

## 퍼지 PID제어기를 이용한 비선형 유압시스템의 제어

김 인 환\*

### Nonlinear Hydraulic System Control using Fuzzy PID Controller

I. H. Kim

**Key words** : Hydraulic(유압), Fuzzy PID(퍼지 PID), Uncertainty(불확실성), Nonlinearity(비선형성), Fuzzy Logic Controller(퍼지논리제어기)

#### Abstract

In order to control systems which contain nonlinearities, control strategies must deal with the effects of them. Since most of control methods based on system mathematical models have been mainly developed focused on stability robustness against nonlinearities or uncertainties under the assumption that controlled systems are linear time invariant, they have certain amount of limitations to smartly improve control performances of systems disturbed by nonlinearities or uncertainties.

In this paper, the fuzzy PID control law is suggested which can improve control performances of the nonlinear heavy load hydraulic systems disturbed by nonlinearities and uncertainties. Although the derivation process is based on the design process similar to general fuzzy logic controller, resultant control law has analytical forms with time varying PID gains rather than linguistic forms, so that implementation using common-used versatile microprocessors can be achieved easily and effectively in real-time control aspect.

#### 1. 서 론

60년대 비교적 성공적으로 응용되었던 최적제어이론 및 상태변수공간 방정식을 이용한 관측자 기반 현대제어 방법등이 70년대에 들어와 복잡한 공정제어에 시도되었으나 파라미터 변화나 불확실성에 강인하지 못한 점 등의 많은 문제들을 노출

하였다.

수학적 모델을 기초로 한 제어기법의 한계를 극복하는 다른 한 수단으로 80년대부터 강인제어이론<sup>1,2)</sup>이 등장하여 활발한 연구결과가 발표되고 있으며, 또 다른 한편으로는 1970년 초부터 거론되기 시작한 학습제어 또는 지능제어라는 새로운 제어개념이 제안되어 그 응용성이 시험되고 있는

\* 진주산업대학교 기계설계공학과(원고접수일 : 99년 6월)

중이다. 특히 최근에는 퍼지제어와 신경망제어기법들이 여러 지능제어기법 중 활용도 면에서 선두주자로서 많은 관심을 모으고 있다. 퍼지제어의 발전은 퍼지집합이론을 제안한 Zadeh<sup>3)</sup>가 이 이론을 시스템 자동제어에 응용할 수 있다는 논문을 발표한 후, Mamdani<sup>4)</sup>가 스티밍엔진 제어에 처음으로 응용하여 실용가능성을 발표함으로써 퍼지제어이론은 가장 활발하고 중요한 제어 이론으로 부상하고 있으며 산업체에서 급격히 적용되고 있다.<sup>5,6)</sup>

퍼지논리제어기(FLC : Fuzzy Logic Controller)는 퍼지논리에 근거하고 있다. 퍼지논리는 재래의 논리시스템보다 인간의 사고 및 자연언어를 더욱 근접하게 표현한다. 이러한 관점에서 보면 FLC의 주요 핵심부분은 퍼지함의와 추론의 합성법칙에 의해 관계되는 언어적 제어집합이다. FLC는 전문가의 지식에 근거한 언어적 제어전략을 자동제어전략으로 바꾸는 제어 알고리즘으로 기존의 제어방식으로 해석하기 매우 복잡한 경우나 이용가능한 정보가 불확실한 경우에 매우 유용하다.

하지만 조직적인 설계방법이 거의 없는 실정<sup>7)</sup>이고, 재래식 제어이론을 근거로 하여 안정도를 보장하도록 FLC를 설계하는 방향으로 연구되고 있다.<sup>8~11)</sup>

본 논문에서는 대형부하를 갖는 유압서보시스템에 대하여 비선형성을 조사하고, 비선형성과 불확실성을 포함한 고각비선형 유압시스템에 대하여 퍼지PID 제어치를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 제어기의 성능을 비교, 분석하고자 한다. 여기에서 유도된 제어치는 일반적인 FLC의 설계과

정에 근거하여 유도되는 언어적 표현과 다른 시변계인을 갖는 해석적 형태로 표현되므로 하드웨어 구현이 용이하도록 설계하였다.

## 2. 고각 시스템 비선형성 모델링

유압서보시스템은 유압에너지를 조절하여 액추에이터에 공급하는 전기유압서보밸브, 액추에이터인 유압실린더, 피스톤의 출력을 토오크로 받아서 회전하는 부하로 구성되어 있으며 각각 요소들 사이의 기능적 관계는 그림 1과 같다.

### 2.1 액추에이터 변위환산 비선형성

본 논문의 유압서보시스템은 액추에이터로 유압실린더를 사용하기 때문에 고각입력에 대하여 피스톤 변위를, 피스톤 변위에 대해서는 고각을 산출해야 한다. 그림 2는 유압실린더와 부하와의 기하학적 관계를 나타낸다.

그림 2에서 실린더의 회전중심을 P, 부하회전각이 0일 때 암이 피스톤로드와 연결되는 점을 Q, 부하가  $\theta$ 만큼 회전할 경우의 좌표를 S 라고 하면 임의의 부하회전각  $\theta$ 에 대하여 피스톤 변위  $l_p$ 를 구할 수 있다.

$$l_0^2 = (x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2 \tag{1}$$

부하가  $\theta$ 만큼 회전한 경우 S점의 좌표는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= R \cos(180^\circ - \Phi - \theta) = -R \cos(\Phi + \theta) \\ y &= R \sin(180^\circ - \Phi - \theta) = R \sin(\Phi + \theta) \end{aligned} \tag{2}$$

PS의 길이, 즉 피스톤-실린더의 길이  $l$ 은

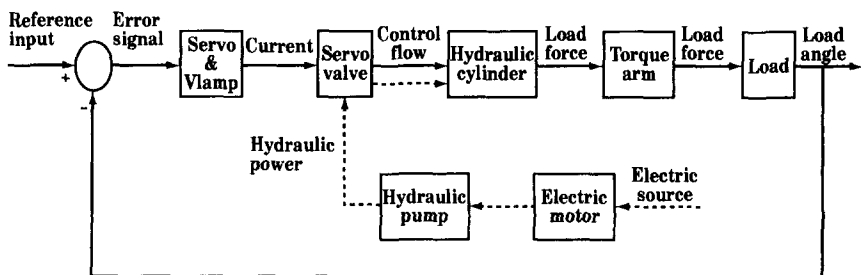


Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic servo system.

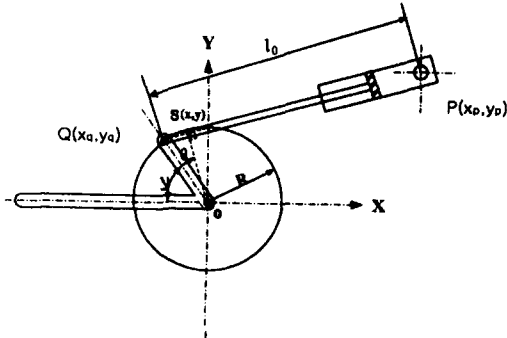


Fig. 2 Geometric diagram of actuator and load.

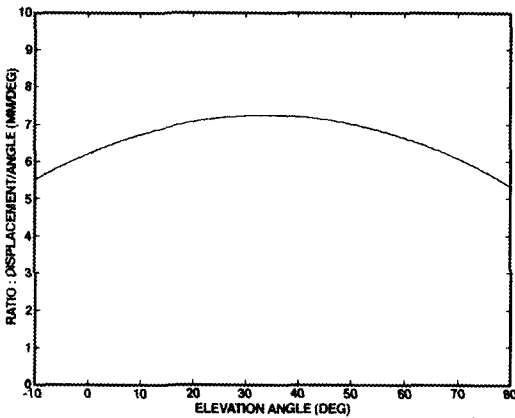


Fig. 3 Conversion ratio from elevation angle to piston displacement.

$$l^2 = x_p^2 + y_p^2 + R^2 + A \cos \theta - B \sin \theta \quad (3)$$

로 표시되고, 여기에서  $A = 2R(x_p \cos \Phi - y_p \sin \Phi)$ ,  $B = 2R(x_p \sin \Phi + y_p \cos \Phi)$ 를 나타낸다. 따라서 부하의 회전각에 대한 피스톤의 변위  $l_p$ 는 다음과 같다.

$$l_p = l_0 - l = l_0 - \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + R^2 + \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\theta + \delta)} \quad (4)$$

여기에서  $\delta = \tan^{-1} \frac{A}{B}$ 이다. 피스톤 변위에 대한 부하의 회전각  $\theta$ 를 식 (4)로부터 구하면 식 (5)와 같다.

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{(l_0 - l_p)^2 - x_p^2 - y_p^2 - R^2}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right\} - \delta \quad (5)$$

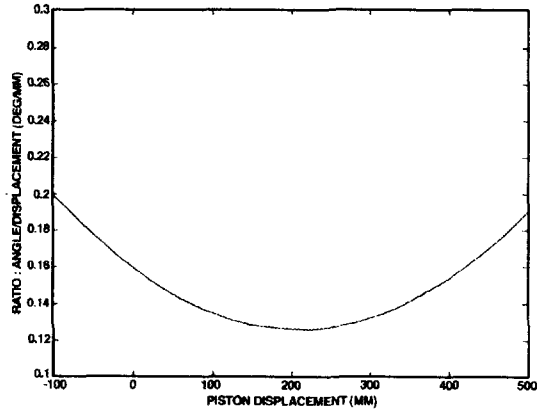


Fig. 4 Conversion ratio from position displacement to elevation angle.

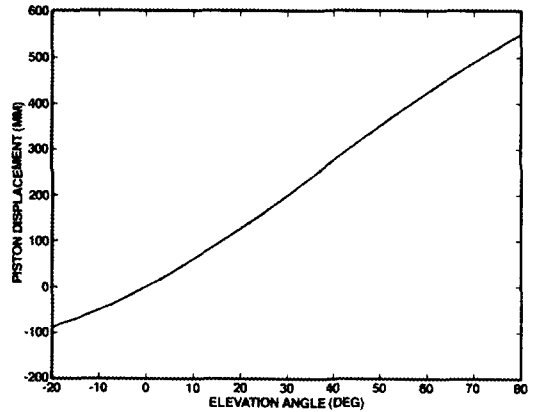


Fig. 5 Piston displacement according to elevation angle.

그림 3은 부하회전각에 대한 피스톤 변위의 환산율을 나타내고, 그림 4는 피스톤변위에 대한 부하회전각의 환산율을 나타낸다. 그림 3에서 주로 사용되는 부하회전각  $0^\circ \sim 70^\circ$  범위에서의 환산율은 5.7~7.3 범위에서 변하고, 그림 4에서 주로 사용되는 피스톤 변위 0~470mm 범위에서의 환산율은 0.138~0.174 범위에서 변함을 알 수 있다. 그림 5는 부하회전각에 대한 피스톤 변위를 나타낸다.

## 2.2 포화 비선형성

고각 유압서보시스템에서 포화 비선형성은 토오크 모터전류, 액츄에이터에 공급되는 유량 그리

고 부하의 마찰토크이다. 마찰토크는 정량적으로 산정하기 힘들기 때문에 부하의 관성토크에 대하여 식 (6)과 같이 모델링하였다.

$$T_F = 0.05 J_i \ddot{\theta} \quad (6)$$

여기에서  $\ddot{\theta}$ 는 부하의 회전 각가속도,  $J_i$ 는 질량 관성모멘트 그리고  $T_F$ 는 쿨롱마찰토크이다.

### 2.3 토오크암의 비선형성

피스톤에 의한 출력을 부하의 입력토크로 변환시키는 토오크암은 그림2에서 부하의 각 위치의 함수로서 계산할 수 있다. 토오크암의 길이 계산식은 식(7)과 같다.

$$r = R \sin(180^\circ - \Phi - \theta - \beta)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{y_p - R \sin(180^\circ - \Phi - \theta - \beta)}{y_p - R \cos(180^\circ - \Phi - \theta)} \quad (7)$$

여기에서  $r$ 은 토오크암의 길이 그리고  $\beta$ 는 부하의 회전각변위에 대한 피스톤로드의 각변위를 나타낸다.

그림 6은 부하회전각이 변할 때 유압실린더에서 출력되는 힘을 부하에 전달되는 토오크암의 변화를 도시한 것이다. 토오크암의 변화량은 주로 사용되는 부하회전각 범위에서 약 100mm이다. 따라서 토오크암의 비선형성은 부하의 각가속도에 큰 영향이 있을 것으로 예상할 수 있다.

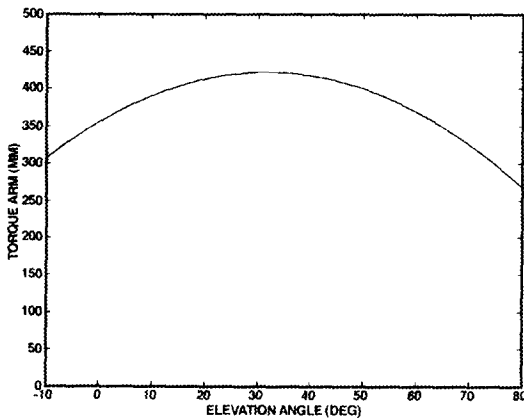


Fig. 6 Torque arm variation according to elevation angle.

### 2.4 중력토크에 의한 비선형성

고각 유압서보시스템에서 부하의 중력때문에 야기되는 중력토크는 액추에이터를 사용한 평형기에서 보상해 준다. 그러나 액추에이터는 유체의 압축성을 이용함으로 그 특성이 비선형적이며 시간지연이 발생할 여지를 많이 갖고 있다. 또한 피스톤 변위에 따른 압력변화 특성이 선형적이라 할지라도 토오크암의 길이가 변하기 때문에 중력토크를 전부 보상하지 못하는 결과를 발생한다. 그림 7은 중력토크에 대한 어큐뮬레이터 부하곡선을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 부하에 의해 발생하는 중력토크 중 최대 약 15[%] 정도는 어큐뮬레이터에 의해서 보상되지 못함을 알 수 있다. 이때 미보상 압력에 의하여 보상되지 못하는 중력토크  $T_g$ 는

$$T_g = R \cdot \sin(125^\circ - \theta - \beta) \cdot \Delta P \cdot A_p \quad (8)$$

여기에서  $\Delta P$ 는 미보상압력 그리고  $\beta$ 는 부하의 회전각 변위에 대한 피스톤로드의 각변위를 나타낸다.

### 3. 비선형 퍼지제어칙의 유도

퍼지논리제어기의 구조는 그림 8과 같다. 입력 변수로 오차, 오차변화를 및 가속도 입력을 퍼지화기를 통해 퍼지수로 변환하고 입력항으로 오차와 속도의 퍼지수를 사용한 PI 퍼지제어기 형태의 퍼지제어블럭 1과 입력항으로 속도와 가속도의 퍼지

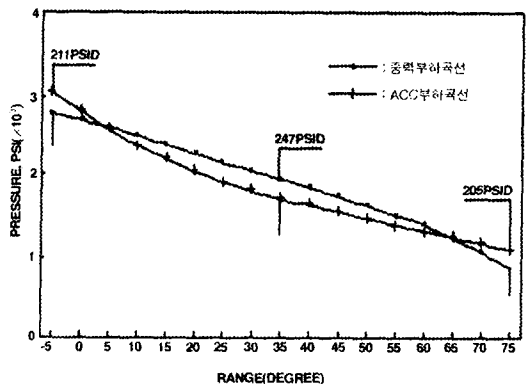


Fig. 7 Load curve of accumulator for gravity torque.

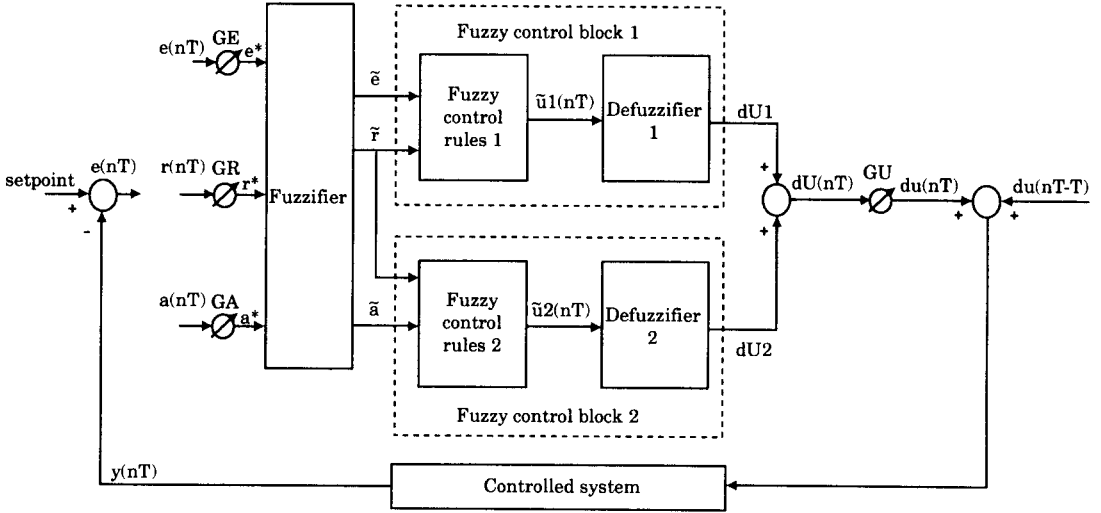


Fig. 8 The Structure of FLC

수를 사용한 PD 퍼지제어기 형태를 갖는 퍼지제어블럭 2를 결합하여 비선형 PID 퍼지제어기<sup>11)</sup>를 구성하였다. 퍼지논리제어기의 구조는 2개의 서로 독립한 평형 퍼지제어블럭으로 구성되고 FLC의 출력은 퍼지제어블럭 1과 퍼지제어블럭 2 출력의 대수적 합으로 표시된다.

GE는 오차입력에 대한 이득, GR는 속도입력에 대한 이득, GA는 가속도입력에 대한 이득, GU는 FLC의 출력에 대한 이득 그리고  $du(nT)$ 는 샘플링 시간에서 FLC의 출력증분을 나타낸다.

$y(nT)$ ,  $e(nT)$ ,  $r(nT)$  그리고  $a(nT)$ 는 샘플링시간  $nT$ 에서 FLC의 출력, 오차, 오차변화율 그리고 가속도를 각각 나타내고 식(9)과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 e(nT) &= \text{setpoint} - y(nT) \\
 r(nT) &= [e(nT) - e(nT - T)]/T \\
 a(nT) &= [r(nT) - r(nT - T)]/T \\
 \tilde{e}(nT) &= F(e^*) \\
 \tilde{r}(nT) &= F(r^*) \\
 \tilde{a}(nT) &= F(a^*)
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기에서  $F(\cdot)$ 는 스케일된 입력신호에 대한 퍼지화기를 나타낸다.

### 3. 1 스케일된 입력에 대한 퍼지화기

스케일된 입력에 대한 퍼지화기의 소속함수는

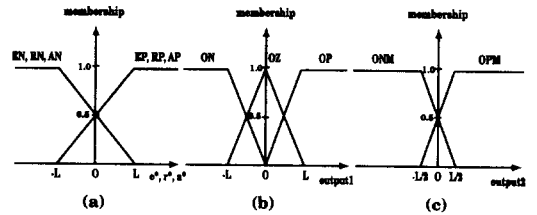


Fig. 9 Membership function.

그림 9와 같다. 그림9에서 L은 입 · 출력변수에 대한 스케일요소를 나타내고, 그림9(a)는 각각의 입력에 대한 스케일된 소속함수, 그림9(b)는 퍼지제어블럭1에 대한 소속함수 그리고 그림9(c)는 퍼지제어블럭2에 대한 소속함수를 나타낸다.

### 3. 2 퍼지제어규칙 및 퍼지로지

퍼지제어규칙은 일반적으로 전문가의 경험, 제어기술자의 지식이나 작동자의 제어조작에 근거하여 구성되는데 본 논문에서는 전문가의 지식, 제어기술자의 지식에 근거하여 구성하였으며 각각의 퍼지제어블럭에 대하여 각각 4개로 이루어져 있다.

퍼지제어블럭 1에 대한 퍼지제어규칙은 다음과 같다.

$$(R1)_1 : \text{if error is EP and rate is RP then out-}$$

put 1 is OP

(R2)<sub>1</sub> : if error is EP and rate is RN then output 1 is OZ

(R3)<sub>1</sub> : if error is EN and rate is RP then output 1 is OZ

(R4)<sub>1</sub> : if error is EN and rate is RN then output 1 is ON (10)

퍼지제어블럭2 에 대한 퍼지제어규칙은 다음과 같다.

(R1)<sub>2</sub> : if rate is RP and acc is AP then output 2 is OPM

(R2)<sub>2</sub> : if rate is RP and acc is AN then output 2 is ONM

(R3)<sub>2</sub> : if rate is RN and acc is AP then output 2 is OPM

(R4)<sub>2</sub> : if rate is RN and acc is AN then output 2 is ONM (11)

그림 10(a)는 입력변수 e\*와 r\*의 가능한 결합을

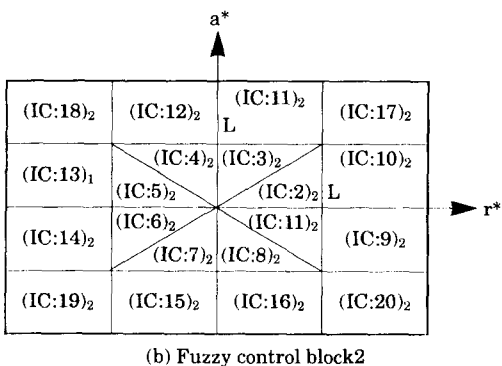
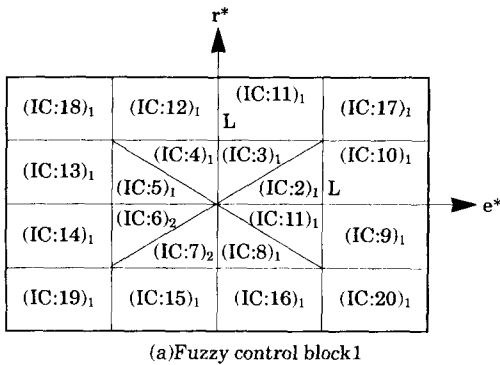


Fig. 10 Possible input combinations.

나타내고 그림 10(b)는 r\*와 a\*의 가능한 결합을 나타낸다. 본 논문에서 제어규칙은 Zadeh의 AND논리와 Lukasiewicz의 OR논리를 사용하였다.

### 3. 3 비퍼지화기 알고리즘

본 논문에서는 비퍼지화기 알고리즘으로 무게 중심법을 사용하였다. 비퍼지화된 출력값은 식 (12)로 표시된다.

$$dU = \frac{\sum(\text{membership value}) \cdot (\text{value of member})}{\sum(\text{membership value})} \quad (12)$$

퍼지제어블럭1에 대하여 비퍼지화기 알고리즘을 적용하면 제어입력증분은 식(13), (14)로 표시된다.

$$\begin{aligned} \text{If } GR \cdot |r(nT)| \leq GE \cdot |e(nT)| \leq L, \\ dU_1(nT) = \frac{0.5 \cdot L}{2L - GE \cdot |e(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{If } GE \cdot |e(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L, \\ dU_1(nT) = \frac{0.5 \cdot L}{2L - GE \cdot |r(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] \end{aligned} \quad (14)$$

동일한 방법으로 퍼지제어블럭2에 대하여 적용하면 식(15), (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{If } GA \cdot |a(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L, \\ dU_2(nT) = \frac{0.25 \cdot L}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GA \cdot a(nT)] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{If } GR \cdot |r(nT)| \leq GA \cdot |a(nT)| \leq L, \\ dU_2(nT) = \frac{0.25 \cdot L}{2L - GA \cdot |a(nT)|} [GA \cdot a(nT)] \end{aligned} \quad (16)$$

퍼지논리제어기의 출력 dU(nT)의 전체출력증분은 각각의 퍼지제어블럭에 대한 출력증분 합으로 표시된다. 따라서 스케일된 오차와 속도, 스케일된 속도와 가속도가 [-L, L]의 영역안에 있을 경우 제어입력증분은 다음과 같은 4가지의 다른 형태로 표현된다.

따라서 FLC의 출력은 다음과 같은 4가지의 다른 형태로 표현된다.

1) If  $GR \cdot |r(nT)| \leq GE \cdot |e(nT)| \leq L$  and,

$$GA \cdot |a(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L,$$

$$du(nT) = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU}{2L - GE \cdot |e(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] + \frac{0.25 \cdot L \cdot GU}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GA \cdot a(nT)]$$

(17)

2) If  $GR \cdot |r(nT)| \leq GE \cdot |e(nT)| \leq L$  and,

$$GR \cdot |r(nT)| \leq GA \cdot |a(nT)| \leq L,$$

$$du(nT) = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] + \frac{0.25 \cdot L \cdot GU}{2L - GA \cdot |a(nT)|} [GA \cdot a(nT)]$$

(18)

3) If  $GE \cdot |e(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L$  and,

$$GA \cdot |a(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L,$$

$$du(nT) = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] + \frac{0.25 \cdot L \cdot GU}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GA \cdot a(nT)]$$

(19)

4) If  $GE \cdot |e(nT)| \leq GR \cdot |r(nT)| \leq L$  and,

$$GR \cdot |r(nT)| \leq GA \cdot |a(nT)| \leq L,$$

$$du(nT) = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU}{2L - GR \cdot |r(nT)|} [GE \cdot e(nT) + GR \cdot r(nT)] + \frac{0.25 \cdot L \cdot GU}{2L - GA \cdot |a(nT)|} [GA \cdot a(nT)]$$

(20)

식(17)을 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$du(nT) = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU \cdot GE}{2L - GE \cdot |e(nT)|} \cdot e(nT) + \frac{0.5 \cdot L \cdot GU \cdot GR}{2L - GE \cdot |e(nT)|} \cdot r(nT)$$

$$+ \frac{0.25 \cdot L \cdot GU \cdot GA}{2L - GR \cdot |r(nT)|} \cdot a(nT) \quad (21)$$

여기에서

$$K_i = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU \cdot GE}{2L - GE \cdot |e(nT)|}$$

$$K_p = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU \cdot GR}{2L - GE \cdot |e(nT)|}$$

$$K_d = \frac{0.5 \cdot L \cdot GU \cdot GA}{2L - GE \cdot |r(nT)|} \quad (22)$$

로 정의하면 제어입력증분은 오차, 속도, 가속도입력에 따라서 변하는 이득  $K_p, K_i, K_d$ 를 갖는 퍼지 PID 제어기 형태로 표현된다.

$$du(nT) = K_i \cdot e(nT) + K_p \cdot r(nT) + K_d \cdot a(nT) \quad (23)$$

여기에서  $K_p$ 는 비례이득,  $K_i$ 는 적분이득 그리고  $K_d$ 는 미분이득으로 정의한다.

정상상태, 즉  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0$ 인 경우, 각각에 대한 정상상태이득은 식(24)로 표현된다.

$$K_p^* = \frac{GU \cdot GR}{4}$$

$$K_i^* = \frac{GU \cdot GE}{4}$$

$$K_d^* = \frac{GU \cdot GA}{8} \quad (24)$$

결론적으로 제시된 퍼지논리제어기는 그림 9와 같이 간단한 형태의 퍼지소속함수를 사용함으로써 FLC의 설계과정이 간단하고, 언어적 규칙으로부터 제어칙의 형태가 간편한 해석적인 형태로 구할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그리고 그림 10의 입력공간 분할에 따라 제어이득이 변하는 시변형태로 표시되므로 비선형 시스템에 잘 적용할 수 있는 구조로 되어있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

2장에서 모델링된 비선형요소들을 고려한 서보시스템의 블록선도는 그림 11과 같다. 이 외의 비선형항들, 즉 유압장치내에서 발생되는 유체특성에 의한 서어지압력, 캐비테이션에 의한 충격압력 등

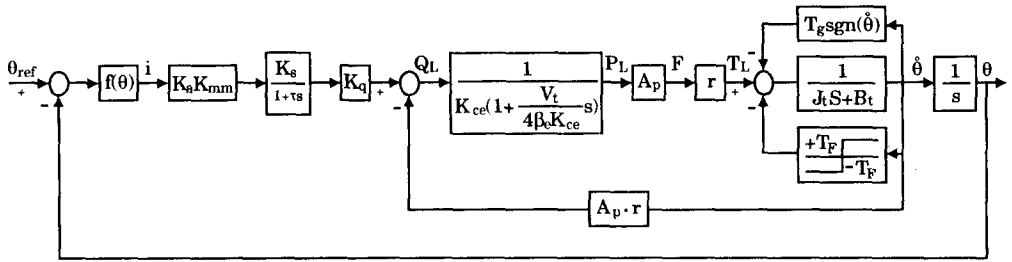


Fig. 11 Block diagram of servo system with nonlinearity.

Table 1 Parameter values for hydraulic servo system

$K_a$	21.53 [in/rad]	$\beta_c$	100,000 [psi]
$K_s$	0.0041 [in/mA]	$V_t$	16.3 [in <sup>3</sup> ]
$K_w$	3820 [CIS/in]	$A_p$	18.8 [in <sup>2</sup> ]
$K_{cc}$	0.046 [CIS/psi]	$T_F$	560 [N · m]

은 불확실성으로 처리하였다. 시뮬레이션에서 사용된 유압서보시스템에 대한 데이터는 표1과 같다.

토크모터전류  $i$ 의 포화량은  $\pm 4.5$ [mA], 부하유량  $Q_L$ 의 포화량은  $\pm 50$ [CIS]값으로 제한하였고, 부하각 변위에 대한 피스톤 변위의 환산율  $f(\theta)$ 는 그림 4에서, 그리고 토크암  $r$ 은 그림6의 값을 사용하였다.

그림12는 부하가 상승할 경우 부하위치에 대한 시간응답곡선이다. 여기에서 파선은 2장에서 논의된 모든 비선형항을 고려한 플랜트에 대하여, 실선은 비선형 퍼지 PID제어시스템에 대한 위치 제어 성능을 나타낸다. 플랜트인 경우  $0^\circ$ 에서  $+60^\circ$ 로 상승할 경우에는 최대오버슈트량  $+3.54^\circ$ 이고 감소하는 요동이 발생되었다. 설계된 제어기를 사용할 경우 오버슈트가 발생되지 않았으며 약 7초이내에서 만족스러운 위치 제어성능을 얻을 수 있었다.

그림13은 부하상승시 각각의 경우에 대한 토크모터전류에 대한 시간응답곡선을 나타낸다. 플랜트인 경우, 상승후  $-1.5 \sim +0.5$ [mA] 범위에서 안정적으로 입력되었지만, 제어기를 사용할 경우에는 부하상승후 약  $\pm 1$ [mA]범위에서 채터링이 발생되었다. 이것은 플랜트가 관성이 큰 비선형 시스템이므로 제어칙을 생성하는 과정에서 오차와 오차변화율에 민감하게 작용하기 때문으로 판단된다.

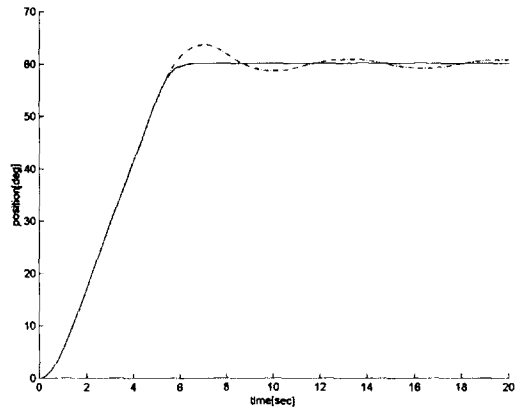


Fig. 12 Load position for upload command angle of plant(dashed line) and control system(solid line).

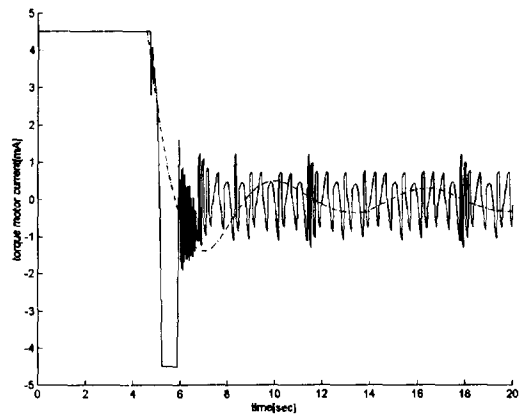


Fig. 13 Torque motor current for upload command angle of plant(dashed line) and control system(solid line).



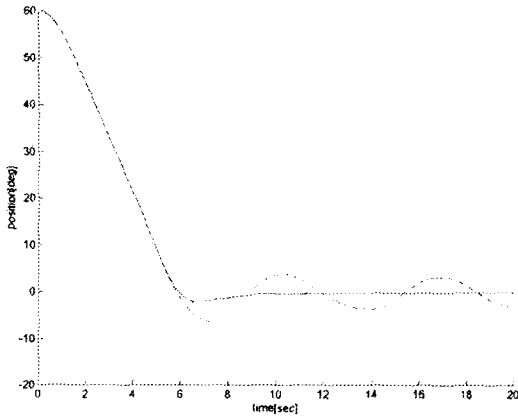


Fig. 14 Load position for download command angle of plant(dashed line) and control system(solid line).

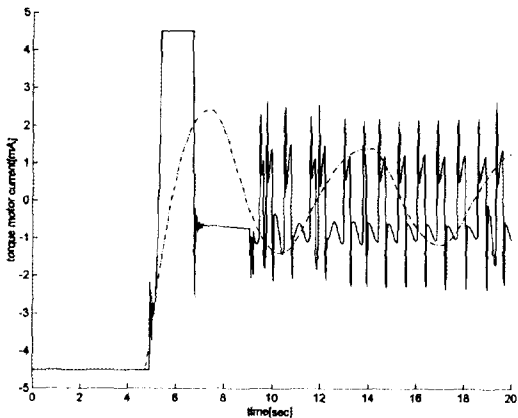


Fig. 15 Torque motor current for download command angle of plant(dashed line) and control system(solid line).

그림 14는 부하가 하강할 경우 부하위치에 대한 시간응답곡선이다. 여기에서 파선은 비선형 플랜트에 대하여, 실선은 퍼지 PID제어시스템에 대한 위치제어성능을 나타낸다. 플랜트인 경우 부하가  $+60^\circ$ 에서  $0^\circ$ 로 하강할 경우 최대언더슈트량  $6.5^\circ$ 가 발생된 후, 요동이 장시간 유지됨을 알 수 있었다. 이것은 어큐뮬레이터에서 완전히 보상되지 못하는 미보상 중력토크는 부하가 하강할 경우에는 부하의 구동토크와 동일한 방향으로 작용함으로써 원하지 않는 부가토크로 작용하여 제어성능을 저하시키기 때문이다. 설계된 제어기를 사용할 경

우에는  $2.1^\circ$ 의 최대언더슈트량이 발생된 후 정상상태오차는  $0.1^\circ$  이내로 빨리 안정되었다.

그림 15는 하강시 토크모터전류에 대한 시간응답곡선이다. 플랜트에서는 하강후  $-1.5 \sim +2.5$ [mA]범위에서 안정적으로 입력되었고, 제어시스템인 경우 약  $\pm 2$ [mA]의 범위에서 채터링이 발생되었으나 토크모터의 시정수가 0.013초임을 고려할 때 가능한 입력으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 대형부하 유압서보시스템에 대하여 비선형을 조사한 후, 비선형성과 불확실성을 포함한 비선형 시스템에 대하여 퍼지 PID제어치를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 제어기의 성능을 비교 분석하였다.

제시된 퍼지 PID제어치는 식(21)과 같이 간단한 형태로 표현되지만 오차에 따라 변하는  $K_i$ ,  $K_p$ 와 속도오차에 따라서 변하는  $K_d$ 를 사용함으로써 대형부하 시스템의 동특성을 개선시키고, 고정밀 위치제어를 실현할 수 있었다. 여기에서 유도된 제어치는 일반적인 FLC의 설계과정에 근거하여 유도되는 언어적 표현과 다른 시변계인을 갖는 해석적 형태로 표현되므로 하드웨어 구현이 용이하도록 설계하였다.

### 참고문헌

- [1] Doyle, J. C. and Stein, G., "Multivariable Feedback Design : Concepts for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-26, pp. 4~16, 1981.
- [2] Safonov, M. G., Laub, A. J. and Hartmann, G. L. "Feedback Properties of Multivariable Systems : The Role and Use of the Return Difference Matrix", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-26, pp. 63~81, 1981.
- [3] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets", Inform. Contr., Vol. 8, pp. 338~358, 1965.
- [4] Mamdani, E. H., "Applications of Fuzzy Algorithm of Simple Dynamic Plant", Proc. IEEE, Vol. 121, pp. 1585~1588, 1974.

- [5] Sugeno, M., "An Introductory Survey of Fuzzy Control", *Information Science* Vol. 36, pp. 59~83, 1985.
- [6] Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller—Part I", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-20, No.2, pp. 404~418, 1990.
- [7] Tanaka, K. and Sugeno, M., "Stability Analysis and Design of Fuzzy Control System", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 45, pp. 135~156, 1992.
- [8] Hwang, G. C. and Lin, S. C., "A Stability Approach to Fuzzy Control Design for Nonlinear System", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 48, pp. 279~287, 1992.
- [9] Ying, H., Siler, W. and Buckley, J. J., "Fuzzy control Theory : A Nonlinear case", *Automatica*, Vol. 26, pp. 513~520, 1990.
- [10] Ying, H., "Practical Design of Nonlinear Fuzzy Controller with Stability Analysis for Regulating, Processes with Unknown Mathematical Models", *Automatica*, Vol. 30, pp. 1185~1195, 1994.
- [11] Kim, J. H., "A Suggestion of Nonlinear PID Controller to Improve Transient Responses of Nonlinear of Uncertain System", *한국퍼지 및 지능시스템학회*, Vol. 5, No.4, pp. 87~100, 1995.
- [12] Wang, L. X., *Adaptive Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1994.

## 저 자 소 개



### 김인환(金仁煥)

1959년 4월생. 1982년 부산대학교 공과대학 기계공학과 졸업. 1989년 동대학교 대학원 졸업(석사, 동역학시스템 및 제어). 1983년 동대학원 박사과정수로. 1982년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1992년~현재 진주산업대학교 기계설계공학과 전임강사, 조교수 당학회 종신회원.