0.0060	72.5390	16.5351	0
Process 3	1.8928	0.8646	0.0003	1.1454	0.0856	0
Process 4				30.6540	0.8428	0

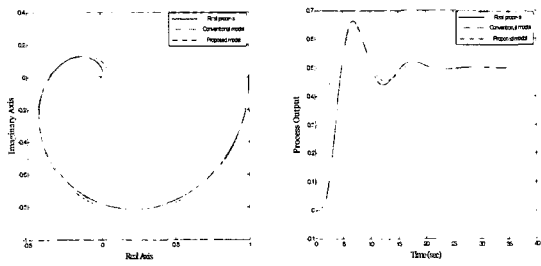
$$\text{공정 3 : } \frac{1}{(s+1)(s+5)^2}e^{-0.5s},$$

$$\text{공정 4 : } \frac{(s+2)}{(s+3)(s+5)(0.5s+1)}$$

표 3.은 실제 모델과 축소 모델간의 기존의 방법과 제안된 방법의 성능을 주파수 영역에서의 절대 오차의 합(N)과 시간 영역에서의 절대 오차의 합(T), 정상상태 오차(S)를 각각 비교한 것이다.

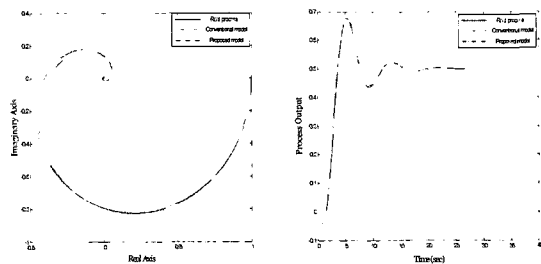
공정 1~공정 3 모두 제안된 방법이 기존의 방법보다 실제 모델과 축소 모델 간의 오차가 적음을 알 수 있고, 공정 4는 기존의 방법으로는 적용할 수 없지만 제안된 방법으로는 구할 수 있음을 알 수 있으며, 특히 제안된 방법은 실제 모델과 축소 모델의 정상상태 응답이 일치함을 알 수 있다.

그림 4.~그림 7은 공정 1~공정 4에 대하여 실제 모델과 축소 모델을 주파수 영역 및 시간 영역에서의 응답을 각각 그래프로 나타 낸 것이다. 그림 4와 그림 5에서 확인 할 수 있듯이 기존의 방법은 실제 모델과 축소 모델 간의 정상상태 응답 부분이 일치 하지 않음을 확인할 수 있다.



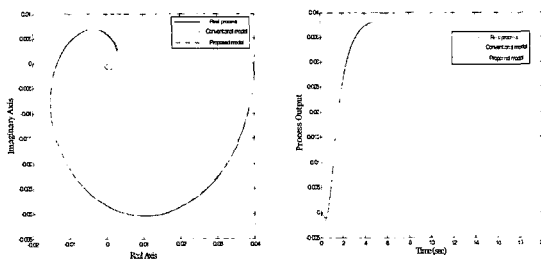
(a) 주파수 응답 (b) 페루프 단위 계단 응답

그림 4. 공정 1에 대한 축소 모델들의 비교
Fig. 4. Comparison of reduced models for process 1.



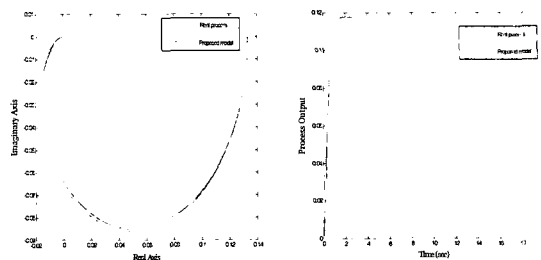
(a) 주파수 응답 (b) 페루프 단위 계단 응답

그림 5. 공정 2에 대한 축소 모델들의 비교
Fig. 5 Comparison of reduced models for process 2.



(a) 주파수 응답 (b) 페루프 단위 계단 응답

그림 6. 공정 3에 대한 축소 모델들의 비교
Fig. 6. Comparison of reduced models for process 3.



(a) 주파수 응답 (b) 페루프 단위 계단 응답

그림 7. 공정 4에 대한 축소 모델들의 비교
Fig. 7. Comparison of reduced models for process 4.

2. 축소 모델을 이용한 범용적 제어기 설계와 관련된 시뮬레이션

본 논문에서는 고차 모델을 2차의 지연시간을 갖는 모델로 축소 한 뒤 이 축소 모델을 이용하여 각 종 제어기를 설계 할 수 있음을 앞 장에서 설명 하였다. 본 장에서는 축소 모델을 이용하여 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID 제어기와 최적화 PID제어기에 대하여 시뮬레이션 하였다. 위의 제어기 설계 방법을 각각 제안된 방법1, 제안된 방법2로 정의하여 본 논문에서 사용하였다.

2.1 위상여유와 등 제동의 특성을 만족하는 PID 제어기 설계와 관련된 시뮬레이션

표 4.에는 제안된 방법 1를 사용하여 공정 1, 공정2에 대하여 위상여유와 등-제동의 특성을 만족하는 제어기 파라미터 값을 구한 것이다. 이득 교차 주파수 ω_g 와 공정의 미분 값은 각각 식 (23)과 식 (19)에 의해서 구할 수 있으며, 제어 파라미터 값들은 식 (18), 식(24), 식 (25)에 의해서 각각 구할 수 다. P_m^* , $ITAE^*$ 은 제안된 방법에 의해서 구한 위상여유 값이며, P_m^{**} , $ITAE^{**}$ 은 기존의 방법에 의해서 구한 위상여유 이다. 표 4에서 확인할 수 있듯이 제안된 법이 기존의 방법보다 원하는 위상여유값에 근접함을 알 수 있다. 그림 8, 그림 9는 제안된 방법에 의해 구해진 PID 제어기에 의한 주파수 응답 및 시간 응답을 나타 낸 것이다. 주파수 응답은 원하는 위상여유를 만족하는 것을 확인하기 위해서 나타낸 것이며, 시간 응답은 기존의 방법과 제안된 방법으로 구분하여 나타냈으며, 특히 기존의 위상여유의 값에 만족하는 제어 파라미터 값을 구하여 비교 하여 놓은 것이다.

그림 8, 그림 9에서 확인 할 수 있듯이 주파수 응답에서는 제안된 방법이 원하는 위상여유의 값에 근접함

표 4. 제안된 방법 1의 PID 제어기 파라미터 동조
Table 4. PID parameters tuning of Proposed method 1.

	$K(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$							
	Proposed method 1							
	P_m	k_p	T_i	T_d	P_m^*	$ITAE^*$	P_m^{**}	$ITAE^{**}$
Process 1	45°	1.83	2.00	1.93	45.24°	1.14	47.31°	1.76
Process 2	30°	1.44	1.27	1.49	30.06°	2.16	32.78°	2.26

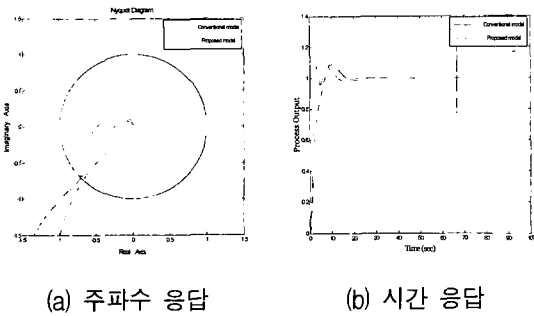


그림 8. 공정1에 대한 제안된 방법 1적용
Fig. 8. Application of Proposed method 1 for process 1.

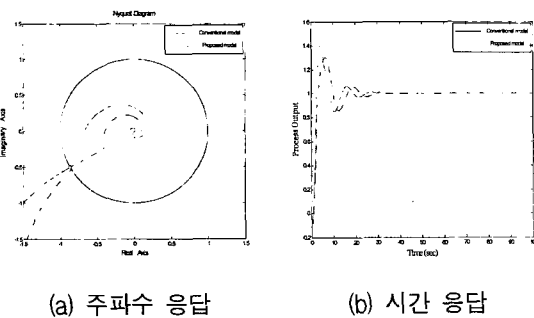


그림 9. 공정2에 대한 제안된 방법 1적용
Fig. 9. Application of Proposed method 1 for process 2.

을 알 수 있으며, 시간 응답에서는 설계 사양으로 제어기 파라미터 값을 구한 값은 기존의 값이 성능지수면에서는 우수하나, 제안된 방법을 기존의 방법의 위상여유를 만족하는 값으로 제어기 파라미터 값을 구하면 제안된 방법이 기존의 방법보다 성능지수면에서 우수함을 알 수 있다.

2.2 최적화 제어기 설계와 관련된 시뮬레이션

표 6에서는 기존의 방법과 제안된 방법 2을 사용하여 경우 공정 3~4에 대하여 설계된 PID 제어기의 파라미터를 보인다. 이렇게 설계된 PID 제어기는 단위 궤환 구조에 적용 하였다. 공정3, 공정4는 L 값이 0.1보다 크

표 6. 제안된 방법 2의 PID 제어기 파라미터 동조
Table6. PID parameters tuning of Proposed method 2.

	$\hat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c}$							
	Conventional method				Proposed method 1			
	k	K_p	K_I	K_D	k	K_p	K_I	K_D
Process 3	0.83	26.87	20.90	6.37	3.29	107.47	82.29	25.59
Process 4					107.53	419.68	806.45	40.53

표 7. 공정3에 대한 성능지수 비교

Table 7. Comparison of performance index for process 3.

	Conventional Method	Proposed Method 2
IAE	129.615	126.201
ISE	98.382	95.067
ITAE	1.1675	1.0872
Over-Shoot	1.1162	1.0739

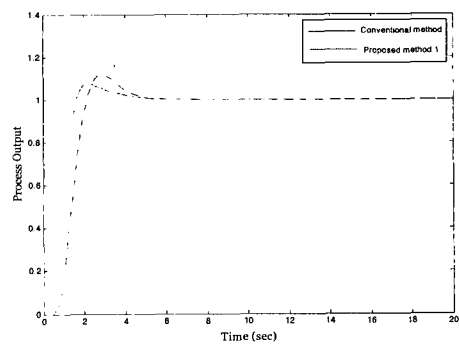


그림 10. 공정3에 대한 제안된 방법 2적용
Fig. 10. Application of Proposed method 2 for process 3.

표 8. 공정4에 대한 성능지수 비교

Table 8. Comparison of performance index for process 4.

	Conventional Method	Proposed Method 2
IAE		28.0677
ISE		20.8614
ITAE		6.6043
Over-Shoot		1.1174

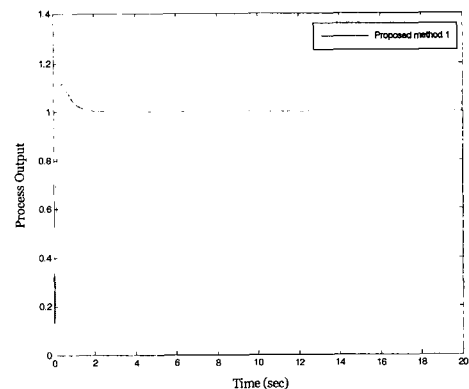


그림 11. 공정4에 대한 제안된 방법 2 적용
Fig. 11. Application of Proposed method 2 for process 4.

므로 축소 모델의 계수를 이용하여 ITAE값이 최소가 되는 k 의 값을 구하였고, 공정 3은 L 값이 0.1보다 작으므로 유전자 알고리즘에 의해서 k 값을 구하였다. 그림 10, 그림 11를 보면 여러 성능 지수 측면에서 기존의 방법보다 제안된 방법이 우수함을 알 수 있으며, 그림 11은 기존의 방법으로는 적용할 수 없으나 제안된 방법에 의해서 제어 파라미터 값을 구하고, 실제 공정에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 2차의 지연시간을 갖는 축소 모델을 이용하여 범용적 제어기 설계에 대해서 제안 하였다. 축소 모델을 구하는 방법으로는 Wang의 방법을 개선하기 위해서 수치적 계산과 유전자 알고리즘을 사용하여 축소 모델을 구하였고, 그 결과 단위 궤환 입력에 대하여 교차 모델과 축소 모델의 정상 상태 응답은 완벽하게 일치한다. 범용적 제어 구조 중 첫째, 등-제동의 특성을 고려한 제어기를 설계하기 위해서는 먼저 이득 주파수 w_g 와 공정의 미분값이 필요하다. 본 논문에서는 이득 교차 주파수 w_g 값을 축소 모델을 이용하여 수식적으로 쉽게 구하는 방법을 제안 했으며, 공정의 미분값 또한 축소 모델의 계수를 이용하여 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 이렇게 구한 w_g 값과 공정의 미분값을 이용하여 등-제동의 특성을 만족하는 1제어기 값을 구할 수 있었으며, PD값은 위상여유를 만족한 제어기 설계 방법을 적용하여 구하였다. 둘째, 축소 모델을 이용한 제안된 최적화 PID 동조 방법은 2차의 지연시간을 갖는 축소 모델을 구했기 때문에 지연시간을 보상해주는 스미스 예측기를 결합하였고, 제어기 파라미터 값은 성지 지수 ITAE값을 최소화하는 수치적 계산 방법과 GA방법을 결합하여 구하였다.

Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 하였으며, 시뮬레이션 결과 기존의 방법보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] Franklin, G. F., J. D Powell. and A. E, Baeni, "Feedback control of Dynmic Systems" Addison-Wesley, Reading, Ma 1986.
- [2] Ogata, K , "Moden Control Engineering, 2nd. Prentice-Hall", Englewood Cliffs, Nj,1990.
- [3] Åström, K.J. and C.C. Hang and P. Persson, "Towards intelligent PID control", Automatica, 28, 1-9, 1991.
- [4] Åström, K.J. and C.C. Hang., "Automatic Tuning of PID Controller", instrument Society of America. 1988.
- [5] M.Zhuang and D.P.Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers", Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 140, pt. D, no. 3, pp. 216-224, May 1993.
- [6] K.J.Astrom and T.Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins", Automatica, vol. 20, no. 5, pp. 645-651, 1984.
- [7] W.K.Ho, C.C.Hang, W.Wojsznis, and Q.H.Tao, "Frequency domain approach to self-tuning PID control", Contr.Eng. Practice, vol, 4, no.6, pp.807-813, 1996
- [8] W.K.Ho, O.P.Gan, E.B.Tay, and E.L.Ang, "Performance and gain and phase margins of well-known PID tuning formulas", IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 4, pp. 473-477, 1996
- [9] W.K.Ho, C.C.Hang, and L.S.Cao, "Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications", Automatica, vol. 31, no. 3, pp. 497-502, 1995.
- [10] W.K.Ho, T.H.Lee, H.P.Han, and Y.Hong, "Self-Tuning IMC-PID Control with Interval Gain and Phase Margins Assignment", IEEE Trans. Contro. Syst. Technol, vol. 9, no.3 , may 2001, pp.535-541
- [11] Y.Shamash, "Model reduction using the Routh stability criterion and the Pade approximation technique", Int. J. Control, vol. 21, No. 3, pp. 475-484, 1975
- [12] K.Y.Kong, S.C.Goh, C.Y.Ng, H.K.Loo, K.L.Ng, W.L. Cheong, and S.E.Ng, "Feasibility report on frequency domain adaptive controller", Dept. Elect. Eng., Nat. Univ. Singapore, Internal Rep., 1995.
- [13] Q.G.Wang, T.H.Lee, H.W.Fung, Q.Bi and Y. Zhang, "PID tuning for improved performance", IEEE Trans. Contro. Syst. Technol., vol. 7, no.4, pp. 457-465, July 1999.
- [14] Qing-Guo Wang, Chang-Chieh Hang, and Qiang Bi, "A Technique for Frequency Response Identification from Relay Feedback", IEEE Trans. Contro. Syst. Technol., vol.7, no1, January 1999, pp.122-128
- [15] Y.Shamash, "Model reduction using the Routh stability criterion and the Pade approximation technique", Int. J. Control, vol. 21, No. 3, pp.

475-484, 1975

- [16] Jeoungnae Choi, Joonho Cho, Wonjyok Lee, Hyungsoo Hwang, "Model Reduction Method and Optimized Smith Predictor Controller Design using Reduced Model", Trans. KIEE, Vol. 52D, No. 11, NOV. 2003, pp. 619-625
- [17] 조준호, 김정철, 김진권, 최정내, 황형수, "Model Reduction Algorithm Using Nyquist Curve in Frequency Domain", Journal of Control, Automation and System Engineering, Vol. 8, No.6, June, 2002, pp. 439-444
- [18] 최정내, 조준호, 황형수, "Smith-Predictor Controller Design Using New Reduction Model", Trans. KIEE, Vol. 52D, No. 1, JAN. 2003 pp. 9-15
- [19] 최정내, 조준호, 이원혁, 황형수, "Model Reduction Method and Optimized Smith Predictor Controller Design using Reduced Model", Trans. KIEE, Vol. 52D, No. 11, NOV. 2003, pp. 619-625
- [20] 조준호 "다양한 성능만족을 위한 계층적 제어기 설계", 대한전기학회논문지, 제 56권, 제 2호 pp. 396-406, 2007.2
- [21] A. Karimi, D. Garcia, and R.Longchamp, "PID controller design using Bode's integrals", in Proc. American Control Conf., Anchorage, AK, 2002, pp. 5007-5012
- [22] YangQuan Chen, Kevin L. Moore. "Relay Feedback Tuning of Robust PID Controllers With Iso-Damping Property." IEEE Transactions on systems, man, and Cybernetics., part B, Vol. 35. NO. 1, Feb 2005, pp 23-31

저 자 소 개



조 준 호(정회원)

2002년 원광대학교 제어계측 공학과 석사 졸업.

2006년 원광대학교 제어계측 공학과 박사 졸업.

2007년 원광대학교 전기전자및 정보공학부 전임강사

<주관심분야 : 퍼지 및 지능제어, 모델링>



황 형 수(평생회원)

1983년 전북대학교 전기공학과 석사 졸업.

1987년 전북대학교 전기공학과 박사 졸업.

1998년 원광대학교 전기전자및 정보공학부 교수

<주관심분야 : 퍼지 및 지능제어, 이산사건 시스템 및 제어>