

단순 FLC의 정상상태오차 해석

Analysis of Steady State Error on Simple FLC

이 경 응, 최 한 수*
(Kyoung-Woong Lee¹ and Hansoo Choi²)

¹Daelim I&S

²Chosun University

Abstract: This paper presents a TS (Takagi-Sugeno) type FLC (Fuzzy Logic Controller) with only 3 rules. The choice of parameters of FLC is very difficult job on design FLC controller. Therefore, the choice of appropriate linguistic variable is an important part of the design of fuzzy controller. However, since fuzzy controller is nonlinear, it is difficult to analyze mathematically the affection of the linguistic variable. So this choice is depend on the expert's experience and trial and error method. In the design of the system, we use a variety of response characteristics like stability, rising time, overshoot, settling time, steady-state error. In particular, it is important for a stable system design to predict the steady-state error because the system's steady-state response of the system is related to the overall quality. In this paper, we propose the method to choose the consequence linear equation's parameter of T-S type FLC in the view of steady-state error. The parameters of consequence linear equations of FLC are tuned according to the system error that is the input of FLC. The full equation of T-S type FLC is presented and using this equation, the relation between output and parameters can be represented. As well as the FLC parameters of consequence linear equations affect the stability of the system, it also affects the steady-state error. In this study, The system according to the parameter of consequence linear equations of FLC predict the steady-state error and the method to remove the system's steady-state error is proposed using the prediction error value. The simulation is carried out to determine the usefulness of the proposed method.

Keywords: FLC (Fuzzy Logic Control), steady-state error, linguistic variable

I. 서론

전통적인 제어기의 성능을 개선한 퍼지제어기(FLC)는 많은 분야에서 응용되고 있으나 FLC의 비선형성으로 인하여 성능 분석이 어려운 단점이 있다[1,2].

Mandani 형 퍼지제어기의 경우 후건부 언어변수의 크기에 따라 다양한 응답특성을 보이지만 수식으로 표현이 용이하지 않다[3]. Mandani 형에 비해 Takagi-Sugeno 형 퍼지제어기는 후건부가 선형식으로 이루어져 있어 퍼지제어기에 대한 수식의 표현이 용이하다는 장점이 있다[4,5].

시스템 설계에 있어 중요한 요소인 안정성 판별을 위해 다양한 방법들이 제안됐다. 특히 퍼지제어기의 경우 비선형성을 가지고 있어 선형시스템에 적용되는 안정도 판별법을 적용할 수 없다. 따라서 퍼지제어기에 대한 안정도 해석을 위해서 비선형 시스템의 안정도 판별에 적용된 Describing Function, Circle Criterion과 같은 다양한 방법이 퍼지제어기의 안정도 판별을 위해 적용되었으며 또한 언어변수와 시스템의 안정성과의 관계에 대한 연구가 이루어졌다[6-9].

안정성 외에도 시스템 설계에 있어 상승시간, 오버슈트, 정착시간, 정상상태오차와 같은 다양한 응답특성을 이용하게 된다. 특히 시스템의 정상상태에 있어서 응답특성은 시스템의 전체적인 특성과 관련이 있어 정상상태오차를 예측하는 것은 안정된 시스템 설계에 있어 중요하다.

비선형시스템은 입력과 출력에 대한 전달특성이 비선형성을 가지기 때문에 위와 같은 응답특성을 이용한 폐회로 응답특성을 분석하기가 어렵다. 일반적으로 FLC는 입출력의 전달특성이 비선형성을 가지고 있어 폐회로 응답특성 중 하나인 정상상태오차를 예측하는데 어려움이 있다.

본 논문에서 FLC의 정상상태오차의 예측을 위해 비선형 시스템에 대한 정상상태오차를 예측하는 방법을 이용하여 퍼지제어기의 멤버십함수 변화에 따른 전체 시스템의 정상상태오차를 예측하는 방법을 제시한다[10]. 이를 위하여 입력과 출력의 언어변수가 3개로 구성된 3변수 T-S형 단순 퍼지제어기의 입출력 관계식을 각각 멤버십 함수의 특성을 이용하여 단일 함수로 정의하였다.

비선형시스템에 대한 정상상태오차를 예측하는 방법의 적용을 위해 정의된 함수가 Sector condition를 만족할 수 있도록 입출력이 0점을 중심으로 대칭되도록 하였다. 정의된 3변수 T-S형 FLC 응답함수는 후건부 선형식의 계수 m 에 의해 응답특성이 변화된다.

본 연구에서는 이러한 특성을 이용하여 퍼지제어기 함수의 계수인 m 과 정상상태오차간의 관계 방정식을 도출하였으며, 도출된 방정식을 통해 퍼지제어기 계수에 따른 시스템의 정상상태오차를 예측할 수 있다.

제안된 방법에 대한 검증을 위해 예측한 정상상태오차와 실제 오차와의 비교를 위해 시뮬레이션을 이용하였으며 제안된 방법이 효과적으로 예측되고 있음을 보였다. 예측된 정상상태오차의 제거를 위해 시스템에 이득을 추가하여 정상상태오차를 제거하는 방법을 제시한다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 18., 수정: 2011. 7. 6., 채택확정: 2011. 7. 20.

이경응: 대림 I&S(yikw@yncc.co.kr)

최한수: 조선대 제어계측로봇공학과(hschoi@chosun.ac.kr)

* 본 논문은 2011 제26회 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었음.

II. 단순 FLC의 구조

퍼지이론은 기존의 이분법적인 이론으로 표현할 수 없었던 인간의 사고나 자연언어를 정량화하여 나타낼 수 있도록 제안된 이론으로 불확실한 언어적 표현을 기술하는데 효과적으로 이용되었다. 그러나 이러한 특성으로 인해 퍼지제어기의 입력과 출력에 대한 수식의 수학적 해석에 어려움이 있다.

본 연구에서는 FLC를 포함한 시스템의 수학적 해석을 위해 FLC의 입출력을 나타내는 단일방정식을 정의하였다. 이를 위해 SISO Takagi-Sugeno 형 FLC로 3개의 언어변수로 이루어진 전건부 멤버십 함수와 3개의 후건부 선형식을 사용하였다. 그림 1은 전건부 멤버십 함수의 언어변수를 나타내고 있다.

식 (1)과 같이 T-S형 FLC의 제어규칙을 정의하였다. 퍼지 제어기의 응답특성이 0점을 중심으로 대칭이 되도록 하였다. 식 (2)는 에러 입력에 대한 일반화를 정의하고 있다.

$$\begin{aligned}
 R1: & \text{if } (\hat{e} \text{ is NB}) \text{ then } (\hat{u} = m_1 \times \hat{e} - (1 - m_1)) \\
 R2: & \text{if } (\hat{e} \text{ is AZ}) \text{ then } (\hat{u} = m_2 \times \hat{e}) \\
 R3: & \text{if } (\hat{e} \text{ is PB}) \text{ then } (\hat{u} = m_1 \times \hat{e} + (1 - m_1))
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$e(n) = \begin{cases} 1, & \hat{e}(n) > 1 \\ \hat{e}(n), & |\hat{e}(n)| \leq 1 \\ -1, & \hat{e}(n) < -1 \end{cases} \tag{2}$$

본 논문에서는 후건부 선형식의 매개변수에 따른 응답특성을 이용하기 때문에 전건부 멤버십 함수는 그림 2와 같이 좌우가 완전히 대칭인 고정된 퍼지변수를 사용하였고 후건부 선형 식은 좌우가 대칭되도록 하였다. NB, PB는 m_1 을 이용하여 선형 식을 구성하였으며 AZ는 m_2 를 이용하여 선형 식을 구현하였다. 또한 입력범위 $[-1 \ 1]$ 에 대해 출력범위도 $[-1 \ 1]$ 이 될 수 있도록 후건부 멤버십 함수는 식 (3)과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned}
 \hat{u}_{NB} &= m_1 \times \hat{e} - (1 - m_1) \\
 \hat{u}_{AZ} &= m_2 \times \hat{e} \\
 \hat{u}_{PB} &= m_1 \times \hat{e} + (1 - m_1)
 \end{aligned} \tag{3}$$

3변수 T-S형 퍼지제어기를 수식으로 표현하기 위해 그림 1의 전건부 멤버십 함수는 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 \mu_{NB} &= -x \\
 \mu_{AZ} &= |x| + 1 \\
 \mu_{PB} &= x
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (5)는 T-S형 퍼지제어기의 비퍼지화를 나타내고 있으며 무게중심법을 이용하여 퍼지제어기의 제어입력 \hat{e} 에 대한 제어신호 \hat{u} 의 관계는 (6)와 같다.

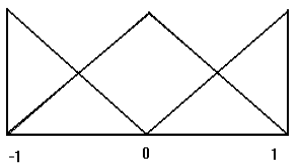


그림 1. 전건부 멤버십 함수.
Fig. 1. Membership function for premise.

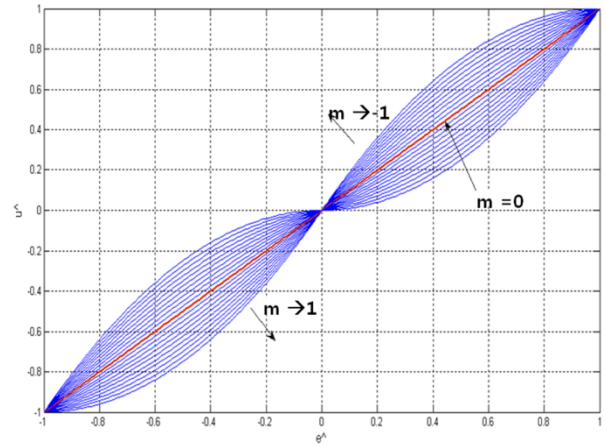


그림 2. FLC의 일반화된 출력.
Fig. 2. Normalized output of FLC.

$$\hat{u} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_i \times \hat{u}_i}{\sum_{i=1}^M \mu_i} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{u} &= (m_1 - m_2) \times \hat{e} \times |\hat{e}| + (1 - m_1 + m_2) \times \hat{e} \\
 \hat{u} &= m \times \hat{e} \times |\hat{e}| + (1 - m) \times \hat{e}, \quad m = m_1 - m_2
 \end{aligned} \tag{6}$$

식 (6)에서와 같이 후건부 선형식 계수 m_1 과 m_2 는 각각의 영향이 아닌 두 변수의 차 m 에 의해 시스템 전체의 응답이 변화됨을 알 수 있다.

후건부 멤버십함수의 선형식의 계수인 m_1 과 m_2 를 통해 입력 출력 응답은 그림 2와 같이 다양한 비선형 응답을 나타낸다.

그림 2는 퍼지제어기의 입력에 따른 출력을 보여주고 있다. m 이 0일 때는 거의 선형식에 가까운 입력 출력 관계를 보여주고 m 이 -1에 가까울수록 전체적인 응답은 x 값이 0 근처에서 급격하게 변화하는 특성을 보이고 m 이 1에 가까울수록 x 값이 1 근처에서 급격하게 변화하는 응답 특성을 보인다.

III. 비선형 시스템의 정상상태오차

비선형 제어기가 포함된 시스템의 정상상태오차를 예측하기 위해서는 식(7)과 같이 비선형 제어기 φ 가 Sector condition을 만족하고 Circle Criterion에 의한 안정도 조건을 만족해야 한다.

$$\alpha \leq \frac{\varphi(a) - \varphi(b)}{a - b} \geq \beta \tag{7}$$

비선형 제어기 φ 의 응답의 경계값에 의한 평균 기울기는 식 (8)과 같으며 식 (9)는 φ 의 평균 기울기 c_0 를 포함한 제어 대상 플랜트의 폐회로 방정식을 나타내고 있다.

$$c_0 = \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \tag{8}$$

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + c_0 G(s)} \tag{9}$$

식 (10)은 평균 기울기에 의한 응답과 FLC에 의한 실제 응답과의 차를 나타내고 있으며 식(11)은 $\gamma \in \mathbf{R}$ 에 대해 유일한 $\varepsilon \in \mathbf{R}$ 가 존재하며 $\lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon_k \rightarrow \varepsilon$ 와 같다.

$$\hat{\varphi}(e) = \varphi(e) - c_0 e \quad (10)$$

$$\gamma = \varepsilon + H(0)\hat{\varphi}(\varepsilon) \quad (11)$$

따라서 비선형제어기가 포함된 플랜트의 비선형 오차반복 함수는 식 (12)와 같이 표현할 수 있다[10].

$$\varepsilon_{k+1} = \gamma - H(0)\hat{\varphi}(\varepsilon_k) \quad (12)$$

만약 r 이 $t \rightarrow \infty$ 에 대해 극한값 l 에 접근하면 정상상태오차 e_{ss} 에 대해 $e_{ss} \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} (t)$ 가 존재한다. 또한 $l \neq 0$ 이고 $\rho = 0$ 이면 $e_{ss} \neq 0$ 되고 $\gamma = \frac{l}{1+c_0G(0)}$ 에 대해 $e_{ss} = \varphi(\gamma)$ 이 된다.

IV. 단순 FLC의 정상상태오차

본 연구에서 제안한 단순 FLC는 비선형 기함수로 정상상태오차를 예측하기 위해서는 식 (7)과 같은 Sector condition을 만족하고 Circle Criterion에 의한 안정도 조건을 만족한다

본 연구에서는 식 (12)를 이용하여 단순 FLC의 입출력함수를 적용하여 단순 FLC를 포함하는 플랜트의 정상상태오차를 구하는 정형화된 방법을 제안하고 있는데 이를 위해 단순 FLC의 입출력 함수의 평균 기울기는 식 (5)에 의해 식 (13)과 같다.

$$c_0 = \frac{1}{2}(1 + (1 - m)) = \frac{2 - m}{2} \quad (13)$$

식 (14)는 식 (13)의 평균기울기를 이용한 단순 FLC를 포함한 시스템의 정상상태오차 점화식을 나타내고 있다.

$$\varepsilon_{k+1} = \frac{2}{2 + (2 - m)G(0)}(1 - G(0))\left(m|\varepsilon_k|\varepsilon_k - \frac{m}{2}\varepsilon_k\right) \quad (14)$$

식 (14)와 같이 시스템의 오차는 단순 FLC의 후건부 선형식 계수 m_1 과 m_2 의 차인 m 의 함수가 됨을 보여준다. 이는 시스템의 오차는 m 을 이용하여 조정가능 함을 보여주고 있다. 따라서 시스템의 정상상태오차는 단순 FLC의 후건부 선형식의 크기를 나타내는 계수인 m 에 의해 제어가능 함을 보여준다.

식 (14)의 점화식의 극한은 $\lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon_{k+1} \rightarrow \varepsilon$ 으로 식 (15)와 같은 m 을 변수로 하는 정상상태오차 ε 에 대한 방정식이 된다. 식 (15)는 단순 FLC를 포함한 시스템에 대한 정상상태오차를 예측하는 방정식으로 플랜트의 초기값 $G(0)$ 이 주어지면 T-S형 퍼지제어기의 후건부 선형식 계수인 m 에 의해 시스템의 정상상태오차를 조정할 수 있게 된다.

$$G(0)m|\varepsilon|\varepsilon + (1 + G(0) - m)\varepsilon - 1 = 0 \quad (15)$$

비선형성을 가진 단순 FLC가 포함된 시스템의 정상상태오차가 식 (15)와 같은 단순방정식으로 표현되어 단순 FLC를 포함한 시스템의 정상상태오차를 쉽게 예측할 수 있으며 또한 후건분 변수에 대한 계수인 m 에 의해 시스템의 정상상태오차가 변화될 수 있음을 보여주고 있다.

V. 시뮬레이션

단순 FLC의 후건부 퍼지 변수의 크기에 따른 시스템의 안정도에 대한 기여도를 알아보기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며 모든 근이 s 평면의 좌 반면에 위치하는 임의의 안정한 플랜트를 식 (16)와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -60 & -10 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 10]x \end{aligned} \quad (16)$$

식 (17)은 식 (16)에 의한 γ 를 정의하고 있으며 식 (18)은 단순FLC φ 의 평균 기울기를 이용한 시스템의 폐회로 방정식을 나타내고 있다. 식 (18)에서와 같이 폐회로 방정식의 초기값은 단순 FLC의 계수인 m 에 의해 방정식으로 표현됨을 볼 수 있다.

$$\gamma = \frac{1}{1 + c_0G(0)} = \frac{2}{4 - m} \quad (17)$$

$$H(0) = \frac{G(0)}{1 + c_0G(0)} = \frac{2}{4 - m} \quad (18)$$

식 (19)는 식 (16)의 플랜트와 제안된 단순 FLC에 의한 오차반복 함수를 보여주고 있다. 식 (19)에서 같이 오차반복 함수는 단순 FLC의 계수인 m 에 의해 조정되는 점화식으로 표현된다.

$$\varepsilon_{k+1} = \frac{2}{4 - m} - \frac{2}{4 - m}((1 - m)\varepsilon_k + m|\varepsilon_k|\varepsilon_k - \frac{2 - m}{2}\varepsilon_k) \quad (19)$$

식 (20)과 같은 점화식의 극한값에 대한 특성으로 인해 식 (19) 점화식의 극한값은 식 (21)과 같다. 식 (21)은 정상상태오차 ε 와 FLC의 후건부 선형식의 계수인 m 의 방정식이 됨을 알 수 있다. 따라서 m 에 의해 정상상태오차 ε 를 예측할 수 있다.

$$\text{if } \lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon_{k+1} = \varepsilon, \text{ then } \lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon_k = \varepsilon \quad (20)$$

$$(4 - m)\varepsilon = 2 - 2((1 - m)\varepsilon + m|\varepsilon|\varepsilon - \frac{2 - m}{2}\varepsilon) \quad (21)$$

식 (21)을 정리하면 식 (15)에서와 같이 $G(0)=1$ 에 대해 식 (22)와 같이 표현되며 ε 는 절대값으로 표현됨으로 m 에 대한 ε 를 예측하기 위해 근의 방정식을 이용하여 식 (23)과 같이 ε 의 범위에 따른 해를 구하였다.

$$m|\varepsilon|\varepsilon + (2 - m)\varepsilon - 1 = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{-2 + m \pm \sqrt{m^2 + 4}}{2m}, \varepsilon \geq 0 \\ \varepsilon &= \frac{-2 + m \pm \sqrt{m^2 - 8m + 4}}{2m}, \varepsilon < 0 \end{aligned} \quad (23)$$

ε 이 0보다 크면 식 (24)와 같이 m 의 모든 값에 대해 식이 성립하고 ε 이 0보다 작을 경우 특정 범위의 m 에 대해서만 식이 성립함을 보여주고 있다. 정상상태오차 ε 는 실수값으로 식 (23)의 근호부분이 실수값이어야 한다. 따라서 식 (24)와 식 (25)와 같이 ε 의 범위에 따른 m 의 조건이 주어지게 된다.

본 연구에서는 m_1 과 m_2 의 범위는 $[-1 \ 1]$ 이 됨으로 m_1 과 m_2 의 차인 m 의 범위는 $[-2 \ 0]$ 이 된다. 따라서 ε 이 0보다 클 경우에는 식 (24)와 같이 위에서 제시된 m 의 범위에 존재하지만 ε 이 0보다 작을 경우에는 식 (25)와 같이 m 의 범위에서 벗어남으로 식 (16) 플랜트에 대한 정상상태오차는 식 (24)와 같이 표현된다.

$$(m^2 + 4) > 0, \varepsilon \geq 0 \quad (24)$$

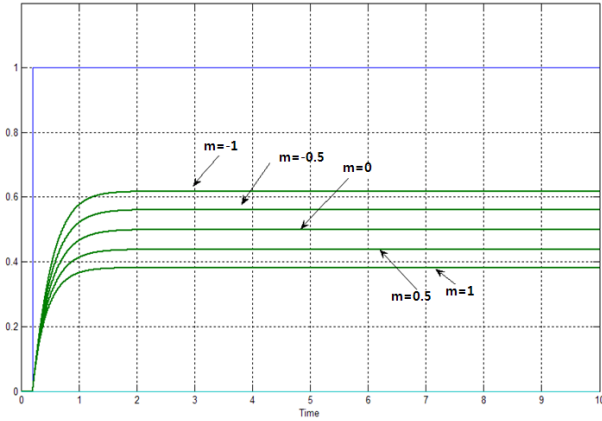


그림 3. m의 변화에 따른 시스템 응답.
Fig. 3. System response on varying m.

$$\begin{aligned} (m - 4)^2 - 12 > 0, \varepsilon < 0 \\ m > 4 + 2\sqrt{3}, m < 4 - 2\sqrt{3}, \varepsilon < 0 \end{aligned} \quad (25)$$

식 (23)에서와 같이 정상상태오차는 m에 의해 조정 가능하게 된다. 식 (16)에 의한 시스템의 정상상태오차에 대한 검증 을 위해 식 (23)을 이용하여 m의 변화에 대한 시스템의 정상 상태오차를 예측해 보면 m = 0일 경우 $\varepsilon = 0.5$, m = -1이 면 $\varepsilon = 0.3820$ 으로 정상상태에서 시스템은 0.6180에 수렴하 게 되며 m = -0.5일 경우 $\varepsilon = 0.4384$ 로 0.5616에 수렴하게 됨을 예측할 수 있다.

식 (23)에서 정상상태오차가 0이 되도록 하는 m은 존재하 지 않음을 알 수 있다. 따라서 단순형 FLC를 통한 식 (16)의 플랜트의 제어는 정상상태오차가 존재하는 제어만이 가능함 을 알 수 있다. 그림 3은 위에서 제시된 m에 대한 시스템 응 답의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며 위에서 예측된 값 과 동일함을 알 수 있다.

제어기의 입출력에 대해 함수 $\varphi(\cdot)$ 로 표현하면 플랜트 $G(s)$ 를 포함한 전체시스템의 전달 함수 $G_T = \varphi \cdot G(s)$ 로 정 의되며 정상상태오차 제거를 위한 이득을 구하기 위해 최종 값정리 $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot Y(s) = S.P.(\text{Set Point})$ 에 의해 이득 C_g 는 식 (26)과 같이 구할 수 있다[12].

$$C_g = \frac{S.P.}{G_T(0)} \quad (26)$$

위의 경우 선형시스템에 대해 적용가능 함으로 본 연구에 서 사용한 FLC의 비선형 특성으로 인해 식 (26)을 직접적으 로 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법을 통해 정상상태오차를 예측하고 이를 식 (26)에 적용하여 시스템의 정상상태오차를 제거하기 위한 이득 C_g 를 구할 수 있다.

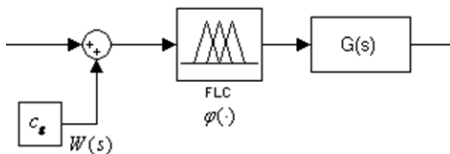


그림 4. 이득을 포함한 FLC.
Fig. 4. FLC including gain.

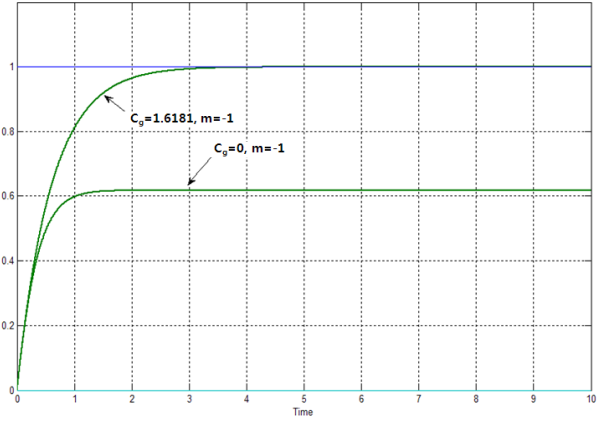


그림 5. 이득 C_g 에 따른 시스템 응답.
Fig. 5. The system response on gain C_g .

그림 4는 이득 C_g 를 포함한 시스템 구성을 나타내고 있다. C_g 는 정상상태오차를 제거하기 위한 목적으로 사용되기 때 문에 정상상태에 도달하기 전까지는 시스템의 상태변화에 둔감하고 시스템의 응답이 왜곡시킬 수 있다.

그림 5는 특정 m에 대해 이득 C_g 의 변화에 따른 시스템 응답을 보여주고 있다. 본 연구에서 제안된 방법에 의해서 m = -1이면 $\varepsilon = 0.3820$ 의 정상상태가 예상되며 이를 제거 하기 위해 식 (26)을 이용하면 C_g 는 1.6181이 되어야 정상상 태오차가 제거될 수 있음을 예측할 수 있으며 이에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같다.

VI. 결론

본 연구에서는 FLC에 대해 제어시스템의 중요한 응답특성 중 하나인 정상상태오차를 예측하고 이를 제거하기 위해 시 스템에 이득을 포함시켜 정상상태가 오차가 제거된 FLC를 포함한 시스템 설계방법을 제시하였다.

제안된 FLC는 제어기의 수학적 해석을 용이하게 하기 위 해 SISO Takagi-Sugeno형 FLC를 제안하였다. 제안된 방법으 로 표현된 FLC의 입출력 방정식은 후건부 변수 m의 변화에 의해 다양한 비선형 응답을 보이는데 이러한 응답적 특성은 시스템의 정상상태오차에 영향을 미치게 되는데 이를 이용 하여 정상상태오차를 후건부 변수 m에 대한 방정식으로 나 타내고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

예측된 정상상태오차 제거를 위해 정상상태오차에 대한 시스템의 이득을 구하여 이를 시스템에 포함시켜 정상상태 오차를 제거할 수 있음을 보였다.

정상상태오차는 시스템의 안정도 해석에 중요한 특성 중 하나이다. 본 연구에서 제안된 FLC를 포함한 시스템의 정상 상태오차 예측은 정형화된 비선형 요소를 포함한 시스템의 정상상태오차 예측에도 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] C. W. de Silva, "Intelligent Control, Fuzzy Logic Applications," Boca Ration. FL: CRC, 1995.
- [2] D. Driankov, Hellendoorn, and M. Reinfrank, An Introduction to Fuzzy Control, 2nd Ed., New York:Springer-Verlag, 1996.
- [3] B. Hu, G. K. I. Mann, and R. G. Gosine, "A systematic study of

fuzzy PID controllers-function-based evaluation approach," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 699-712, 2001.

[4] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.

[5] T. Taniguchi, K. Tanaka, H. Ohtake, and H. O. Wang, "Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 9, no. 4, pp. 525-538, 2001.

[6] B. Hu, G. K. I. Mann, and R. G. Gosine, "New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers," *IEEE Trans. on Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 5, pp. 521-539, 1999.

[7] Š. Tomislav, S. Tešnjak, and S. Kuljača Og-njen, "Stability analysis of fuzzy control system using describing function method," *Proceedings of 9th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Dubrovnik, Croatia, 2001.

[8] K.-W. Lee and H. S. Choi, "Analysis of FLC with changing fuzzy variables in frequency domain," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 695-701, 2010.

[9] H. S. Choi and K.-W. Lee, "Consideration to the stability of FLC using the circle criterion," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 5, pp. 525-529, 2009.

[10] I. W. Sandberg and K. K. Johnson. "Steady state errors in nonlinear control systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*,

vol. 37, no. 12, pp. 1985-1989, Dec. 1992.

[11] C.-T. Chao and C.-C. Teng, "A PD-like self-tuning fuzzy controller without steady-state error," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 87, pp. 141-154, 1997.

[12] K.-W. Lee and H. S. Choi, "Design of simple FLC with considering steady state error," *Proc. of 2011 26th ICROS Annual Conference (in Korean)*, vol. 11, no. 1, pp. 116-118, 2011.



이 경 응

1998년 조선대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 동 대학원 제어계측공학과 석사. 2010년 동 대학원 제어계측공학과 박사. 2000년~현재 대림 I&S 근무. 관심 분야는 인공지능, 자동제어, 네트워크시스템.



최 한 수

1980년 조선대학교 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 석사. 1994년 전북대학교 전기공학과 박사. 1984년~현재 조선대학교 교수. 관심분야는 퍼지이론, 뉴럴네트워크, 인공지능.