

적응 가변구조 개념을 이용한 퍼지 제어기의 설계

朴貴泰* 李起常** 朴太洪* 婁相旭* 金星鎬*

* 高麗大學校 電氣工學科, ** 禮國大學校 電氣工學科, # 群山大學校 制御計測工學科

Design of Fuzzy Logic Controller based on Adaptive Variable Structure Controller

Gwi-Tae, Park · Kee-Sang, Lee · Tae-Hong, Park · Sang-Wook, Bae · Sung-Ho, Kim

* Dept. of Elec. Eng., Korea Univ., ** Dept. of Elec. Eng., Dankook Univ., # Dept. of Control & Instrumentation Eng., Kunsan Univ.

Abstract

In this paper, the author proposed FLVSC (Fuzzy Logic Variable Structure Controller), of which control rules are extracted from the concepts of VSC (Variable Structure Control). FLC (Fuzzy Logic Controller) based on linguistic rules has the advantages of not needing of some exact mathematical model for plant to be controlled. The proposed method has the characteristics which are viewed in conventional VSC, e.g. insensitivity to a class of disturbances, parameter variations and uncertainties in sliding mode. In addition, the method has the properties of FLC - noise rejection capability etc. The computer simulations have been carried out for a DC servo motor to show the usefulness of the proposed method and the effects of disturbances and parameter variations are considered.

이 제어기는 소위 슬라이딩모드에서 파라미터 변화, 모델의 불확정성 및 외란에 대해 강인하다는 가변구조 제어계의 특성과 원천적인 FLC의 강인성(robustness)을 조화시킨 결과임을 고려할때 강인성 면에서 타 제어기법에 비해 우월할 뿐 아니라 가변구조 제어계의 적응성 및 정확성등의 특성을 함께 갖고 있다고 할 수 있다. 최근에 FLC의 개념과 VSC의 개념을 도입한 연구가 많이 발표되고 있으나[5,6] 본 연구에서 제안하고자 하는 FLVSC (Fuzzy Logic Variable Structure Controller)는 설계과정에서 수학적모델이 필요 없고 단지 기존의 FLC설계에 요구되는 기본적 계통 정보만에 의해 설계가 가능하므로 모델링이 불가능하거나 모델의 불확정성 정도가 심하여 고전적인 VSC의 적용이 불가능한 기타 계통 제어에도 효과적으로 사용될 수 있다.

1. 서론

FLC (Fuzzy Logic Controller)는 1965년 Zadeh에 의해 제안된 퍼지 집합 이론의 중요 응용분야로서 수학적 모델링이 불가능한 미지시스템 또는 비선형성, 시변성 및 기타의 불확실성을 포함한 수학적 모델로 표현되는 소위 잘 정의되지 않은(ill-defined) 계통 제어에 효과적으로 도입되고 있다.

FLC의 기본개념은 Zadeh에 의해 제안되었지만 제어 응용의 최초의 시도는 1974년 Mamdani에 의해 이루어졌으며 그 연구 결과 해석적 제어기법의 도입이 어려운 계통에의 적용이 효과적으로 수행된 바 있다. FLC의 성능은 물론 적용된 제어규칙에 크게 좌우되지만 일반적으로 제어규칙 습득을 위한 체계적방법은 없으며 거의 모든 경우 시행착오에 의존하고 있는 실정이다.[1-3]

1976년 MacVicar-Whelan이 제안한 제어규칙은 프로세스 출력에 대한 목표치와 측정치의 편차(e : error)와 편차의 변화(ce : change in error)에 의하여 제어입력의 증분을 결정하는 meta-rule에 근거를 두고 있다.[4] 그러나 이 FLC의 기본개념과 제어규칙은 단지 직관적으로 관찰될 수 있는 정도의 것이기 때문에 제어규칙(성능) 또는 평가지표의 도입이 요구되는 고성능 제어계에의 적용이나 또한 PI제어기와 유사한 특성을 갖기 때문에 순수적분을 포함하는 계통의 서보(위치)제어계에의 도입은 곤란하다.

본 연구의 목적은 FLC의 핵심이면서도 체계적 설계방법이 없는 제어규칙 습득의 문제점을 극복하기 위하여 서보계통 제어에 효과적으로 적용될 수 있는 제어규칙을 제안하고 이 제어규칙을 이용한 FLC의 유용성을 입증함에 있다.

제안된 FLC에 도입될 일반적인 제어규칙은 최근 서보제어와 관련하여 주목을 받고 있는 가변구조제어(VSC : Variable Structure Control) 개념에서 도출하였으며 이를 도입하여 제안된 제어기는 계통의 출력 목표치와 측정치의 편차(e)와 그 증분(ce)으로 형성된 2차원 공간에서 미리 정해진 (VSC의 경우 switching line) 과도기간중의 제어규칙을 명백하게 도입할 수 있다는 중요한 특징을 갖는다. 또한

2. 퍼지 제어기 및 가변구조 제어기

일반적으로 FLC 설계과정은 다음과 같은 단계로 구성된다.[7,8]

- 언어적 제어규칙의 선정 및 표현
- 퍼지화 (fuzzification)
- 퍼지 implication 과 추론(inference)
- 비퍼지화 (defuzzification)

또한 가변구조 제어기의 설계과정은 다음과 같다.[9]

- 상평면(phase plane)상에서 설계자가 원하는 제어구격을 나타내는 스위칭평면(라인)의 설계
- 계통의 상평면 궤적을 선정된 스위칭평면에 도달시키고, 그 스위칭평면을 따라 슬라이딩 운동을 하여 원하는 최종상태에 이르게하는 제어입력의 결정

예를 들어, 편차(e)와 그 도함수(ė)를 각각 상태변수 x_1, x_2 를 갖는 2차계에 대하여 스위칭라인은 두 변수의 선형결합

$$s(x) = c_1x_1 + c_2x_2 \quad (2.1)$$

으로 정의되며 편차 $e = x_1$ 과 그 증분 $\dot{e} = x_2$ 가 $s(x_1, x_2) = 0$ 을 따라 원점에 도달하기 위해서는 식 (2.2)의 스위칭 제어입력이 도입되어야한다.

$$u = \begin{cases} u^+ > u_{eq} & \text{if } s(x) > 0 \\ u^- < u_{eq} & \text{if } s(x) < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 u_{eq} 는 $s = 0$ 를 만족하도록 결정된 등가 제어입력이다.

3. 제안된 제어 구조

3.1 제어규칙

본절에서 제안하는 FLC의 제어규칙은 최근 제어이론 및 응용분야, 특히 서보제어용으로 주목을 받고 있는 가변구조 제어 방식에서 추출하였으며 따라서 FLC가 지니는 기본적인 특성, 예를 들면 모델링이 불가능하거나 시변성 또는 비선형성 등으로 해석적인 제어가 어려운 계통에 대하여 제어를 설계할 수 있는 특성 및 외란 및 파라미터 변화에 대한 강인성과 가변구조 제어기의 적응성 등의 특성을 함께 가질 수 있다.

제어규칙은 PD제어기의 제어입력 형태가 상평면상에서, RP (representation point) 가 switching line에서의 수직 거리에 비례한다는 사실로부터 Fuzzy 제어규칙을 추출한 KAWAJI[10]의 방법을 가변구조의 특성을 얻기 위하여 가변구조의 switching line 과 switching 입력의 관계로부터 추출한다.

즉, 계통 출력의 편차 (e) 및 편차의 변화 (\dot{e})에 의한 등가 입력을 다음과 같이 정의하는 상평면상의 두개 변수에 의한 등가입력으로 계산한다.

$$u_{eq} = f(e, \dot{e}) \rightarrow u_{eq} = f(\theta_e, D)$$

여기서, θ_e 와 D 는 그림 1.에서와 같이 4상한에서 설정된 switching line과 RP를 고려하면, θ_e 는 현재 RP의 위상각 - switching line 의 위상각($\theta_e = \theta_c - \theta_r$), D는 원점으로부터 현재 RP까지의 거리, $D = \sqrt{e_x^2 + \dot{e}_x^2}$ 로 정의된다.

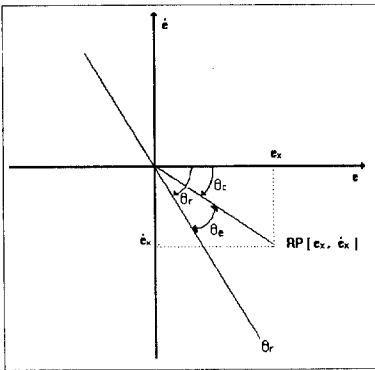


그림 1. 상평면상에서의 위상편차 및 거리
Fig. 1. Phase error and distance in phase plane

현재의 RP의 위상각 θ_c 는 $\theta_c = \tan^{-1}(\dot{e}_x/e_x)$ 로 계산할 수 있으며 RP가 존재하는 상한에 대한 θ_c 의 범위는 표 1. 과 같다.

표 1. 위상 편차 θ_c 의 범위
Table 1. The range of phase error θ_c

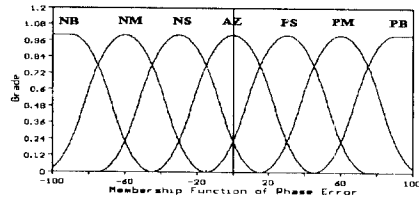
상한	e_x	\dot{e}_x	θ_c
1	+	+	$-360^\circ < \theta_c < -270^\circ$
2	+	-	$-90^\circ < \theta_c < 0^\circ$
3	-	+	$-270^\circ < \theta_c < -180^\circ$
4	-	-	$-180^\circ < \theta_c < -90^\circ$

또한 상평면에서 switching이 발생하기 위하여 RP가 θ_r 보다 큰 위치에 있는 경우 즉, $\theta_c > \theta_r$ 인 경우 RP를 θ_r 의 switching line으로 보내주는 positive 입력($u_{eq} > 0$)이 필요하며 RP가 θ_r 보다 작은 위치에 있는 경우 즉, $\theta_c < \theta_r$ 인 경우 negative 입력($u_{eq} < 0$)가 필요하다는 사실과 switching line 으로부터의 RP까지의 수직 거리가 동일하더라도 원점에 가까울수록 작은 크기의 입력이 요구될 것이라는 사실로부터 θ_r 로 부터 $\pm 90^\circ$ 크기의 편차 및 거리에 대한 새로운 제어 규칙을 작성하면 다음 표 2.와 같으며 사용된 fuzzy 변수의 membership 함수는 그림 2.와 같다.

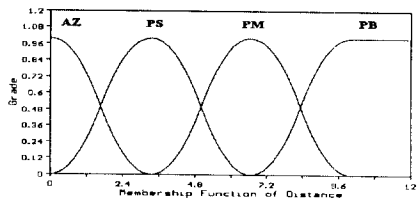
표 2. 제안된 제어규칙
Table 1. Proposed rules

$\theta_e \setminus D$	AZ	PS	PM	PB
NB	NS	NM	NB	NB
NM	NS	NM	NM	NB
NS	AZ	NS	NM	NM
AZ	AZ	AZ	AZ	AZ
PS	AZ	PS	PM	PM
PM	PS	PM	PM	PB
PB	PS	PM	PB	PB

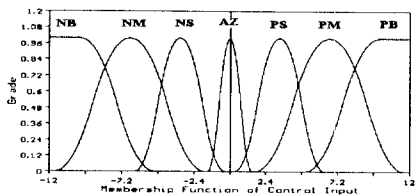
NB : Negative Big
NM : Negative Medium
NS : Negative Small
AZ : Approximately Zero
PS : Positive Small
PM : Positive Medium
PB : Positive Big



(a) 위상 편차 θ_e 에 대한 membership 함수



(b) 거리 D에 대한 membership 함수



(c) 제어 입력에 대한 membership 함수

그림 2. Fuzzy 변수의 membership 함수
Fig. 2. Membership function of fuzzy variables

오버슈터가 발생하지 않는 위치서보제어의 경우에는 상평면상의 4상한내에서의 제어규칙만으로도 제어가 가능하겠지만 외란투입 상황을 고려하여 모든 상황에 대한 제어규칙을 준비한다. [11] 그림 3.와 같이 $\theta_r > 90^\circ$ 이거나 $\theta_r < 90^\circ$ 인 경우 원점으로 부터의 거리가 동일한 RP_1, RP_2 에 대하여 위상 편차 (θ_e)가 동일한 경우 switching line 으로 보내주는 제어입력을 동일하다고 보면 $|\theta_e| > 90^\circ$ 인 경우에는 $\theta_{c1} = 180^\circ - (\theta_r - \theta_{c2})$ 에 해당하는 규칙과 대응됨을 알 수 있고 전 상한에 대한 제어규칙을 적용할 수 있게 된다.

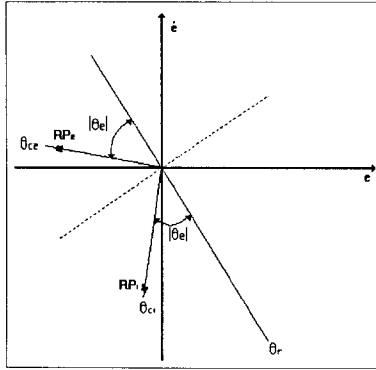


그림 3. $\theta_r > 90^\circ$ 인 경우 제어 규칙의 대응
Fig. 3. Corresponding control rule for $\theta_r > 90^\circ$

3.2 제어규칙의 수정

표 2.의 제어규칙은 $\theta_e = NM, D = PS$ 인 경우 다음 예와 같은 의미를 갖는다.

IF Phase error(θ_e) is Negative Medium and
IF Distance(D) is Small,
THEN Control input is Negative Medium .

위의 제어규칙은 $\theta_e = \theta_c - \theta_r = 0$ 를 중심으로 θ_e 가 Negative이면 Negative 입력을 θ_e 가 Positive이면 Positive 입력을 투입하도록 동작한다. 따라서 이 초기규칙은 $\theta_e(NS)$ 와 $\theta_e(PS)$ 사이에 대응하는 입력을 등가제어입력 u_{eq} 로 간주한 것으로 볼 수 있고 따라서 실제 u_{eq} 를 기준으로하는 가변구조제어 입력조건 식 (3.1)를 만족하지 못한다.

$$u = \begin{cases} u' > u_{eq} & \text{if } \theta_e > 0 \\ u' < u_{eq} & \text{if } \theta_e < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

만일 등가 제어입력을 알고 있다면 이를 모든 입력크기에 더해줌으로써 식(3.1)의 조건을 만족시킬 수 있지만, 이 등가 제어입력은 계통의 수학적모델에 근거하여 구해져야하므로 미지계통을 대상으로 하는 경우 그 계산은 불가능하다. 그럼에도 불구하고 위의 제어규칙이 매우 유용하게 사용될 수 있는 근거는 제어상황에서 θ_e 와 D가 전체공간내의 요소 값인 한 그에 대응하는 제어입력이 결정될 수 있고 따라서 그 규칙에 의해 규정되는 라인을 따라 슬라이딩운동을 발생한다는 사실이다. 이 슬라이딩운동의 발생은 위 제어규칙의 가장 큰 특징으로서 해석적인 VSC에서와 같은 2분적논리 즉, $\theta_e > 0$ 또는 $\theta_e < 0$ 로는 얻을수 없는 특성이며 이러한 특성은 전체공간내에서 θ_e 가 각 언어치에 대응하는 여러개의 퍼지 부집합으로 분할되어 있고 또 θ_e 의 한 언어치에 대해서도 거리 D에 따른 제어입력이 일관성을 갖기 때문에 θ_e 의 어떤 언어치를 유지하면서 D를 줄일수 있는 제어입력이 발생된다는 사실로부터 얻어진다.

이상의 사실은 θ_r 을 기준으로 기준 슬라이딩라인과는 다른 자생된(self-generated)된 슬라이딩라인 즉, θ_e 의 특정한 레벨(예를 들면 $\theta_e = PS$)을 중심으로 다음 식 (3.2)와 같은 관계가 만족됨을 의미한다.

$$u = \begin{cases} u' > u_{eq}(\text{unknown}) = u(\theta_e(PS)) & \text{if } \theta_e > \theta_e(PS) \\ u' < u_{eq}(\text{unknown}) = u(\theta_e(PS)) & \text{if } \theta_e < \theta_e(PS) \end{cases} \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 미지의 u_{eq} 는 자생된 슬라이딩라인에서 슬라이딩운동을 하게 해주는 등가 제어입력이다. 예를들어 그림 4.에서와 같이 θ_r 을 달성하기 위한 등가 제어입력이 $\theta_e(PS)$ 에 대응하는 입력 준위라면 초기 제어규칙에 의해 형성되는 슬라이딩 라인의 위상과 θ_r 와의 편차(θ_e)는 $\theta_e(PS)$ 를 유지하게 되고 슬라이딩 라인의 위상은 $\theta_c = \theta_r - \theta_e(PS)$ 로 된다.

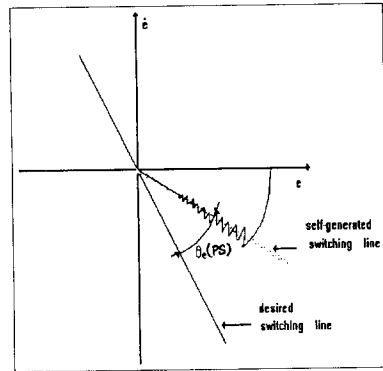


그림 4. 초기 제어규칙에 의한 상평면도
Fig. 4. Phase plane for the initial control rules

이상과 같은 초기 제어규칙에 의한 제어결과는 초기 제어규칙이 등가 제어입력을 영으로 간주하여 작성된 것이기 때문에 그림 4.과 같이 요구되는 스위칭라인에서 슬라이딩운동을 발생시키는 등가입력 준위에 대응하는 θ_e 만큼 편기된 스위칭라인을 따라 슬라이딩운동을 하게 된다. 따라서 요구하는 스위칭라인을 따라 슬라이딩 운동을 발생시키기 위하여는 초기 제어규칙을 수정해야 한다. 이 제어규칙의 수정은 초기 제어규칙의 적용결과 얻어지는 슬라이딩라인과 요구되는 슬라이딩라인의 위상편차 θ_e 의 언어치에 대응하는 제어입력 집합이 등가입력에 대응된다는 사실로부터 쉽게 이루어질수 있으며 그 개정방법은 위의 등가 제어입력이 $\theta_e = 0$ 또는 $NS(\theta_e)$ 와 $PS(\theta_e)$ 의 중간 단계에 대응되도록 look-up table에서의 입력집합을 상향 또는 하향 조정하는 것이다. 이렇게하여 얻어지는 제어규칙은 $\theta_e = 0$ 또는 $NS(\theta_e)$ 와 $PS(\theta_e)$ 의 중간 단계의 등가 제어입력에 대응하는 입력 준위를 갖게되고 그림 5.에서와 같이 상평면내적은 요구되는 스위칭라인을 따라 슬라이딩 운동을 하게된다.

또한 가변 구조 제어기법에서 상평면에서의 기준 switching line 을 적응변화시켜 switching line까지의 도달시간을 줄이므로써 과도상태에서 응답 강인성을 향상시킬 수 있다.[12] 따라서 본 논문에서도 기준 θ_e 의 크기를 점차로 증가시킴으로써 강인성을 향상시키고자 한다.

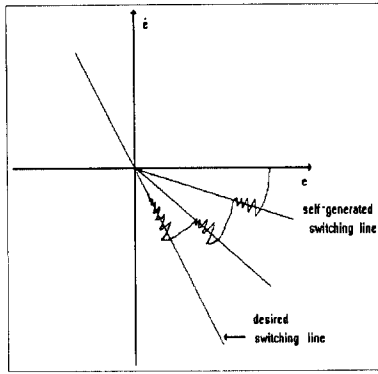


그림 5. 제어규칙을 수정하는 경우에 대한 상평면궤적
Fig.5. Phase plane trajectory during rule modification

3.3 성능 향상

FLC는 복수개의 제어규칙으로부터 규칙에 대한 적합도에 의하여 제어입력이 결정되기 때문에 잡음성분이나 작은 외란에 대하여는 강인하다고는 하나, 큰 외란이 투입된 경우에는 제어 성능이 저하될 수 있다. 따라서 이러한 경우 제어기 구조를 변경할 필요가 있으며 본 논문에서는 그림 6. 과 같은 구조를 사용한다.

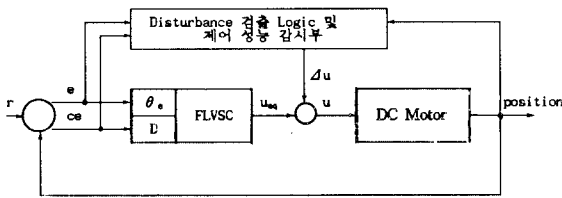


그림 6. 제안된 제어계의 구성
Fig. 6. The proposed FLC scheme

4. 컴퓨터 시뮬레이션

제안된 기법의 유용성을 보이기 위하여 다음과 같은 동특성을 갖는 직류 모터의 위치제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. [13]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -94.6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -99.8 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ f \end{bmatrix}$$

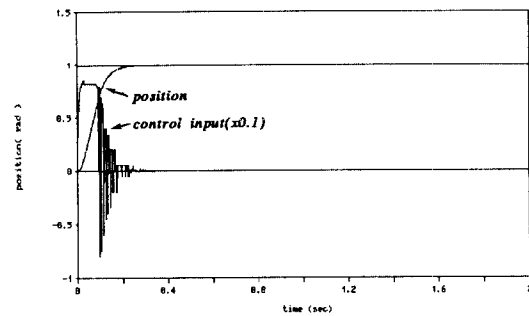
여기서, x_1 : 위치 편차
 x_2 : 편차 속도
 f : 외란

또한 3.3 절에 서술한 바와 같이 제어 규칙을 수정하기 용이 하도록 그림 2.의 각 Fuzzy 변수들을 표 3.에서와 같이 13 X 13 크기의 look-up table로 작성하여 위치제어에 사용하였다.

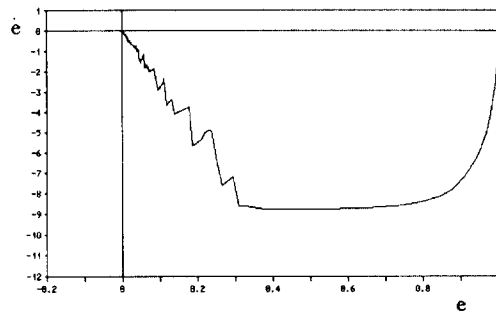
표 3. 위치제어에 사용된 Fuzzy look-up table
Table 3. Fuzzy look-up table for proposed FLVSC

θ_a \ D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
-6	-4.00	-4.74	-6.00	-7.26	-8.00	-8.37	-9.38	-10.60	-11.27	-11.34	-11.36	-11.83	-12.00
-5	-4.00	-4.55	-6.00	-7.45	-8.00	-8.28	-9.00	-9.72	-10.00	-10.28	-11.00	-11.72	-12.00
-4	-3.38	-4.07	-5.06	-6.00	-7.38	-7.77	-8.00	-8.23	-8.62	-9.11	-10.00	-10.89	-11.38
-3	-2.00	-2.55	-4.00	-5.45	-6.00	-6.28	-7.00	-7.72	-8.00	-8.28	-9.00	-9.72	-10.00
-2	-0.73	-1.77	-3.23	-4.29	-4.73	-5.40	-6.62	-7.63	-8.00	-8.37	-8.62	-8.66	-8.73
-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0	0.00	0.55	2.00	3.45	4.00	4.55	6.00	7.45	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
1	0.00	0.55	2.00	3.45	4.00	4.55	6.00	7.45	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
2	0.73	1.77	3.23	4.29	4.73	5.40	6.62	7.63	8.00	8.37	8.62	8.66	8.73
3	2.00	2.55	4.00	5.45	6.00	6.28	7.00	7.72	8.00	8.28	9.00	9.72	10.00
4	3.38	4.07	5.06	6.00	7.38	7.77	8.00	8.23	8.62	9.11	10.00	10.89	11.38
5	4.00	4.55	6.00	7.45	8.00	8.28	9.00	9.72	10.00	10.28	11.00	11.72	12.00
6	4.00	4.74	6.00	7.26	8.00	8.37	9.38	10.60	11.27	11.34	11.36	11.83	12.00

그림 7. 은 제안된 FLVSC의 단위 계단응답 및 상평면궤적을 나타내고 있다. 또한 그림 8. 에서는 외란 투입에 대한 응답 특성을 보인다. 시뮬레이션 결과 계단형 외란외에도 정현적으로 변하는 외란에 대하여도 강인한 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 특히 그림 9. 에서와 같이 계통 파라미터 변화시에도 FLC의 고유특성인 강인함을 나타내어 응답에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

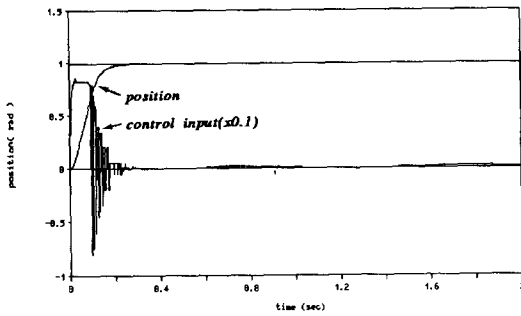


(a)

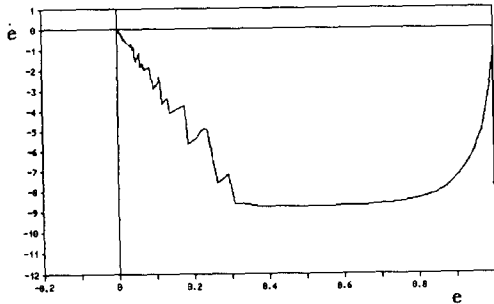


(b)

그림 7. FLVSC의 계단응답 및 상평면궤적
Fig. 7. Unit step response and phase plane trajectory

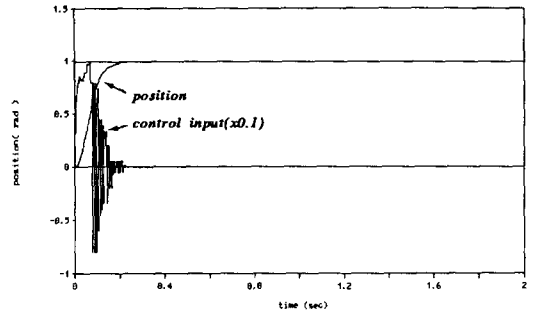


(a)

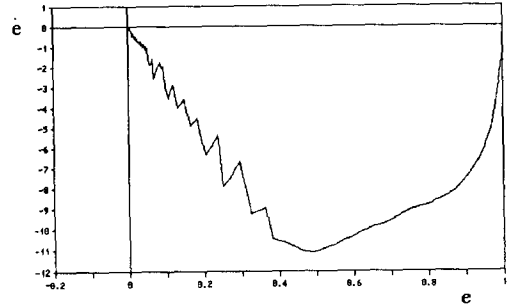


(b)

그림 8. 외란투입시 FLVSC의 계단응답 및 상평면궤적
Fig. 8. Unit step response and phase plane trajectory with disturbance.



(a)



(b)

그림 9. 파라미터 변동시 FLVSC의 계단응답 및 상평면궤적
Fig. 9. Unit step response and phase plane trajectory with parameter variation.

5. 결 론

본 연구에서는 가변구조 제어기법으로부터의 규칙 추출을 통해 전형적인 가변구조제어의 특성인 슬라이딩모드에서의 파라미터 변화에 대한 강인성 및 속응성과 FLC가 갖는 불확실한 모델에 대한 제어 가능성등의 특성을 동시에 얻을 수 있는 위치 서보제어 기법을 제안하였다. 또한 제어성능 감시기구를 통해 성능향상을 큰 외란에 대한 대응을 하였다. 여러가지 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검토하였으며 그 결과 모델을 완전히 알고 있는 상태에서 설계된 VSC 보다 우수한 성능을 가짐을 확인하였다.

또한 본 연구에서는 단일 입력력만을 갖는 위치 서보제어계에 적용하기 위한 FLVSC를 개발하였으나 이 제어계 설계기법은 속도제어용으로의 변경이 가능하며, 자기구성 제어기(self-organizing controller)의 도입으로 보다 강인한 제어기 형태를 구성할 수 있을 것으로 생각되며 이후의 과제로 삼고자한다.

참고 문헌

1. E.H.Mamdani and S.Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *Int.J.Man Machine Studies*, vol.7, pp.1-13, 1974
2. C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Sytems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol 20, no.2, pp.404-435, Mar/Apr, 1990.
3. R.R.Yager, R.M.Tong et.al., *Fuzzy Sets and Applications :Selected Papers by L.A.Zadeh*, John Wiley & Sons, Inc., 1987.

4. P.J.MacVicar-Whelan, "Fuzzy Sets for Man-machine Interaction", *Int.J. Man-Machine Studies*, vol.8, pp. 687-697, Nov., 1967.
5. Roman Swiniarski, "Neuromorphic Fuzzy Variable Structure Controller", pp1221-1226, 1990
6. S.Kawaji, N.Matsunaga, "Fuzzy Control of VSS Type and Its Robustness", *IFSA '91, Brussels*
7. Braae, M.and Rutherford, D.A, "Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller," *Automatica*, vol.13, pp.553-557
8. Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Sytems", *IEEE Control Syst. Mag.* vol.9, no.3, pp.65-72, APR, 1989.
9. R.A.DeCarlo, S.H.Zak, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems : A Tutorial", *Proceedings of the IEEE*, vol.76, no.3, Mar.1988.
10. S. Kawaji, T. Maeda, "Fuzzy Control Using Knowledge Acquired From PD Control", *IECON '91, Japan*
11. G.T.Park, K.S.Lee, T.H.Park, "A new FLC based on the variable structure control", *ConFuse '92, Seoul, Korea*
12. U.Itkis, *Control Systems of Variable Structure*, John Wiley & Sons, 1976.
13. F. Harashima, H. Hashimoto, "MOSFET Convert-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control", *IEEE Trans. on Industrial Elect.*, vol.IE-32, no.3, Aug., 1985