

축소 모델을 이용한 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계

Design of Hybrid Smith-Predictor Fuzzy Controller Using Reduction Model

조 준 호*, 황 형 수

(Joon-Ho Cho and Hyung-Soo Hwang)

Abstract : In this paper, we propose an improved reduction model and a reduction model-based hybrid smith-predictor fuzzy controller. The transient and steady-state responded of the reduction model was evaluated. In tuning the controller, the parameters of PID and the factors fuzzy controllers were obtained from the reduced model and by using genetic algorithms, respectively. Simulation examples demonstrated a better performance of the proposed controller than conventional ones.

Keywords : model reduction, PID controller, smith-predictor, fuzzy controller

1. 서론

PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 근래보다 정교한 현대 제어이론이 개발되었음에도 산업계 현장 엔지니어들이 최적제어, 적응제어 등의 현대 제어이론들 보다는 PID 제어알고리즘에 친숙해져 있으며 PID 제어기의 운전과 동조에 관한 많은 경험을 가지고 있고, 제어기의 구조가 간단하여 실현하기가 용이하다[1-5]. 하지만 PID 제어기로는 비선형성이 큰 시스템이나, 지연시간이 큰 시스템에 적용했을 경우 만족할만한 성능을 얻기가 쉽지 않다[6].

퍼지 제어기는 인간의 경험과 지식에 근간한 언어적 제어규칙을 사용 할 수 있으며, 이로 인하여 선형공정 뿐만 아니라, 비선형 공정 제어시의 적합함과 우수성이 입증되어 왔다. 그러나 퍼지 집합의 조정에 의한 최적 퍼지 제어규칙을 구성하기 위해, 시행착오를 통한 매우 숙련된 기술이 요구되며, 또한 퍼지 제어기의 제어출력은 이를 표현하는 언어적이 될 수 있다[7].

따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 가중치에 따라 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 PID 제어기를 주로 사용하여 각 제어기의 장점을 이용한 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 필요성이 제기 되었다[8]. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기(HSFC)는 가중치에 따라 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 최적화 PID 제어기를 주로 사용하며 스미스 제어 구조로써 지연시간을 보상해주는 장점을 갖고 있다. 따라서 하이브리드 스미스 퍼지 제어기는 기존의 제어기에 보다 과도 및 정상 상태에서의 더 우수한 제어 성능을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 지연 시간과 비선형성을 보상주기 위해서 축소모델을 이용한 최적의 PID 제어기와 퍼지 제어기를 결합한 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계를 제안 하

였다. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계에 있어 어려운 점으로는 PID 파라미터, 퍼지 제어 규칙, 환산 계수, 멤버쉽 함수, HSFC의 하중 계수 등과 같은 제어 파라미터값을 결정하는 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 제어 파라미터값을 구하기 위해서 축소 모델을 이용한 PID 제어파라미터값과 스미스 예측기 값을 구하는 것과 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 하중계수를 구하는 것을 제시하였다.

먼저 축소 모델에 관한 연구는 시간 영역 및 주파수 영역에서 이루어지고 있으며 많은 성과를 얻고 있다. 시간 영역에서의 모델 축소와 주파수 영역에서의 모델 축소를 비교해 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 방법[9]이 있으며 주파수 영역에서의 대표적인 방법으로는 Wang의 모델 축소 방법이 있다[10-14]. Wang은 실제 공정을 2차의 지연시간을 갖는 모델(SOPTD)로 축소하여 서로 다른 동특성을 갖는 공정들을 저차 모델로 나타내었다. 본 논문에서는 Wang의 모델 축소 알고리즘을 보완하여 개선된 모델 축소방법을 제시 하였다. 개선된 모델 축소 알고리즘에서는 최종값의 정리와 유전자 알고리즘을 이용하여 실제 모델과 축소 모델의 정상 상태 응답의 일치 및 과도상태 응답의 오차를 개선하였고, 지연시간 첨가 및 제거 방법을 이용하여 기존의 방법을 적용할 수 없었던 공정에 대하여 축소 모델을 구할 수 있는 방법이다. 첫째, 축소 모델을 이용한 최적의 PID 제어기 설계 방법은 제어 성능을 향상시키기 위해서 축소 모델과 지연시간을 보상해 주는 스미스 예측기구조를 적용하여 성능지수 ITAE 값이 최소가 되도록 제어기를 설계하는 방식이다. 여기서 제어 파라미터 값은 수치적 해석에 의해 축소 모델의 파라미터값으로 직접 구하는 방법과 유전자 알고리즘을 이용하는 방법을 결합하여 사용하였다. 둘째, 스미스 예

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 1. 10., 채택확정 : 2007. 3. 5.

조준호 : 원광대 제어계측공학과(cho1024@wonkwang.ac.kr)

황형수 : 원광대 전기전자 및 정보공학부(hshwang@wonkwang.ac.kr)

※ 본 연구는 2007년도 원광대학교 지원에 의해서 이루어진 연구임.

측기의 파라미터 값은 축소 모델의 값을 이용하여 구하였다. 셋째, 퍼지 제어기의 환산계수 (GE, GD, GH, GC)값은 유전자 알고리즘을 통하여 구하는 방법을 제안하였다. 결론적으로 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계 방법은 PID 제어기와 지연시간을 보상하는 스미스 예측기와 퍼지제어기를 병렬로 결합하여 제어하는 방법으로 PID 제어 파라미터 값은 축소 모델을 이용하여 최적화 PID의 파라미터 값을 구하며, 스미스 예측기의 파라미터 값은 축소 모델의 값을 통하여 구하였고, 퍼지 제어기의 환산계수 (GE, GD, GH, GC)값은 유전자 알고리즘을 이용하여 구하는 방법을 제안하였다. 본 논문의 구성은 수치적 계산과 GA를 이용한 개선된 모델 축소 알고리즘, 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계, 시뮬레이션 및 고찰, 결론으로 구성되어 있다.

II. 최종값의 정리와 GA를 이용한 모델 축소 알고리즘

실제 공정이 (1)의 형태로 주어진다면, 주파수 응답을 이용하여 (2)의 SOPTD 모델로 축소 할 수 있다.

$$G(s) = \frac{\beta_0 s^m + \beta_1 s^{m-1} + \dots + \beta_{m-1} s + \beta_m}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n} \quad (1)$$

$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c} \quad (2)$$

기존의 방법에서는 Nyquist 선도 상에서 정상상태 응답에 해당되는 위상이 0인 점, 즉 $G(0)$ 을 제외한 위상이 $-\pi$ 와 $-\pi/2$ 인 두 점만을 일치 시켰으므로 시간영역에서의 실제 공정과 축소 모델간의 정상상태 응답이 일치하지 않는 경우가 발생한다[7]. 본 논문에서는 이런 문제점을 해결하기 위해서 제안된 지점(0, $-\pi/2$, $-\pi$, 그리고 $-3/2\pi$ 인 4개의 점)에서 실제 모델과 축소 모델이 일치하도록[13] 수치적 계산법과 유전자 알고리즘을 이용하여 축소 모델의 파라미터 값들을 구하였다.

수치적 계산법은 정상상태 응답에 해당되는 축소 모델의 파라미터 값 c 값을 구할 때 사용하였고, 유전자 알고리즘은 과도 상태 응답에 해당되는 a, b, L 값을 구할 때 사용하였다. 유전자 알고리즘의 성능 평가 함수로는 제안된 지점에서 실제 모델의 주파수 응답과 축소 모델의 주파수 응답의 값이 최소값이 되도록 하였다. 또한 유전자 알고리즘으로 구한 축소 모델의 파라미터값의 초기값은 Wang의 방법으로 구한 값을 이용하였다. 그림 1은 개선된 모델 축소 알고리즘이다.

• 1단계: Nyquist 응답 확인

고차 모델의 Nyquist 선도를 확인하여 주파수 응답이 복소평면의 전 영역을 통과하는지를 확인하여 통과하면 고차 모델은 (1)과 같고, 통과하지 않으면 (3)과 같이 고차 모델에 미소의 지연시간을 첨가하여 주파수 응답이 복소평면의 전 영역을 통과하도록 한다.

$$G(s) = \frac{(\beta_0 s^m + \beta_1 s^{m-1} + \dots + \beta_{m-1} s + \beta_m)(e^{-\rho s})}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n} \quad (3)$$

여기서, ρ 값은 첨가된 미소의 지연시간이다.

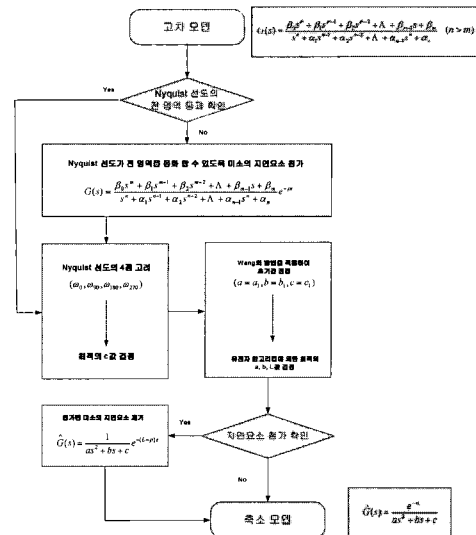


그림 1. 개선된 축소 모델 알고리즘의 흐름도
Fig. 1. Flowchart of improved reduction model algorithm.

• 2단계: 수치적 계산법을 이용한 파라미터 c 의 최적화 단위계단 입력이며, 단위 케환을 갖는 구조에서 실제 모델과 축소 모델의 최종값이 같아야 정상상태의 출력은 동일하다. 실제의 모델의 최종값은 (4)와 같다.

$$y_{gs}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = |G(0)| \quad (4)$$

축소 모델의 최종값은 (5)와 같다.

$$y_{gs}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{g}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \frac{1}{c} \quad (5)$$

(4)와 (5)에 의해서 정상상태의 출력값을 동일하게 하는 c 값은 (6)과 같다.

$$c = \frac{1}{|G(0)|} \quad (6)$$

• 3단계: 최적의 a, b, L 값 결정

축소 모델의 파라미터 a, b, c, L 값은 Nyquist 선도의 4점 ($\angle G(j\omega_a) = 0, \angle G(j\omega_b) = -\pi/2, \angle G(j\omega_c) = -\pi, \angle G(j\omega_d) = 3\pi/2$)에서 고차 모델과 축소 모델의 주파수 응답을 일치시킴으로써 과도 응답과 정상상태 응답을 고려하여 기존의 방법보다 우수한 축소 모델을 구할 수 있다.

Nyquist 선도의 $\angle G(j\omega_a) = 0$ 인 값은 시간영역에서는 정상상태 응답에 해당되며, 나머지 세 점 $\angle G(j\omega_b) = -\pi/2, \angle G(j\omega_c) = -\pi, \angle G(j\omega_d) = -3\pi/2$ 은 과도 상태 응답에 해당된다. (2)의 e^{-sL} 을 오일러 공식을 적용하면 (7)과 같다.

$$\hat{G}(j\omega) = \frac{\cos(\omega L) - j \sin(\omega L)}{c - a\omega^2 + j b \omega} \quad (7)$$

Nyquist 선도의 4점에서 고차 모델과 축소 모델이 같게 한다는 조건에서 (8)-(11)을 유도할 수 있다.

$$c - a\omega_a^2 + j\omega_a b = \frac{\cos(\omega_a L) - j \sin(\omega_a L)}{|G(j\omega_a)|} \quad (8)$$

$$c - a\omega_b^2 + j\omega_b b = \frac{\cos(\omega_b L) - j\sin(\omega_b L)}{-jG(j\omega_b)} \quad (9)$$

$$c - a\omega_c^2 + j\omega_c b = \frac{\cos(\omega_c L) - j\sin(\omega_c L)}{-|G(j\omega_c)|} \quad (10)$$

$$c - a\omega_d^2 + j\omega_d b = \frac{\cos(\omega_d L) - j\sin(\omega_d L)}{|G(j\omega_d)|} \quad (11)$$

(8)-(11)은 복소 연립 방정식이므로 총 8개 중 c값과 관련된 (8)을 제외하면 총 6개의 수식이 나온다. (9)-(11)은 서로 종속관계에 있으므로 a, b, L 값을 수식적으로 구하기 어렵다. 본 논문에서는 유전자 알고리즘을 사용하여 최적의 a, b, L 값을 구하였다.

유전자 알고리즘을 이용하려면 축소 모델의 파라미터의 초기값(a₁, b₁, L₁)이 필요하다. 본 논문에서는 Wang의 방법에 의한 값을 초기값으로 적용하였으며, 각 파라미터의 범위는 0 ≤ a ≤ 2a₁, 0 ≤ b ≤ 2b₁, 0 ≤ L ≤ 2L₁로 하였다. 적용된 최적화 기법은 단순 유전자 알고리즘으로, 사용된 선택연산은 룰렛방식, 교배연산은 단일교배, 돌연변이 연산은 선택된 비트를 반전시키는 invert 방식을 적용했다. 또한 세대는 1000세대, 군집은 60개체, 각 파라미터 문자열의 길이를 이진 형태로 15비트, 교배율은 70%, 돌연변이 발생율은 3%로 적용했다.

또한 적합도 평가 함수(J)는 Nyquist 선도의 세 점에서 오차의 합이 최소가 되도록 (12)를 이용하였다.

$$J = \sum_w (|G(jw)| - |\hat{G}(jw)|) \quad (12)$$

여기서 ω = ω_b, ω_c, ω_d이다.

• 4단계: 첨가된 지연시간 제거

1단계에서는 Nyquist 응답이 복소평면의 전 영역을 통과하지 않으면 미소의 지연시간 e^{-ps}를 첨가 하였다. 4단계에서는 첨가된 지연시간을 제거함으로써 축소 모델을 구할 수 있다. (13)은 Nyquist 곡선상의 모든 영역을 통과하게 되며, 첨가된 미소 지연시간 e^{-ps}를 제거하면 축소 모델을 구할 수 있게 된다.

$$\hat{G}(jw) = \frac{e^{-jLw}}{a(jw)^2 + b(jw) + c} = \frac{e^{-jLw} e^{-jpw}}{a(jw)^2 + b(jw) + c} \quad (13)$$

III 하이브리드 스미스 퍼지 제어기(HSFC) 설계

하이브리드 스미스 퍼지 제어기는 가중치에 따라 과도상태에서는 퍼지 제어기를 주로 사용하고 정상상태에서는 최적화 PID 제어기를 주로 사용되며, 스미스 제어 구조로써 지연시간을 보상해주는 장점을 갖고 있다. 따라서 하이브리드 스미스 퍼지 제어기는 기존의 제어기에 비해 정상 및 과도 상태에서의 각 제어출력의 정성적 특성 사이의 상호 균형으로부터 더 우수한 제어 성능을 얻을 수 있다. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계에 있어 어려운 점으로는 PID 파라미터, 퍼지 제어 규칙, 환산 계수, 멤버십 함수, HFC의 하중 계수 등과 같은 제어 파라미터값을 결정하는 것이다. 본 논문에서는 제어 파라미터의 동조 방법으로 PID 파라미터는 축소 모델을 이용한 최적화 PID 제어기를

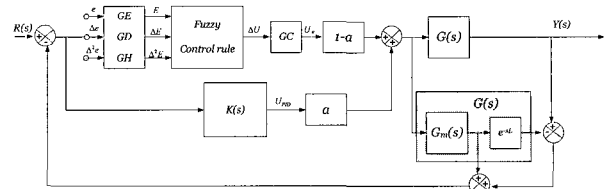


그림 2. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 구성도.
Fig. 2. The scheme of a hybrid smith fuzzy controller.

이용하여 설계하였고, 환산 계수 및 HSFC의 하중계수는 비선형 최적화 알고리즘인 GA(Genetic Algorithms)를 사용하여 최적의 값을 구하여 설계하였다.

1. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기(HSFC) 구조

HSFC는 퍼지제어기와 PID 제어기의 결합과 지연시간을 보상해 주는 Smith-Predictor가 포함되어 구성되어 있다. 기존의 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점을 융합한 것으로, 본 논문에서는 유전자 알고리즘과 축소 모델을 이용하여 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 성능을 향상 시켰다. 시스템에 대한 제어 입력은 퍼지 제어기 및 PID 제어기 출력에 대한 퍼지 변수의 컨벡스 결합으로 각 제어기 출력에 하중값을 곱한 합성치를 이용하였고, 스미스 예측기의 계수값은 축소 모델의 지연시간을 제외한 부분과 지연시간 부분으로 나누어 사용 하였다. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 기본 요소는 PID 파라미터, 환산계수, 언어적 제어 규칙, 하중계수 그리고 스미스 예측기의 계수값 이다. 그림 2는 HSFC의 구성도이다.

여기서, e: 오차값, Δe: 오차의 변화 값, Δ²e: 변동오차의 변화, ΔU는 제어 출력의 변화, GE, GD, GH, GC는 퍼지 환산계수, K(s)는 PID 제어기이며, (1-a)는 퍼지 제어기의 하중계수, a는 PID 제어기의 하중계수, UPID 는 제어기의 출력, UF는 퍼지제어기의 제어 출력, $\hat{G}(s)$ 값은 축소 모델로서 스미스 예측기 부분이며, U는 두 제어 출력이 결합된 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 제어 출력이다.

하이브리드 스미스 퍼지 제어기는 축소 모델을 이용하여 스미스 예측기를 설계함으로써 제어공정의 지연시간을 보상해주고 있으며, PID 제어기와 퍼지 제어기의 효과적인 결합을 위해서 하중 계수 (α)를 이용하였다. 그림 3은 하중 계수의 멤버십 함수를 나타내었다. 설정치와 공정 출력의 절대 오차가 크면 α는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대면 PID 제어기의 영향이 크게 된다. 이와 같이 하중계수인 이 가중치로부터 과도 상태 부근에서는 퍼지제어기의 영향이 커지며, 정상상태 부근에서는 PID 제어기의 영향이 커지게 된다. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기는 이 하중 계수에 의한 제어 출력 특성의 상호 깊은 균형으로부터 공정 출력성능을 향상시키며, 이 합성 제어 출력은 (14)와 같다.

$$U = a \cdot UPID + (1-a) \cdot UF \quad (14)$$

2. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 동조 알고리즘

HSFC는 (15)와 같은 퍼지 논리 규정의 의하여 n개의 퍼지 규칙으로 구성된다.

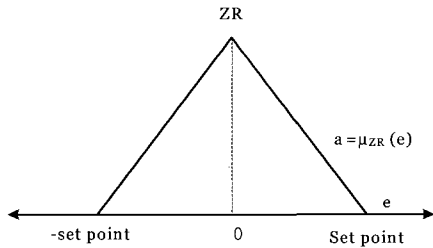


그림 3. 하중계수의 멤버십 함수.
Fig. 3. Membership function of weighting coefficient.

Ri: IF E is Ai and ΔE is Bi and Δ²E is Ci, THEN ΔU is Di (15)

여기서,

- Ri : i 번째의 제어 규칙(i=1,2,...,n),
- E : 오차 (error)값,
- ΔE : 오차의 변화 값,
- Δ²E : 변동오차의 변화 값,
- ΔU : 제어 입력의 변화값,
- Ai, Bi, Ci : 퍼지 변수,
- Di : 싱글톤 (singleton).

각 각의 규칙에 있어 전반부의 적합도는 (16)과 같고, 퍼지 제어기의 비퍼지화 과정을 거친 후반부 추론 값은 (17)과 같다.

$$W_i = \min\{\mu_{Ai}(E), \mu_{Bi}(\Delta E), \mu_{Ci}(\Delta^2 E)\} \quad (16)$$

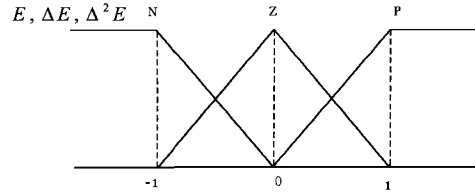
$$\Delta U^* = \frac{\sum_{i=1}^N w_i D_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (17)$$

전반부 언어적 제어변수가 오차(E), 오차의 변화값(ΔE) 일 경우 멤버십 함수는 NB(Negative Big), NM(Negative Middle), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Middle), PB(Positive Big)의 7개로 구성되고 오차(E), 오차의 변화값(ΔE), 변동 오차의 변화값(Δ²E)일 경우 멤버십 함수는 N(Negative), Z(Zero), P(Positive)의 3개로 구성되며, 후반부의 제어 출력의 변화값(ΔU)은 NB(-m3), NM(-m2), NS(-m1), ZO(0), PS(m1), PM(m2), PB(m3)로 7개의 싱글톤 (singleton) 멤버십 함수를 사용한다. 후반부 멤버십 함수의 초기값 즉, 규칙을 동조하기 전의 멤버십 함수는 m1 =1/3, m2= 2/3, m3=1의 값을 가진다. 전체적인 제어 규칙은 표 1과 같다.

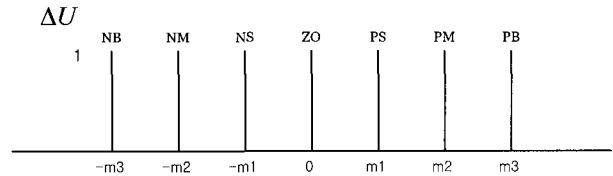
표 1. 퍼지 제어규칙.

Table 1. Fuzzy control rules.

		Δ ² E = N			Δ ² E = Z			Δ ² E = P				
		ΔE			ΔE			ΔE				
		N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P		
E	N	-m3	-m3	-m2	N <td>-m3</td> <td>-m2</td> <td>-m1</td> <td>N <td>-m2</td> <td>-m1</td> <td>0</td> </td>	-m3	-m2	-m1	N <td>-m2</td> <td>-m1</td> <td>0</td>	-m2	-m1	0
	Z	-m2	-m1	0	Z <td>-m1</td> <td>0</td> <td>m1</td> <td>Z <td>0</td> <td>m1</td> <td>m2</td> </td>	-m1	0	m1	Z <td>0</td> <td>m1</td> <td>m2</td>	0	m1	m2
	P	0	m1	m2	P <td>m1</td> <td>m2</td> <td>m3</td> <td>P <td>m2</td> <td>m3</td> <td>m3</td> </td>	m1	m2	m3	P <td>m2</td> <td>m3</td> <td>m3</td>	m2	m3	m3



(a) 전반부 입력 멤버십 함수



(b) 후반부 출력 멤버십 함수

그림 4. 전반부 입력변수의 멤버십 함수 및 후반부 출력 멤버십 함수.

Fig. 4. Membership function of premise input variable and consequence output variable.

(15)의 제어규칙에서 입·출력 변수의 멤버십 함수는 각각 그림 4와 같이 [-1, 1]에 의해 표준화된 삼각형 형태와 싱글톤을 사용한다.

3. 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 파라미터 동조

하이브리드 스미스 퍼지 제어기를 설계할 때 가장 중요한 요소 중 하나는 제어 파라미터 값을 최적의 값으로 동조하는 것이다. 본 논문에서는 단위 입력에 대한 제어 응답 특성을 최적화하기 위하여, PID 제어기의 파라미터 값 및 퍼지 제어기의 환산계수의 값을 최적화하기 위해서 목적함수로는 ITAE를 선택하여 설계하였다. PID제어기 파라미터 동조 방법, 스미스 예측기의 계수값 결정방법 및 퍼지 제어기의 환산계수값 결정 방법에 대하여 살펴본다.

3.1 PID 파라미터 동조

본 논문에서는 그림 2와 같이 지연시간을 보상해 주기 위해서 스미스 예측기 구조 이므로 PID 파라미터 값을 구할 때도 스미스 예측기 부분을 고려하여 설계해야 한다. 따라서 제어기 파라미터 값은 그림 5와 같은 스미스 예측기 구조에서 구할 수 있다.

그림 5에서 스미스 예측기구조의 페루프 전달함수는 (18)과 같다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K(s)G(s)}{1 + K(s)G_m(s) + K(s)[G(s) - G_m(s)]e^{-sL}} \quad (18)$$

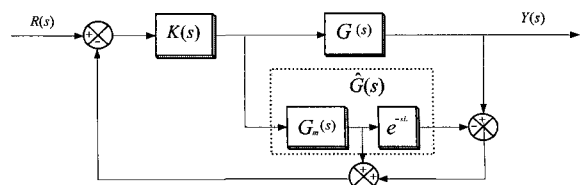


그림 5. 스미스 예측기 구조.
Fig. 5. Structure of smith predictor.

여기서 $G(s)$ 는 실제 공정, $G_m(s)e^{-Ls}$ 는 축소 모델을 의미하며, 위의 구조에서 실제공정과 축소 모델이 거의 일치한다고 가정하면, 즉, $G(s) \approx G_m(s)e^{-sL} = \hat{G}(s)$ 라면, (18)은 (19)처럼 근사화 된다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \approx \frac{K(s)\hat{G}(s)}{1+K(s)G_m(s)} \quad (19)$$

(19)에서 보면 특성방식의 시간 지연 항이 제거되었으며, 스미스 예측기 구조는 시간 지연을 보상할 수 있다.

여기서 제어기 $K(s)$ 는 (20)처럼 PID 제어를 사용한다.

$$K(s) = k \frac{As^2 + Bs + C}{s} \quad (20)$$

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 $A=a$, $B=b$, $C=c$ 처럼 설정한다면, (20)는 (21)처럼 근사화 된다. 여기서 a, b, c 는 축소 모델의 계수이다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} \approx \frac{ke^{-sL}}{s+k} \quad (21)$$

결론적으로 스미스 예측기 구조에, 추정 모델로써 SOPTD 모델을 사용하고, PID 제어를 사용한다면 고차계 시스템의 제어문제는 (21)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.

3.2 수식적 계산에 의한 제어 파라미터 동조

입력이 단위계단 함수이고 설정치가 y_r 이라 하면, (21)은 (22)처럼 표현된다.

$$Y(s) = y_r \left(\frac{1}{s} - \frac{e^{kL}}{s+k} \right) \quad (22)$$

(22)을 역라플라스 변환하면 (23)이 얻어진다.

$$y(t) = y_r (1 - e^{-k(t-L)}) \quad (23)$$

여기서 에러함수는 (24)처럼 구해진다.

$$e(t) = y_r - y(t) = y_r e^{-k(t-L)} \quad (24)$$

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

ITAE에 대한 정의로부터 (25)와 같다.

$$ITAE = \int_0^\infty te(t)dt = \frac{y_r}{k^2} e^{kL} \quad (25)$$

미분을 이용하여 ITAE를 최소로 하는 k 값을 구할 수 있다. (25)을 미분하면 (26)과 같다.

$$\frac{dITAE}{dk} = (L - \frac{2}{k}) \frac{e^{kL}}{k^2} \quad (26)$$

여기서 $k = 2/L$ 에서 극값을 가지는데, 이 점에서 ITAE가 최소가 된다.

즉 ITAE가 최소가 되는 k 는 (27)처럼 결정된다.

$$k = \frac{2}{L} \quad (27)$$

3.3 GA를 이용한 제어 파라미터 동조

수치적 계산에 의한 k 값은 (27)과 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 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 2와 같다. 그림 6은 본 논문에서 제안한 최적화 PID 파라미터 동조 알고리즘을 보인다.

표 2. 유전자 알고리즘의 초기 정보.

Table 2. A list parameters of genetic algorithms.

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

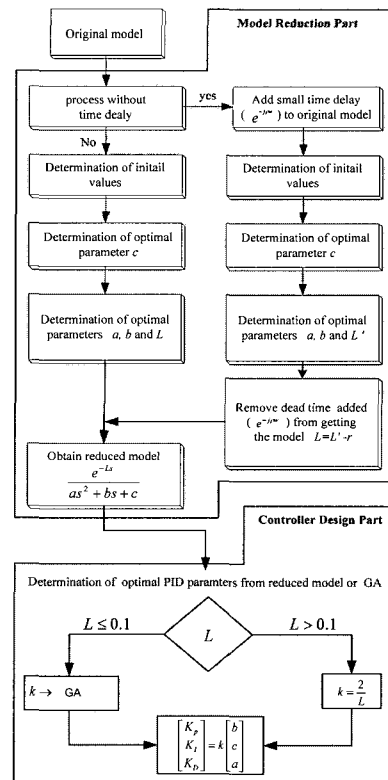


그림 6. 제안된 최적화 PID 동조 알고리즘.
Fig. 6. Proposed optimal PID tuning algorithm.

3.4 스미스 예측기의 계수값 결정

산업용 공정시스템의 대부분은 시간지연 프로세스를 가지고 있다. 이들 프로세스의 지연 시간으로 계통의 응답을 저하시키게 되는데 이를 해결하기 위한 시간 지연 보상기법으로 스미스 예측 알고리즘이 널리 쓰이고 있다. 스미스 예측기는 지연시간 부분과 지연시간을 제외한 부분으로 크게 나눌 수 있다. 본 논문에서는 스미스 예측기의 계수 값을 축소 모델의 계수값으로 사용함으로써 쉽게 구할 수 있다. (28)은 스미스 예측기의 계수값을 나타낸 것이다.

$$G(s) \approx \hat{G}(s) = G_m(s)e^{-sL} = \frac{1}{as^2 + bs + c} e^{-sL} \quad (28)$$

여기서, e^{-sL} 값은 지연시간 부분이며, G_m 은 지연시간을 제외한 부분이다.

3.5 퍼지 환산 계수 동정

하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 환산계수(GE, GD, GH, GC)값을 구하기 위해서는 HSFC 구조에서 구해야 되므로, 앞 절에서 구한 제어 파라미터 값과 스미스 예측기의 계수 값을 적용한 뒤 제어기 환산계수 값들을 구해야 한다. 본 논문에서는 퍼지 제어기의 환산계수 값들을 유전자 알고리즘을 이용하여 평가함수 ITAE값이 최소가 되도록 자동동조하였다. 그림 7은 유전자 알고리즘을 사용하여 HSFC의 환산계수를 자동 동조하는 구성도를 나타내었다.

여기서, 환산계수 ((GE, GD, GH)값은 공정 출력과 설정치와 오차를 퍼지규칙의 전반부 소속함수로 표현하기 위한, [-1, 1]의 표준화된 퍼지값 (E, ΔE, Δ²E)으로 표현하는 수치를 의미한다. 그리고 GC는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 환산 계수 이다. 퍼지 규칙에 있어 각각의 전·후반부 환산계수의 표현은 (29)-(32)와 같다.

$$E(kT) = \text{error}(kT) \times GE \quad (29)$$

$$\Delta E(kT) = [\text{error}(kT) - \text{error}((k-1)T)] \times GD \quad (30)$$

$$\Delta^2 E(kT) = [\text{error}(kT) - 2\text{error}((k-1)T) + \text{error}((k-2)T)] \times GH \quad (31)$$

$$U(kT) = U((k-1)T) + \Delta U(kT) \times GC \quad (32)$$

지금까지 설명한 HSFC는 다음의 단계적 절차를 통하여 설계되어진다.

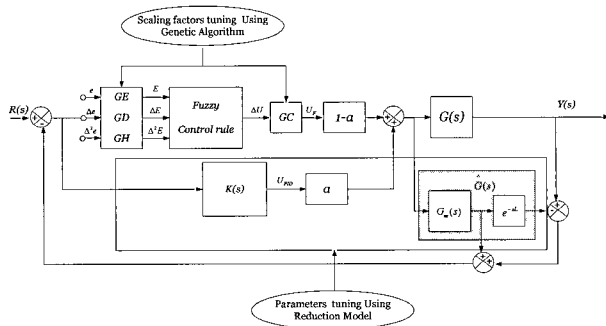


그림 7. 환산계수를 자동 동조하는 하이브리드 스미스 퍼지 제어기의 구성도.

Fig. 7. The scheme of auto-tuning hybrid smith controller with scaling factors.

Step 1: 축소 모델을 구한다.

Step 2: 축소 모델의 계수를 이용하여 PID 제어기의 파라미터 값 및 스미스 예측기의 계수값들을 결정한다.

Step 3: 퍼지 제어기의 전·후반부 멤버십 함수 및 제어 규칙을 결정한다.

Step 4: 퍼지제어기의 환산계수(GE, GD, GH, GC)값들을 유전자 알고리즘을 통하여 동조한다.

IV. 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 이득여유와 위상여유를 만족하는 PID 제어기 설계 및 하이브리드 스미스 퍼지 제어기에 대한 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법이 우수함을 증명한다. 논문에 적용된 고차 모델과 개선된 모델 축소 방법에 의해 구해진 축소 모델은 표 3과 같다.

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

공정 2: $\frac{1}{(s^2+s+1)(s+2)} e^{-0.1s}$

표 4는 실제 모델과 축소 모델간의 기존의 방법[9]과 제안된 방법의 성능을 주파수 영역에서의 절대 오차의 합(N)과 시간 영역에서의 절대 오차의 합(T), 정상상태 오차(S)를 각각 비교한 것이다.

표 3. 시뮬레이션 공정 및 축소 모델의 계수 비교.

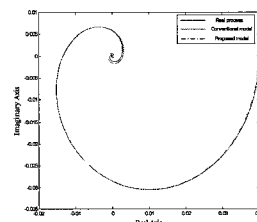
Table 3. Definition of process and coefficient of reduced model.

	$\hat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c}$							
	기존의 방법				제안된 방법			
	L	a	b	c	L	a	b	c
공정 1	0.602	7.664	32.340	25.15	0.608	7.776	32.650	25
공정 2	0.439	2.624	2.239	2.279	0.492	2.526	2.419	2

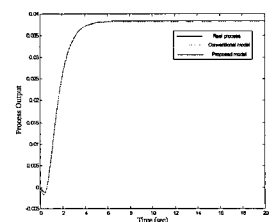
표 4. 축소 모델들의 성능 비교.

Table 4. Performance comparison of reduced models.

	기존의 방법			제안된 방법		
	N	T	S	N	T	S
공정 1	1.893	0.865	0.0003	1.145	0.086	0
공정 2	297.874	51.378	0.0287	90.392	13.972	0



(a) 주파수 응답



(b) 페루프 단위 계단 응답

그림 8. 공정 1에 대한 축소 모델들의 응답 비교.

Fig. 8. Response comparison of reduced models for process 1.

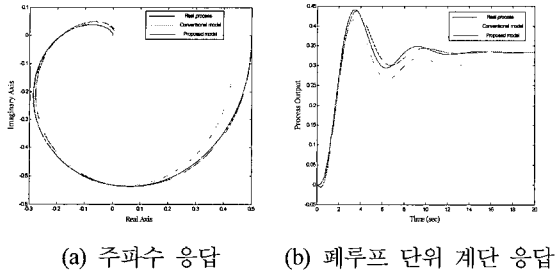


그림 9. 공정 2에 대한 축소 모델들의 응답 비교.

Fig. 9. Response comparison of reduced models for process 2.

1.1 모델 축소에 대한 시뮬레이션 결과의 고찰

그림 8, 9는 공정 1,2에 대하여 실제 모델과 축소 모델을 주파수 영역 및 시간 영역에서의 응답을 각각 그래프로 나타 낸 것이다. 표 4에서 확인할 수 있듯이 제안된 방법이 기존의 방법보다 주파수 영역, 시간영역, 정상상태 응답 모두에서 우수함을 확인할 수 있다. 특히 공정 2를 시뮬레이션 한 결과인 그림 9에서 확인할 수 있듯이 기존의 방법은 실제 모델과 축소 모델 간의 정상상태 응답 부분이 일치하지 않으나, 제안된 방법은 실제 모델에 일치함을 알 수 있다.

2. 축소 모델을 이용한 하이브리드 스미스 퍼지 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 하이브리드 스미스 퍼지 제어기에 대하여 시뮬레이션 하였다.

공정 1, 2에 대해서 제안된 방법을 적용하여 표 5와 같이 PID 파라미터 값 및 퍼지 제어기의 환산계수 (GE, GD, GH, GC) 을 구하였고, 표 6, 7은 기존의 방법[9]과 성능지수를 비교하여 그림 10, 11에 나타내었다.

2.1 제안된 방법에 대한 시뮬레이션 결과의 고찰

표 5는 제안된 방법을 적용하여 공정 1, 2에 대해서 하이브리드 스미스 퍼지제어기 파라미터 값을 구한 것이다. 표

표 5. 제안된 방법의 PID 제어기 파라미터 동조.

Table 5. PID parameters tuning of proposed method.

	제안된 방법						
	K_P	K_I	K_D	GE	GD	GH	GC
공정 1	107.474	82.291	6.368	0.012	0.023	0.528	30.021
공정 2	65.872	85.583	49.669	0.018	0.498	0.747	13.584

표 6. 공정1에 대한 성능지수 비교.

Table 6. Comparison of performance index for process 1.

	기존의 방법	제안된 방법
IAE	130.2514	103.5136
ISE	101.2989	91.0036
ITAE	1.3025	1.0351
Over-Shoot	1.0358	1.0319

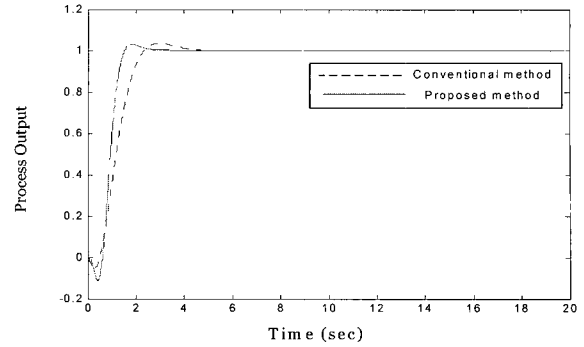


그림 10. 공정 1에 대한 제안된 방법 적용.

Fig. 10. Application of proposed method for process 1.

표 7. 공정 2에 대한 성능지수 비교.

Table 7. Comparison of performance index for process 2.

	기존의 방법	제안된 방법2
IAE	229.615	161.4827
ISE	122.2483	92.2660
ITAE	2.1675	1.6148
Over-Shoot	1.3047	1.2176

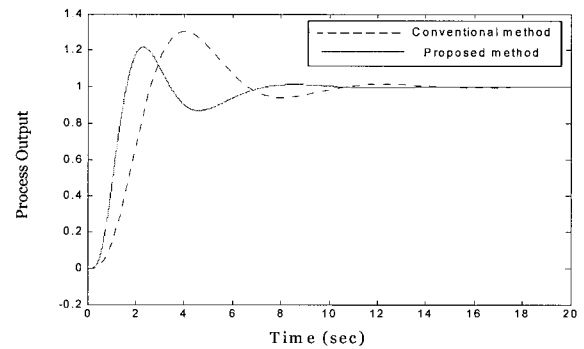


그림 11. 공정 2에 대한 제안된 방법 적용.

Fig. 11. Application of proposed method for process 2.

5의 PID 파라미터 값은 그림 6에서 정리된 최적화 PID 파라미터 값을 사용하였고, 스미스 예측기의 G_m 값과 e^{-sL} 값은 축소 모델을 사용하였으며, 퍼지 제어기의 환산계수 (GE, GD, GH, GC)값들을 유전자 알고리즘을 이용하여 동조 하였다. 그 결과 표 6, 7에서 확인할 수 있듯이 제안된 방법이 기존의 방법보다 성능지수(IAE, ISE, ITAE)에서 우수함을 알 수 있고, 그림 10, 11에서 확인할 수 있다.

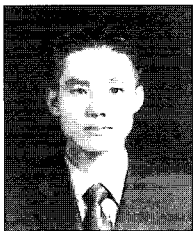
V. 결론

본 논문에서는 지연 시간과 비선형성을 보상주기 위해서 축소모델을 이용한 최적의 PID 제어기와 퍼지 제어기를 결합한 하이브리드 스미스 퍼지 제어기 설계를 제안 하였다. 축소 모델을 구하는 방법으로는 Wang의 방법을 개선하기 위해서 수치적 계산과 유전자 알고리즘을 사용하여 축소 모델을 구하였고, 그 결과 표 4와 같이 주파수 응답, 시간 응답 그리고 시간 응답의 정상상태 모든 부분에서 기존의

방법보다 우수함을 확인 할 수 있었다. 최적의 성능을 얻기 위한 제어기 방법으로 하이브리드 스미스 퍼지 제어기를 설계 하였으며, 기존의 방법은 PID 파라미터 및 퍼지 환산 계수의 동정을 모두 유전자 알고리즘을 사용하였지만, 제안된 방법은 축소 모델을 이용하여 최적의 PID 제어기의 파라미터 값 및 스미스 예측기의 값을 직접 구할 수 있으며, 퍼지 환산계수 부분은 유전자 알고리즘을 이용하여 구함으로써, 기존의 방법보다 성능뿐만 아니라 시간적으로 많이 단축할 수 있었다. Matlab을 이용한 시뮬레이션 결과 기존의 방법보다 우수한 성능을 확인 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K. J. Astrom, "Automatic tuning of PID regulators," *Instrument Soc. Amer.*, 1998.
- [6] J. Malers and Y. S. Sherif, "Application of fuzzy set theory," *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, 1985.
- [7] Kevin M. Passino and Stephen yurhovich, "Fuzzy control," *Addison Wesley Longman, Inc.*, 1998.
- [8] S. K. Oh, T. H. Ahn, H. S. Hwang, Jongin Park and Kwangbang Woo, "Design of a hybrid fuzzy controller with the optimal auto-tuning method." *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 1, no. 1, September 1995.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
- [13] Q.-G. Wang, C.-C. Hang, and Q. Bi, "A technique for frequency response identification from relay feedback," *IEEE Trans. Contro. Syst. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 122-128, January 1999.
- [14] 최정내, 조준호, 이원혁, 황형수, "축소모델을 이용한 최적화된 Smith predictor 제어기 설계," *대한전기학회 논문지*, 제 52 권, 제 11 호 pp. 619-625, 2003.



조 준 호

2000년 원광대학교 제어계측공학과 학사 졸업. 2002년 원광대학교 제어계측공학과 석사 졸업. 2006년 원광대학교 제어계측 공학과 박사 졸업. 관심분야 퍼지 및 지능제어, 모델링.



황 형 수

1983년 전북대학교 전기공학과 석사 졸업. 1987년 전북대학교 전기공학과 박사 졸업. 1998년 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수. 관심분야 퍼지 및 지능제어, 이산사건 시스템 및 제어.