

## 궤환 퍼지제어기 설계와 구현

# Design and Implementation of The Feedback Fuzzy Controller

이상윤 · 신위재\*

Sang-Yun Lee and Wee-Jae Shin\*

\* 경남대학교 전기전자공학부

### 요 약

본 논문에서 제안한 제어기 구조는 일반적인 궤환제어기를 기초로 구성한다. 일반적인 궤환제어기는 플랜트 입력과 기준신호 사이의 오차에 제어기의 적당한 이득을 곱한 제어입력을 공급한다. 설계한 궤환 퍼지제어기는 3개의 루프로 구성되며, 내부 루프는 보통의 궤환제어기와 플랜트로 구성된다. 제어기는 퍼지 모델링과 퍼지추론기로 이루어진 외부 루프에 의해서 조절되며 제안한 궤환 퍼지 시스템의 출력이 기준신호를 향해서 잘 수렴하는가를 확인하기 위해 직접구동 밸브를 사용한 비선형 유압 서보시스템을 제어대상으로 부동 소수점 DSP 프로세서를 사용하여 구현한 후 실험결과를 관찰하였다. 실험결과 궤환 퍼지제어기는 정상상태 도달시간은 느리지만 오버슈트나 언더슈트는 일어나지 않는다. 그러므로 새로운 궤환제어 방식을 사용한 궤환 퍼지제어 알고리즘이 비선형 플랜트에 효과적으로 잘 적용됨을 확인하였다.

### ABSTRACT

In this paper, we proposed a fuzzy controller that founded by the general feedback control with the new adjustment method when it's tuning. The general feedback controller is operated that supply to the plant making the control input multiplying the appropriate gain of controller on the error between the output of the plant and the reference, But proposed feedback fuzzy controller consist of three loops. The inner loop consists of plant and an ordinary feedback controller. The fuzzy inference of controller performed by the outer loops, which is composed of a fuzzy modeling and inference. We can observe that the output of control system converges toward the reference. Also, the behaviour of feedback fuzzy system is converged from the transient. That is, we verified that designed fuzzy controllers was adapted effectively through the experiments in the hydraulic motor system using floating point DSP processor.

## 1. 서 론

퍼지제어는 제어하고자 하는 대상 시스템에 대한 전문가의 지식 혹은 숙련자의 지식에 바탕을 둔 퍼지논리를 기초로 하여 이루어진다. 따라서 퍼지제어는 대상 시스템에 대한 여러 정보가 전문가에 의해 언어적 정보로 취득 가능하면 제어기의 골격이 쉽게 퍼지논리로 변환될 수 있는 고유한 특성 때문에 입출력 변수가 아주 많거나 시스템의 모델링이 어려운 시스템인 경우, 또는 비록 시스템은 간단하지만 기존의 제어 방법에 의한 성능 향상에 한계가 있는 경우 등에 효과적으로 이용될 수 있다[1-3].

한편 주파수 응답을 이용하는 고전적인 제어기의 설계 방법이나 상태변수를 이용하는 현대제어 방법에서는 시스템의 수학적 모델링이 쉽지 않을 뿐만 아니라 설사 모델링이 구해진다 하더라도 적절한 제어기를 설계하기가 쉽지 않다.

본 논문에서는 일반적인 궤환제어기를 이용하여 제어기의 이득을 입·출력 조건만으로 동조시켜 자동으로 조절할 수 있는 알고리즘을 제안하고 제어대상을 비선형 플랜트인 경우로 확장하기 위하여 숙련자 중심 시스템을 도입하여 궤환 퍼지제어기를 설계한다.

설계한 궤환 퍼지제어기를 DSP 프로세서를 사용하여 구현한 후 비선형 플랜트인 유압 서보시스템에 적용하여 그 성능을 확인하였다.

## 2. 궤환 퍼지제어기 설계

궤환 퍼지제어기는 궤환부, 퍼지 모델링, 퍼지 추론으로 구성되고, 그림 1에 나타내었고, 퍼지 모델링과 퍼지 추론 부분을 그림 2에 상세히 나타내었다.

이 퍼지 모델링 부분은 퍼지화기(Fuzzifier)와 퍼지 모델링(Fuzzy modeling)으로 구성되고, 퍼지 모델링에서 얻어진 퍼지모델은 퍼지추론(Fuzzy inference)으로

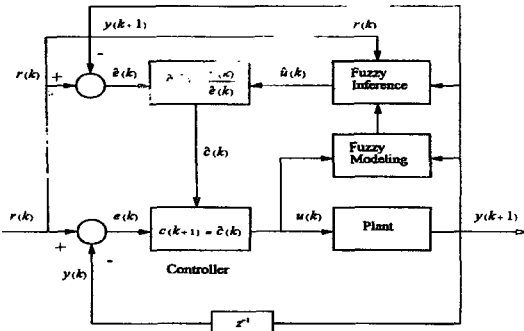


그림 1. 제한한 케환 퍼지제어기 구성도

전달되어 추정 제어입력  $\hat{u}(k)$ 를 추론하며 케환제어기의 제어기 이득을 구하는데 사용한다.

케환제어기는 제어대상인 플랜트의 출력신호와 희망하는 기준입력사이의 오차에 제어기 이득을 곱하여 제어대상의 입력으로 사용한다.

케환제어기의 동조순서는 먼저 플랜트의 입력에 임의의 작은량  $\varepsilon$ 을 제어입력으로 다음과 같이 인가한다.

$$u(k) = \varepsilon \quad (1)$$

여기서  $u(k)$ 는  $k$ 번째 제어입력이다. 그리고 플랜트 입력측의 제어입력  $u(k)$ 와 플랜트의 출력  $y(k+1)$ 의 관계로부터 플랜트의 전달함수  $\hat{p}(k)$ 를 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{p}(k) = \frac{y(k+1)}{u(k)} \quad (2)$$

여기서  $y(k+1)$ 은  $k+1$ 번째 플랜트의 출력이다.

추정한 전달함수  $\hat{p}(k)$ 와  $k$ 번째 기준입력  $r(k)$ 로부터  $k$ 번째 추정 제어 입력  $\hat{u}(k)$ 를 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{u}(k) = \frac{r(k)}{\hat{p}(k)} \quad (3)$$

그리고  $r(k)$ 와  $y(k+1)$ 로부터  $k$ 번째 추정에 필요한 오차  $\hat{e}(k)$ 를 구한다.

$$\hat{e}(k) = r(k) - y(k+1) \quad (4)$$

$\hat{e}(k)$ 와  $\hat{u}(k)$ 로부터  $k$ 번째 추정된 제어기 이득  $\hat{c}(k)$ 를 아래와 같이 추정한다.

$$\hat{c}(k) = \frac{\hat{u}(k)}{\hat{e}(k)} \quad (5)$$

$k+1$ 번째의 제어기 이득  $c(k+1)$ 은  $\hat{c}(k)$ 로 되고,

$$c(k+1) = \hat{c}(k) \quad (6)$$

$k+1$ 번째의 제어 입력  $u(k+1)$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$u(k+1) = c(k)e(k+1) \quad (7)$$

여기서

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (8)$$

이다.

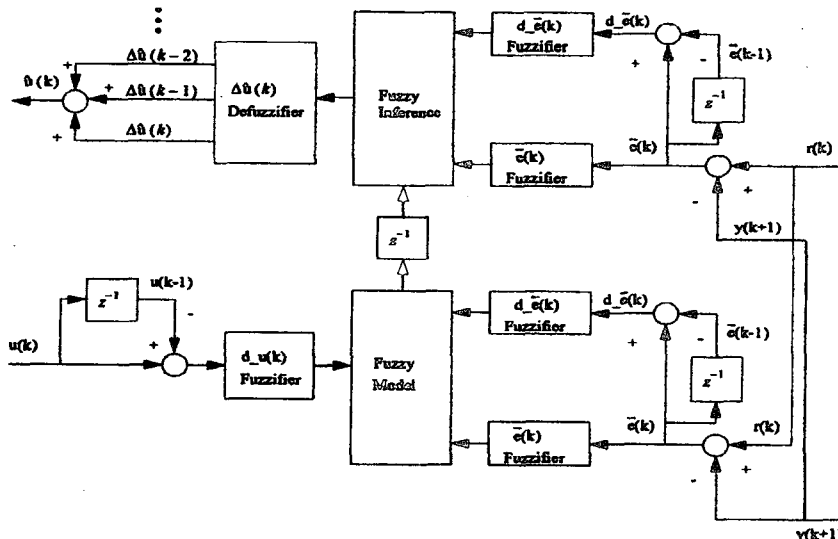


그림 2. 퍼지 모델링과 퍼지 추론부

### 3. 퍼지모델링과 퍼지추론

#### 3.1 퍼지 모델링

먼저 입·출력변수들의 대집합 및 언어값과 소속함수를 결정하고, 입·출력 공간의 퍼지 분할은 입·출력 변수들의 언어값을 결정하는 것으로 퍼지 모델의 작성과 밀접한 관계에 있으며, 대집합이 [-1, +1]인 퍼지분할을 생각하자. 퍼지분할의 언어값은 입출력 공간 [-1, +1]을 19개의 퍼지 부분집합으로 퍼지분할하는 것으로 이해될 수 있다[4].

소속함수의 모양은 여러 가지의 형태를 생각할 수 있으나 그림 3과 같은 삼각형 소속함수를 사용한다. 퍼지 입력공간에 있는 용어집합(Term-set)의 원소개수(Cardinality)는 구성 할 수 있는 퍼지규칙 모델의 최대수를 결정한다.

현재의 퍼지규칙 모델은 2입력-1출력이고 원소개수는 각각 19개를 가짐으로 최대 퍼지규칙 모델은  $19 \times 19 = 361$ 개이다. 입력 공간 오차  $\bar{e}(k)$ -오차의 변화율  $(d\bar{e}(k))$ 은 361개의 퍼지 부분집합으로 퍼지분할하였으므로 361개의 퍼지규칙 모델이 필요하다.

정규화된 오차  $\bar{e}(k)$ 는 설정치  $r(k)$ 가 변화해도 스케일 계수를 수정해서 퍼지화 비율을 조절할 필요가 없어진다. 즉 변화하는  $r(k)$ 값을 기준으로 상대적인 오차를 구해 사용함으로써 기존의 제어기 설계시 설정치가 바뀌면 스케일 계수를 다시 수정하는 불편을 막

아 주며, 퍼지분할은 퍼지화기에서 수행한다.

퍼지변수의 소속함수는 그림 3에서 연속적으로 이산화된 소속함수를 사용하였으며, 사용된 퍼지변수는 0을 중심으로 +, - 방향으로 9단계로 나누어서 전체 19개를 사용하였다.

그리고, 0 양자화 수준이 0이 아니고  $\pm \frac{1}{256}r(k)$ 로 사용한 것은 제어 알고리즘 구현시 A/D 변환기의 양자화 오차와 센서 잡음으로 정확하게 정규화된 오차나 오차 변화율이 0이 되지 않는다. 그러므로 양자화 수준 0에 오프셋을 주어서 이 범위 안에  $e(k)$ 나  $\bar{e}(k)$ 가 들어오면 0에 수렴한 것으로 하기 위해서이다.

언어값의 소속함수는 삼각형 함수를 사용하고 출력 변수들의 대집합 또는 스케일계수는 제어대상 특성에 따라 적당히 선정된 후 궤환 시스템이 원하는 제어성을 발휘하도록 시행착오 방법으로 재조정한다.

본 연구에서 궤환 퍼지제어기의 제일 중요한 문제는 규칙모델을 작성하는 것이며, 종래의 퍼지제어기 설계과정을 그대로 사용한다. 규칙모델의 작성법은 합성에 의한 추론법을 사용할 때 규칙모델은 "If x is A then u is B."의 형식으로 기술된다.

규칙모델의 전건부 변수로는 기준 설정치와 출력 사이의 오차  $\bar{e}(k)$ 와 한 샘플링 구간에서의  $\bar{e}(k)$ 의 변화분  $d\bar{e}(k)$ 를 사용하고 후건부 변수로는 조작량  $\hat{u}(k)$ 의 변화분  $\Delta\hat{u}(k)$ 를 사용한다[5-7].

설정치를  $r(k)$ 라하고 샘플링 시간  $k=1, 2, 3, \dots$ 에서 출력  $y(k+1)$ , 오차를  $\bar{e}(k)$ ,  $d\bar{e}(k)$ , 조작량을  $\Delta\hat{u}(k)$  라고 하면 다음과 같이 표현된다[8].

$$\bar{e}(k) = r(k) - y(k+1) \tag{9}$$

$$d\bar{e}(k) = \bar{e}(k) - \bar{e}(k-1) \tag{10}$$

$$\hat{u}(k) = \Delta\hat{u}(k) + \hat{u}(k-1) \tag{11}$$

$\Delta\hat{u}(k)$  는  $\bar{e}(k)$ ,  $d\bar{e}(k)$ 로부터 결정되므로 다음과 같다.

$$\Delta\hat{u}(k) = f(\bar{e}(k), d\bar{e}(k)) \tag{12}$$

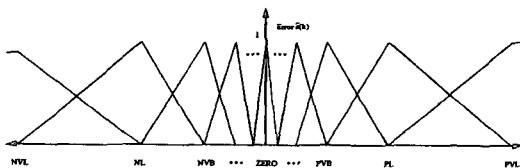
$\bar{e}(k)$ ,  $d\bar{e}(k)$  그리고  $\Delta\hat{u}(k)$ 의 언어값을 각각  $\bar{E}(k)$ ,  $d\bar{E}(k)$  그리고  $\Delta\hat{U}(k)$ 라 하면 식(9)는 다음의 식(13)와 같이 쓸 수 있으며, 식(14)에서 R은 퍼지관계를 의미하며 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\Delta\hat{U}(k) = R(\bar{E}(k), d\bar{E}(k)) \tag{13}$$

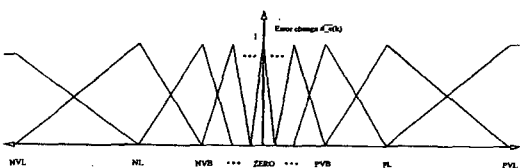
식(12)에서 퍼지관계 R가

$$R : \bar{E}(k), d\bar{E}(k) \rightarrow \Delta\hat{U}(k) \tag{14}$$

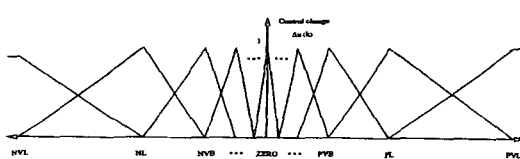
의 관계를 의미할 때에 제어 알고리즘을 속도형이라 한다. 식(13)와 같은 제어기는 E의  $\Delta E$ 로부터  $\Delta\hat{U}(k)$



(a)  $\bar{e}(k)$ 의 Membership Function과 Linguistic Value.



(b)  $d\bar{e}(k)$ 의 Membership Function과 Linguistic Value.



(c)  $\Delta\hat{u}(k)$ 의 Membership Function과 Linguistic Value.

그림 3. 퍼지모델과 퍼지 추론부의 소속함수

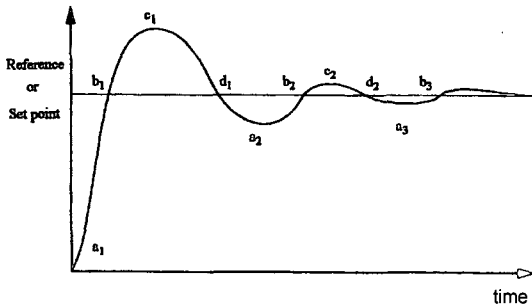


그림 4. 스텝 응답

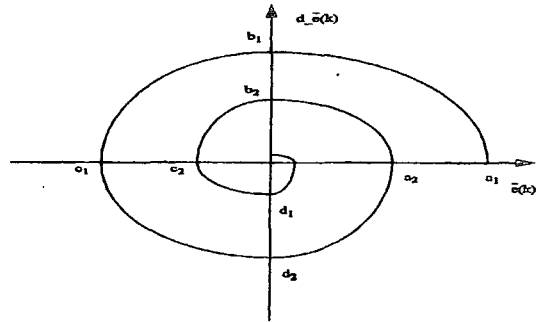


그림 5. 스텝응답의 위상공간

를 추론하는 구조이기 때문에 퍼지 PI 제어기라고 부른다.  $E$ 와  $\Delta\hat{U}(k)$ 의 관계가  $u(t) = K_I \int e(\tau) d\tau$ 의 적분 관계에 대응되고,  $\Delta E$ 와  $\Delta\hat{U}(k)$ 의 관계는  $u(t) = K_P e(t)$ 의 비례관계에 대응한다[9,10].

### 3.2 제어규칙 모델링

기본 제어규칙 모델을 작성하기 위하여 그림 5의  $\bar{e}(k) - d\bar{e}(k)$  위상공간에서의 스텝응답을 관찰한다. 특히 스텝응답의 특징점들  $a_i, b_i, c_i, d_i, i=1, 2, 3, \dots$ 에서 필요한 제어규칙 모델을 생각하자

그림 5의  $a$ 점 부근에서는  $\bar{e}(k) = +$ 이고  $d\bar{e}(k) = 0$

이어서 오차를 줄이기 위해 가속이 요구되므로  $\Delta\hat{u}(k)$ 를 +로 하여야 한다. 따라서,  $a$ 점 부근에서 필요한 제어규칙 모델은  $\bar{e}(k)$  값에 따라 다음 네 개의 제어규칙 모델 중 하나 또는 두개로 된다[9-11].

- If  $\bar{e}(k) = PB$  and  $d\bar{e}(k) = ZERO$  then  $\Delta\hat{u}(k) = PB$  also
  - If  $\bar{e}(k) = PM$  and  $d\bar{e}(k) = ZERO$  then  $\Delta\hat{u}(k) = PM$  also
  - If  $\bar{e}(k) = PS$  and  $d\bar{e}(k) = ZERO$  then  $\Delta\hat{u}(k) = PS$  also
  - If  $\bar{e}(k) = ZERO$  and  $d\bar{e}(k) = ZERO$  then  $\Delta\hat{u}(k) = ZERO$ .
- (15)

$b$ 점 부근에서는  $\bar{e}(k) = 0$ 이고  $d\bar{e}(k) = -$  이어서 오

표 1. 기본 퍼지 제어규칙(361개의 규칙 사용)

$\bar{e}(k)$ $d\bar{e}(k)$	NVL	NL	NVB	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZERO	PVS	PS	PLM	PM	PHM	PVB	PL	PL	PVL
NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NL	NVB	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZERO
NL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NLS	NS	NLS	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	
NVB	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NS	NS	NS	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	
NB	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NL	NS	NS	NS	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	
NHM	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NL	NVB	NS	NS	NS	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	
NM	NVL	NVL	NVL	NVL	NVL	NL	NVB	NB	NS	NVS	NVS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	
NLM	NVL	NVL	NVL	NVL	NL	NVB	NB	NHM	NVS	NVS	NVS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	
NS	NVL	NVL	NVL	NL	NVB	NB	NHM	NLS	NVS	NVS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	PVB	
NVS	NVL	NVL	NL	NVB	NB	NHM	NLS	NLS	NVS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	PVB	PL	
ZERONVL	NL	NVB	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	PVB	PL	PVL		
PVS	NL	NVB	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PVS	PLM	PM	PHM	PB	PVB	PL	PVL	PVL	
PS	NVB	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PVS	PVS	PM	PHM	PB	PVB	PL	PVL	PVL	PVL	
PLM	NB	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PVS	PVS	PVS	PHM	PB	PVB	PL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PM	NHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PVS	PVS	PS	PB	PVB	PL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PHM	NM	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PS	PS	PS	PVB	PL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PB	NLS	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PS	PS	PS	PL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PVB	NS	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PS	PS	PS	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PL	NVS	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	PLM	PS	PLM	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	
PVL	ZEROPVS	PS	PLM	PM	PHM	PB	PVB	PL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	PVL	

차를 줄이기 위해 감속이 요구되므로  $\Delta\hat{u}(k)$  를 -로 하여야 한다.

$c_i$ 점 부근에서는  $\bar{e}(k) = -$ 이고  $d\bar{e}(k) = 0$ 이어서 감속이 요구되므로  $\Delta\hat{u}(k)$  를 -로 하여야 하며,  $d_i$ 점 부근에서는  $\bar{e}(k) = 0$ 이고  $d\bar{e}(k) = +$ 이어서 가속이 요구되므로  $\Delta\hat{u}(k)$  를 +로 하여야 한다.

스텝응답의 특징점으로 부터 제어규칙 모델을 작성한 것을 기본 제어규칙 모델이라 부른다.

따라서, 본 폐환 퍼지제어기에서는 19개의 언어변수를 사용하여 기본 퍼지규칙 모델을 361개의 규칙으로 확장한 것을 표 1에 나타내었다.

### 3.3 퍼지 추론

기본 제어규칙 모델에서 제어 입력을 추론하는 과정을 생각하자. 입력변수  $\bar{e}(k)$ 와  $d\bar{e}(k)$ 의 퍼지화 방법으로는 퍼지 싱글턴방법을 채택하고, 추론법으로는 Mamdani의 추론법을, 비퍼지화 방법으로는 SCOG 방법을 채택할 때의 추론 알고리즘은 다음과 같다[11,12].

[1] 표 1에 있는  $i$ -번째 제어규칙  $R_i$ 는 다음의 식 (16)으로 기술된다.

$$R_i: \text{If } \bar{e}(k) \text{ is } A_i \text{ and } d\bar{e}(k) \text{ is } B_i \text{ then } \Delta\hat{u}(k) \text{ is } C_i \quad (16)$$

[2]  $i$ -번째 제어규칙  $R_i$ 에 의한 근사 추론 결과를  $C'_i$ ,  $C'_i$ 을 COG 방법으로 비퍼지화한 값을  $\Delta\hat{u}_i(k)$ , 전체 제어규칙에 의한 비퍼지화 추론결과를  $\Delta\hat{u}(k)$  라고 하면,  $\Delta\hat{u}_i(k)$ 와  $\Delta\hat{u}(k)$ 는 다음과 같이 구한다.

① 입력이  $(\bar{e}(k), d\bar{e}(k)) = (\bar{e}^0, d\bar{e}^0)$ 일때  $\bar{e}^0$ 와  $d\bar{e}^0$ 의 퍼지화 값  $A$ 와  $B$ 을 각각 다음과 같이 퍼지 싱글턴으로 정의하면

$$\mu_A(\hat{e}(k)) = \begin{cases} 1, & \text{if } \hat{e}(k) = \bar{e}^0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_B(d\hat{e}(k)) = \begin{cases} 1, & \text{if } d\hat{e}(k) = d\bar{e}^0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

②  $i$ -번째 제어규칙  $R_i$ 의 적합도  $\omega_i$ 는 다음의 식 (19)으로 계산되며,

$$\omega_i = \mu_{A_i}(\bar{e}^0) \wedge \mu_{B_i}(d\bar{e}^0) \quad (19)$$

③  $i$ -번째 제어규칙  $R_i$ 에 의한 퍼지 추론결과  $C'_i$ 은 다음의 식(20)으로 구하고,

$$\mu_{C'_i}(\Delta\hat{u}(k)) = \omega_i \wedge \mu_{C_i}(\Delta\hat{u}(k)) \quad (20)$$

④  $C'_i$ 을 COG 방법으로 비퍼지화한 추론결과

$\Delta\hat{u}_i(k)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\hat{u}_i(k) = COG(C'_i) \quad (21)$$

⑤ 표 1의 제어규칙 모델에 의한 비퍼지화된 추론 결과  $\Delta\hat{u}(k)$ 는 다음 식으로부터 구한다.

$$\Delta\hat{u}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{13} \omega_i \Delta\hat{u}_i(k)}{\sum_{i=1}^{13} \omega_i} \quad (22)$$

퍼지 제어규칙 모델을 수정하는 알고리즘은 ①에서 ③까지 단계를 수행하여 제어규칙 모델을 수정하고, 폐환 퍼지제어기의 알고리즘은 ①에서 ⑤까지의 단계를 수행하여 제어 입력 값을 계산하여 제어를 수행한다.

## 4. 실험 및 결과 고찰

제안한 제어기를 유압 서보시스템에 적용하여 제어기의 성능을 확인한다.

그림 6은 전체 실험장치의 구성도이다. 제안한 제어 알고리즘을 수행하는 부분은 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드이고 이 보드의 제어는 RS-232 통신 방식을 사용하여 PC1에서 이루어진다.

PC1은 ADSP-21020 계열 개발 소프트웨어를 사용하여 C 언어로 작성한 뒤 제안한 알고리즘을 DSP 어셈블리 언어로 번역하고, 실행파일을 생성시켜 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 다운로드(Down loading)하여 알고리즘을 수행한다[13].

유압 서보시스템은 유압모터와 직접구동 밸브(Direct Drive Valve) 그리고 관성부하로 이루어진다.

유압 서보시스템에서 제어기의 제어 입력신호를 D/

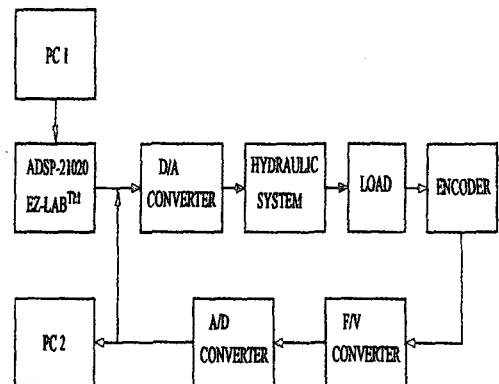


그림 6. 실험 장치의 구성도

A 변환기를 사용하여 아날로그 전압으로 바꾼 다음 직접구동 밸브에 인가한다. 직접구동 밸브는 밸브 내부에 서보 증폭기를 내장하고 있는 일체형이다.

직접구동 밸브의 구동신호(제어입력)는  $\pm 10$  V로 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드에 D/A 변환기(AD669 : 16bit)를 연결하여 생성하며 직접구동 밸브의 A, B 포트(Port)는 유압모터의 포트에 연결되고, 유압모터의 축은 커플링을 통하여 관성부하를 연결하는 축에 결합된다. 밸브에 의해 제어된 유량은 유압모터로 공급되고, 공급된 유량에 비례해서 회전력을 발생시킨다[14,15].

또한 관성부하를 고정하는 축은 다시 커플링을 통하여 증분 광부호기로 연결된다.

증분 광부호기는 유압모터의 회전수를 감지하는 부분으로 F/V 변환기를 사용하여 유압모터의 회전수를 전압신호로 변환하고, 변환된 전압신호는 A/D 변환기를 통과하여 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 연결된다. 또한 PC2의 A/D 변환 카드(Lab-PC-1200/AI)로 전달되며, PC2는 실험 결과를 기록하는 역할을 담당한다.

유압 서보시스템 실험장치는 서보밸브를 100% 열고, 유압펌프의 압력을 최대로 하면, 약 250[rpm]으로 모터가 회전하지만, 실험은 설정치가 200[rpm]일 때 80[kg/cm<sup>2</sup>]의 유압을 유지하여 수행하였다. 각각의 설정치는 다시 부하상태와 무 부하상태로 나누어 실험하였다.

부하 상태 실험에서 사용한 부하는 플라이 휠(Fly wheel) 형태의 회전 관성 부하 79.882[kg/cm<sup>2</sup>]를 사용하였으며, 유압모터의 축에 스프링 커플러를 연결하여 구성하였다.

잡음을 제거하기 위해 제어기의 아날로그 전원과 디지털 전원을 분리하여 사용하였고 모든 배선은 실드 선을 사용하였다.

제안한 궤환 퍼지제어기의 성능 평가를 위해 기준

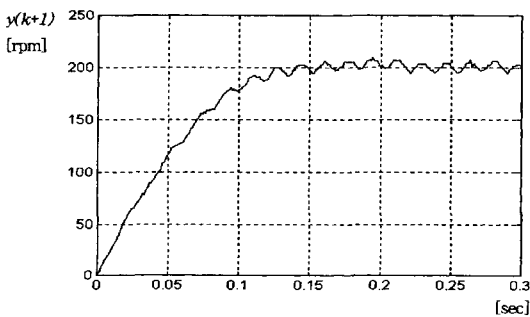


그림 7. 무 부하시 기본 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력: 80[kg/cm<sup>2</sup>].)

의 퍼지제어기와 다중 퍼지제어기(두개의 퍼지 제어 규칙 사용)를 비교 실험하였다. 그림 7, 8, 9는 무 부하상태의 실험결과이고, 그림 10, 11, 12는 부하상태의 실험결과이다.

3가지 제어기의 상승시간, 정정시간 그리고 정상상태 오차를 비교하면, 궤환 퍼지제어기가 가장 우수하고 그 다음이 다중 퍼지제어기 그리고 기본 퍼지제어

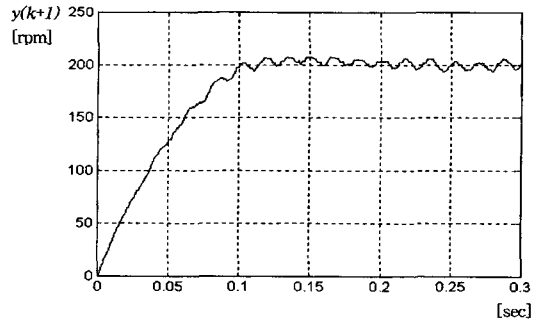


그림 8. 무 부하시 다중 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력: 80[kg/cm<sup>2</sup>].)

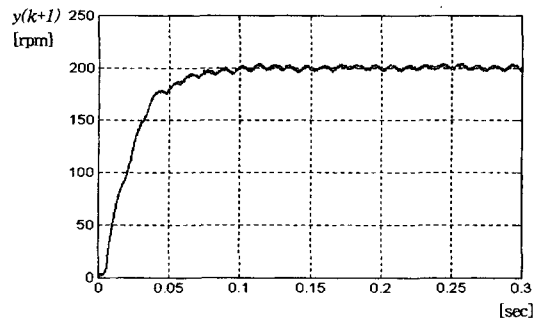


그림 9. 무 부하시 궤환 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력: 80[kg/cm<sup>2</sup>].)

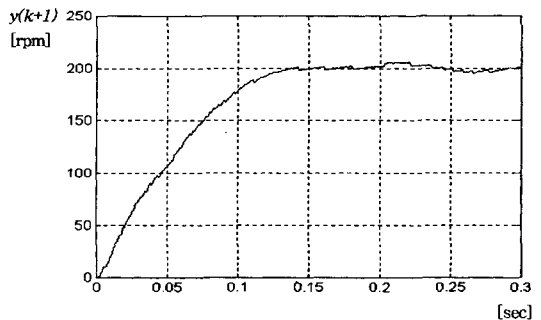


그림 10. 부하시 기본 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력: 80[kg/cm<sup>2</sup>], 관성부하: 79.882[kg/cm<sup>2</sup>].)

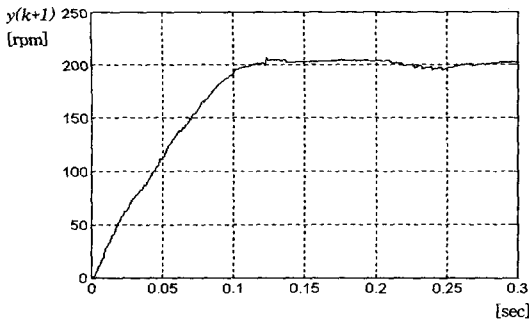


그림 11. 부하시 다중 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력:80[kg/cm<sup>2</sup>], 관성부하: 79.882[kg/cm<sup>2</sup>].)

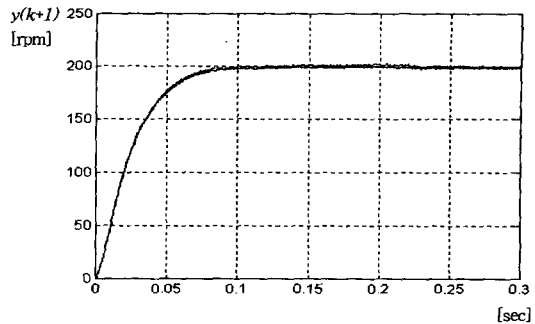


그림 12. 부하시 궤환 퍼지제어기 응답(설정치: 200[rpm], Oil 압력: 80[kg/cm<sup>2</sup>], 관성부하: 79.882[kg/cm<sup>2</sup>].)

표 2. 궤환 퍼지제어기와 기본 및 다중 퍼지제어기의 결과비교(설정치: 200[rpm], Oil 압력:80[kg/cm<sup>2</sup>].)

제어기 종류	상승시간	정정시간	정상상태오차	샘플링 시간	
무부하시	기본퍼지제어기	94 ms	107 ms	4.9%	2.8 ms
	다중 퍼지제어기	74 ms	96 ms	4.1%	2.8 ms
	궤환 퍼지제어기	44 ms	61 ms	4.1%	2.8 ms
부하시(관성부하 :79.882[kg/cm <sup>2</sup> ])	기본퍼지제어기	91 ms	115 ms	3.3%	2.8 ms
	다중 퍼지제어기	80 ms	98 ms	3.2%	2.8 ms
	궤환 퍼지제어기	48 ms	65.2 ms	2.7%	2.8 ms

기이다. 그러므로 제안한 궤환 퍼지제어기가 우수함을 확인할 수 있다.

무 부하시 정상 상태에서의 리플이 부하시의 정상 상태 리플보다 큰 것은 부하를 연결하는 축과 유압 모터 사이의 커플러가 스프링 형태여서 커플러가 일종의 관성체로 작용하기 때문이며, 관성 부하를 부가 하였을 때는 관성 부하가 커플러의 영향을 포함하기 때문에 이로 인하여 리플이 줄어들었다. 무 부하시 리플이 주기적으로 좀 크게 나타나는 것은 스프링 커플러에 의한 것이고 큰 리플속에 포함된 작은 리플은 제어기에서 디지털 회로가 동작 할 때 나타나는 스위칭 잡음으로서 주로 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드가 제어 알고리즘을 수행할 때 DSP 프로세서에 의해서 유도되는 잡음이다.

### 5. 결 론

일반적으로 제어기 설계 방법은 먼저 제어하고자 하는 제어대상 즉 플랜트에 대한 자료를 수집하여 수학적 모델링을 한 다음 제어기를 설계한다.

그러나 본 논문에서는 플랜트를 완전하게 수학적으로 모델링하지 않고, 최소의 정보만으로 설계한 제어기를 사용할 수 있다. 즉 제안한 궤환제어기는 플랜트

의 수학적 정보를 완전히 필요로 하지 않고, 단지 입·출력 조건과 플랜트의 차수만 알면 적용할 수 있도록 설계하였다. 궤환 퍼지제어기는 비선형적인 요소가 강한 플랜트에 우수한 성능을 나타낸다.

앞으로의 연구 방향은 제어기의 과도응답 부분에서 상승시간을 개선해야 할 것이며 제어기 구현시 병렬 처리 기술을 도입함으로써, 프로세서의 처리 속도가 단축 되도록 해야한다.

### 참고문헌

- [1] H. J. Zimmerman, "Methods and Applications of Fuzzy Mathematical Programming", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 97-120, 1992.
- [2] R. R. Yager, D. P. Filev, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control", Canada, John Wiley & Sons, Inc., pp. 1-383, 1994.
- [3] S. Tzafestas, Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 37, No. 5, pp. 365-371, Oct. 1990.
- [4] D. Willaelys and N. Malvache, "The Use of Fuzzy Sets for the Treatment of Fuzzy Information by Computer", An Introduction to Fuzzy Logic

Applications in Intelligent systems Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 314-316, 1992.

[5] D. Filev, "Fuzzy Modeling of Complex Systems", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 404-408, 1992.

[6] H. Tanaka, T. Tsukiyama, and K. Asai, "A Fuzzy System Model Based on the Logical Structure", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 546-554, 1992.

[7] S. A. Orlovsky, "Decision-Making with a fuzzy Preference Relation", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 717-723, 1992.

[8] R. M. Tong, "Some Properties of Fuzzy Feedback Systems", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 333-336, 1992.

[9] W. E. Bandler and L. Kohout, "Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operations", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 88-96, 1992.

[10] D. Dubois and H. prade, "A Theorem on Implication Functions Defined from Triangular Norms", An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent systems, Edited by R. R. Yager, L. A. Zadeh, Netherlands, Kluwer Academic Pub., pp. 105-111, 1992.

[11] 채석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 서울, 청문각, pp. 207-353, 1995.

[12] W. J. M. Kickert and E. H. Mamdani, "Analysis of a

Fuzzy Logic Controller", Reading in Fuzzy Sets for Intelligent Systems Edited by D. D. Dubois and R. R. Yager, San Mateo, California, Morgan Kaufmann Pub. Inc., pp. 290-297, 1993.

[13] Analog Devices, "32/40-Bit IEEE Floating-Point DSP Microprocessor ADSP-21020", Technology Note, Analog Devices, Inc., pp. 1-32, 1992.

[14] H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., pp. 1-354, 1967.

[15] J. M. Jacob, "Industrial Control Electronics Applications and Design", London, Pentice-Hall International Editions, pp. 1-549, 1996.



**이 상 윤 (Sang-Yun Lee)**

1986년 : 금오공과대학교 전자공학과 졸업  
 1991년 : 금오공과대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1998년 : 경남대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 현재 : 경남대학교 전기전자공학부 시간강사



**신 위 재 (Wee-Jae Shin)**

1975년 : 동아대학교 전자공학과 졸업  
 1979년 : 동아대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1989년 : 동아대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 1995년~1997년 : 대한전자공학회 부산·경남 지부장  
 1998년 : 일본 구주대학 객원교수  
 1983년~현재 : 경남대학교 전기전자공학부 교수