

# 모터시스템의 전역 최적 슬라이딩모드 제어기의 설계

최형식\*, 조용성\*\*, 박용헌\*\*\*

## A Design of Global Optimal Sliding Mode Control for Motor Systems

Hyeung-Sik Choi\*, Yong-Sung Cho\*\*, Yong-Hun Park\*\*\*

### ABSTRACT

A design of the global optimal sliding mode control is presented to control the second order uncertain time varying system with torque limit. With specified ranges of parametric uncertainties and torque limit, the minimum arrival time to reference inputs can be calculated. The proposed control scheme is applied to the motor system carrying loads. The merit of the proposed control scheme is that the arriving time at the reference input, which is the revolution angle, and the maximum allowable acceleration are expressed in a closed form solution. The superior performance of the proposed control scheme is validated by the computer simulation and experiments comparing with other sliding mode controllers.

**Key Words** : Global sliding mode control(전역최적 슬라이딩모드 제어), Torque Limit(토크 한계), Uncertain time varying system(불확실한 시변 시스템)

### 1. 서론

가변구조 제어기로부터 연유되는 SMC(sliding mode control)는 1960년대 구 소련의 Emelyanov와 Ikis<sup>[1-2]</sup>에 의해서 제안되고 다듬어졌다. 그 이후 SMC에 대한 연구는 불확실한 매개변수와 외란에 대한 강인성에 대한 폭넓은 연구로 확장되었다. Ukin<sup>[3]</sup>은 선형 초표면(hyper surface)으로 정의된 슬라이딩 면에 시스템의 상태가 머무른다면 그 시스템은 정함조건을 만족하는 불확실한 매개변수와 외란에 대해서 강인성을 가진다는 결과를 발표하였다. 참고문헌<sup>[4]</sup>에서는 SMC에 대한 전반적인 조사 연구와 주된 결과 및 가변구조에 대한 적용사례들

을 소개하였고, Ashchepkov는 최적 슬라이딩표면을 이용하는 개선된 슬라이딩모드 제어기를 적용하여 빠른 경로 추적을 성취하는 연구를 수행하였다<sup>[5]</sup>.

비선형 이차 방정식으로 표현되는 운동 시스템의 경로추적 성능을 향상시키기 위하여 Choi와 Park은 이동 슬라이딩표면(moving sliding surface)를 제안하였다<sup>[6]</sup>. 일반적으로 SMC는 슬라이딩면에 도달하는 동안의 외란의 변화등에 대한 강인성을 확보할 수 없는데 이를 해결하기 위해서 추적오차의 역치에 대한 스위칭 선형초표면의 기울기 벡터를 적용하는 방법이 제안되었다<sup>[7]</sup>. Lu와 Chen은 슬라이딩면에 도달하는 과정을 제거하고 입력토크 한계 내에서 안정한 전역 슬라이딩모드(GSMC,

\* 한국해양대학교 기계공학과

\*\* 동아대학교 전자공학과

\*\*\* 한국해양대학교 대학원

global sliding mode control)를 제안하였다<sup>[8]</sup>. 여기서는 허용할 수 있는 제어 입력의 한계를 추정하는 방법을 제안하였다. SMC의 적용에 있어서 Hashimoto는 불확실성을 가진 BLDC 모터 시스템에 이러한 전통적인 가변구조 제어를 적용하였고<sup>[9]</sup>, Park은 관측기를 이용하여 가속도를 추정하고 정상 상태 오차의 감소시키는 SMC를 AC 서보 모터에 적용하였다<sup>[10]</sup>.

본 논문에서는 불확실한 매개변수와 외란의 한계를 갖는 시변 선형 2차 시스템의 제어를 위해 전역 최적 슬라이딩모드(GOSMC)법을 제안하였다. GOSMC는 GSMC의 경로함수를 최소시간경로함수로 개선하여 제한된 입력 내에서 최단시간에 목표점에 도달하는 경로를 따르도록 설계되었다. 이외에도 제안된 제어기의 장점은 불확실한 매개변수와 외란의 한계가 주어지면 목표점에 도달하는 최단시간과 가속도를 추정하는 수식을 구할 수 있다. 더욱이 이 식은 해석적인 형태(closed form)로 표현되어 Runge-Kutta와 같은 수치해석방법을 사용하지 않아 계산이 빠르고 용이하다. 실험과 모의실험을 통하여 제안된 제어기를 BLDC모터 시스템에 적용하여 그 성능과 결과의 유용성을 검증하였다.

## 2. 시스템의 정의

불확실한 매개변수를 갖는 시변 선형 2차 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{x} + a_1(t)\dot{x} + a_2(t)x = b(t)(u + d(t)) \quad (1)$$

여기서 시스템의 매개변수  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$  및  $b(t)$ 의 정확한 측정은 어렵고 입력 외란의 크기  $d(t)$ 는 불확실하지만 유계된다고 가정하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \beta_{\min} &\leq b^{-1}(t) \leq \beta_{\max} \\ \alpha_{1\min} &\leq b^{-1}(t)a_1(t) \leq \alpha_{1\max} \\ \alpha_{2\min} &\leq b^{-1}(t)a_2(t) \leq \alpha_{2\max} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\max_t |d(t)| < D$$

모든 시스템의 제어입력 크기에는 한계가 존재하므로 그 제한범위는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{\min} \leq u \leq U_{\max} \quad (3)$$

## 3. 슬라이딩모드 제어기의 설계

### 3.1 슬라이딩모드 제어기의 설계

식 (1)과 같은 시스템의 제어를 위하여 다음의 GOSMC를 제안하였다.

$$u = -\hat{\beta}(c\dot{x} - f) + \hat{a}_1\dot{x} + \hat{a}_2x - \{\Delta\beta c\dot{x} - \hat{f} + \Delta\alpha_1|\dot{x}| + \Delta\alpha_2|x| + D\}sgn(s) \quad (4)$$

여기서

$$\begin{aligned} \hat{\beta} &= \frac{\beta_{\max} + \beta_{\min}}{2}, \quad \Delta\beta = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{2} \\ \hat{a}_1 &= \frac{\alpha_{1\max} + \alpha_{1\min}}{2}, \quad \Delta\alpha_1 = \frac{\alpha_{1\max} - \alpha_{1\min}}{2} \\ \hat{a}_2 &= \frac{\alpha_{2\max} + \alpha_{2\min}}{2}, \quad \Delta\alpha_2 = \frac{\alpha_{2\max} - \alpha_{2\min}}{2} \end{aligned}$$

또한, 식 (4)의 슬라이딩모드는 참고 문헌<sup>[8]</sup>에서 제안한 GSMC의 5차 다항식으로 구성된 강제함수(forcing function)  $f(t)$ 를 최소시간 경로함수로 개선하여 시스템의 상태가 최적 경로를 추적하도록 한 것이다. 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

$$s = \dot{e} + ce - f(t) \quad (5)$$

여기서  $e = x - r$ 이고  $r > 0$ 은 기준신호이며, 강제함수는 일반적인 슬라이딩모드 제어기의 단점인 슬라이딩면에 도달하는 과정 없이 전역적으로 슬라이딩면에 도달하도록 하는 역할을 한다. 본 논문에서는 이 장점에 더하여 시스템의 상태가 최소 시간경로를 따르도록 하는 강제함수를 제안하였다.  $f(t)$ 의 설계에는 다음의 조건들이 요구된다.

$$f(0) = \dot{e}_0 + ce_0 \quad (6a)$$

$$f(t) \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (6b)$$

$$\dot{f}(t) \text{가 유계됨} \quad (6c)$$

여기서, (6a)는  $t=0$ 일때, 시스템의 상태가 슬라이딩면에 있음을 의미하고, (6b)는 페루프 시스템이 점근안정하기 위한 조건이며, (6c)는  $\dot{f}(t)$ 이 유계되어 슬라이딩모드가 존재하도록 하는 조건이다. 조건 식(6)을 만족하는 식 (5)의 슬라이딩모드 제어기의 안정도는 리아푸노프 함수  $V = (1/2)s^2 > 0$ 를 이용하고 이의 시간에 관한 미분치가  $\dot{V} < 0$  (for  $s \neq 0$ ) 임을 보이면 된다. 이의 증명은 매우 단순하며 이미 참고문헌<sup>[8]</sup>에 정리되어 있다.

### 3.2 강제함수의 설계

안정도 증명에서 강제함수를 조건 (6)을 만족하는 원하는 경로함수로 구성하면 시스템의 점근적 안정도가 입증된다. 이는 궁극적으로  $s = 0$ 이 성립됨을 의미한다. 본 논문에서는 식 (6)의 조건을 만족하는 경로함수의 선정을 위해 참고문헌 [11]에 설명된 최소시간경로를 갖는 다음의 함수를 제안하며 이의 초기 및 말기 조건은 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{for } t = 0 : y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0 \\ \text{for } t \geq t_f : y(t_f) = r, \dot{y}(t_f) = 0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

최소시간 경로의 이동 경계 조건은 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} y = \frac{a}{2} t^2 \\ \dot{y} = at \\ \ddot{y} = a = \frac{v}{t_b} \end{array} \right\} \quad \text{for } 0 \leq t < t_b \quad (8a)$$

$$\left. \begin{array}{l} y = r - \frac{a}{2} t_f^2 + at_f t - \frac{a}{2} t^2 \\ \dot{y} = a(t_f - t) \\ \ddot{y} = -a \end{array} \right\} \quad \text{for } t_b \leq t \leq t_f \quad (8b)$$

여기서  $v$ 는 최대속도이고  $a$ 는 가속도이며  $t_f$ 는 최종 도착시간이다. Fig. 1은 최소시간 경로, 속도 및 가속도의 윤곽도이다.

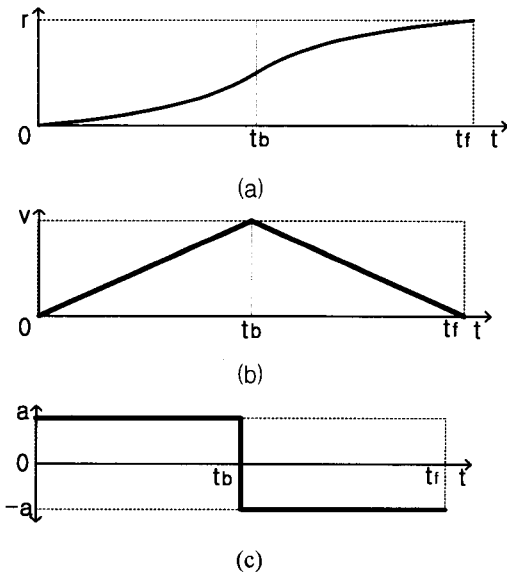


Fig. 1 Minimum time trajectory: a) position b) velocity c) acceleration

최소시간 경로를 갖는 경로함수를 포함하며 전

역적 특성을 갖는 슬라이딩모드를 생성하는 강제함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \dot{y} + c(y-r) = at + c\left(\frac{a}{2} t^2 - r\right) \quad (0 \leq t < t_b) \quad (9a)$$

$$f(t) = a\left\{(t_f - t) + c\left(t_f t - \frac{1}{2} t_f^2 - \frac{1}{2} t^2\right)\right\} \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (9b)$$

#### 4. 최소시간경로의 도착시간 추정

식 (2)의 불확실한 매개변수와 외란을 갖는 시스템을 제어하는 입력은 식 (3)과 같이 크기가 제한되어 있다. 이 제한을 만족하며 시변 선형 2차 시스템에서 최소시간경로를 따라 기준입력에 도달하는 시간을 추정하는 방법을 제안하였다. 도달시간추정을 위하여 우선 GOSMC를 크기에 따라 두 부분으로 분할하였다. 크기는  $s$ 의 부호에 따라 결정되며 다음과 같이 표현된다.

$$u_h = \hat{\beta}(-c\dot{x} + f) + \hat{a}_1 \dot{x} + \hat{a}_2 x + \{\Delta\beta - c\dot{x} + f + \Delta a_1 |\dot{x}| + \Delta a_2 |x| + D\} \quad s < 0 \quad (10a)$$

$$u_l = \hat{\beta}(-c\dot{x} + f) + \hat{a}_1 \dot{x} + \hat{a}_2 x - \{\Delta\beta - c\dot{x} + f + \Delta a_1 |\dot{x}| + \Delta a_2 |x| + D\} \quad s > 0 \quad (10b)$$

제안된 GOSMC는 궁극적으로 점근 안정하므로 시스템의 상태는 경로함수를 잘 추적하고, 따라서  $t \geq 0$ 에 대하여  $s = \dot{s} = 0$ 의 상태가 된다. 이를 이용하면, 식 (5)에서 다음의 식이 성립된다.

$$\ddot{x} = -c\dot{x} + f \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 식 (10)을 다시 표현하면 다음과 같이 된다.

$$u_h = \hat{\beta}\ddot{x} + \hat{a}_1 \dot{x} + \hat{a}_2 x + \{\Delta\beta |\dot{x}| + \Delta a_1 |\dot{x}| + \Delta a_2 |x| + D\} \quad (12a)$$

$$u_l = \hat{\beta}\ddot{x} + \hat{a}_1 \dot{x} + \hat{a}_2 x - \{\Delta\beta |\dot{x}| + \Delta a_1 |\dot{x}| + \Delta a_2 |x| + D\} \quad (12b)$$

Fig. 1을 참조하면 구간  $0 \leq t < t_b$ 에서  $|\dot{x}| = \dot{x} = a$ 이고 구간  $t_b \leq t \leq t_f$ 에서는  $|\dot{x}| = -\dot{x} = -a$ 임을 알 수 있다. 따라서, 식 (12a)는 식 (4)를 이용하면

$$\begin{aligned}
 u_h &= \beta_{\max} \dot{x} + \alpha_{1\max} \dot{x} + \alpha_{2\max} x + D \\
 &\quad (\text{for } 0 \leq t < t_b) \quad (13a) \\
 &= \beta_{\min} \dot{x} + \alpha_{1\max} \dot{x} + \alpha_{2\max} x + D \\
 &\quad (\text{for } t_b \leq t \leq t_f)
 \end{aligned}$$

이고, 다음의 (13b)도 같은 방법으로 구한다.

$$\begin{aligned}
 u_l &= \beta_{\min} \dot{x} + \alpha_{1\min} \dot{x} + \alpha_{2\min} x - D \\
 &\quad (\text{for } 0 \leq t < t_b) \quad (13b) \\
 &= \beta_{\max} \dot{x} + \alpha_{1\min} \dot{x} + \alpha_{2\min} x - D \\
 &\quad (\text{for } t_b \leq t \leq t_f)
 \end{aligned}$$

식 (13a)와 (13b)를 비교하면,  $u_h > u_l$ 임을 알 수 있고, 식 (8)에서 정의한 최적 경로 함수의 정의들과  $r = 1/4at_f^2$ 을 식 (13a)의  $x$ ,  $\dot{x}$  및  $r$ 에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 u_h &= aW + D \quad (0 \leq t < t_b) \\
 &= aX + D \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 W &= \beta_{\max} + \alpha_{1\max} t + \frac{1}{2} \alpha_{2\max} t^2 \\
 X &= -\beta_{\min} + \alpha_{1\max} (t_f - t) \\
 &\quad - \alpha_{2\max} \left( \frac{1}{4} t_f^2 - t_f t + \frac{1}{2} t^2 \right)
 \end{aligned}$$

같은 방법으로 최적 경로함수를 식 (13b)의  $x$ 와  $\dot{x}$ 에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 u_l &= aY - D \quad (0 \leq t < t_b) \\
 &= aZ - D \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned}
 Y &= \beta_{\min} + \alpha_{1\min} t + \frac{1}{2} \alpha_{2\min} t^2 \\
 Z &= -\beta_{\max} + \alpha_{1\min} (t_f - t) \\
 &\quad - \alpha_{2\min} \left( \frac{1}{4} t_f^2 - t_f t + \frac{1}{2} t^2 \right)
 \end{aligned}$$

식 (14)의  $u_h$ 의 최대치와 식 (15)의  $u_l$ 의 최소치는 어떤 시간에 존재하게 되며, 이때 구한 최대치 및 최소치를 이용하면 식 (3)의 제어 입력의 한계, 혹은, 모터 시스템의 토크 한계 구간 내에서 시스템에 설정할 수 있는 최대 및 최소 가속도의 한계 범위를 다음과 같이 설정할 수가 있다. 식 (14)와 (15)의 최대치와 최소치를 각각 다음과 같이 표현하면

$$\max_{t \geq 0} u(t)_h = aT_{\max} + D \quad (16)$$

$$\min_{t \geq 0} u(t)_l = aT_{\min} - D \quad (17)$$

식 (3)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{\min} \leq \min u(t) \leq \max u(t) \leq U_{\max} \quad (18)$$

최단경로 도착시간을 구하기 위하여 식 (16)과 (17)에서  $u_h$ 의 최대치와  $u_l$ 의 최소치를 구해야 한다. 이를 구하기 위하여 시간에 관하여 각각 미분하여 각 함수의 최대 및 최소치를 구한다. 그러나 각 함수의 구간이 유계되고 닫혀있기 때문에  $t \in [0, t_f]$ 의 시초, 시말 및 중간 점에서는 미분 가능하지 않으나 이 점들이 최대 및 최소점이 될 수 있다. 우선 미분 가능 구간에서 최대 및 최소치를 구하기 위하여 식 (14)와 (15)를 시간에 관하여 미분한다.

$$\begin{aligned}
 \frac{du_h}{dt} &= \alpha_{1\max} a + \alpha_{2\max} at \quad (0 \leq t < t_b) \\
 \frac{du_h}{dt} &= -\alpha_{1\max} a + \alpha_{2\max} a(t_f - t) \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서 각 구간에 대하여  $\frac{du_h}{dt} = 0$ 과  $t \geq 0$ 를 만족하는 해를 구하면 다음과 같다.

$$t_{hd} = t_f - \frac{\alpha_{1\max}}{\alpha_{2\max}} \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (20)$$

이를 식 (16)에 대입하면

$$u_h|_{t=t_{hd}} = aT_{\max}|_{t=t_{hd}} + D \quad (t_b \leq t \leq t_f) \quad (21a)$$

시초, 시말 및 중간 점에서의 제어 입력의 크기를 계산하면 다음과 같다.

$$u_h|_{t=0} = a\beta_{\max} + D \quad (21b)$$

$$u_h|_{t=t_b-0} = a(\beta_{\max} + \alpha_{1\max} t_b + \frac{1}{2} \alpha_{2\max} t_b^2) + D \quad (21c)$$

$$u_h|_{t=t_b+0} = a(-\beta_{\min} + \alpha_{1\max} t_b + \frac{1}{2} \alpha_{2\max} t_b^2) + D \quad (21d)$$

$$u_h|_{t=t_f} = a(-\beta_{\min} + \frac{1}{4} \alpha_{2\max} t_f^2) + D \quad (21e)$$

제어 입력의 최대치는 식 (21b)가 (21c) 보다 명백히 작고 식 (21d)은 식 (21c) 보다 작으므로 식 (21a), (21c) 및 (21e) 중에서 최대치를 갖는 것 중에서 선정된다. 즉

$$\max u(t) = \max \{ u_h|_{t=t_{hd}}, u_h|_{t=t_b-0}, u_h|_{t=t_f} \} \quad (22)$$

이 된다. 같은 방법으로  $u_i$ 의 최소치를 구하면 다음과 같이 최소치를 갖는 것 중에서 선정된다.

$$\min u(t) = \min \{ u_i |_{t=t_w}, u_i |_{t=t_{b+0}}, u_i |_{t=t_f} \} \quad (23)$$

제안된 제어 방법의 장점은 식 (22)와 (23)의 최대 및 최소치 가능 함수들이 모두 최종 도착 시간  $t_f$ 의 2차 함수로 표현되어 해석적인 해가 존재한다는 것이다. 따라서 수치 해석의 접근 없이 쉽게 최대치를 선정할 수 있다. 특히, 모터 시스템의 경우와 같이 강성 계수  $a_2 = 0$  인 경우, 다음과 같이 해석적인 형태로 최소 도착 시간을 계산할 수 있다.

우선,  $a_2=0$  임으로 식 (20)에는 근이 존재치 않는다, 따라서, 식 (21c)와 (21e)에서 최대치는

$$\max u(t) = u_h |_{t=t_{b-0}} \quad (0 \leq t) \quad (24)$$

이 된다. 최소치에서는  $a_2=0$  임으로

$$\min u(t) = u_l |_{t=t_f} \quad (0 \leq t) \quad (25)$$

최소 도착 시간을 구하기 위하여 식 (7)의 원하는 경로함수에서의  $r = (1/4)at_f^2$ 을 이용하면  $a = 4r/t_f^2$ 의 관계를 구할 수 있고, 이를 식 (21c)와 (25)에 대입하여 정리하고 식 (3)의 유계범위를 적용하면 다음의 식이 각각 구해진다.

$$\frac{4r}{t_f^2} (\beta_{\max} + \alpha_{1\max} t_b) + D \leq U_{\max} \quad (26)$$

$$U_{\min} \leq -\frac{4r}{t_f^2} \beta_{\max} - D \quad (27)$$

식 (26)을 정리하면

$$(U_{\max} - D)t_f^2 - 2r\alpha_{1\max} t_f - 4r\beta_{\max} \geq 0 \quad (28)$$

식 (28)의 해석 해, 즉 목표점  $r$ 에 최단으로 도착하는 시간은 다음과 같다.

$$t_{hmin} = \frac{r\alpha_{1\max} + \sqrt{r^2\alpha_{1\max}^2 + 4r\beta_{\max}(U_{\max} - D)}}{U_{\max} - D} \quad (29)$$

식 (27)에서 도착시간을 구하면

$$t_{lmin} = \sqrt{\frac{4r\beta_{\max}}{-U_{\min} - D}} \quad (30)$$

따라서 최소 도착시간은 다음과 같다.

$$t_{\min} = \max \{ t_{hmin}, t_{lmin} \} \quad (31)$$

모터 시스템의 기준입력에 대한 최소도착시간은 식 (29)와 (30) 같이 해석적인 형태의 해로 명료하게 표현된다. 이를 이용하면 최소 도착시간을 매우 쉽게 계산할 수가 있다. 역으로 제어 대상인 기계 시스템의 원하는 도착시간과 거리가 주어지면 모터의 설계도 매우 용이하게 할 수가 있다.

## 5. 모의실험 및 실험

### 5.1 모터 시스템의 정의

모의실험 및 실제 실험에서는 BLDC 모터 시스템을 대상으로 제안된 GOSMC 제어기를 적용하여 GSMC나 SMC 제어기 보다 성능이 우수하고 현실성이 있음을 보이고자 한다.

모터 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} + a_1 \dot{\theta} = b(u + d) \quad (32)$$

여기서,  $\theta$ 는 각 위치;  $a_1 = B/J$ ;  $b = K_t K_c / J$ 이고,  $B$ 는 점성 마찰계수;  $J$ 는 부하를 포함한 관성 모멘트;  $K_t$ : 모터의 토크 계수;  $K_c$ : PWM 인버터의 전류이득이고 이들 중  $K_t$ 만이 카탈로그에 명시되고 나머지는 측정이나 추정에 의해 한계를 구할 수 있다. 여기서  $u$ : 전압입력이다.

불확실한 시스템 매개변수들은 여유를 두고 추정하였고 외란의 한계  $D$ 는 마찰력 추정한계이다. 매개변수의 추정범위는 약 15% 내로 정하였고 이로 인한 제어 변수의 한계와 관련 추정치는 다음과 같다.

$$4.140e-5 \leq J \leq 6.210e-5, \quad 1.314e-1 \leq K_c \leq 1.971e-1$$

$$2.902e-1 \leq K_t \leq 4.354e-1, \quad 5.078e-4 \leq B \leq 7.617e-4$$

$$3.814e-2 \leq K_c \times K_t \leq 8.581e-2,$$

$$5.917e-3 \leq \alpha \leq 1.997e-2, \quad 4.824e-4 \leq \beta \leq 1.628e-3$$

$$\hat{\beta} = 1.05533e-3, \quad \Delta\beta = 5.72895e-4,$$

$$\hat{\alpha} = 1.29444e-2, \quad \Delta\alpha = 7.02696e-3,$$

$$D = 0.03, \quad \text{Sampling Time} = 0.905 \text{ (msec)}.$$

실험장치로서 모터는 일회전 당 1000 펄스 출력이 나오는 로터리 엔코더가 부착된 삼성제품의 CSM A5(50W) BLDC 모터/드라이버를 사용하였다. 모터제어를 위한 주제어기로 IBM 586 PC를 사용하였고 모터엔코더로부터의 신호는 PCL-722 신호

Table 1 Experimental and simulation data of control schemes

Method	Controller	$t_f$ [sec]	c	a	Max Input
Closed form estimation	-	0.632	7.878	623.897	5.000
Simulation	GOSMC	0.635	7.878	623.897	5.017
Experiment	GOSMC	0.647	7.878	623.897	5.021
Experiment	GSMC	0.700	7.878	623.897	3.972
Experiment	SMC	0.760	7.878	-	5.640

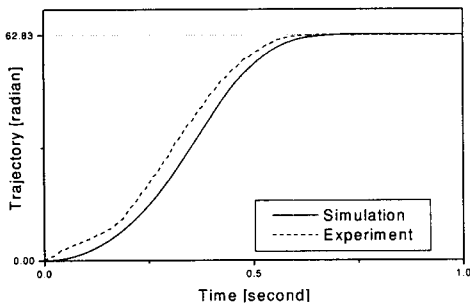
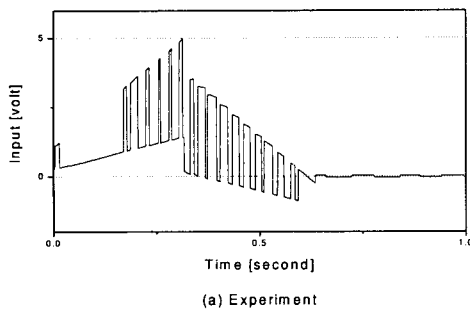
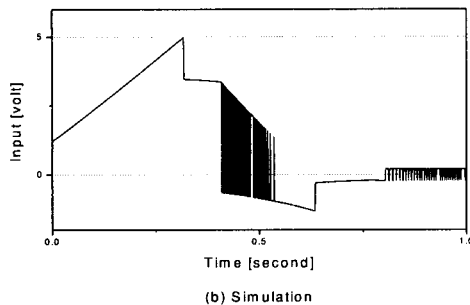


Fig. 2 Trajectory tracking of GOSMC



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 3 Control inputs of GOSMC

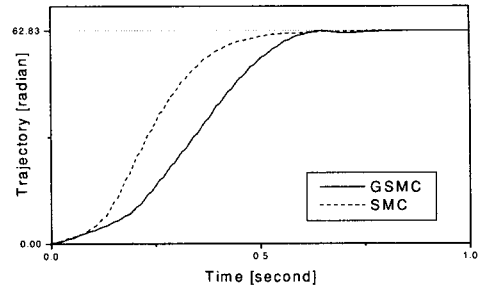


Fig. 4 Trajectory tracking of GSMC and SMC

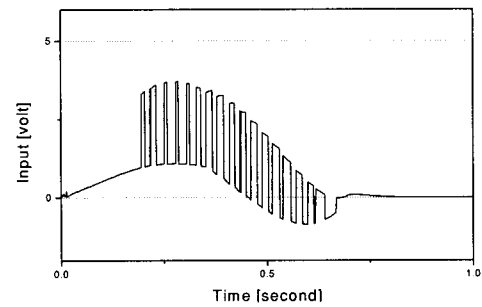


Fig. 5 Control inputs of GSMC in experiment

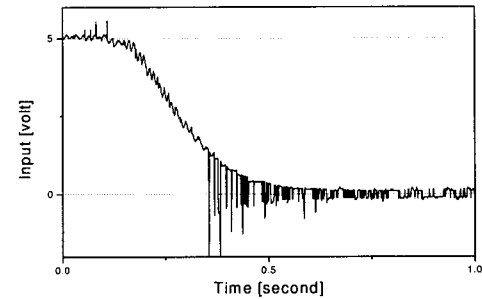


Fig. 6 Control inputs of SMC in experiment

처리 보드를 사용하였다. 제어명령신호는 PCL-833 D/A 보드를 사용하였다. 모터 제어입력의 한계 치는 D/A 컨버터를 통해 변환된  $\pm 5V$ 이다.

### 5.2 모의실험 및 실험의 결과 및 비교

GOSMC, GSMC, SMC에 대한 실험과 GOSMC에 대한 모의실험에서 모터 시스템의 기준입력(목표점)을  $r = 20(\text{rad})$ 으로 정하였다. 모든 제어기들에 사용된 제어이득은  $c=7.878$ 이고, 모의실험은 Runge-Kutta 4차 식을 이용한 모의실험으로 수행하

였다. 주어진 한계치 및 추정오차들을 이용하여 식 (29)와 (30)의 시스템의 최소 도착 시간, 가속도 및 식 (24)의 최대 입력 등을 계산하면 Table 1과 같다.

제안한 제어기의 성능을 고찰하기 위하여 SMC 및 GSMC와 비교하였다. 같은 조건의 불확실한 매개변수를 적용하여 실험을 수행하여 결과를 Fig. 2 - Fig. 6에 나타내었다. Table 1.과 Fig. 2와 4에서 나타난 실험결과를 비교해보면 다른 제어기에 비하여 GOSMC의 도착시간(오차가 0이 되는 시간)이 가장 빠르다는 것을 알 수 있다. 제어 입력도 Table 1.과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 토크 한계를 초과하지는 않으나 최대한 활용함을 보여주는데 이는 목표점 도착시간을 최소로 하는 이유가 된다. SMC의 경우 상승시간은 매우 빠르나 기준제어입력 근처에서 수렴하는 데 상당한 지연을 가지며, 제어입력도 한계인 5(V)를 초과하여 현실적이지 못하다. GSMC의 경우 제어입력한계 내에서 시스템을 제어하여 SMC보다는 추속속도가 빠르나 제어입력을 충분히 활용하지 못함을 Fig 5를 통하여 알 수 있다. GOSMC의 적용 시에 Table 1.과 Fig 3a 및 3b에 나타난 바와 같이 실험과 모의실험의 입력형태와 크기가 유사함을 보여준다,

GOSMC의 적용으로 구한 일반 해를 이용하면 Table 1에 나타난 바와 같이 모의실험을 수행한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서, 이를 이용하면 실험이나 모의실험을 수행하지 않고 목표점 도착 시간과 가속도를 정확히 추정할 수 있어서 계산이 빠르고 용이하여 모터 제어 시스템의 설계를 용이하게 하는데 도움이 된다. 이때 요구되는 조건은 단지 매개변수의 범위와 제어입력의 한계이다.

## 6. 결론

불확실한 매개변수와 한계토크를 갖는 2차 시스템을 위한 전역 최적 슬라이딩모드 제어기(GOSMC)를 설계하였다. GOSMC는 불확실한 매개변수와 외란의 한계가 정의되면 입력한계 내에서 최단시간에 시스템의 기준입력에 도달하는 성능을 갖는다. 제안한 제어기를 BLDC모터 시스템에 적용하였다. 이의 결과로 기준입력인 회전각도와 불확실한 매개변수와 외란의 범위만 정하면 목표점에 도달하는 최단 시간과 가속도를 추정하는 추정계산식을 도출하였고, 특히 이는 닫힌 형태(closed form)의 식으로 표현되어 계산이 용이하다. GOSMC의

BLDC모터 시스템의 적용결과로 실험과 모의실험 및 추정계산식의 결과와 매우 유사함을 알 수 있으며 성능도 다른 SMC들 보다 우수하다는 것을 입증하였다.

## 참고문헌

1. Emelyanov, S. V., "Variable Structure Control Systems," Moscow: Nauka, 1967.
2. Ikis, U, "Control Systems of Variable Structure," New York: Wiley, 1976.
3. Utkin, V. I., "sliding mode and their applications," Moscow: Mir, 1978.
4. Hung, J. Y., Gao, W., and Hung, J. C., "Variable structure control : A survey," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, pp. 2~22, 1993.
5. Ashchepkov, L.T., "Optimization of sliding motion in a discontinuous control," Automation and remote control, Vol. 44, No. 11, pp. 30~37, 1983.
6. Choi, S. B. and Park, D. W., "Moving sliding surfaces for fast tracking control of second-order dynamical systems," J. of Dynamic Systems, Meas., and Control, Vol. 116, pp. 154~158, 1994.
7. Lee, C. K., and Kwok, N. M., "A variable structure controller with adaptive switching surfaces," American Control Conference, Seattle, USA, pp. 1033~1034, 1995.
8. Lu, Y. S. and Chen, J. S.: "Design of a global sliding mode controller for a motor drive with bounded control," Int. J. control, Vol. 62, No. 5, pp. 1001-1019, 1995.
9. Hashimoto, H., Yamamoto, H., Yanagisawa, S., and Harashima, F., "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach," IEEE Trans. on Ind. App., Vol. 24, No. 1, pp. 160~170, 1988.
10. Park, S., Kang, M., Lee, L., Huh, U., and Rhee, J., "A speed control of AC servo motor using sliding mode controller," Proc. Korea Automatic Control Conference, pp. 1406~1410, 1994.
11. Spong, M. W., and Vidyasagar, M., "Robot Dynamics and Control," John Wiley & Sons, 1994.