

## 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 양측식 가동 자석형 LDM의 위치 제어

김 전우<sup>0</sup>, 김 영태, 이 동욱

동국대학교 전기공학과

### Position Control of a Double-Sided MM Type LDM Using Fuzzy Sliding Mode Control

Jin-Woo Kim<sup>0</sup>, Young-Tae Kim, Dong-Wook Lee

Dept. of Electrical Eng. Dongguk University

**Abstract** - Variable Structure Control(VSC) scheme with sliding mode is widely used to keep a control system insensitive to parameter variations and disturbances. However, the conventional sliding mode control has the undesired phenomenon of chattering which may become a serious problem. Also the restriction of the sliding mode regime cannot guarantee the insensitivity throughout an entire response. In this paper, the sliding surfaces, which are composed of three-line segments, are used to remove the reaching phase. Also, the concept of fuzzy logic is incorporated with the sliding mode control in order to control the unknown or partially known systems effectively. The proposed method is applied to a Double-Sided MM Type LDM to show its usefulness.

### 1. 서 론

제어 시스템을 파라미터의 변화나 외란의 영향에 둔감(건실:Robustness)하게 설계한다는 것은 어렵다. 특히, 시스템이 큰 외란에 영향을 받고 있다거나 또는 넓은 영역에 걸쳐 파라미터의 변화가 일어나는 시스템에서는 더욱 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법의 하나는 시스템의 이득을 높여서 파라미터의 변화나 외란의 영향을 줄일 수 있는데 이 방법에서는 안정도가 문제이다[1].

위와 같은 문제에 대해 모터 제어 시스템에 널리 응용되고 있는 가변 구조 제어 방법은 빠른 응답과 외란 및 파라미터 변화에 견실하며 오버슈트가 발생하지 않는다. 그러나 이 제어기는 매우 높은 스위칭 주파수가 요구되며 실제로 이를 구현하기가 곤란하므로 이로 인한 채터링(Chattering)현상이 나타나게 된다. 또한, 상태의 초기 위치가 스위칭 평면을 벗어나 있을 때, 이 상태로부터 스위칭 평면에 도달하기까지의 기간(Reaching Phase)에는 슬라이딩 모드가 일어나지 않으므로 이 기간 동안에는 파라미터의 변동이나 외란에 민감하게 된다[4]. 그리고 수학적으로 모델링이 불가능한 시스템은 슬라이딩 모드 제어를 적용하기가 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 가속, 정속 및 감속 구간으로 이루어진 스위칭 평면을 설정하여 Reaching Phase를 제거함과 동시에 고전적인 슬라이딩 모드 제어 시스템에서 제어 입력을 발생시키는 것과는 달리 스위칭 평면 S와 시간에 대한 미분형  $\dot{S}$ 를 입력 변수로 하는 퍼지 규칙을 결정하여 제어 입력을 발생시키는 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 설계하고 이를 양측식 가동 자석형 LDM의 위치 제어에 적용하였다.

### 2. 시스템 표현

본 연구의 제어 대상인 양측식 가동 자석형 LDM은 스트로크(Stroke) 구간이 제한되어 있기 때문에 소형기기에 주로 이용되며 정밀한 위치제어가 요구된다. 다음의 식은 LDM에 대한 전기-기계 결합계의 등록성을 나타낸다.

$$u = R\dot{i} + L \frac{di}{dt} + K_E v \quad (1)$$

$$f = K_E \dot{i} = M \frac{dv}{dt} + Dv \quad (2)$$

여기서,

$u$  : 입력 전압

$R$  : 고정자 코일의 저항

$K_E$  : 역기전력 상수

$L$  : 고정자 코일의 인덕턴스

$f$  : 발생추력

$K_F$  : 추력상수

$M$  : 가동자의 질량     $D$  : 점성마찰계수

$v = \frac{dx}{dt}$ 이며  $x$ 는 변위이다.

제어기 설계를 간략하게 하기 위해 식(1)과 식(2)의 전기적 시장수를 무시하고 점성마찰계수  $D=0$  이라 가정하면 다음과 같은 상태 공간 모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K}{T} \end{pmatrix} U \quad (3)$$

$$\text{여기서, } T = \frac{RM}{K_E K_F}, K = \frac{1}{K_F}$$

### 3. 가변구조제어

슬라이딩 모드 제어란 시스템의 궤적이 상태 공간에서 미리 설정된 초평면(Hyperplane)을 따라 미끄러지도록 하여 시스템의 파라미터 변동이나 외란에 둔감한 특성을 갖도록 하는 이론으로써 제어 입력은 스위칭 평면에서 스위칭 논리에 따라 시스템의 구조를 변화시킨다. 이가 가변 구조 입력에 따라 상태 공간의 어떤 위치에서도 상태는 스위칭 평면을 향하고 일단 거기에 도달하면 이 평면을 벗어나지 않고 평면을 따라 이동하는데 이 현상을 슬라이딩 모우션(Sliding Motion)이라 한다.

이번 절에서는 기존의 가변 구조 제어 이론에서 존재하는 Reaching Phase를 제거함으로써 이 기간 동안에의 파라미터 변화나 외란의 영향으로부터 빨간하게 하고 동시에 빠른 응답을 얻기 위하여 스위칭 평면을 가속, 정속 및 감속 구간으로 설정하여 제어기를 구성하였다.

다음과 같이 스위칭 평면을 정의한다.

$$S_1 = X_2 + a(X_1 - X_{10}) \quad (4)$$

$$S_2 = X_2 + v \quad (5)$$

$$S_3 = X_2 + cX_1 \quad (6)$$

여기서,  $a < 0$ ,  $v < 0$ ,  $c > 0$ ,  $X_{10}$ : 초기값

그림 1은 초기 값이 음수일 때 스위칭 평면을 나타내며  $\eta_1$ 은 스위칭 평면  $S_1$ 과  $S_2$ 가 접할 때의  $X_1$ 의 값이고  $\eta_2$ 는  $S_2$ 와  $S_3$ 가 접할 때의  $X_1$ 의 값이다.

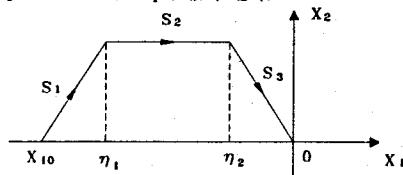


그림 1 스위칭 평면

제어 입력  $U$ 를 다음과 같이 정의하며 채터링을 억제할 목적으로 Saturation 함수를 쓴다.

$$U = -\psi_1 X_1 - \psi_2 X_2 - K \text{sat}(S) \quad (7)$$

$$\text{sat}(S) = \frac{S}{|S| + \delta}, \quad \delta: \text{작은 양의 정수} \quad (8)$$

슬라이딩 모드의 존재 조건  $SS' < 0$  을 만족하도록 스위칭 평면은 다음과 같이 전개된다.

i) 시간에 대하여 스위칭 평면  $S_1$ 을 미분하면

$$\begin{aligned} S_1' &= \dot{X}_2 + a\dot{X}_1 \\ &= -\frac{1}{T}X_2 + \frac{K}{T}U + aX_2 \\ &= -\frac{K}{T}\psi_1 X_1 + (a - \frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)X_2 \\ &\quad - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_1) \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에  $S_1$ 을 곱한다.

$$\therefore S_1 S_1' = -\frac{K}{T}\psi_1 S_1 X_1 + (a - \frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)S_1 X_2 - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_1) S_1 \quad (10)$$

식(10)이 항상 음이 되도록 이득  $\psi_1, \psi_2, K$ 를 결정하면 슬라이딩 모드의 존재 조건을 만족한다.

ii) 식(5)로부터

$$\begin{aligned} S_2' &= \dot{X}_2 \\ &= -\frac{1}{T}X_2 + \frac{K}{T}U \\ &= -\frac{K}{T}\psi_1 X_1 + (-\frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)X_2 \\ &\quad - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_2) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\therefore S_2 S_2' = -\frac{K}{T}\psi_1 S_2 X_1 + (-\frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)S_2 X_2 - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_2) S_2 \quad (12)$$

슬라이딩 모드 존재 조건을 만족하도록 식(12)의 이득을 결정한다.

iii) 식(6)으로부터

$$\begin{aligned} S_3' &= \dot{X}_2 + c\dot{X}_1 \\ &= -\frac{1}{T}X_2 + \frac{K}{T}U + cX_2 \\ &= -\frac{K}{T}\psi_1 X_1 + (c - \frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)X_2 \\ &\quad - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_3) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\therefore S_3 S_3' = -\frac{K}{T}\psi_1 S_3 X_1 + (c - \frac{1}{T} - \frac{K}{T}\psi_2)S_3 X_2 - \frac{K}{T}K \text{sat}(S_3) S_3 \quad (14)$$

식(14)가 음이 되도록 이득을 결정한다.

#### 4. 퍼지 슬라이딩 모드 제어

시스템이 복잡하거나 수학적으로 모델링하기가 어려운 시스템은 기존의 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 제어기를 설계하기가 곤란하다. 따라서 이러한 문제점의 해결 방안으로 기존의 슬라이딩 모드 제어를 개선한 퍼지 슬라이딩 모드 제어는 스위칭 평면  $S$ 와 시간에 대한 미분형  $S'$ 를 입력 변수로하고 슬라이딩 모드가 존재할 수 있도록 퍼지 규칙을 결정하여 시스템 모델과는 독립적으로 제어 입력  $U$ 를 발생시킴으로써 시스템이 불확실하여도 제어를 효과적으로 수행할 수 있다. 퍼지 추론은 Mamdani의 Max-Min Composition을 사용하였다. 추론을 거쳐 대응된 출력단의 소속 함수는 다수가 겹쳐지게 나타난다. 이 값들은 퍼지값이므로 실제 시스템의 제어 입력으로 사용되지 못하므로 겹쳐져 나타난 퍼지값 중 가장 효율적인 대표값을 얻기 위해 비퍼지화를 해야 한다[5]. 비퍼지화의 방법으로 본 연구에서는 무게중심 법을 사용하였다.

$S$ 와  $S'$  및  $U$ 의 소속 함수는 그림2, 그림3과 같으며 슬라이딩 모드가 존재할 조건  $SS' < 0$ 을 만족하도록 퍼지 규칙을 결정하여야 한다. 퍼지 규칙에 사용된 언어적 변수는 다음과 같다.

$S$  : SN(Negative), SZ(Zero), SP(Positive)

$S'$  : DSN(Negative), DSZ(Zero), DSP(Positive)

$U$  : NB(Negative Big), NM(Negative Medium)

NS(Negative Small), Z(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)

퍼지 규칙은 예를 들면 슬라이딩 평면  $S$ 가 SN이고  $S'$ 가 DSN이면 제어 입력  $U$ 는 Representative Point를 슬라이딩 평면에 가깝게 접근시키도록 하기 위해 NB를 선택하도록 한다. 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 전체 퍼지 규칙은 표1과 같이 결정된다.

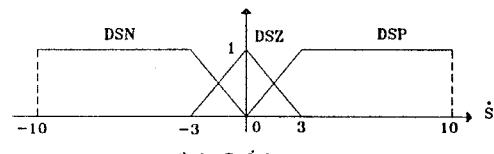
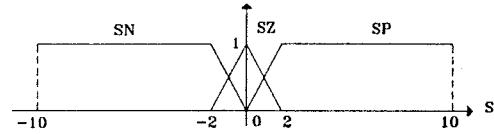


그림 2  $S, S'$ 의 소속 함수

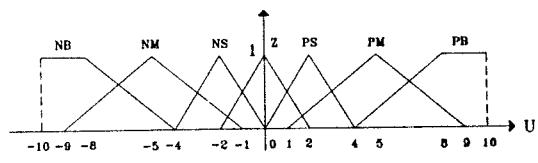


그림 3  $U$ 의 소속 함수

표 1 퍼지 제어 규칙

$S$	DSN	DSZ	DSP
SN	NB	NB	NM
SZ	NS	Z	PS
SP	PM	PB	PB

#### 5. 실험 결과

그림4는 실험을 위해서 구성한 전 시스템의 블럭선도를 나타낸 것으로 구동부, 인코더 신호 처리부, 그리고 제어부 등 크게 3부분으로 분류된다. 제어 부는 IBM PC-486을 이용하였으며 인코더 신호 처리부는 인코더에서 검출된 신호를 위치 및 속도 신호로 각각 변환시킨다.

실험에 이용된 LDM은  $\pm 8V$ 로 제어하였으며 LDM 가동자 위에 1kg의 부하를 연결하고 가동자를 0.15m 이동시켰다. 실험은 Reaching Phase를 제거한 기존의 슬라이딩 모드 제어와 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 수행하였다. 그림 5와 그림 6은 각각 기존의 슬라이딩 모드 제어와 퍼지 슬라이딩 모드 제어의 위치 응답 및 제어 입력 그리고 위상 케이스를 나타낸다.

스위칭 평면 계수는 다음과 같다.

$$a = -15$$

$$v = -0.4$$

$$c = 15$$

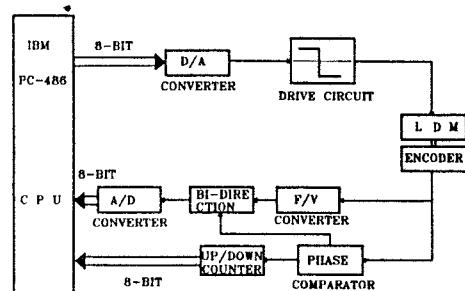
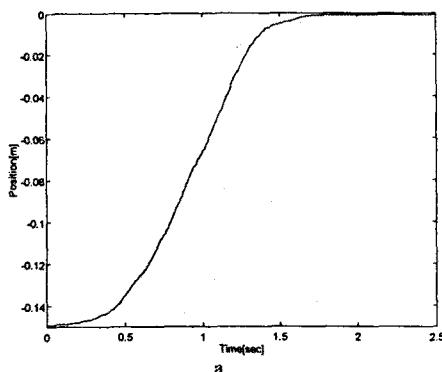
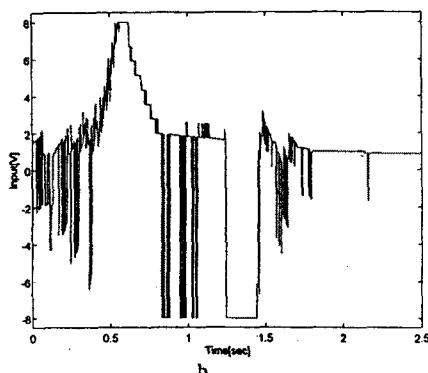


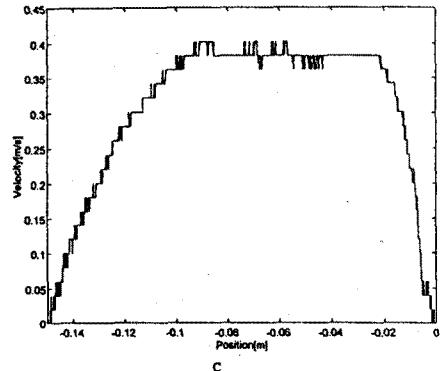
그림 4 전체 시스템 블럭도



a

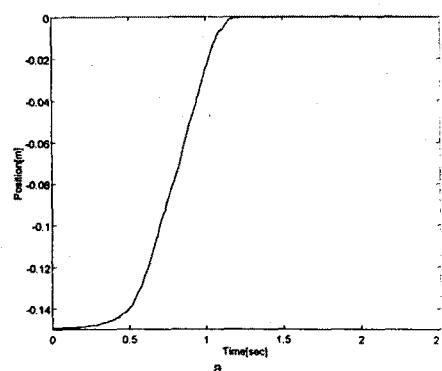


b

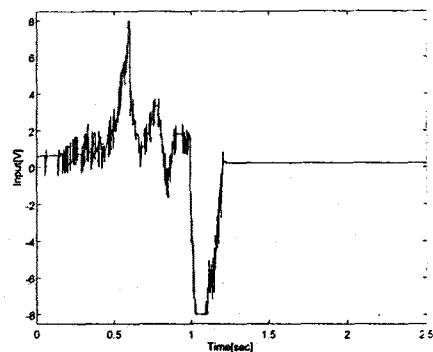


c

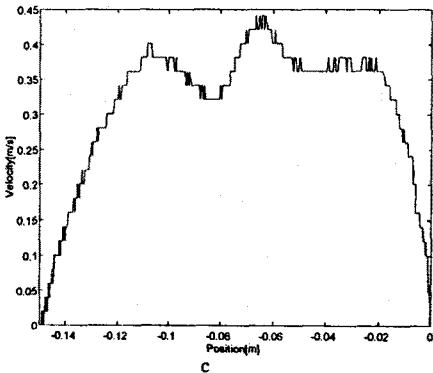
그림 5 기존의 슬라이딩 모드 제어  
(a. 위치응답 b. 제어입력 c. 위상계적)



a



b



c

그림 6 퍼지 슬라이딩 모드 제어  
(a. 위치응답 b. 제어입력 c. 위상계적)

## 6. 결론

본 연구는 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 양축식 기동 차석형 LDM의 위치 제어에 적용하였다. 그 결과 제어 입력을 발생시키기 위해 행한 퍼지규칙은 시스템의 수학적 모델을 모르는 상태에서 결정할 수 있었으며 퍼지 슬라이딩 모드 제어는 기존의 슬라이딩 모드 제어보다 채터링을 감소시킬 수 있었고 동시에 응답의 속도를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] F. Harashima, H. Hashimoto, S. Kondo, " MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control," IEEE Trans. Ind. Electr., Vol. IE-32, NO.3, 1985
- [2] Dong-Sik Kim, Gwi-Tae Park, " Sliding Mode Control of a Manipulator Using New Switching Surfaces," Journal of KIEE, Vol. 6, No. 1, 1993
- [3] P. Begon, F. Pierrot, P. Dauchez, " Fuzzy Sliding Mode Control of a Fast Parallel Robot," IEEE Inter. Conference on Robotics and Automation, 1995
- [4] U. Itkis, Control Systems of Variable Structure, John Wiley and Sons, 1976
- [5] M. Jamshidi et.al., Fuzzy Logic and Control, Prentice Hall, 1993