

〈논 문〉

## 퍼지 알고리즘을 이용한 고차 이동슬라이딩서피스의 설계

박동원\* · 최승복\*\*

(1995년 9월 28일 접수)

### Design of High-Order Moving Sliding Surface via Fuzzy Algorithm

Dong-Won Park and Seung-Bok Choi

**Key Words :** High-Order Variable Structure System (고차 가변구조 시스템), Moving Sliding Surface (이동슬라이딩서피스), Rotating and Shifting Condition (회전 및 평행이동 조건), Fuzzy Algorithm (퍼지 알고리즘)

#### Abstract

A moving sliding surface(MSS) was proposed earlier for the second-order variable structure control system(VSCS). The MSS was designed to pass arbitrary initial conditions, and subsequently moved towards a predetermined sliding surface by rotating and/or shifting. This methodology led to fast and robust control responses of the second-order VSCS, especially in a reaching phase. However, the moving algorithm of the MSS was too complicated to be employed to the high-order VSCS. To resolve this problem, a new moving algorithm based on the fuzzy theory is proposed in this paper. For the generalization of the MSS, the conditions for rotating or shifting are firstly investigated. Then the fuzzy algorithm is formulated by adopting the values of the surface function and the total discontinuity gain as input variables, and the variation of the surface function as output variable. The position control problem of an electrohydraulic servo-mechanism is adopted in order to demonstrate the efficiency and the feasibility of the proposed MSS associated with fuzzy algorithm.

#### 기 호 설 명

MSS : 이동슬라이딩서피스(moving sliding surface)  
 SMC : 슬라이딩모드제어(sliding mode control)  
 VSCS : 가변구조 제어시스템(variable structure control system)  
 $B_m$  : 부하의 점성댐핑계수  
 $C_d$  : 방출계수(discharge coefficient)  
 $C_{tm}$  : 모터의 총 부하누설계수  
 $D_m$  : 모터의 배제 용적  
 $G$  : 부하의 비틀림 스프링상수

$J_t$  : 모터와 부하의 총 관성모멘트  
 $K_c$  : 밸브의 유량-압력계수  
 $K_{ce}$  : 총 유량-압력계수  
 $K_q$  : 밸브의 유량이득  
 $K_v$  : 서보밸브이득  
 $P_t$  : 부하 압력차  
 $P_s$  : 공급압력  
 $Q_t$  : 부하유량  
 $T_t$  : 모터에 대한 임의의 부하토크  
 $V_t$  : 수축된 총 체적  
 $W$  : 면적변화율  
 $X_v$  : 밸브변위  
 $c$  : 슬라이딩서피스의 계수벡터

\*회원, 인하대학교 대학원

\*\*회원, 인하대학교 기계공학과

$d(t)$	: 외란
$e$	: 오차상태벡터
$k$	: 공칭 불연속이득
$u(t)$	: 제어기
$w_m, w_s$	: 퍼지 알고리즘에서의 회전과 평행이동에 대한 변환계수
$x$	: 상태벡터
$\beta_e$	: 시스템의 체적 탄성계수
$\gamma(x)$	: 총 불연속이득
$\tilde{\gamma}$	: 총 불연속이득에 대한 퍼지변수
$\rho$	: 작동유체밀도
$\theta_m$	: 모터축의 각변위
$\sigma(e)$	: 슬라이딩서비스함수
$\sigma_m(e)$	: 이동슬라이딩서비스함수
$\tilde{\sigma}$	: 슬라이딩서비스함수에 대한 퍼지변수
$\Delta\tilde{\sigma}$	: 슬라이딩서비스함수의 변화량에 대한 퍼지변수

## 1. 서 론

슬라이딩모드제어(sliding mode control : SMC), 혹은 가변구조제어 시스템(variable structure control system;VSCS) 이론은 구 소련의 여러 문헌에 기초를 두고 있으며, <sup>(1,2)</sup> 현재 전 세계에서 이에 대한 연구가 심도있게 그리고 활발히 진행되고 있다.<sup>(3-5)</sup> 슬라이딩모드는 가변구조제어 시스템의 주요 작동모드(principal operation mode)로서 적당한 불연속제어기를 사용하여 얻을 수 있다. 슬라이딩모드에서는 전체 상태공간의 차수보다 낮은 차수를 갖는 초평면들에 상태궤적이 속하게 되며, 따라서 슬라이딩운동을 표현하는 운동방정식의 차수도 역시 감소하게 된다. 슬라이딩모드 하에서 시스템은 변수변화 및 외란에 대해 매우 강건한 성질을 나타내게 된다. 또한, 대부분의 실제 시스템에 있어서 슬라이딩운동은 제어기와는 무관하며 제어대상의 특성과 슬라이딩 초평면의 위치(혹은 방정식)만으로 결정된다. 이것은 본래에 주어진 제어문제가 두가지의 작은 문제로 분리될 수 있음을 의미한다. 즉, 제어기는 슬라이딩모드를 발생시키는 역할만을 하도록 설계하고, 슬라이딩모드에서 요구되는 운동특성은 이 슬라이딩 초평면의 방정식을 알맞게 선택함으로써 얻을 수 있다. 따라서, 슬라이딩 초평면의 설계는 매우 중요하며, 이에 대한 연구가 여

러가지 방법으로 활발히 진행되어 오고 있다.<sup>(6-11)</sup>

가변구조 제어시스템의 강건성은 슬라이딩모드에 까지 도달하는 리칭시간(reaching time)을 줄임으로써 향상시킬 수 있다. 리칭상태를 줄이는 쉬운 방법으로 큰 제어입력을 사용할 수 있다. 그러나, 이 방법은 실제 시스템에서 바람직하지 않은 보다 큰 채터링(chattering)을 유발하게 되며, 또한 이것은 모델링되지 않은 부분에 대한 극심한 민감성을 초래할 수 있다.

이제까지 제안된 대부분의 슬라이딩서비스는 초기조건과 무관하게 설계되었다. 이러한 경우에 가변구조 시스템은 특히 리칭상태에서 외란이나 변수변화에 대해 매우 민감하게 된다. 최근에 몇몇 연구가들에 의하여 몇 가지의 시변슬라이딩서비스(time-varying sliding surface)들이 제안되었으나, 이런 서비스의 대부분은 슬라이딩서비스의 시변절편을 사용한다.<sup>(8,9)</sup> 더욱이, 이러한 방법들은 제어기의 수정을 필요로 하였고, 따라서 기존의 슬라이딩서비스를 사용한 가변구조 시스템에서보다 큰 제어입력이 필요하게 된다. Harashima 등은 여러 개의 다른 기울기를 갖는 슬라이딩라인으로 구성되는 시변슬라이딩서비스를 제안하였다.<sup>(10)</sup> 그러나, 그들은 제어기의 아무 수정없이 적절한 슬라이딩서비스의 회전만으로 보다 빠른 제어응답을 얻을 수 있다는 것에 대하여는 언급하지 않았다.

Choi 등은 2차의 가변구조 시스템의 성능과 강건성을 향상시키기 위하여 이동슬라이딩서비스(moving sliding surface : MSS)를 제안하였다.<sup>(12)</sup> MSS는 초기에 임의의 초기조건을 지나며 곧이어 미리 정해진 슬라이딩서비스를 향해 회전과 평행이동을 통하여 이동하도록 설계되었다. MSS를 이용하여 바람직하지 않은 제어입력의 떨림현상의 증가없이 리칭상태를 줄임으로써 외란에 대한 민감성을 줄일 수 있다. 또한, 거주시간(dwelling time)을 증가시키면 리칭상태가 거의 없어지며, 전 제어기간동안 강건성을 보장받을 수 있다. MSS는 단일력 시스템뿐만 아니라 다입력 시스템에 대하여도 적용될 수 있다.

그러나, Choi 등에 의해 제안된 MSS의 이동은 서비스 함수값을 일정한 범위안에 유지시키기 위한 서비스 방정식의 정확한 계산에 의존한다. 따라서, 고차 시스템으로의 MSS의 확장적용은 복잡한 방정식으로 인하여 제한받았다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 퍼지이론에 근거한

MSS의 새로운 이동알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 서피스함수의 값과 총 불연속이득을 퍼지 입력변수로 이용하여 서피스함수의 변화량이 출력변수로 사용된다. 또한, 서피스함수의 변화량으로부터 서피스의 절편 혹은 요구고유치의 변화량을 도출하는 방법이 연구되었다. 2차 시스템의 경우에는 상태점(representative point; RP)이 1사분면과 3사분면에 있을 경우에는 서피스를 평행이동하였고, 나머지 위치에서는 회전시켰다. 그러나 이러한 이동양식은 고차 가변구조 시스템에서는 더이상 적용될 수 없다. 따라서, 본 논문에서는 고차 시스템에 MSS를 적용시키기 위해서 필수적인 이동양식의 결정에 대한 연구도 수행되었다. 그 결과로 3차와 4차 시스템에 대한 구체적인 조건들이 유도되었다. 일반화된 MSS의 효율성과 적합성을 보이기 위해 3차 시스템으로 모델링되는 전기-유압서보 시스템의 위치제어문제를 채택하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 가변구조제어 이론의 개요

### 2.1 가변구조제어 시스템 설계

다음과 같은  $n$ 차의 제어가능 표준형의 비선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x} &= \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{x}, t) + \sum_{i=1}^q \delta a_i g_i(\mathbf{x}, t) \\ &\quad + b(\mathbf{x}, t)u(t) + d(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ 은 상태벡터이며,  $u(t)$ 는 제어 입력이다.  $\delta a_i g_i(\mathbf{x}, t)$ 는 플랜트(plant) 불확실성을 나타내며,  $d(t)$ 는 외부로부터의 외란이다. 이것들은 미지의 값을 갖고 있으나, 크기가 한정되어 있다. 다입력-다출력 비선형 시스템이  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ 에서 (벡터) 상대차수(relative degree)를 갖는다면 입력/출력 선형화(input/output linearization)가 가능하며, 따라서 식 (1)의 형태로 분리하여 표현할 수 있는 것이 잘 알려져 있기 때문에 단일입력 시스템을 고려하였다. 여기에서 제어문제는 상태변수  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ 가  $[t_0, \infty)$ 에서  $C^1$ 함수인  $\mathbf{x}_a(t) = [x_{a1}(t), \dots, x_{an}(t)]^T$ 를 추적하도록 하는 것이다. 바꾸어 말하면, 제어 시스템을 통해 추적오차가 임의

의 초기상태로부터 0에 점근적으로 수렴하도록 하여야 한다. 그러므로, 다음과 같이 추적오차를 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(t) &= [e_1(t), \dots, e_n(t)]^T \\ &= [x_1(t) - x_{a1}(t), \dots, x_n(t) - x_{an}(t)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

슬라이딩서피스는  $\{\mathbf{e} | \sigma(\mathbf{e}) = 0\}$ 로 정의되며, 서피스함수는 다음과 같다.

$$\sigma(\mathbf{e}) = \mathbf{c}\mathbf{e} = \sum_{i=1}^n c_i e_i, \quad c_n = 1 \quad (3)$$

고차 가변구조 시스템에 대한 슬라이딩서피스의 계수는 요구고유치의 집합  $\{\lambda_{a1}, \lambda_{a2}, \dots, \lambda_{an-1}\}$ 만으로 결정될 수 있으며, <sup>(14,15)</sup> 요구다항식  $p(\lambda)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p(\lambda) &= \prod_{i=1}^{n-1} (\lambda - \lambda_{ai}) = \lambda^{n-1} + d_{n-2}\lambda^{n-2} + \dots \\ &\quad + d_1\lambda + d_0 \end{aligned} \quad (4)$$

가변구조 시스템이 슬라이딩모드에서 요구고유치들을 갖도록 하기 위해서 슬라이딩서피스의 계수벡터  $\mathbf{c}$ 를 다음과 같이 결정한다. <sup>(14,15)</sup>

$$\mathbf{c} = [d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{n-2} \ 1] \quad (5)$$

만약 슬라이딩서피스를 기준으로 양쪽의 모든 궤적이 이 서피스를 향한다면, RP는 이 서피스위에 머물러있게 된다. 즉, 슬라이딩모드가 발생된다. 그러므로, 슬라이딩서피스  $\sigma(\mathbf{e}) = 0$  주위에서 슬라이딩모드가 일어나기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0^+} \dot{\sigma} < 0 \quad \text{and} \quad \lim_{\sigma \rightarrow 0^-} \dot{\sigma} > 0 \quad (6)$$

이 조건을 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\sigma(\mathbf{e}) \dot{\sigma}(\mathbf{e}) < 0 \quad (7)$$

가변구조 시스템은 이상(ideal) 슬라이딩모드 하에서 다음의 조건을 만족한다.

$$\sigma(\mathbf{e}) = 0 \quad (8)$$

따라서, 가변구조 시스템은 외부로부터의 외란이나 변수변화에 대해 강건한 성질을 나타내게 된다. <sup>(16)</sup>

조건 (7)을 만족하는 제어규칙을 유도하기 위하여, 시스템 (1)의 불확실항들이 다음과 같은 범위 안에 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \delta a_i(t) &\in (l_{\delta a_i}, h_{\delta a_i}), \quad i = 1, \dots, q \\ d(t) &\in (l_d, h_d) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $l_{\delta a_i}$ ,  $l_d$ 는 각각  $\delta a_i(t)$ 와  $d(t)$ 의 하한이며  $h_{\delta a_i}$ 와  $h_d$ 는 각각  $\delta a_i(t)$ 와  $d(t)$ 의 상한이다. 간단한 계산을 통해 다음의 제어기를 이용하면, 시스템 (1)에서 슬라이딩운동이 발생한다는 것이 증명된다. (17)

$$u(t) = \left[ -\left(k + \sum_{i=1}^q \bar{g}_i(\mathbf{x}, t)\right) \text{sgn}(\sigma) - \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{x}, t) - \sum_{i=1}^q \bar{g}_i(\mathbf{x}, t) - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} + \dot{x}_{dn} \right] [b(\mathbf{x}, t)] \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \bar{g}_i(\mathbf{x}, t) &= \bar{a}_i g_i(\mathbf{x}, t), \quad \bar{a}_i = (\ell_{\delta a_i} + h_{\delta a_i})/2 \\ \bar{g}_i(\mathbf{x}, t) &= \bar{a}_i g_i(\mathbf{x}, t), \quad \bar{a}_i = h_{\delta a_i} - \bar{a}_i \\ k &> \max(|\ell_d|, |h_d|) \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.2 2차 VSCR을 위한 이동슬라이딩서피스

서론에서 언급된 바와 같이 기존의 슬라이딩서피스를 갖는 가변구조 시스템의 성능은 초기조건에 의해 많은 영향을 받는다. 이것을 살펴보기 위해 단일 입력 2차 시스템의 경우, 제어기 (10)을 시스템 (1)에 대입하여 정리하면 추적제어문제에 대한 오차상태방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= -ce_2 - k \text{sgn}(\sigma(e)) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)로부터 만약 RP가 안정한 영역 (상상태의 2사분면과 4사분면)에 있으면, 정해진 불연속이득  $k$ 에 대하여  $c$ 값이 증가할수록  $e_2$ 의 절대값이 작아지는 것을 알 수 있다. 따라서,  $c$ 값이 클 경우에는 RP가 슬라이딩서피스에 도달하는 시간을 지연시키게 된다. 한편,  $c$ 값을 작게 택하면 슬라이딩서피스 위에서 원점까지 수렴하는데 많은 시간이 소요되어 결과적으로 추적이 이루어지기까지 오랜 시간이 걸린다. 그러므로 정해진  $k$ 와 초기조건에 대하여 알맞은 슬라이딩서피스를 찾아낼 수 있다.

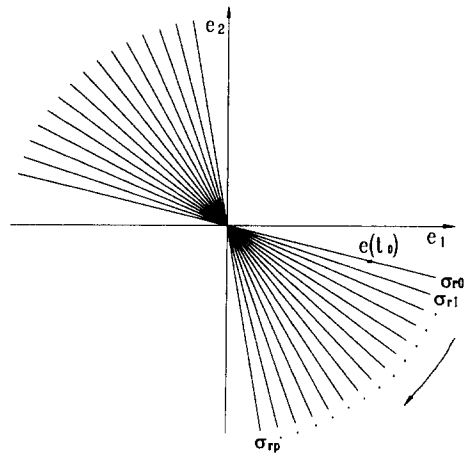
이러한 개념에 근거하여 보다 빠르고 강건한 제어를 위한 2차 가변구조 시스템에 대한 이동슬라이딩서피스(MSS)가 다음과 같이 제안되었다. (12)

$$\sigma_m(\mathbf{e}, t) = c(t)e_1(t) + e_2(t) - \alpha(t) \quad (13)$$

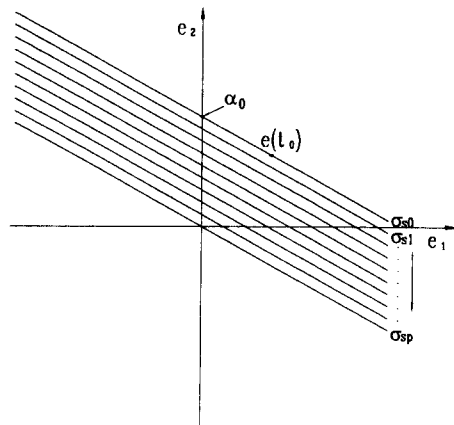
MSS는 초기에 임의의 초기조건을 지나며, 곧이어 미리 정해진 슬라이딩서피스를 향해 이동하도록 설계되었다. MSS의 이동은 회전과 평행이동으로 나뉘어진다. 회전이동은 계단함수(참고문헌 (18) 참조)인 시변기울기  $c(t)$ 를 사용함으로써 이루어

지며, 평행이동은 역시 계단함수인 시변절편  $\alpha(t)$ 를 이용하여 구현된다. Fig. 1은 두 가지의 이동양식인 회전과 평행이동을 도시한 것이다.

2차 시스템의 경우에는 회전이나 평행이동이 이루어지기 위한 조건을 직관적으로 찾아낼 수 있다. 즉, 초기조건이 불안정한 영역에 있는 경우, 슬라이딩서피스는 RP가 안정한 영역에 도달할 때까지 평행이동하며, 그 이후에는 회전이동을 통하여 미리 정해진 슬라이딩서피스에 도달한다. 이 때의 이동 알고리즘은 서피스방정식의 정확한 계산을 통하여 서피스 함수값이 일정한 범위안에 유지되도록 하였다. 그러나, 고차 가변구조 시스템에 대한 서피스의 방정식은 회전이나 평행이동이 행해지는 동



(a) Rotating sliding surface



(b) Shifting sliding surface

Fig. 1 Illustration of two types of moving sliding surface

안 반복해서 계산되기에는 너무 복잡하다. 그러므로, 본 논문에서는 일반화된 MSS에 대한 새로운 이동 알고리즘이 제안되었다.

### 3. 고차 VSCS를 위한 이동슬라이딩서피스

식 (13)의 이동슬라이딩서피스(MSS)는 제어시스템 (1)에 적용가능한 형태로 다음과 같이 일반화될 수 있다.

$$\sigma_m(\mathbf{e}, t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) e_i(t) - \alpha(t), \quad c_n=1 \quad (14)$$

여기에서  $c_i(t)$ 와  $\alpha(t)$ 는 계단함수이다. 회전이동시 절차를 간소화하기 위해 슬라이딩서피스가 동일한 시변 요구고유치들을 갖는다고 가정하고, 이 고유치를  $\lambda_a(t)$ 로 표시하자. 그러면,  $c_i(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} c_i(t) &= \binom{n-1}{i-1} (-\lambda_a(t))^{n-i} \\ &= \frac{(n-1)! (-\lambda_a(t))^{n-i}}{(i-1)! (n-i)!}, \\ & \quad i=1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (15)$$

이제, 슬라이딩서피스 (14)는 요구고유치  $\lambda_a(t)$ 의 값을 바꾸어 줌으로써 회전이동시킬 수 있으며, 절편  $\alpha(t)$ 의 값을 변화시킴으로써 평행이동시킬 수 있다.

2차 시스템의 경우에는 RP가 2사분면과 4사분면에 있을 때는 MSS를 회전이동시키고, 나머지 영역에서는 평행이동시켰다. 그러나, 고차 시스템의 경우에는 언제 회전이나 평행이동을 하여야 하는가를 결정하는 것은 상당히 복잡한 문제이다. 따라서, 3.1절에서는 회전이나 평행이동의 조건에 관한 연구가 선행되었고, 3.2절에서는  $\lambda_a(t)$  또는  $\alpha(t)$ 를 결정하는 퍼지 알고리즘이 제안되었다.

#### 3.1 회전과 평행이동의 결정조건

슬라이딩서피스의 요구고유치들이 모두 같다고 가정하였으므로,  $n$ 차 시스템에 대한 슬라이딩서피스 (14)를 요구고유치에 대하여 정리하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$q_{n-1}\lambda_a^{n-1} + \dots + q_1\lambda_a + q_0 \equiv f(\lambda_a) = 0 \quad (16)$$

여기서,

$$q_{n-i} = \frac{(-1)^{i-1} (n-1)!}{(i-1)! (n-i)!} c_i \quad (17)$$

만약 방정식 (16)이 시스템의 상태변수에 대하여 음의 실근을 갖는다면, RP를 지나며 안정한 요구고유치를 갖는 슬라이딩서피스가 존재한다. 따라서, 다음에 소개될 알고리즘을 이용하여 MSS를 미리 정해진 슬라이딩서피스를 향해 회전이동시킬 수 있다. 만약 식 (16)이 음의 실근을 갖지 않으면, MSS는 리칭상태 동안에 시스템의 안정성을 해치지 않기 위해 미리 정해진 슬라이딩서피스를 향해 평행이동을 해야 한다.

다항식  $f(\lambda_a)$ 의 차수가 홀수인 경우 최고차항의 계수와 절편의 부호가 같으면 최소한 하나의 음의 실근이 존재한다. 한편, 다항식  $f(\lambda_a)$ 의 차수가 짝수인 경우에는 최고차항의 계수와 절편의 부호가 반대일 때 음의 실근이 존재한다. 상수항의 부호가 차수에 따라 바뀌므로 다음과 같은 조건이 유도된다.

$$c_1 c_n < 0 \quad (18)$$

이 조건은  $\lambda_a \rightarrow -\infty$ 일 때와  $\lambda_a=0$ 일 때의  $f(\lambda_a)$ 의 부호가 다른 것을 의미한다.

다항식  $f(\lambda_a)$ 의 차수가 홀수인 경우,  $f(\lambda_a)$ 의 음의 극점  $\lambda_a^*$ 가 존재하고, 이 극점에서의  $f(\lambda_a)$ 의 부호와  $f(\lambda_a)$ 의 최고차항의 부호가 같으면 최소한 하나의 음의 실근이 존재한다. 반면에 다항식  $f(\lambda_a)$ 의 차수가 짝수이면,  $f(\lambda_a)$ 의 음의 극점  $\lambda_a^*$ 가 존재하고, 이 극점에서의 다항식의 부호와  $f(\lambda_a)$ 의 최고차항의 부호가 다르면  $f(\lambda_a)$ 의 음의 실근이 존재한다. 즉,

$$\begin{aligned} \exists \lambda_a^* < 0 \text{ such that } f'(\lambda_a^*) = 0 \text{ and} \\ (-1)^n c_1 f(\lambda_a^*) > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $\text{prime}'()$ 은  $\lambda_a$ 에 대한 편미분을 나타낸다.

3차 시스템에 대한 슬라이딩서피스는 식 (16)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$e_1 \lambda_a^2 - 2e_2 \lambda_a + e_3 = 0 \quad (20)$$

그리고, 식 (18)로부터 다음의 조건을 얻을 수 있다.

$$e_1 e_3 < 0 \quad (21)$$

한편, 극점  $\lambda_a^*$ 는  $e_2/e_1$ 이며, 식 (19)로부터 다음의 조건을 얻는다.

$$\begin{aligned} e_1 e_2 < 0 \\ e_2^2 - e_1 e_3 > 0 \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)의 첫번째 조건은 음의 극점의 존재를 위한 것이며, 두번째 조건은 이 극점을 조건식 (19)에 대입하여 얻은 것이다.

4차 시스템에 대한 슬라이딩서비스 역시 식 (16)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$e_1\lambda^3 + 3e_2\lambda^2 + 3e_3\lambda + e_4 = 0 \quad (23)$$

그리고, 3차 시스템의 경우와 같이 식 (18)로부터 다음의 조건을 얻는다.

$$e_1e_4 < 0 \quad (24)$$

조건식 (19)로부터 방정식 (23)에서 음의 실근이 존재할 수 있는 다른 하나의 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{i) } e_2^2 - e_1e_3 \geq 0 \\ & \text{ii) } e_1e_2 < 0 \text{ or } e_1e_3 < 0 \\ & \text{iii) } \begin{cases} \text{if } e_1 > 0 : -2e_2^3 + 3e_1e_2e_3 + 2(e_2^2 - e_1e_3)^{3/2} \\ \quad - e_1^2e_4 > 0 \\ \text{if } e_1 < 0 : -2e_2^3 + 3e_1e_2e_3 + 2(e_2^2 - e_1e_3)^{3/2} \\ \quad - e_1^2e_4 < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (25)$$

따라서, 4차 시스템의 경우 조건식 (24)와 (25) 중 하나가 만족되면 미리 정해진 서비스를 향해 슬라이딩서비스(MSS)를 회전이동시키고, 그렇지 않을 때는 평행이동시킨다.

### 3.2 퍼지이동 알고리즘

RP가 이동슬라이딩서비스로부터 일정한 간격을 유지하도록 하기위해서 다음의 언어적 제어규칙이 사용되었다.

The smaller  $|\sigma_m|$  and the larger the discontinuity gain, the larger  $|\Delta\sigma_m|$  (26)

여기에서,  $|\sigma_m|$ 은 이동슬라이딩서비스함수  $\sigma_m(e, t)$ 의 절대값을 나타내며,  $|\Delta\sigma_m|$ 은  $|\sigma_m|$ 의 요구되는 변화량의 절대값이다. 그리고, 'discontinuity gain'은 제어기 (10)에서의 불연속항의 크기를 나타내며 이것을 총 불연속이득  $\gamma(x)$ 라 정의한다. 총 불연속이득의 크기는 슬라이딩서비스함수의 변화율과 밀접한 관계가 있으므로 제어규칙을 구성하는데 있어서 필수적이다. Fig. 2는 2차 시스템에서의 회전슬라이딩서비스에 대한 언어적 규칙의 개념을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 RP가 슬라이딩서비스에 접근하면 큰 회전이 필요하고, RP가 서비스로부터 멀리 떨어지면 작은 회전만이 이루어진

다.

언어적 제어규칙 (26)의 실현을 위하여,  $|\sigma_m|$ 과 총 불연속이득  $\gamma(x)$ 가 퍼지입력변수로 선택되었다. 퍼지출력변수로는  $|\Delta\sigma_m|$ 이 사용되었다. 총 불연속이득  $\gamma(x)$ 는 제어기 (10)에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma(x) = k + \sum_{i=1}^q |\tilde{g}_i(x, t)| \quad (27)$$

이제, 언어적 입력변수들을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma} &= \{VS, SM, ME, LA, VL\} \\ \tilde{\gamma} &= \{VS, SM, ME, LA, VL\} \end{aligned} \quad (28)$$

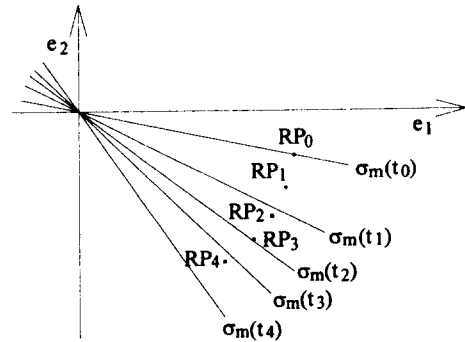


Fig. 2 Illustration of the linguistic rule

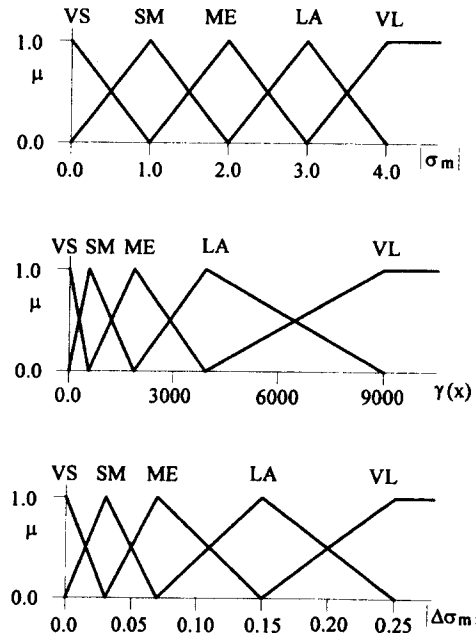


Fig. 3 Fuzzy variables for electrohydraulic servo-mechanism

여기서,  $VS=$ very small,  $SM=$ small,  $ME=$ medium,  $LA=$ large,  $VL=$ very large를 각각 나타낸다. 회전이나 평행이동의 양을 표시하기 위한 언어적 출력변수는 다음과 같이 선택되었다.

$$\Delta\bar{\sigma} = \{VS, SM, ME, LA, VL\} \quad (29)$$

모든 입력과 출력퍼지변수는 양수로 구성되었다. 이것은 회전이나 평행이동의 방향으로부터 퍼지변수의 부호를 판단할 수 있기 때문에 가능하며, 계산시간이나 소요되는 기억용량을 줄이는 데 유용하다. Fig. 3에는 퍼지변수들의 한 예로, 다음 절에서 다룬 전기-유압서보 시스템에 사용될 퍼지변수들이 도시되었다. 식 (28)과 (29)의 입력과 출력퍼지변수의 관계는 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}, \bar{\gamma} \rightarrow \Delta\bar{\sigma} \quad (30)$$

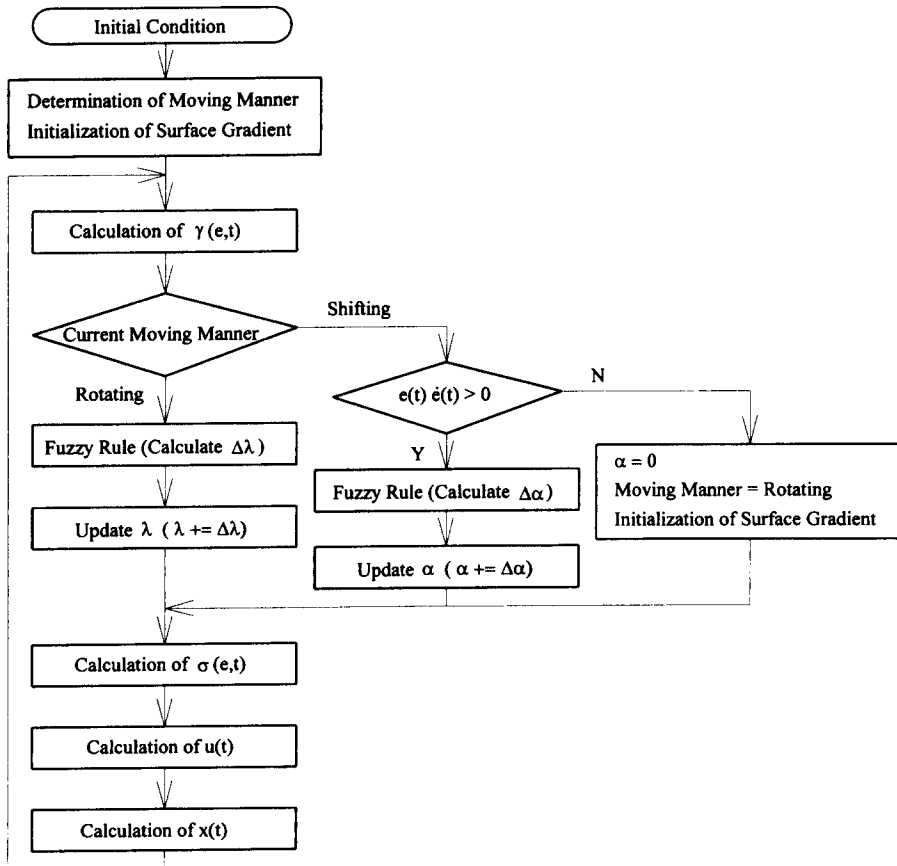
Table 1은 퍼지제어규칙  $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{55}$ 의 한 예를 나타내고 있으며, 이 예는 다음 장의 전기-유

**Table 1** Fuzzy rule base of MSS for electrohydraulic servomechanism

$\bar{\sigma} \backslash \bar{\gamma}$	VS	SM	ME	LA	VL
VS	VS	SM	ME	LA	VL
SM	VS	VS	SM	ME	LA
ME	VS	VS	VS	SM	SM
LA	VS	VS	VS	VS	VS
VL	VS	VS	VS	VS	VS

압서보 시스템의 위치제어에서 사용된 예이다. 즉, 다음과 같은 규칙을 의미한다.

- $R_{11}$  : IF  $\bar{\sigma}$  is VS and  $\bar{\gamma}$  is VS,  
THEN  $\Delta\bar{\sigma}$  is VS
- $R_{12}$  : IF  $\bar{\sigma}$  is VS and  $\bar{\gamma}$  is SM,



**Fig. 4** Flow chart of the control scheme with fuzzy algorithm

THEN  $\Delta\delta$  is SM

:

$R_{55}$  : IF  $\delta$  is VL and  $\dot{\gamma}$  is VL,

THEN  $\Delta\delta$  is VS (31)

이 퍼지 알고리즘은 무게중심법을 통하여 시스템에 공급될 실제 입력변수의 값을 도출할 수 있다. (19)

식 (14)와 같이 MSS를 정의하였기 때문에  $|\Delta\sigma_m|$ 은 슬라이딩서피스가 평행이동 할 경우  $\Delta\alpha$ 로, 슬라이딩서피스가 회전이동할 경우에는  $\Delta\lambda_\alpha$ 로 변환되어야 한다.  $|\Delta\sigma_m|$ 과  $\Delta\alpha$ , 그리고  $|\Delta\sigma_m|$ 과  $\Delta\lambda_\alpha$ 의 관계를 알아내기 위하여 다음과 같이  $\Delta\sigma_m$ 의  $\Delta\alpha$ 와  $\Delta\lambda_\alpha$ 에 대한 편미분을 구한다.

$$\frac{\partial\sigma_m}{\partial\alpha} = -1 \quad (32)$$

$$\frac{\partial\sigma_m}{\partial\lambda_\alpha} = \sigma'_m = -\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(n-1)! (-\lambda_\alpha(t))^{n-i-1}}{(i-1)! (n-i-1)!} e_i \quad (33)$$

이 식들을 이용하여 다음의 관계를 도출할 수 있다.

$$\Delta\alpha = w_s \Delta\sigma_m \quad (34)$$

$$\Delta\lambda_\alpha = w_m \Delta\sigma_m / \sigma'_m \quad (35)$$

여기서,  $w_s$ 와  $w_m$ 은 변환계수들이고 이것들은 시간격이나 시스템의 특성에 의해 좌우된다.  $\sigma'_m=0$  일 경우에는 임의의 큰 수를 곱함으로써  $\Delta\lambda_\alpha$ 를 구할 수 있다. Fig. 4에는 슬라이딩모드제어기와 퍼지규칙에 대한 전체적인 흐름도가 도시되어있다.

#### 4. 전기-유압서보 시스템의 위치제어에 대한 적용

다른 제어 시스템에 비하여 유압제어 시스템은 빠른 반응속도와 운동, 속도전환 가능성, 연속적인 작동 등의 여러가지 우월한 특성을 갖고 있다. (20) 그러나, 작은 오차범위를 위해서는 많은 비용이 필요한 점, 고온 한계성, 입력 전류와 유량출력 사이의 비선형성, 유체 압축성, 그리고 내부누설과 히스테리시스에 의한 불감대(deadband) 등의 문제점이 있다. (21) 또한 이러한 문제점들이 전기-유압 시스템을 위한 제어기의 구현을 어렵게 만든다. 한편, Petersen은 어떤 종류의 불확실성은 선형제어기에 의해 안정화될 수 없으나 비선형제어기에 대해서는 안정화될 수 있다는 것을 증명하였다. (22) Hwang과 Lan은 슬라이딩모드제어기를 이용한 전

기-유압서보 시스템의 위치제어에 대하여 연구하였다. (23) 그들은 빠른 응답특성을 얻기 위하여 큰 불연속이득을 사용하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 이것은 모델링되지 않은 부분에 대한 극도의 민감성, 바람직스럽지 않은 정상상태에서의 큰 떨림과 오차범위를 유발한다. 본 연구에서는 제안된 MSS를 사용함으로써 상대적으로 작은 불연속이득만으로 빠른 제어응답을 얻었다.

#### 4.1 시스템 모델링

전기-유압 시스템의 위치제어에 대한 블록선도가 Fig. 5에 도시되어 있다. (22) 밸브변위  $X_v$ 와 부하유량  $Q_l$ 의 관계가 다음의 서보밸브 유량식으로 표현된다.

$$Q_l = K_q X_v - K_c P_l \quad (36)$$

여기서,  $K_c$ 는 밸브의 유량-압력계수,  $P_l$ 은 부하압력차이며,  $K_q$ 는 밸브의 유량이득이며, 다음과 같이 주어진다.

$$K_q = C_d W \sqrt{[P_s - \text{sgn}(X_v) P_l] / \rho} \quad (37)$$

여기에서  $C_d$ 는 방출계수,  $W$ 는 면적변화율,  $\rho$ 는 작동유체밀도이며,  $P_s$ 는 공급압력이다.

모터 챔버(chamber)에 대한 연속방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$Q_l = D_m \dot{\theta}_m + C_{tm} P_l + (V_t / 4\beta_e) \dot{P}_l \quad (38)$$

여기서,  $D_m$ 은 모터의 배제용적,  $\theta_m$ 은 모터의 각변위,  $C_{tm}$ 은 모터의 총 부하누설계수,  $V_t$ 는 수축된 총 체적이며,  $\beta_e$ 는 시스템의 체적탄성계수이다.

모터의 토크 평형방정식은 다음과 같다.

$$P_l D_m = J_t \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + G \theta_m + T_l \quad (39)$$

여기서,  $J_t$ 는 모터와 부하의 총 관성모멘트,  $B_m$ 은

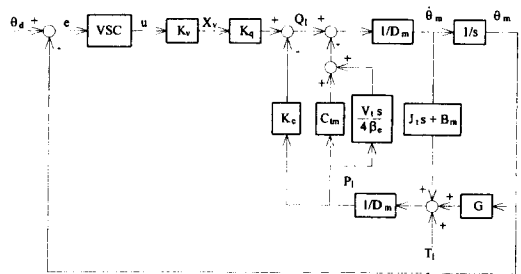


Fig. 5 The position control block diagram of the electrohydraulic servomechanism



부하의 점성댐핑계수,  $G$ 는 부하의 비틀림 스프링 상수이며,  $T_l$ 은 모터에 대한 임의의 부하토크이다.

식 (36)을 식 (38)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$K_q X_c = D_m \dot{\theta}_m + (K_c + C_{tm}) P_t + (V_t / 4\beta_e) \dot{P}_t \quad (40)$$

식 (36)부터 식 (40)까지를 통합하면 다음과 같은 전기-유압서보 시스템에 대한 상태방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2(t) \\ \dot{x}_2 &= x_3(t) \\ \dot{x}_3 &= -\sum_{i=1}^3 a_i(t) x_i(t) - \sum_{i=1}^3 \delta a_i(t) x_i(t) \\ &\quad + b(x) u(t) - d(t) \end{aligned} \quad (41)$$

여기서,

$$\begin{aligned} x(t) &= [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T \\ &= [\theta_m(t) \ \dot{\theta}_m(t) \ \ddot{\theta}_m(t)]^T \\ a_1(t) &= \frac{4\beta_e}{V_t} \frac{K_{cc}}{J_t} G \\ a_2(t) &= \frac{G}{J_t} + \frac{4\beta_e}{V_t} \frac{D_m^2}{J_t} + \frac{4\beta_e}{V_t} \frac{K_{cc}}{J_t} B_m \\ a_3(t) &= \frac{B_m}{J_t} + \frac{4\beta_e}{V_t} K_{cc} \\ b(x) &= \frac{4\beta_e}{V_t} \frac{D_m}{J_t} K_q K_c \\ d(t) &= \frac{4\beta_e}{V_t} \frac{K_{cc}}{J_t} T_l + \frac{1}{J_t} \dot{T}_l \\ \delta a_i(t) &: \text{The parameter uncertainty} \\ K_{cc} &= K_c + K_{tm} : \text{The total flow-pressure} \\ &\quad \text{coefficient (in}^3\text{s}^{-1}\text{psi}^{-1}) \\ K_c &: \text{The servovalve gain} \\ T &= f(\theta_m) \end{aligned} \quad (42)$$

이 시스템은 비선형성이 매우 크고 외란의 영향을 받고 있는 식 (1)과 같은 형태의 3차 단일입력 불확실 시스템을 나타낸다.

## 4.2 VSCS 설계

먼저, 다음과 같이 오차상태벡터  $e$ 를 정의하자.

$$e = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T = [x_1 - x_{d1} \ x_2 - \dot{x}_{d2} \ x_3 - \ddot{x}_{d3}]^T \quad (43)$$

이때, 기존의 전형적인 슬라이딩서비스는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 = 0 \quad (44)$$

여기서,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 식 (5)에 의해 결정된다.

불확실항  $a_i(t)$  ( $i=1, 2, 3$ )와 외란  $d(t)$ 가 조건 (9)를 만족한다고 가정하고, 다음과 같은 식 (10) 형태의 제어기를 사용하면 슬라이딩모드가 발생한다.

$$\begin{aligned} u(t) &= \left[ -\left( k + \sum_{i=1}^3 |\dot{g}_i(\mathbf{x}, t)| \right) \text{sgn}(\sigma) - \sum_{i=1}^3 f_i(\mathbf{x}, t) \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^3 \bar{g}_i(\mathbf{x}, t) - c_1 c_2 - c_2 c_3 - \dot{x}_{d3} \right] / [b(\mathbf{x}, t)] \end{aligned} \quad (45)$$

여기서,  $\bar{g}_i(\mathbf{x}, t)$ 와  $\dot{g}_i(\mathbf{x}, t)$ 는 식 (11)에 의하여 정의되었다.

이동슬라이딩서비스는 식 (14)의 형태로 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_m = c_1(t) e_1 + c_2(t) e_2 + e_3 - a(t) = 0 \quad (46)$$

여기서, 시변계수  $c_1(t)$ 와  $c_2(t)$ 는 식 (15)에 의해 주어졌다. 퍼지변수들은 Fig. 3에 도시되었고 MSS의 이동 안고리들을 위한 퍼지규칙은 Table 1에 주어졌다.

## 4.3 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 초기조건은  $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ -2]^T$ 로, 요구 각변위는  $\theta_d = 1$  rad으로 선택하였다. 고정된 슬라이딩서비스와 MSS의 미리 설정된 슬라이딩서비스의 요구고유치들은 모두 -25로 선

**Table 2** The nominal values of the electrohydraulic servomechanism

Parameter	Value	Unit
$P_s$	$1.379 \times 10^7$	Pa
$K_q$	6.4516	$\sqrt{P_s - \text{sgn}(X_v)} P_1 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\beta_e$	$3.4474 \times 10^8$	Pa
$V_t$	1.6387	$\text{m}^3$
$K_{cc}$	1.1299	$\text{m}^3 \text{sPa}$
$D_m$	$8.1935 \times 10^{-6}$	$\text{m}^3 \text{sPa}$
$J_t$	$5.6492 \times 10^{-2}$	$\text{mNs}^2$
$B_m$	8.4739	$\text{mNs}$
$K_v$	0.5080	$\text{mV}^{-1}$
$G$	$1.1298 \times 10^{-3}$	$\text{mNrad}^{-1}$

정되었다. 고려된 전기-유압서보계 변수들의 공칭 값들이 Table 2에 나열되었다. 변수 불확실항들과 부하의란은 다음과 같이 가정되었다.

$$\begin{aligned} \bar{a}_i(t) &= 0.3|\bar{a}_i(t)|, \quad i=1,2, \\ \max(|l_{d1}|, |h_{d1}|) &= 1000 \end{aligned} \quad (47)$$

여기서,  $\bar{a}_1$ ,  $\bar{a}_2$ ,  $\bar{a}_3$ 는 각각  $\bar{a}_1=0.004$ ,  $\bar{a}_2=12000$ ,  $\bar{a}_3=170$ 으로 주어졌다. 시뮬레이션은 Runge-Kutta 법을 이용하여 시간간격 0.001 sec로 수행되었다. 퍼지 알고리즘의 변환계수  $w_s$ 와  $w_m$ 은 각각 1.0과 3.2로 선택되었다.

Fig. 6은 불연속이득  $k=1200$ 을 사용하였을 때의 전기-유압제어시스템의 각 변위의 궤적과 슬라이딩 서비스의 변화과정을 나타낸다. 이 그림에서 고정된 슬라이딩서피스를 사용한 경우에는 추적시간이 3.194 초이며, 슬라이딩서피스에 도달하는 리칭시간은 3.143초이다. 한편, MSS를 사용한 경우의 추적시간과 리칭시간은 각각 0.587초와 0.460초이다. 이러한 결과들로부터 MSS를 사용함으로써 불연속이득의 증가없이 제어성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6과 같은 결과를 얻

기 위해 공급된 제어입력과 총 불연속이득의 변화를 나타낸다. 이 그림으로부터 고정된 슬라이딩서피스를 사용하였을 때와 MSS를 사용하였을 경우의 정상상태에서의 총 불연속이득과 채터링의 크기가 같음을 명확히 알 수 있다. Fig. 6의 슬라이딩서피스 궤적에서 MSS에 대한 슬라이딩서피스의 궤적에만 채터링현상이 나타난 것은 고정된 슬라이딩서피스의 궤적과 축척이 다르기 때문이다. 리칭시간인 0.460초 이전의 채터링은 MSS의 이동에 의해 나타나는 현상이며, 이것은 한쪽으로 편향되어  $\sigma_m(t)$ 의 부호에 영향을 미치지 않으므로  $u(t)$ 에는 채터링이 나타나지 않게 된다.<sup>(11,12)</sup> 리칭시간 이후의 채터링은 슬라이딩서피스가 이동을 멈춘 후이므로 고정된 슬라이딩서피스의 경우와 같게 되며 채터링의 크기는 총 불연속이득의 크기  $\gamma(x)$ 에 비례하게 된다. 따라서 약 0.5초 부근에서 채터링의 크기가 큰 것은 총 불연속이득의 크기가 가장 큰 시점이기 때문이다.

시뮬레이션은 작성된 C++ 프로그램을 BC++ 3.1 compiler를 사용하여 compile한 후 Intel 80486 DX2 66 마이크로 프로세서를 사용하여 실행

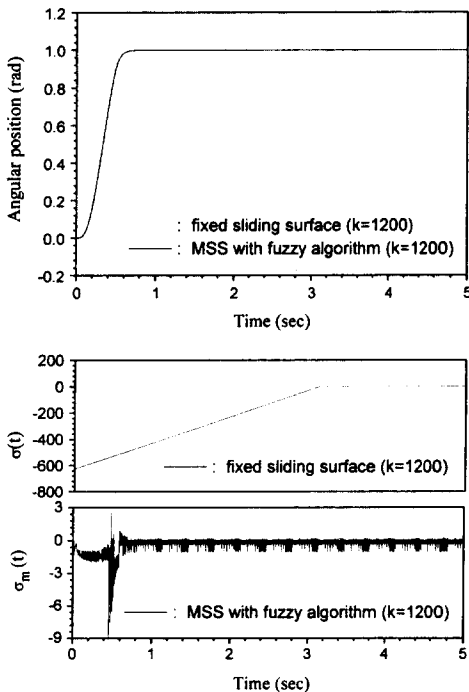


Fig. 6 Control responses of the electrohydraulic system

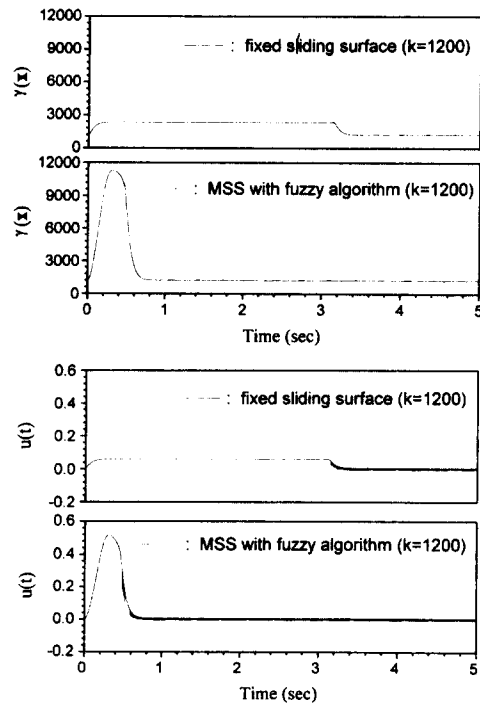


Fig. 7 Control histories of the electrohydraulic system

시켰으며, 이 때 제어입력을 계산하는데 소요된 시간은 약 0.17 ms이며, 퍼지 알고리즘을 이용하여 MSS의 이동량을 도출하는 데 약 0.1 ms가 경과되었습니다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 고정된 슬라이딩서피스를 사용한 경우 MSS를 사용한 경우에 비하여 제어입력이 매우 작게 공급된 것을 알 수 있다. 따라서 제어입력의 크기가 비슷한 경우에 대하여 비교하기 위해 고정된 슬라이딩서피스의 경우  $k=2400$ 을 사용하였을 때와 MSS의 경우  $k=1200$ 을 사용하였을 때의 시스템 제어성능 비교를 Fig. 8에 도시하였다. 전자의 경우 추적시간이 0.619초, 리칭시간이 0.467초로 후자의 제어성능과 거의 비슷하나 정상상태에서의 채터링의 크기가 후자의 경우의 두배가 됨을 알 수 있다. 큰 채터링은 정상상태에서의 큰 추적오차와 함께 실제적용시 하드웨어에 여러 악영향을 끼치며 경계층을 이용한 제어기의 연속화법을 이용할 때에도 큰 경계층의 두께가 필요하게 된다. 또한, 고정된 슬라이딩서피스를 사용할 경우에는  $k$ 의 값이 너무 작으면 시스템의 응답특성이 너무 느려지며,  $k$ 가 너무 크면 정상상태에서의 큰 채터링을 유발한다. 따라서, 초기조건과

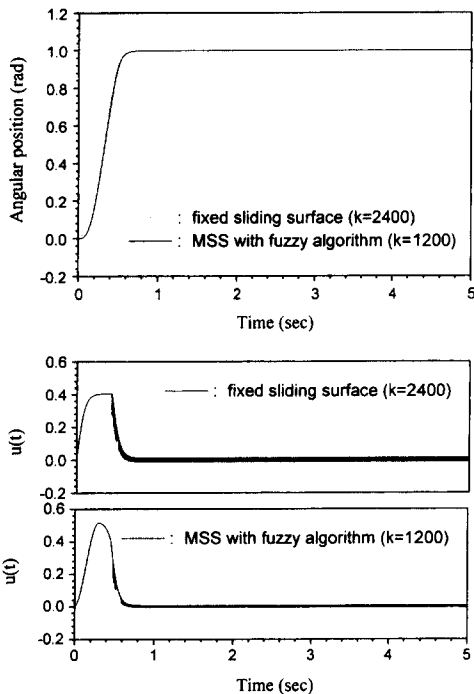


Fig. 8 Comparison of fixed sliding surface and MSS

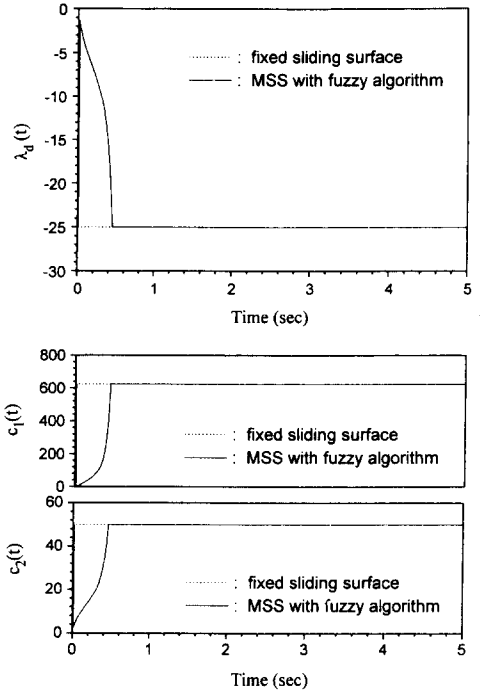


Fig. 9 Histories of the desired eigenvalues and the coefficients of the sliding surfaces

$k$ 값에 따른 최적의  $c$ 값을 결정하는 것이 중요한 문제가 된다.<sup>(11)</sup> 그러나, MSS를 사용하는 경우에는 최적의 고정된 슬라이딩서피스를 사용할 때 보다 우수한 응답특성을 얻을 수 있다. 또한, MSS를 사용할 때는 상대적으로 작은  $k$ 값만으로도 충분하기 때문에 경계층을 이용한 연속화법을 이용할 때 경계층의 크기를 작게 잡을 수 있어 연속화로 인해 발생하는 정상상태오차의 증가를 최소화할 수 있다.

Fig. 9는 요구고유치와 슬라이딩서피스계수의 변화과정을 도시한 것이다. 여기에서,  $c_1(t)$ 와  $c_2(t)$ 는 각각  $-2\lambda_d(t)$ 와  $\lambda_d^2(t)$ 로 정의된다. 이 그림을 통하여 회전과 평행이동에 관한 조건이 입증되었고, 또한 퍼지이동 알고리즘이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있다. 이러한 결과들로부터 고차의 VSCS를 위해 제안된 MSS가 빠르고 강건한 제어 응답을 얻는데 매우 유용하다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

기존 2차 시스템을 위한 이동슬라이딩서피스

(MSS)의 고차 가변구조 시스템으로의 확장을 위하여 새로운 이동 알고리즘이 제안되었으며, 회전과 평행이동에 관한 조건이 연구되었다. 새로운 이동 알고리즘은 퍼지이론에 기초하였으며, 서피스함수의 값과 총 불연속이득값이 입력변수로, 서피스함수값의 변화량이 출력변수로 사용되었다. 회전과 평행이동에 관한 조건의 연구결과로 3차와 4차 시스템에 대한 구체적인 조건이 도출되었다. 제안된 MSS의 효율성과 적합성을 보이기 위하여 전기-유압서보 시스템의 위치제어 문제에 대해 적용하였다. MSS를 사용함으로써 정상상태에서의 불연속이득의 증가없이 제어성능이 크게 향상되었다. 또한, 새로운 이동 알고리즘 및 회전과 평행이동에 관한 조건을 통해 MSS가 고차의 가변구조 시스템에서 성공적으로 작동함을 입증하였다. 퍼지 이동 알고리즘의 퍼지변수와 퍼지규칙의 결정과정에서의 시행착오를 줄이기 위한 적응퍼지기법 및 뉴로퍼지 알고리즘에 관한 연구가 진행중에 있다.

## 후 기

본 연구의 일부는 1995년도 인하대학교 교내 연구비에 의해 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Filippov, A. F., 1964, "Differential Equations with Discontinuous Right-Hand Side," *American Mathematical Society Trans.*, Vol. 42, pp. 199~231.
- (2) Utkin, V. I., 1978, *Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems*, MIR Publishers, Moscow.
- (3) Young, K.K.D., 1978, "Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems," *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics.*, Vol. SMC-8, pp. 101~109.
- (4) Slotine, J.J.E. and Sastry, S.S., 1983, "Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators," *Int. J. Control.*, Vol. 38, pp. 465~492.
- (5) DeCarlo, R.A., Zak, S.H. and Matthews, G.P., 1988, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A Tutorial," *Proc. of IEEE*, Vol. 76, pp. 212~232.
- (6) Dorling, C.M. and Zinober, A.S.I., 1986, "Two Approaches to Hyperplane Design in Multivariable Variable Structure Systems," *Int. J. Control*, Vol. 44, pp.65~82.
- (7) Ashchepkov, L.T., 1983, "Optimization of Sliding Motions in a Discontinuous Systems," *Automation and Remote Control*, Vol. 44, pp.1408~1415.
- (8) Chang, T.H. and Hurmuzlu, Y., 1992, "Trajectory Tracking in Robotic Systems Using Variable Structure Control without a Reaching Phase," *Proc. 1992 American Control Conf.*, Vol. 2, pp. 1505~1509.
- (9) Park, K.B. and Lee, J.J., 1993, "Variable Structure Controller for Robotic Manipulators Using Time-Varying Sliding Surface," *Proc. 1993 IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp.89~93.
- (10) Harashima, F., Hashimoto, H. and Maruyama, K., 1986, "Sliding Mode Control of Manipulator with Time-Varying Switching Surfaces," *Trans. of the Soc. of Instrument and Control Engineers*, Vol. 22, pp.335~342.
- (11) Choi, S.B. and Park, D.W., 1994, "Moving Sliding Surfaces for Fast Tracking Control of Second-Order Dynamical Systems," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 116, pp. 154~158.
- (12) Choi, S.B., Park, D.W. and Jayasuriya, S., 1994, "A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-Order Uncertain Systems," *Automatica*, Vol. 30, pp. 899~904.
- (13) Isidori, A., 1985, *Nonlinear Control Systems, An Introduction*, Springer-Verlag, Berlin.
- (14) Chern, T.L. and Wu, Y.C., 1991, "Design of Integral Variable Structure Controller and Application to Electrohydraulic Velocity Servomechanism," *IEE Proc.-D*, Vol. 138, pp. 439~444.
- (15) 박동원, 최승복, 김재문, 1994, "불확실성을 갖는 비선형 가변구조 시스템의 슬라이딩 초평면

- 설계,” 대한기계학회논문집, 제18권, 제7호, pp. 1985~1996.
- (16) Drazenovic, B., 1969, “The Invariance Conditions in Variable Structure Systems,” *Automatica*, Vol. 5, pp. 287~295.
- (17) Jayasuriya, S. and Choi, S.B., 1987, “On the Sufficiency Condition for Existence of a Sliding Mode,” *Proc. 1987 American Control Conf.*, Vol. 1, pp.84~89.
- (18) Apostol, T.M., 1974, *Mathematical Analysis*, Addison-Wesley, New-York.
- (19) Jamshidi, M., Vadiiee, N and Ross, T.J., 1993, *Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- (20) Merrit, H.E., 1976, *Hydraulic Control System*, John Wiley, New York.
- (21) Larry, S., 1988, “Precision Control with Hydraulics,” *Machine Design*, Vol. 12, pp.64~67.
- (22) Petersen, I.R., 1985, “Quadratic Stabilizability of Uncertain Linear Systems:existence of a Nonlinear Stabilizing Control does not Imply Existence of a Linear Stabilizing Control,” *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. AC-30, pp.291~293.
- (23) Hwang, C.L. and Lan, C.H., 1994, “The Position Control of Electrohydraulic Servomechanism via a Novel Variable Structure Control,” *Mechatronics*, Vol. 4, pp.369~391.