

최단시간 슬라이딩 면에 의한 스텝모터의 위치제어

A Position Control of Step Motor with Minimum Time Sliding Surface

유완식, 박형남, 김영석

(Wan sik You, Hyung nam Park and Young seok Kim)

Abstract : For the robust control, sliding mode control has gained a great attention. Sliding mode control has the good robustness, because it makes the state of system reach the origin of the state space, by a varying the structure of system on the sliding surface. The slope of sliding surface affects to the control performance. If it is small, robustness is increased at the expense of reaching time. On the contrary, if it is large, reaching time is decreased at the expense of robustness and overshoot. In this paper, to design the optimal sliding surface, optimal control theory is introduced. To confirm the validity of the proposed method, the position control of step motor is implemented.

Keywords: minimum time, sliding surface, variable structure control(vsc), step motor, position control

I. 서론

스텝모터와 같은 정밀 제어용 전동기의 위치제어에서 제어기가 갖추어야 할 중요한 요소로 속응성과 강인성을 들 수 있다. 이러한 조건을 만족시킬 만한 제어법으로 최근 가변구조제어[1][2]가 널리 사용되고 있다. 가변구조제어는 시스템의 구조를 슬라이딩 면을 중심으로 전환하면서 원점을 향해 미끄러져 가도록 한다. 그리고 슬라이딩 면 상에서의 시스템의 특성은 파라미터 변동이나 외란에 강인한 특성을 갖게 된다.

가변구조제어는 최근 들어 다양한 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있고 제어성능 면에서 많은 발전이 있어왔다 [3]-[6]. 그러나 가변구조제어에서 슬라이딩 면의 기울기는 제어성능에 중요한 영향을 미치는 요소임에도 불구하고 기울기를 결정하는 구체적인 방법이 제시되고 있지 않다. 슬라이딩 면의 기울기가 작으면 reaching mode가 감소하므로 강인성은 증가하나 도달시간이 길어진다. 반면, 기울기가 커지면 도달시간은 다소 줄어든다 reaching mode의 증가로 강인성이 희생되고 오버슈트가 발생할 우려가 있다. 이러한 슬라이딩 면의 기울기를 결정하는 방법은 지금까지의 연구 결과를 통하여 볼 때 실험적인 방법을 통하여 어떤 범위 내에서 임의로 선택하고 있는데 이와 같은 방법으로는 최소시간에 목표위치에 도달할 수 없다.

본 논문에서는 가변구조제어를 스텝모터의 위치제어에 적용하고, 최적제어이론을 도입하여 목표치 도달시간을 최소로 하는 슬라이딩 면의 기울기를 결정하는 방법을 제안한다. 그리고 제안하는 방법에 의해 구해진 기울기를 적용하여 실험을 행함으로써 응답성을 검토하고 제안하는 방법의 타당성을 확인한다.

II. 스텝모터의 정현파 전류구동

스텝모터는 주어지는 펄스에 비례하여 회전하는 이산적인 회전기이다. 모터의 각 권선의 여자방법에 따라 구동방식이 유니폴라와 바이폴라 구동으로 크게 나누어진다. 이런 구동방식은 코일에 흐르는 전류의 방향이 일정한 것과 바뀌는 것에 따라 구별되고 전자는 제어회로가 간단한 반면 코일의 효율이 떨어지고 후자는 제어회로는 복잡하지만 코일의 효율이 높아진다. 또한 각 상의 여자순서에 따라 1상여자방식, 2상여자방식, 1-2상여자방식으로 나누어진다. 여기서 1-2상 여자방식은 모터의 1/2 스텝각에서도 정지시킬 수

있다. 일반적인 스텝모터의 바이폴라 2상여자 구동의 경우 각 상에 주어지는 전압, 전류파형은 그림 1과 같다.

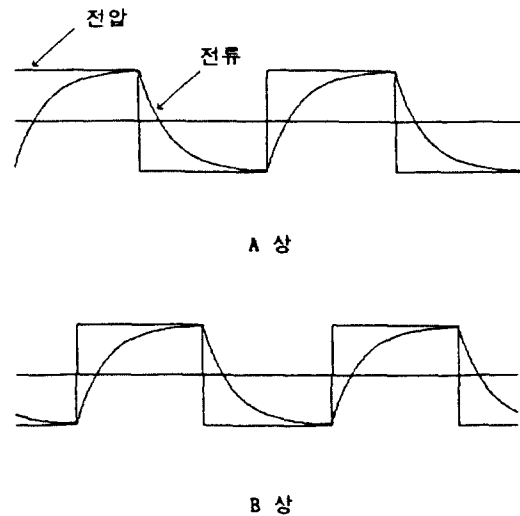


그림 1. 구형파구동시 전압, 전류파형.

Fig. 1. Voltage and current for square wave input.

그림 1에서 보는 바와 같이 A상의 전압은 B상의 전압에 비해 90° 의 위상차를 갖고 전류는 모터의 전기적 시정수를 가지고 증감하게 된다. 그러나 이러한 여자방법은 각 상의 권선에 주어지는 전압을 스위칭하고 있기 때문에 모터의 시정수에 의해 고속회전 시에는 토크가 감소하고 저속회전 시에는 난조와 떨림이 심하고 소음을 발생시켜 주변기에 노이즈를 일으키게 되는 단점이 있다.

본 연구에서는 그림 2에서와 같이 2상 AC 동기모터와 같이 각 상의 전류를 정현파로 구동한다[7]. 이와 같이 구동하면 스텝모터의 토크 리플이 감소되고 저속 시에도 부드러운 회전을 하게 된다. 더욱이 일반적인 스텝구동의 경우에는 모터의 정지위치가 기계적 안정점 외에는 정지시킬 수 없지만 정현파 전류구동의 경우에는 안정점 이외의 위치에서 정지가 가능하고 위치결정의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 여기서 전류의 위상각은 그림 3에서와 같이 회전자(계자속)의 위치를 검출하여 토크각 ψ 를 더한 형태가 된다. A상 전류와 B상의 전류를 (1)에 나타내었다.

$$i_a = I \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

$$i_b = I \cos(\omega t + \psi)$$

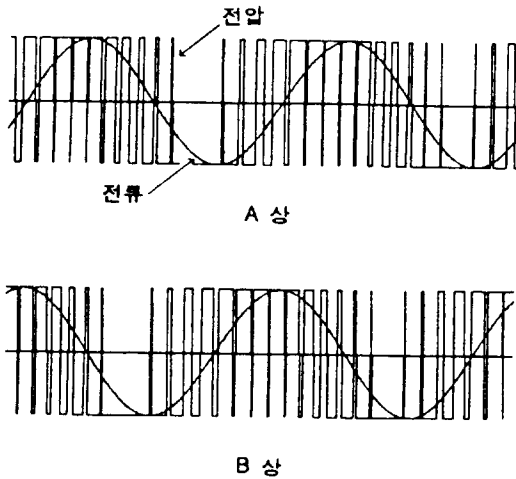


그림 2. 정현파구동시 전압, 전류파형.
Fig. 2. Voltage and current for sinusoidal input.

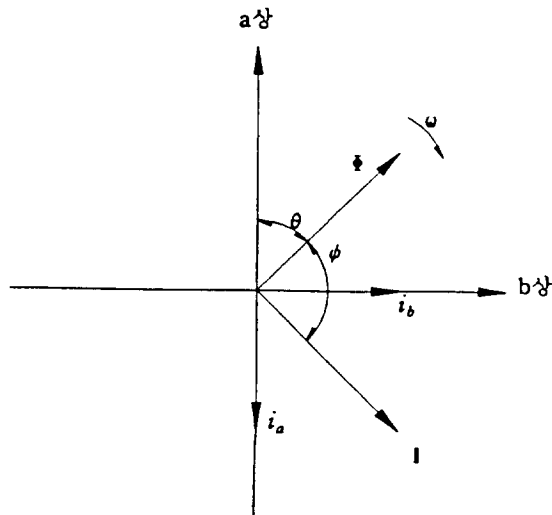


그림 3. 스텝모터의 벡터도.
Fig. 3. Vector diagram of step motor.

여기서, ω 는 각주파수, I 는 스텝모터의 상지 최대전류 그리고 ϕ 는 토오르크각이다.

모터의 발생 토오르크는 다음의 (2)와 같고 스텝모터를 제어하기 위한 제어변수로써 전류의 크기와 토오르크각의 두개의 항이 된다.

$$\tau = K_T I \sin \phi \quad (2)$$

K_T : 토오르크상수

III. 최적제어 이론에 의한 슬라이딩 면의 설계

1. 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩모드제어는 시스템의 상태가 설계자 임의로 설정한 슬라이딩 면을 따라 구속되기 때문에 시스템의 파라미터의 변동과 외란에도 상태제도가 변화되지 않는 강인한 제어계를 구성할 수 있다. 그러므로 모터의 위치제어시 외란이나 부하의 급격한 변동과는 상관없이 대상의 위치와 속도라는 상태만을 가지고 목표위치에 도달하는 고신뢰성을 갖는다. 또한 제어계의 설계에 있어서 시스템의 파라미터와 외란의 정확한 정보가 필요하지 않아 설계가 용이하다는 특징이 있다. 그림 4는 슬라이딩모드제어의 상태평면을 나타내었다.

스텝모터의 위치제어 시스템에서 슬라이딩 면은 다음과 같이 주어진다.

$$s = Cx_1 + x_2 \quad (3)$$

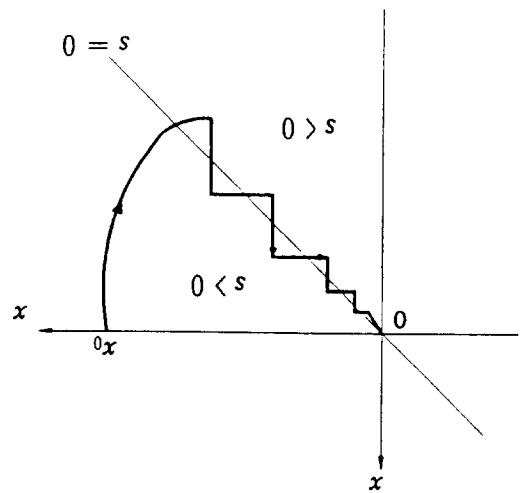


그림 4. 슬라이딩모드제어의 상태궤적.
Fig. 4. Phase portrait of sliding mode control.

여기서 x_1 은 위치오차, x_2 는 속도 그리고 C 는 슬라이딩 면의 기울기이다.

제어대상의 상태궤적은 (4)와 같이 $s=0$ 에 구속되기 때문에 위치오차는 (5)와 같이 시정수(L/C)를 갖고 지수적으로 감소한다.

$$s = Cx_1 + x_2 = 0 \quad (4)$$

$$x_1 = A \exp[-Ct] \quad (5)$$

따라서 슬라이딩 면의 기울기인 C 값은 시스템의 제어성능에 중요한 영향을 미친다. (6)에 가변구조제어를 위한 스텝모터 위치제어계의 상태방정식을 나타내었다. 본 논문에서는 편의상 외란은 없는 것으로 가정하였다.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = ax_2 - bu$$

여기서, $a = D/J$, $b = K_T/J$, J 는 관성, D 는 점성마찰계수 그리고 K_T 는 토오르크 상수이다. 또한 슬라이딩모드가 존재할 충분조건은 다음과 같다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} < 0 \quad (7)$$

제어입력 $u(t)$ 는 (7)의 슬라이딩모드의 존재조건으로부터 구할 수 있다. 먼저, (3)을 (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$s(Cx_1 + x_2) < 0 \quad (8)$$

(8)에 스텝모터의 상태방정식 (6)을 대입하면 다음과 같다.

$$s(Cx_2 + (-ax_2 - bu)) < 0 \quad (9)$$

(9)에서 $s = 0$ 을 만족하는 등가제어입력 u_{eq} 는 (10)과 같이 얻어진다.

$$u_{eq} = \frac{1}{b} (Cx_2 - ax_2) \quad (10)$$

따라서, 제어입력 u 는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$u = u_{eq} + K \operatorname{sgn}(s) \quad (11)$$

$$= \frac{1}{b} (Cx_2 - ax_2) + K \operatorname{sgn}(s)$$

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} -1 & s > 0 \\ 1 & s < 0 \end{cases}$$

여기서, K 는 슬라이딩모드 존재조건을 만족하는 양의 상수이다. 이상의 제어입력은 상태궤적이 정(7)의 영역에서는

+K의 입력으로 가속되고 부()의 영역에서는 -K의 입력으로 감속된다. 이와 같은 제어입력에 의해 모터는 초기위치에서 출발하여 슬라이딩 면에 도달할 때까지 시스템의 상태방정식의 궤도를 따라 움직이다가 슬라이딩 면에 도달하면 $sgn(s)$ 의 부호에 따라 스위칭하면서 목표지점까지 미끄러져 간다.

2. 최적제어이론에 의한 슬라이딩 면의 설정

가변구조제어에서는 슬라이딩 면의 기울기에 따라서 시스템이 목표점에 도달하는 시간이 달라지게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 슬라이딩 면의 기울기를 결정하는 새로운 방법을 제안한다. 기존에는 슬라이딩 면의 기울기를 실험적이거나 임의의 적당한 값으로 결정했으나 보다 이론적인 근거를 두어 최적제어이론을 도입하여 최적시간의 전지에서 슬라이딩 면의 기울기를 결정한다.

먼저 (11)을 상태방정식 (6)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} K sgn(s) \quad (12)$$

초기조건이 $x(0) = [x_1(0) \ x_2(0)]^T$ 이고, $s(0) > 0$ 이라고 가정하면 (12)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -Cx_2 + bK \end{aligned} \quad (13)$$

스텝모터의 시스템 방정식을 구하기 위하여 (13)의 미분방정식을 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \left(\frac{bK}{C^2} - \frac{x_2(0)}{C} \right) e^{-Ct} + \frac{bK}{C} t + x_1(0) \\ x_2(t) &= \left(x_2(0) - \frac{bK}{C} \right) e^{-Ct} + \frac{bK}{C} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $x_1(0)$ 은 초기위치오차이고, $x_2(0)$ 는 초기속도(=0)이다.

슬라이딩 면에의 도달시간(Reaching Time)은 (14)를 (4)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\left(x_2(0) - \frac{bK}{C} \right) e^{-Ct_r} + \frac{bK}{C} = \left(x_2(0) - \frac{bK}{C} \right) e^{-Ct_r} - bKt_r - Cx_1(0) \quad (15)$$

$$\therefore t_r = - \frac{bK + C^2 x_1(0)}{bCK} \quad (16)$$

$t \geq t_r$ 에서 시스템은 $Cx_1 + x_2 = 0$ 에 의해 지배를 받는다. 그러므로 $t \geq t_r$ 인 상태의 초기조건은 (16)을 (14)에 대입하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1(t_r) &= \left(\frac{bK}{C^2} - \frac{x_2(0)}{C} \right) e^{\left(\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK} \right)} - \frac{bK}{C^2} \\ x_2(t_r) &= \left(x_2(0) - \frac{bK}{C} \right) e^{\left(\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK} \right)} + \frac{bK}{C} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, (5)와 (17)로 부터 A를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= A e^{-Ct} \\ x_2(t) &= -CA e^{-Ct} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} x_2(0) &= -CA e^{-C \cdot 0} \\ &= x_2(0) e^{\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}} + \frac{bK}{C} \\ &= \left(1 - e^{\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\therefore A = \frac{bK}{C^2} \left(1 - C e^{-\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}} \right) - \frac{x_2(0)}{C} \quad (20)$$

(14)와 (20)을 (18)에 대입하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$x_1(t) = \left[\frac{bK}{C^2} \left(1 - C e^{-\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}} \right) - \frac{x_2(0)}{C} \right] e^{-Ct} \quad (21)$$

$$x_2(t) = \left[x_2(0) - \frac{bK}{C} \left(1 - C e^{-\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}} \right) \right] e^{-Ct}$$

본 논문에서는 시스템의 해가 가장 빠르게 목표점에 도달하도록 하기 위해서 성능지표 J를 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{aligned} J &= \int_0^{\infty} x_1^2(t) dt \\ &= \int_0^{t_r} x_1^2(t) dt + \int_{t_r}^{\infty} x_1^2(t) dt \end{aligned} \quad (22)$$

(22)에 (14)와 (21)을 대입하여 성능지표 J를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J &= - \frac{x_1(0)^2 [(bK + C^2 x_1(0))^2]}{bKC} \\ &+ \frac{x_1(0) [bK + C^2 x_1(0)]}{bC^3 K} - \frac{[bK + C^2 x_1(0)]^3}{3bC^5 K} \\ &- \frac{[bK + C^2 x_1(0)]^3}{3bC^5 K} + \frac{[-(bK) + Cx_2(0)]^2}{2C^5} \\ &+ \frac{e^{\frac{2(bK + C^2 x_1(0))}{bK}} [bK(1 - C e^{-\frac{bK + C^2 x_1(0)}{bK}}) - \frac{x_2(0)}{C}]^2}{2C} \\ &- \frac{2[bK + C^2 x_1(0)] [-(bK) + Cx_2(0)]}{C^5} \\ &- e^{\frac{2[bK + C^2 x_1(0)]}{bK}} \frac{[-(bK) + Cx_2(0)]^2}{2C^5} \\ &+ e^{\frac{(bK + C^2 x_1(0))}{bK}} \left[\frac{2[bK + C^2 x_1(0)] [bK - Cx_2(0)]}{C^5} \right. \\ &\left. + \frac{2[bK + C^2 x_1(0)] [-bK + Cx_2(0)]}{C^5} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

최적의 C는 (24)와 같이 C에 대한 편미분 J를 최소화하는 C가 된다. (24)의 풀이는 표 1의 정수와 초기위치 및 초기속도를 (23)에 대입하고 Mathematica의 Partial derivative 함수를 이용하였다.

$$\frac{\partial J}{\partial C} = 0 \quad (24)$$

IV. 실험 결과 및 검토

슬라이딩모드제어를 이용한 위치제어의 성능을 평가하고 최적제어에 의한 슬라이딩 면의 기울기를 설정하는 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실험 및 시뮬레이션을 행하였다. 표 1에는 스텝모터의 사양을 나타내었다. 이 논문에서 사용한 스텝모터는 정확한 정격이 알려지지 않은 것이어서 다음과 같은 방법을 통하여 얻은 값이다. 먼저 관성은 회전사의 질량과 지름을 알면 쉽게 계산이 가능하므로 관성을 구한다. 그리고 지령값을 일정하게 출력한 상태에서 모터의 실제속도와 상태방정식을 이용하여 계산한 추정속도를 비교하면서 두 값이 같아질 때까지 D와 K_v를 변화시킨다. 그리고 실제속도와 추정속도가 같아질 때의 a와 b를 얻는다. 실험을 위한 전체 시스템 블록도를 그림 5에 나타내었다.

표 1. 스텝모터의 정격.
Table 1. Specification for motors.

| | |
|----------------|--|
| STEP ANGLE | : 1.8 ° |
| SUPPLY VOLTAGE | : 12 [V] |
| CURRENT | : 0.6 [A]/PHASE |
| R | : 20 [Ω] |
| L | : 37 [mH] |
| J | : 0.135×10^{-4} [N·m·s ²] |
| D | : 0.958×10^{-4} [N·m·s] |
| K _t | : 0.143 [N·m/A] |

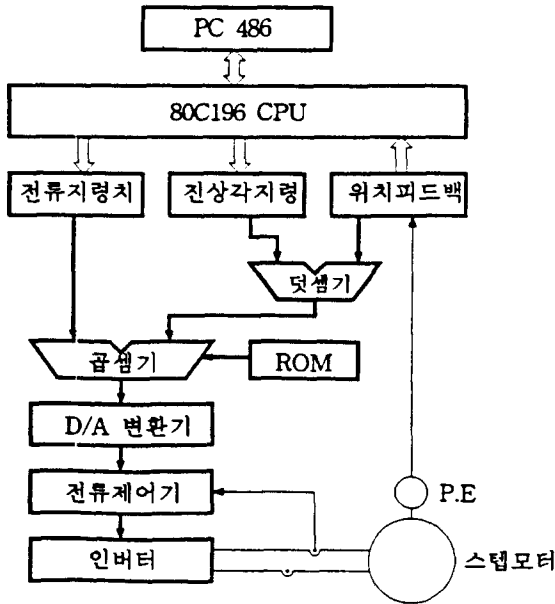


그림 5. 시스템 블럭도.
Fig. 5. System block diagram.

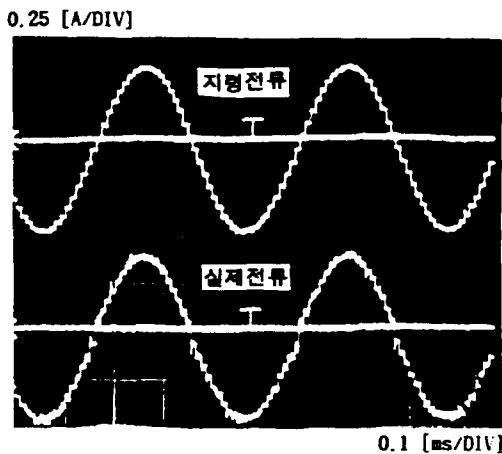


그림 6. 정현파구동시 전류파형.
Fig. 6 Current for sinusoidal input.

그림 6에는 정현파전류 구동방법에 의한 전류제어기의 성능을 확인하기 위해 지령전류와 실제전류의 파형을 보인 것이다. 그림으로부터 실제전류는 지령전류를 잘 추종함을 볼 수 있다. 이와 같이 스텝모터를 정현파구동함으로써 1[rpm]에서도 소음과 진동이 없는 부드러운 회전을 얻을 수 있었다. 전류파형에서 전류지령치에 계단모양이 생긴 이유는 D/A변환시 ROM 테이블의 데이터가 정현파의 1주기 내에 40개의 값만을 갖기 때문이다. 이것은 스텝모터에 직결된 펄스엔코더가 갖는 분해능이 2000 ppr이므로 스텝각이 1.8

도인 스텝모터에서는 1스텝당 10펄스가 나오는데 정현파가 갖는 1주기는 2스텝이므로 20개의 데이터를 갖게 된다. 이것을 다시 엔코더의 A, B상을 이용하여 2배 배 회로에서 1스텝당 20펄스를 만들어 내었다. 이렇게 함으로써 정현파의 1주기가 40개의 전류진폭 데이터를 갖게 되어 계단모양의 파형이 발생된 것이다.

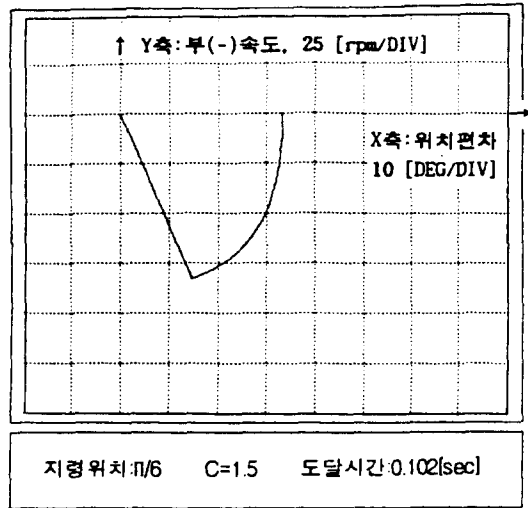


그림 7. 최적 기울기를 사용했을 경우의 상태궤적(시물레이션).
Fig. 7. Phase portrait for optimal slope (simulation).

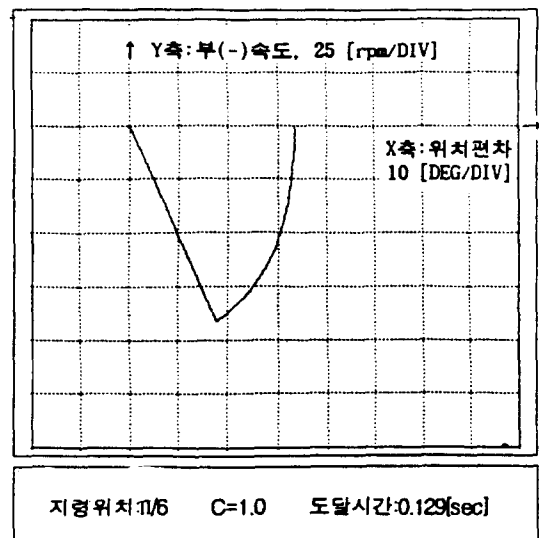


그림 8. 낮은 기울기를 사용했을 경우의 상태궤적(시물레이션).
Fig. 8. Phase portrait for lower slope (simulation).

그림 7, 8 그리고 9는 슬라이딩 면의 기울기에 따라 목표 위치에 도달하는 시간을 비교하기 위해 실시한 시물레이션 파형이다. 먼저, 그림 7은 최적 슬라이딩 면을 적용했을 때의 상태궤적파형으로 도달시간은 0.102초가 소요되었다. 그림 8은 최적 슬라이딩 면의 기울기보다 작은 값을 적용했을 때의 상태궤적파형으로 도달시간은 0.129초가 소요되었다. 또한 그림 9는 최적 슬라이딩 면의 기울기보다 큰 값을 적용했을 때의 상태궤적파형으로 도달시간은 0.121초가 소요되었다. 시물레이션으로부터 알 수 있듯이 최적 슬라이딩 면을 적용한 경우가 가장 최소시간에 목표위치에 도달함을 확인할 수 있다.

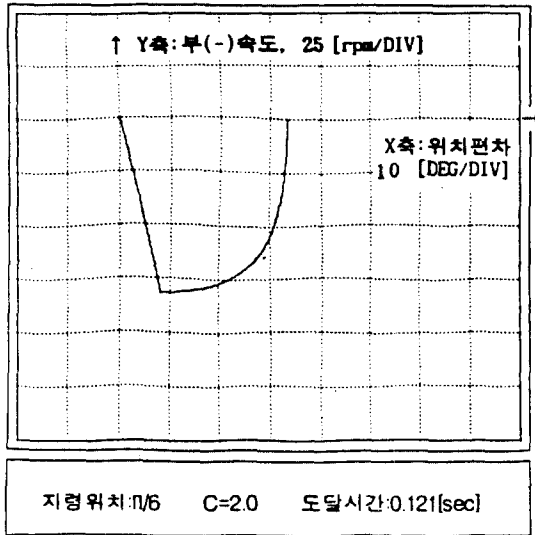


그림 9. 높은 기울기를 사용했을 경우의 상태궤적(시뮬레이션).
Fig. 9. Phase portrait for higher slope (simulation).

그림 10, 11, 12 그리고 13은 시뮬레이션 결과를 토대로 실험을 행한 파형이다. 그림 10은 최적 슬라이딩 면을 적용했을 때의 위치오차와 속도파형을 보인 것이고, 그림 11은 같은 경우의 상태궤적파형을 보인 것이다. 또 그림 12는 최단시간 슬라이딩 면의 기울기보다 큰 슬라이딩 면을 적용했을 때의 위치오차와 속도파형을 보인 것이고 그림 13은 같은 경우의 상태궤적파형을 보인 것이다. 그림에서 최적 슬라이딩 면을 적용한 경우는 도달시간이 약 0.1초 정도가 소요되었고, 슬라이딩 면의 기울기를 크게 하였을 경우는 도달시간이 약 0.12초 정도가 소요됨을 볼 수 있다. 따라서 실험에 있어서도 시뮬레이션에서와 같이 최적 슬라이딩 면을 적용했을 경우가 도달시간이 단축됨을 알 수 있다.

이상으로부터 스텝모터의 위치제어에 슬라이딩모드제어를 적용함으로써 오버슈트가 없는 안정한 제어를 구현할 수 있음을 확인하였고 정현파전류구동법을 사용함으로써 소음과 진동이 없는 부드러운 회전을 얻을 수 있었다. 또 제안한 최적제어에 의한 최적 슬라이딩 면을 적용하여 목표위치 도달시간을 최소화함으로써 제어성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

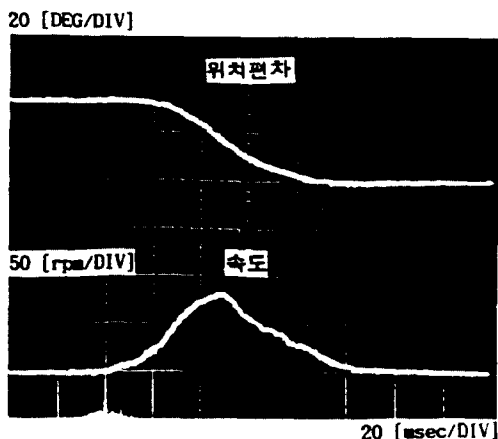


그림 10. 최적 기울기를 사용했을 경우의 위치 및 속도파형.
Fig. 10. Position and velocity for optimal slope.

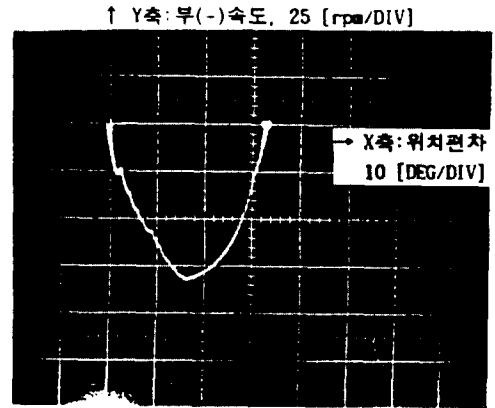


그림 11. 최적 기울기를 사용했을 경우의 상태궤적.
Fig. 11. Phase portrait for optimal slope.

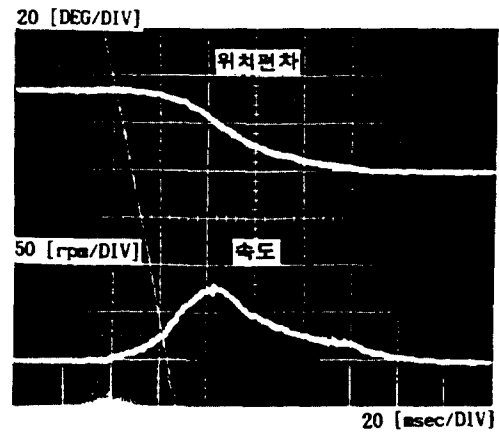


그림 12. 높은 기울기를 사용했을 경우의 위치 및 속도파형.
Fig. 12. Position and velocity for higher slope.

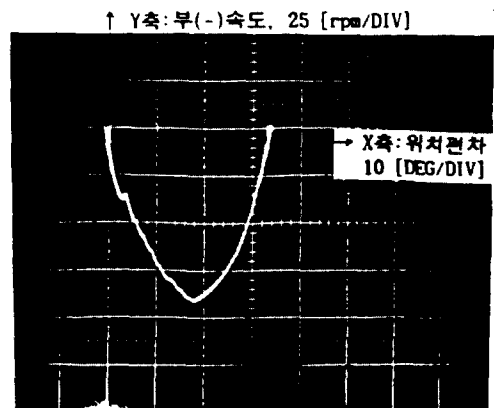


그림 13. 높은 기울기를 사용했을 경우의 상태궤적.
Fig. 13. Phase portrait for higher slope.

V. 결론

본 논문에서는 슬라이딩모드제어를 이용한 스텝모터의 위치제어와 최적제어에 의한 슬라이딩 면의 기울기를 구하는 방법에 관하여 논하였고, 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션과 실험을 행하였다. 시뮬레이션 및 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 슬라이딩 면의 기울기를 결정하는데 있어서 최적제어 이론을 도입하여 최적의 기울기를 구하는 방법을 제시하였고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 최소시간 내에 목표치 도달할 수 있음을 보였다.

(2) 인버터를 이용하여 스텝모터의 전류를 정현파가 되게 제어함으로써 토크리플이 감소하며, 특히 저속운전 시에도 부드러운 연속 회전을 할 수 있으며 스텝모터의 안정점이 아닌 위치에서도 정지가 가능했다.

한편, 본 논문에서는 스텝모터의 위치제어에 적용하여 타당성을 확인 하였으나, 다른 모터에 적용하였을 경우와 외란이 인가되었을 경우에 대한 타당성 확인은 추후 더 실행 되어야할 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] U. Itkis, Control System of Variable Structure, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [2] Vadim I. Utkin, "Variable-structure system with sliding modes," *IEEE Trans.* vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, Apr. 1977.
- [3] 松本 英彦, "ステイディングモード法によるステップモータの位置決め制御," 日本電気學會半導體1.電力變換研究會資料, SPC-87-15, pp. 11-20, 1987.
- [4] H. Hashimoto, H. Yamamoto, "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach," *IEEE Trans. on IA*, vol. 24, no. 1, pp. 160-176, Jan. 1988.
- [5] H. J. Kim, "Position Control of Induction Motor Using Variable Structure Vector Control," 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 1218-1224, 1992.
- [6] Min-ho Park, Kyung-seo Kim, "Chattering Reduction in the Position Control of Induction Motor using the Sliding Mode," *PFSC*, pp. 438-445, 1989.
- [7] 松本 大熊, "ACサーボモータ用ステップモータの駆動法," 日本電気學會全國大會, no. 624, p. 752, 昭 61.



유완식

1963년 12월 24일생. 1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988~1990년 금성기전 근무. 1992년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



박형남

1967년 4월 5일생. 1991년 인천대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993~현재 대우전자 중앙연구소 인천분소 근무.



김영석

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987~1989년 한국전기연구소 선임연구원 실장. 현재 인하대 공대 전기공학과 부교수.