

## 퍼지 제어기의 Scaling Factor의 영향 분석

이 철 희 · 서 선 학\*

### Analysis of the Effects of Scaling Factors of Fuzzy Controller

Chul-Heui Lee · Seon-Hak Seo\*

#### ABSTRACT

In this paper, we analyze the effects of scaling factors on the performance of a fuzzy controller. The quantitative relation between input and output variables of a fuzzy controller is obtained by using a quasi-linear fuzzy model. And an approximate transfer function of a fuzzy controller is derived from the comparison of a fuzzy controller with the conventional PID controller. Then we analyze the effects of scaling factor using this approximate transfer function and root locus method.

#### 1. 서 론

퍼지제어는 언어적 제어규칙과 근사추론을 이용하여 제어 동작을 결정하기 때문에 제어 대상의 수학적 모델링이 필요 없고 전문가의 경험과 직관 등에 의한 규칙을 언어변수로 표현하고 구현할 수 있다는 장점을 지닌다. 따라서 입출력관계의 정량적인 분석이 어려운 시스템의 제어 문제에서 기존 제어기의 부적합한 점을 보완·대체 가능하여 최근에 널리 연구, 응용되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

퍼지제어에서는 결과적으로 비선형 궤환의 형태로 제어가 이루어지는데 퍼지제어의 제어성능은 언어적 제어규칙, 소속함

수, scaling factor 등의 파라미터와 추론 및 비퍼지화 기법에 종속적으로 결정된다. 그런데 퍼지제어기의 구성에 있어서 이러한 제어기 파라미터의 동조를 위한 체계적인 방법론이 없다는 것이 난점이다. 대부분의 경우 제어 응답을 이용하여 시행착오적으로 동조하는 방법을 주로 사용해 왔으며, 실제로 퍼지 제어기의 동조가 기존의 제어기를 동조하는 것 이상으로 어렵다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 따라서 이 문제를 해결하기 위한 시도가 활발히 이루어져 왔지만 최적 파라미터 값은 파라미터 상호간의 연관성뿐만 아니라 대상시스템과 제어 목적에 종속적이므로 보편적인 퍼지제어기에 대한 최적값을 얻을 수 있는 일반화된 방법을 구한다는 것은 사실상 불가능하다.<sup>[3-6]</sup>

본 논문에서는 퍼지 제어기의 파라미터

강원대학교 전기공학과 조교수

\* 강원대학교 전기공학과 대학원 석사 과정

들중 전체시스템의 특성 및 제어 성능에 큰 영향을 끼치는 scaling factor의 영향을 정량적으로 분석해보고자 한다.

scaling factor는 퍼지제어기의 crisp한 정량적인 입·출력인 시스템의 출력오차(e), 출력오차의 변화량( $\Delta e$ ), 출력오차의 변화량의 변화량( $\Delta^2 e$ ) 그리고 제어입력신호의 변화량( $\Delta u$ )등과 퍼지제어기의 퍼지변수의 전체구간(universe of discourse)간에 척도에 대한 환산 연산자로 작용하여 서로를 사상시켜주는 요소이다. 잘못된 scaling factor를 사용했을 경우는 동작영역이 규준화(normalization)된 전체 구간의 경계부로 쏠려서 제어시스템의 출력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이들의 적절한 선정은 매우 중요하며, 신중을 기해야 한다.<sup>[3,6]</sup>

본 논문에서는 준선형 퍼지모델을 이용하여 퍼지제어기의 입·출력 변수간의 관계를 정량적으로 도출하여 퍼지제어기의 근사적 전달함수를 구한뒤 이로부터 근계적 기법 등을 이용하여 scaling factor의 영향을 분석하였다.

## 2. Scaling factor의 영향 분석

### 2.1 퍼지 제어 시스템과 scaling factor

퍼지 제어기의 기본적인 구조는 그림1과 같다.

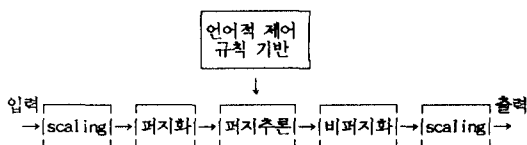


Fig. 1. Typical Structure of Fuzzy Controller

대부분의 경우 퍼지 제어기는 crisp한 정량적인 입력이 인가되므로 언어적 제어 규칙기반과 퍼지추론에 의해 제어 동작이 결

정되기 위해서는 입력의 퍼지화가 요구된다. 이때 각각의 정량적인 입력값에는 이미 정의된 소속함수에 따라 각 퍼지부집합에 대한 귀속도를 할당하게 된다. 그런데 일반적으로 소속함수는 입력 변수들의 실제값에 상응하는 구간에 대해 정의되는 것이 아니라 편의상 규준화된 전체 구간에 대해 정의되므로 퍼지화 단계 이전에 소속함수가 정의된 전체구간에 맞도록 입력값을 규준화해 주어야 한다. 그림1에서 입력단의 scaling factor들이 그 역할을 수행하게 된다.

한편, 퍼지제어기의 출력에 있어서도 제어 대상에 인가될 수 있도록 퍼지출력을 crisp한 정량적인 값으로 변환하는 비퍼지화 과정을 거치게 되지만, 퍼지 출력변수와 연관된 퍼지부집합들이 규준화된 구간 내에서 정의되어 있으므로 비퍼지화된 결과도 또한 규준화된 전체구간내의 값이 된다. 따라서 실제 제어 대상에 인가되는 크기 범위로 역규준화(denormalization)를 시켜야 한다. 그림 1의 출력단의 scaling factor들이 그 역할을 수행하게 된다.

잘못된 scaling factor를 사용했을 경우 퍼지 제어기의 동작영역이 규준화된 전체구간의 경계부로 쏠려버려서 제어 시스템의 출력에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 scaling factor의 적절한 선정이 중요하나, 이는 단지 데이터의 특성에만 관련되는 것이 아니라 소속함수의 형태, 위치, 플랜트의 동특성 등에도 관련되기 때문에 선정이 쉽지 않으므로 신중을 기해야 한다.<sup>[3,6]</sup>

### 2.2 Scaling Factor의 영향의 정성적 분석

Scaling factor의 영향을 간략히 정성적으로 분석해 보기 위해 퍼지 PID제어 시스템을 생각하자.

퍼지 PID제어기의 언어적 제어 규칙기반은 일반적으로 다음과 같은 형태를 갖는 규칙들로 구성된다.

$$R_i : \text{IF } e^* \text{ is A and } \Delta e^* \text{ is B and } \Delta^2 e^* \text{ is C,} \\ \text{THEN } \Delta u^* \text{ is D} \quad (1)$$

입력변수  $e$ ,  $\Delta e$ ,  $\Delta^2 e$  와 출력변수  $\Delta u$ 의 scaling factor를 각각  $k_c (= 1/S_e)$ ,  $k_d (= 1/S_d)$ ,  $k_s (= 1/S_s)$ ,  $k_u (= S_u)$ 라고 하면 입출력 퍼지변수와 crisp 변수의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$e^* = k_c e, -S_e \leq e \leq S_e \quad (2.a)$$

$$\Delta e^* = k_d \Delta e, -S_d \leq \Delta e \leq S_d \quad (2.b)$$

$$\Delta^2 e^* = k_s \Delta^2 e, -S_s \leq \Delta^2 e \leq S_s \quad (2.c)$$

$$\Delta u^* = \Delta u / k_u, -S_u \leq \Delta u \leq S_u \quad (2.d)$$

(2)에서 알 수 있듯이 scaling factor 중의 어느 하나를 변화시키게 되면, 그에 상응하는 변수의 값이 비례적으로 변화하게 되므로 그림 2에서 볼 수 있듯이 곧 같은 비율로 그 scaling factor에 상응하는 퍼지 변수의 소속함수를 이동한 것과 같게 된다.

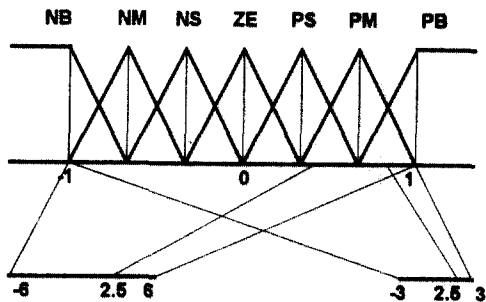


Fig. 2. Change of corresponding fuzzy subsets of fuzzy variable according to the value of scaling factor.

이는 곧 규칙기반에 속하는 모든 규칙들의 전건부 또는 후건부의 의미를 바꾸는 것과 동일한 결과를 가져온다. 예를 들어

그림 2에서 보면 crisp값 2.5가 scaling factor의 값이 3일 경우에는 "PM, PB"에 귀속되나 scaling factor의 값이 6일 경우에는 "PS, PM"에 속하게 된다. 따라서 scaling factor를 바꾸게 되면 규칙기반 내의 모든 규칙이 바뀌는 것과 마찬가지로 이의 모든 언어적 제어규칙으로 표현된 시스템의 동특성이 달라졌다는 것을 의미하므로 당초의 기대와는 다른 제어 결과를 낳게 된다.

**부연 :** 비선형 scaling factor를 사용할 경우 관계식이 (2)식과 다르게 표현될 뿐 근본적인 결과는 선형 scaling factor의 경우와 동일하다.

### 2.3 Scaling Factor의 영향의 정량적 분석

(1)의 언어적 제어 규칙은 퍼지 제어기의 입출력변수  $e$ ,  $\Delta e$ ,  $\Delta^2 e$ ,  $\Delta u$ 사이의 정량적인 관계에 대한 정보를 전혀 주지 못하므로 scaling factor의 영향을 정량적으로 분석하기가 대단히 어렵다. 따라서 퍼지 제어기의 입·출력 변수간의 관계를 정량적으로 근사화하기 위하여 준선형 (Quasi-Linear) 퍼지 모델기법<sup>[7]</sup>을 이용하여 다음과 같이 후건부가 선형 방정식으로 바뀐 경우를 고려하기로 한다.

$$R_i : \text{IF } e^* \text{ is A and } \Delta e^* \text{ is B and } \Delta^2 e^* \text{ is C} \\ \text{THEN } \Delta u_i^* = \alpha_i e^* + \beta_i \Delta e^* + \gamma_i \Delta^2 e^* \quad (3)$$

그러면 전체 규칙에 의한 퍼지 제어기 출력은

$$\Delta u^*(n) \\ = \sum_{i=1}^m v_i \Delta u_i^*(n)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{i=1}^m v_i (\alpha_i e^*(n) + \beta_i \Delta e^*(n) + \gamma_i \Delta^2 e^*(n)) \\
&= \overline{K_I} e^*(n) + \overline{K_P} \Delta e^*(n) + \overline{K_D} \Delta^2 e^*(n)
\end{aligned} \tag{4}$$

여기서  $v_i$ 는 비퍼지화 기법에 의한 하중치로서 직접 퍼지추론법(Direct Fuzzy Reasoning)<sup>[2]</sup>을 사용할 경우 다음과 같이 주어지며

$$v_i = \frac{\tau_i}{\sum_{i=1}^m \tau_i} \tag{5}$$

이때  $\tau_i$ 는  $i$ 번째 제어규칙의 점화수준(firing level)으로서 다음과 같이 계산된다.  
 $\tau_i = \mu A(e) \wedge \mu B(\Delta e) \wedge \mu C(\Delta^2 e)$  (6)

따라서 (2)와 (4)로부터 다음과 같이 퍼지 제어기의 crisp 입출력 변수와 scaling factor의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\Delta u(n) \\
&= k_u \Delta u^*(n) \\
&= \overline{K_I} k_u k_c e(n) + \overline{K_P} k_u k_d \Delta e(n) \\
&\quad + \overline{K_D} k_u k_s \Delta^2 e(n)
\end{aligned} \tag{7}$$

그런데 기존의 PID제어기의 경우 연속계 위치형 알고리즘은 다음과 같이 주어지며 이의 전달함수는 다음과 같다.

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} + K_I \int e(t) dt \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
G_{PID}(s) &= K_P + K_D s + \frac{K_I}{s} \\
&= \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}
\end{aligned} \tag{9}$$

(8)의 연속계 위치형 PID제어기로부터 샘플링 시간  $T$ 가 충분히 작다는 가정 하에 이산계 속도형 PID 제어기로 변환하면

$$\begin{aligned}
\Delta u(n) &= K_I T e(n) + K_P \Delta e(n) \\
&\quad + (K_D/T) \Delta^2 e(n)
\end{aligned} \tag{10}$$

(7)과(10)을 비교하면, 다음과 같이  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ 를 정하면 기존의 PID제어기와 준선형 퍼지 PID제어기는 등가가 된다.

$$K_P = \overline{K_P} k_u k_d \tag{11.a}$$

$$K_I = \overline{K_I} k_u k_c / T \tag{11.b}$$

$$K_D = \overline{K_D} k_u k_s T \tag{11.c}$$

**부연** : 그러나 실제로는 준선형 퍼지 PID제어기에서는 (4)와 (5)에서 볼 수 있듯이 매 스텝마다  $v_i$ 의 값, 즉  $\overline{K_P}$ ,  $\overline{K_I}$ ,  $\overline{K_D}$ 의 값이 달라지므로 전 시간 구간에서 고정된 이득요소를 갖는 기존의 PID제어기와는 차이가 있다.

(9)와 (11)로부터 준선형 퍼지 PID제어기의 전달함수는

$$\begin{aligned}
G_{FC}(s) &= \frac{(\overline{K_D} k_u k_s T) s^2 + (\overline{K_P} k_u k_d) s}{s} \\
&\quad + \frac{(\overline{K_I} k_u k_c / T)}{s} = \frac{N_{FC}(s)}{s}
\end{aligned} \tag{12}$$

따라서 전체 시스템의 전달함수는 프로세서의 전달함수를  $G_p(s) = N_p(s)/D_p(s)$ 라고 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
M(s) &= \frac{G_p(s) G_{FC}(s)}{1 + G_p(s) G_{FC}(s)} \\
&= \frac{N_p(s) N_{FC}(s)}{s D_p(s) + N_p(s) N_{FC}(s)}
\end{aligned} \tag{13}$$

따라서 (13)에서 볼 수 있듯이 scaling factor  $k_c$ ,  $k_d$ ,  $k_s$ ,  $k_u$ 값의 변화는 시스템의 극과 영점의 위치를 변화시킨다. 제어 이론에서 잘 알려진 바와 같이 시스템의 극의 실수부가 크면 감쇠비가 커지므로 감쇠가 빠르고 오버슈트가 작아지며, 극의 허수부가 크면 진동 주파수가 높아지고 상승시간이 짧아지게 된다<sup>[8,9]</sup>. 이 때문에 scaling factor를 변화시키면 전체 시스템

의 동특성이 변화하게 되어 시스템의 동작과 출력에 큰 영향을 주게 된다.

각각의 scaling factor들의 영향은 페루프 시스템의 우세극의 관계로부터 좀더 상세하게 분석할 수 있다. (9)와 같은 기존의 PID제어기의 파라미터와 페루프 시스템의 우세극  $P_1, P_2$ 의 관계는 다음과 같이 주어진다<sup>[8]</sup>.

$$P_1 = -\zeta \omega_0 + j\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} = -\sigma + j\omega \quad (14.a)$$

$$P_2 = -\zeta \omega_0 - j\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} = -\sigma - j\omega \quad (14.b)$$

$$K_P(\omega_0, \zeta) = X(\omega_0, \zeta) + 2\zeta \omega_0 K_D(\omega_0, \zeta) \quad (15.a)$$

$$K_I(\omega_0, \zeta) = Q(\omega_0, \zeta) + \omega_0^2 K_D(\omega_0, \zeta) \quad (15.b)$$

$$K_D(\omega_0, \zeta) = \frac{1 + [X(\omega_0, \zeta) - Q(\omega_0, \zeta) / \omega_0] G_P(-\omega_0)}{2\omega_0(1-\zeta)G_P(-\omega_0)} \quad (15.c)$$

$$X(\omega_0, \zeta) = \frac{\sqrt{1-\zeta^2} \operatorname{Re} G_P(P_1) + \zeta \operatorname{Im} G_P(P_1)}{\sqrt{1-\zeta^2} [\operatorname{Re} G_P(P_1)^2 + \zeta \operatorname{Im} G_P(P_1)^2]} \quad (16.a)$$

$$Q(\omega_0, \zeta) = \frac{\omega_0 \operatorname{Im} G_P(P_1)}{\sqrt{1-\zeta^2} [\operatorname{Re} G_P(P_1)^2 + \operatorname{Im} G_P(P_1)^2]} \quad (16.b)$$

따라서 이로부터 시스템의 과도응답과 PID 파라미터의 연관성의 전반적인 경향은 표1과 같이 찾을 수 있다.

(11)의 관계를 이용하면 (14), (15)로부터 scaling factor들과 우세극의 관계를 찾을 수 있으므로 시스템 과도응답에 대한 scaling factor의 영향을 해석할 수 있다. 그런데 이는 매우 복잡하므로 우세극과의 관계는 (15)를 이용하기 보다는 (12)와 (13)으로부터 근궤적 기법<sup>[9]</sup> 등을 이용하여 좀더 간편하게 분석할 수 있다.

Table 1. Relation of PID parameters and transient response of system

과도응답특성	KP	KI	KD
overshoot/oscillation 감소	↓	↓	↓
응답속도 (상승시간) 감소	↑	↓	↑
정상상태 오차 감소	↓	↑	

준선형 퍼지 PID제어기는 시스템의 개루프 전달함수에 원점에 위치한 극과  $G_{FC}(s)$ 의 분자에 의한 두개의 영점을 추가하는 효과를 가져다 준다. 근궤적의 일반적인 성질에서 개루프 전달함수에 극을 첨가하면 근궤적을 s-평면의 우반면 쪽으로, 영점을 첨가하면 좌반면 쪽으로 휘게 하는 효과를 가지므로<sup>[9]</sup> 각 scaling factor들의 값에 따라 극과 영점의 위치가 변화하면서 근궤적의 형태가 달라진다.

## 2.4 근궤적에 의한 scaling factor의 영향 분석

근궤적에 의해 scaling factor의 영향을 분석하기 위하여 한 예로서 다음과 같은 전달함수를 갖는 플랜트를 생각하자.

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)} \quad (17)$$

퍼지 PID제어, 퍼지 PD제어, 퍼지 PID제어의 3경우에 대해 각각 근궤적 기법을 적용한 결과는 다음과 같다.

### A. 퍼지 PI 제어의 경우

$$G_{FC}(s) = \frac{\overline{K_P} k_d (s + \overline{K_I} k_c / \overline{K_P} k_d)}{s} \quad (18)$$

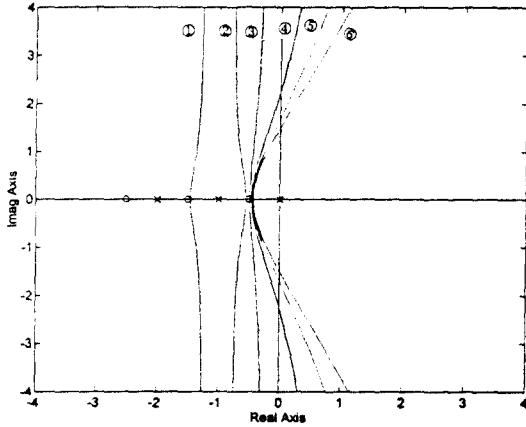
$$\text{제어기 극 : } p_1 = 0$$

$$\text{제어기 영점 : } z_1 = -\overline{K_I} k_c / \overline{K_P} T k_d$$

이경우의 근궤적이 그림 3에 주어져 있다.

그림 3과 (18)로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- $k_u$ 가 커지면 이득이 증가한다
- $k_d$ 가 커지면 이득은 증가한다. 또한 영점 크기가 감소하므로 근궤적이 ⑥에서 ①로 이동한다
- $k_s$ 가 커지면 영점 크기가 커지므로 근궤적이 ①에서 ⑥으로 이동한다



개루프 극 : 0, -1, -2  
개루프 영점 : ① -0.5 ② -1.5 ③ -2.5 ④ -5 ⑤ -10 ⑥ -30

Fig.3. Root Locus of Fuzzy PI Control System

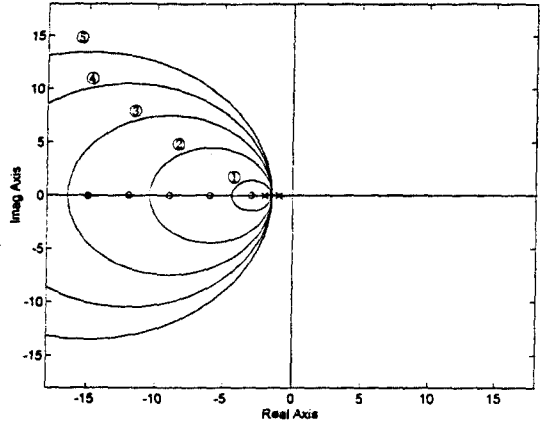
B. 퍼지 PD 제어의 경우

$$G_{FC}(s) = \bar{K}_D T k_u k_s (s + \bar{K}_P k_d / \bar{K}_D T k_s) \quad (19)$$

$$\text{제어기 영점} : z_1 = -\frac{\bar{K}_P k_d}{\bar{K}_D T k_s}$$

이 경우의 근궤적은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4와 (19)로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다

- $k_u$ 가 커지면 이득이 증가한다
- $k_d$ 가 커지면 영점 크기가 커지므로 근궤적이 ①에서 ⑥으로 이동한다
- $k_s$ 가 커지면 이득은 증가한다. 또한 영점 크기가 감소하므로 근궤적이 ⑥에서 ①로 이동한다



개루프 극 : -1, -2  
개루프 영점 : ① -3 ② -6 ③ -9 ④ -12 ⑤ -15

Fig.4. Root Locus of Fuzzy PD Control System

C. 퍼지 PID 제어의 경우

$$\begin{aligned} G_{FC}(s) &= \frac{(\bar{K}_D k_u k_s T)s^2 + (\bar{K}_P k_u k_d)s + (\bar{K}_I k_u k_c / T)}{s} \\ &= \frac{N_{FC}(s)}{s} \quad (20) \end{aligned}$$

제어기 극 :  $p_1=0$

제어기 영점 :  $z_1, z_2$

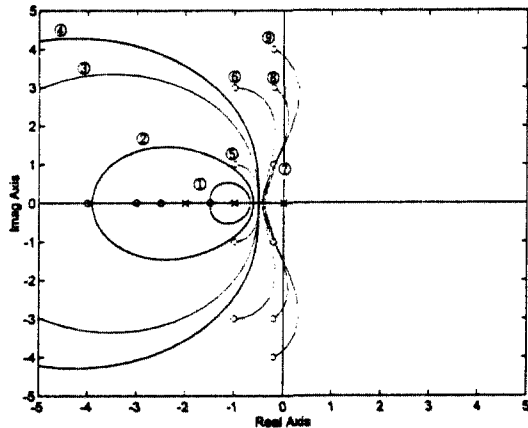
$$= \frac{-\bar{K}_P k_d \pm \sqrt{(\bar{K}_P k_d)^2 - 4 \bar{K}_D \bar{K}_I k_c k_s}}{2 \bar{K}_D T k_s}$$

이 경우의 근궤적이 그림 5에 주어져 있다. 그림 5와 (20)으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- $k_u$ 가 커지면 이득이 증가한다
- $k_d$ 가 커지면 영점이 실근으로 크기가 증가한다. 따라서 근궤적이 ①에서 ④로 이동한다.
- $k_c$ 가 커지면 영점이 실근에서 복소근으로 변해가며, 실근일 경우 크기가 감소하여 ④에서 ①로 근궤적이 이동한다

고 복소근일 경우 허수부의 크기만 증가하므로 ⑤→⑥으로, 또는 ⑦에서 ⑨로 이동한다.

$k_s$ 가 커지면 영점이 실근에서 복소근으로 변해가며, 실근일 경우 크기가 감소하여 근궤적이 ④에서 ①로 이동한다. 복소근일 경우 실수부 및 허수부의 크기가 감소하므로 ⑥→⑤ 또는 ⑧→⑦, ⑨로 이동한다



계루도 극 : 0, -1, -2  
 계루도 영점 : ① -1.5, -1.5 ② -1.5, -2.5 ③ -3, -3 ④ -3, -4  
 ⑤ -1±j1 ⑥ -1±j3 ⑦ -0.2±j1 ⑧ -0.2±j3 ⑨ -0.2±j4

Fig.5. Root Locus of Fuzzy PID Control System

플랜트 전달함수가 (17)과 다른 경우에도 비슷한 경향을 보이며, 이러한 관측으로부터 우세극의 위치와 scaling factor들의 관계를 알게 되며, 이로부터 시스템 과도응답과 scaling factor의 관계를 유추할 수 있다.

이상과 같은 분석에 의거해 얻어진 시스템과 과도응답과 scaling factor의 관계는 표 2와 같다.

**부연 :** (3)의 준선형 퍼지 PID제어기와 (1)의 보다 일반적인 퍼지 PID제어기는

(3)의  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 를 적절히 선정하면 제어평면상에서 매우 유사한 동작 특성을 지니므로<sup>[2]</sup> 준선형 퍼지 PID제어기를 이용해서 얻은 scaling factor의 영향에 대한 결과는 준선형 퍼지 PID제어기에만 국한되는 것이 아닌 일반적인 성향으로 간주할 수 있다.

Table 2. Relation of scaling factors and transient response of system

	$k_e$	$k_d$	$k_s$	$k_u$
overshoot/oscillation 감소	↓	↓	↓	
응답속도 (상승시간) 감소	↓	↑	↑	
정상상태 오차 감소	↑	↓		
시스템 이득 증가				↑

### 3. 결 론

scaling factor는 퍼지제어기의 crisp한 정량적인 입·출력과 퍼지제어기의 퍼지변수의 전체구간 간에 척도에 대한 환산 연산자로 작용하여 서로를 사상시켜주는 요소로서, 잘못된 scaling factor를 사용했을 경우 제어시스템의 출력에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이들의 적절한 선정은 매우 중요하며, 신중을 기해야 한다.

본 논문에서는 준선형 퍼지모델을 이용하여 퍼지제어기의 입·출력 변수간의 관계를 정량적으로 도출하여 퍼지제어기의 근사적 전달함수를 구한뒤 근궤적 기법을 이용하여 이로부터 scaling factor의 영향을 분석하였다. 이러한 분석결과는 앞으로 효과적인 scaling factor의 동조기법을 개발하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

## 후 기

본 연구는 기초전력공학 공동 연구소의 '95 전력기술 기초연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] C.C.Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller, part I and II," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol.20, no.2, pp. 404-435
- [2] R.R.Yager, D.P.Filev, *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994
- [3] L.Zheng, "A Practical Guide to Tune of Proportional and Integral(PI) like Fuzzy Controller," IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Fuzz-IEEE'92-Proceedings, San Diego, pp.633-640, March 1992
- [4] M.Maeda, S. Murakami, "A self-tuning fuzzy controller," Fuzzy Sets and Systems, vol. 51, pp.29-40, 1992
- [5] Z.Zhao, M.Tomizuka, S.Sagara, "A Fuzzy Tuner for Fuzzy Logic Controllers," Proceedings of American Control Conference, pp.2268-2273, 1992
- [6] R.Palm, "Tuning of Scaling Factors in Fuzzy Controllers using Correlation Functions," IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Fuzz-IEEE'93-Proceedings, pp.691-696, March 1993
- [7] M.Sugeno, T.Tagaki, "A new approach to design of fuzzy controller," In *Advances in Fuzzy Sets, Possibility Theory and Applications*, Plenum Press, New York, pp.325-334, 1983
- [8] K.J. Aström and T.Hägglund, *Automatic Tuning of PID Controller*, Instrument Society of America, 1988
- [9] B.C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 7th ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994