

## 가변구조 제어기를 이용한 XY 테이블의 고속 고정도 위치제어

\*이성훈\*, 김가규\*, 최봉열\*\*

\*경북대학교 대학원 전자공학과, \*\*경북대학교 전자전기공학부, 전화:(053)940-8653 / 팩스:(053)959-7336

### A High Speed and High Precision Position Control of a XY Table using a VSC

\*Seong Hun LEE\*, Ga Gue KIM\*, Bong Yeol CHOI\*\*

\*Department of Electronics, Graduate School, Kyungpook National University

\*\*School of Electronics and Electrical Engineering, Kyungpook National University

\*E-mail : 98lee@palgong.kyungpook.ac.kr, \*\*E-mail : bychoi@ee.kyungpook.ac.kr

#### Abstract

In this paper is proposed a VSC(variable structure controller) for a high-speed and high-precision position control of a XY Table, which is based on the PI type reaching mode. Also the comparative study between the proposed method and the conventional PID controller is presented as well. Designed and tuned under repeated experiments, the proposed method showed a better reasonable performance than PID controller in the aspect of tracking error.

#### I. 서론

최근들어 노트북 컴퓨터, 소형 TV, 휴대용 전화기 등의 평판 표시기(FPD : Flat Panel Display)들의 수요 급증으로 대량생산을 하기 위한 자동화 시설에 대한 투자가 확대되고 있다. 특히 대표적인 자동화 시설 장비인 XY 테이블<sup>[1]</sup>은 제품의 고정적화 추세로 인한 높은 정밀도와 대량생산을 위해 빠른 정렬 속도가 요구되어진다. 그러나 정밀한 반도체 제조산업과 유사한 FPD 제조산업에 있어 XY 테이블을 비롯한 고가 장비의 대부분을 수입에 의존하고 있어 기술 확보가 시급한 실정이다.

고속 고정도 위치제어는 기존의 고전적인 제어 방법으로는 요구 조건을 만족하기가 어려워 최신 제어 기법을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 가변구조 제어(variable structure control)는 최근 들어 이론 및 응용 면에서 주목을 받고 있으며, 항공기 제어, 로봇 매니퓰레이터 제어, 유도전동기 제어 등에 효과적으로 적용된 바 있다.

가변구조 제어의 주된 특성은 미리 정해 놓은 스위칭 평면(switching surface)을 경계로 제어 입력을 불연속적으로 바꾸므로써 시스템의 상태를 스위칭 평면 위로 도달시키고 지속적으로 스위칭 평면 위에 머물도록 함으로써 슬라이딩 모드(sliding mode)라는 동특성을 갖게 하는 제어방법이다. 슬라이딩 모드 동안에는 시스템 매개변수 변화나 외란 등의 불확실성에 강인한 견실성을 가진다<sup>[2][3]</sup>. 이러한 가변구조 제어의 특성을 이용하면 부하의 변화나 시스템의 비선형성 등으로 나타나는 문제점을 해결할 수 있어 견실성과 고정밀도가 요구되는 서보 계통 제어에도 가변구조 제어기가 적극적으로 도입되고 있다<sup>[4]</sup>.

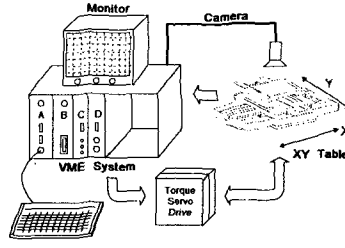
본 논문에서는 자동정렬 장치에 많이 쓰이는 XY 테이블의 고속 고정도 위치제어를 위해 PI 타입 도달 법칙<sup>[5]</sup>을 가지는 가변구조 제어기를 제안한다. PI 타입 도달 법칙은 불연속항을 포함하지 않으므로 채터링을 개선시킬 수 있는 장점을 가진다. 또한 도달 모드에서의 동특성을 간단한 2차계시스템의 해석 방법을 이용하여 쉽게 결정할 수 있으며 이러한 동특성과 제어기 매개변수 설계에 따라 빠른 도달속도와 정상상태 오차를 개선할 수 있다. 그리고 모의실험과 통합실험에서 정상상태와 과도상태의 위치 응답을 PID 제어기와 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 전체 시스템 중 XY 테이블을 구성하는 선형 BLDC(brushless DC)모터와 토크 서보 드라이브에 대한 수학적 모델링을 구한다. III장

에서는 II장에서의 모델링을 바탕으로 스위칭 평면 및 PI 도달 법칙을 가지는 제어 입력을 설계한 뒤 안정성을 증명해 제안한 가변구조 제어기의 타당성을 보인다. IV장에서는 제안한 가변구조 제어기를 현장에서 많이 쓰이는 PID 제어기와 비교하기 위해 모의실험을 한다. V장에서는 전체 시스템의 구성 및 구성요소들의 특성에 대해 알아보고 실험을 통하여 가변구조 제어기와 PID 제어기의 성능을 비교한다. 마지막으로 VI장에서 결론을 맺는다.

#### II. 시스템 모델링

고속 고정도 위치제어 시스템은 그림 1과 같다.



A: Pentium Board  
B: HDD & FDD Board  
C: TMS320C30 Position Controller  
D: Image Grabber

그림 1. 고속 고정도 위치제어 시스템

고속 고정도 위치제어 시스템은 크게 XY 테이블, 토크 서보 드라이브, DSP Controller가 내장된 VME System, 그리고 카메라로 구성된다. XY 테이블은 두개의 선형 BLDC 모터와 0.01 $\mu$ m의 해상도를 가지는 선형 엔코더로 구성되어 있다. 토크 서보 드라이브와 선형 BLDC 모터를 함께 나타내면 그림 2와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

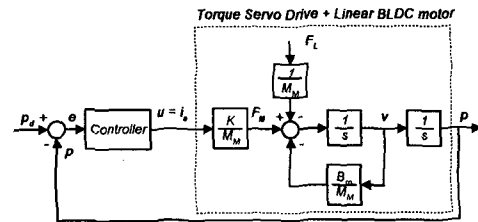


그림 2. 간략화된 고속 고정도 위치제어 시스템 블록도

K: 주력상수,  $R_o$ : 전기자저항,  $M_m$ : 모터질량,  $B_m$ : 공기점성마찰계수,  $F_L$ : 부하력

그림 2로부터 식(1)과 같은 오차 동특성을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= a_2 e_2 - a_2 x_{2d} + \dot{x}_{2d} - bu - d \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)는 정합조건(matching condition)을 만족하고 여기서  $a_2 = -B_m/M_m$ ,  $b = K/M_m$ 이고  $d = -F_L/M_m$  으로 다음과 같이 유계되었다고 가정한다.

$$|d| < d_{\max} \quad (2)$$

### III. 가변구조 제어

본 장에서는 불확실성 시스템에 대해 원하는 동특성을 발생시키기 위한 스위칭 평면 및 제어 법칙을 설계하고 안정성의 증명을 통하여 설계한 가변구조 제어기의 타당성을 보인다. PI 타입의 도달 법칙을 이용해 정상상태오차를 줄이고 채터링을 개선한다.

#### 1. 스위칭 평면 설계

가변구조 제어의 주된 특성인 슬라이딩 모드 동안 시스템의 상태는 매개변수 변동이나 외란에 상관없이 미리 정해진 동특성을 유지한다. 이러한 슬라이딩 모드에서의 동특성은 스위칭 평면에 의해서 결정되므로 원하는 동특성을 얻기 위해서는 적절한 스위칭 평면의 설계가 요구된다.

식 (1)에 대해 스위칭 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$s = Ce = [C_1 \ 1] \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $C_1 > 0$ ,  $C_1 \in R$  으로 설정하여 스위칭 평면을 설계한다.

#### 2. 제어 입력 설계

본 절에서는 불확실성 시스템 (1)에 대한 제어 입력을 구하고자 한다. 제어 입력은 등가 제어 입력  $u_{eq}$  와 불연속 제어 입력  $u_d$  로 구성되는데 등가 제어 입력  $u_{eq}$  는 슬라이딩 모드를 유지시켜 주기 위한 입력이고 불연속 제어 입력  $u_d$  는 상태가 초기 위치로부터 스위칭 평면으로 향하여 슬라이딩 모드가 일어나도록 하는 입력이다.

스위칭 평면 (3)에서 슬라이딩 모드를 유지시켜주는 등가 제어 입력  $u_{eq}$  는 다음과 같이 구한다.

$$\dot{s} = C\dot{e} = 0 \quad (4)$$

식 (4)로부터 슬라이딩 운동이 일어났을 때 슬라이딩 모드를 유지시켜 주는 등가 제어 입력을 구하면 식 (5)과 같다<sup>[2]</sup>.

$$u_{eq} = \{C_1 e_2 + a_2 e_2 - a_2 x_{2d} + \dot{x}_{2d}\} / b \quad (5)$$

다음은 Gao 등이 제안한 도달 법칙<sup>[6]</sup>을 이용해 제어 법칙을 설계한다.

$$\dot{s} = -Ks - Q \operatorname{sgn}(s) \quad (6)$$

$$\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } s > 0 \\ -1, & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (7)$$

식 (6)는 비례 속도항과 정속도항으로 구성되어 초기치가 스위칭 평면에서 멀리 떨어져 있으면 도달 속도를 빠르게 할 수 있어 정속도항만으로 구성된 도달 법칙에 비해 도달 속도가 빠르며 채터링도 줄일 수 있다.

스위칭 평면 (3)에 대한 도달 모드의 제어 법칙을 구하면 다음과 같다.

$$u = u_{eq} + u_d = \{C_1 e_2 + a_2 e_2 - a_2 x_{2d} + \dot{x}_{2d}\} / b + \{Ks + Q \operatorname{sgn}(s)\} / b \quad (8)$$

여기서  $K > 0$ ,  $Q > d_{\max}$  이다.

도달 법칙을 이용하여 구한 제어 입력  $u$  는 슬라이딩 모드를 유지시켜 주는 등가 제어 입력  $u_{eq}$  와 도달 모드 동안에 작용하는 불연속 제어 입력  $u_d$  로 구성된다.

#### 3. 안정성

슬라이딩 모드 동안에 시스템의 상태는 스위칭 평면(3)으로 제한되며 다음과 같은 동특성을 가진다.

$$\dot{e}_1 = -C_1 e_1 \quad (9)$$

식 (9)에서 슬라이딩 모드 동안 시스템의 차수가 1차로 감

소함을 알 수 있으며  $C_1 > 0$  으로 선택하면 고유치들이 s-평면의 좌반면(left half s-plane)에 존재하므로 슬라이딩 모드 동안에 시스템은 안정하게 된다.

한편 슬라이딩 모드가 일어나는 지를 확인하기 위해 식 (10)와 같은 Lyapunov 함수 후보를 둔다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (10)$$

슬라이딩 운동이 일어나기 위해서는 시간에 대한  $V$ 의 미분이 다음 조건을 만족해야 한다<sup>[7]</sup>.

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (11)$$

불확실 시스템에 대한 제어 입력 (8)을 사용하여  $\dot{V}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= -Ks^2 + s(d - Q \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서  $K > 0$  이므로  $Q > d_{\max}$  이면 불확실한 입력이 존재하더라도 식 (12)는 항상 음의 값을 갖게 되어 슬라이딩 모드 존재조건 (11)을 만족한다.

따라서 슬라이딩 운동은 반드시 일어나며 슬라이딩 모드에서의 시스템은 선택된  $C_1$ 에 의해 안정하게 되므로 제어 입력 (8)은 전체 시스템을 건설 안정화시킨다.

#### 4. PI 타입 도달 법칙을 가지는 가변구조 제어기

Gao가 제안한 도달 법칙을 이용해 만든 제어 입력은 채터링을 발생시키는 불연속항을 포함하고 있고 스위칭 평면 가까이에서 정상상태 오차가 일어난다. 본 절에서는 불연속항이 없는 PI 타입의 도달 법칙을 이용해 정상상태 오차와 채터링을 개선하고자 한다.

PI 타입 도달 법칙은 식 (13)과 같다.

$$\dot{s} = -K_P s - K_I \int_{\text{reset}} s dt - Q \operatorname{sgn}(s) \quad (13)$$

여기서  $K_P, K_I > 0$  이며 적분기는 스위칭 함수가 도달 구간에서는 적분을 수행하고 스위칭 평면에 도달하면 적분기를 리셋(reset)한다. 그리고  $Q$ 는 불확실성을 제거하기 위한 매개변수이다.

식 (13)은 기존의 도달 법칙에 적분기가 추가되어 있어 초기 스위칭 함수값부터 적분을 행함으로써 도달 구간 동안에 적분값의 절대값이 증가하기 때문에 스위칭 평면에 도달하는 속도가 증가하고 정상상태 오차가 발생시 적분기의 영향으로 정상상태 오차를 개선할 수 있다.

PI 타입 도달 법칙을 가지도록 하는 제어 입력을 추가한 새로운 형태의 제어 입력은 다음과 같다.

$$u = \{C_1 e_2 + a_2 e_2 - a_2 x_{2d} + \dot{x}_{2d} + K_P s + K_I \int_{\text{reset}} s dt + Q \operatorname{sgn}(s)\} / b \quad (14)$$

여기서  $K_P, K_I > 0$ ,  $Q > d_{\max}$  이다. 제안된 제어기의 안정성을 보이기 위해 식 (10)와 같은 Lyapunov 함수  $V$ 의 시간 미분치를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = -Ks^2 - K_I s \int_{\text{reset}} s dt + s(d - Q \operatorname{sgn}(s)) \quad (15)$$

식 (15)에서 적분기를 포함한 항은 리셋 되기 전까지 항상  $S$ 와 동일한 부호를 가지면서 적분이 되어 불확실한 입력이 존재하더라도 식 (15)는 항상 음의 값을 갖게 되어 슬라이딩 모드 존재조건 (11)을 만족한다.

### IV. 모의실험

먼저 모의실험을 위한 XY 테이블의 매개변수는 표 1과 같다.

표 1. XY 테이블의 매개변수

X 축	Y 축
$M_m = 14.1$	$M_m = 3.6$
$K = 40.03$	$K = 26.69$
$B_m = 1.8 \times 10^{-5}$	$B_m = 1.8 \times 10^{-5}$

식 (1)로부터 XY 테이블의 오차 동특성을 나타내면 식 (16)과 같다.

## 가변구조 제어기를 이용한 XY 테이블의 고속 고정도 위치 제어

$$X\text{축} \begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = 1.276e^{-6}(e_2 - x_{2d}) + \dot{x}_{2d} - 2.839u - d \end{cases} \quad (16)$$

$$Y\text{축} \begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = 5.0e^{-6}(e_2 - x_{2d}) + \dot{x}_{2d} - 7.414u - d \end{cases} \quad (17)$$

여기서 불확실성 행렬의 원소  $d$ 는 식 (17)과 같게 설정한다.  
 $d = 0.01$   
 여기서  $x_{2d}$ 와  $\dot{x}_{2d}$ 는 기준 속도레퍼와 기준 가속도레퍼이다.  
 가변구조 제어기와 PID 제어기에 대한 매개변수는 표 2와 같다.

표 2. 모의실험을 위한 매개변수

PID 제어기	가변구조 제어기
X축	X축
$K_P = 15000$	$K_P = 230$
$K_I = 90000$	$K_I = 15000$
$K_D = 250$	$Q = 0.1$
	$C_1 = 550$

표 2의 매개변수들은 1mm와 원점을 왕복하는 경우에 대해 X축이  $\pm 1\mu\text{m}$ 이내의 추적 오차를 가지도록 설정했다.

XY 테이블의 선형 엔코더는 0.01mm의 해상도를 가지며 0.05%의 속도 제한 때문에 XY 테이블을 움직일 때마다 0.05% 제한속도를 넘지 않게 해야한다. 따라서 실험 할 때 기준 위치( $P_{Ref}$ ), 기준 속도( $V_{Ref}$ ), 기준 가속속도( $A_{Ref}$ )를 설정한 뒤 사다리꼴 속도 프로필을 이용해 기준 속도 레퍼를 만들고 이를 적분하여 S형 기준 위치 레퍼를 만든다.

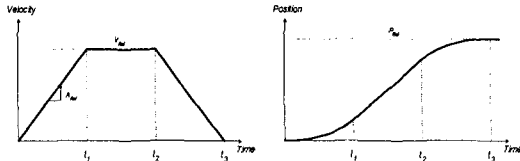


그림 3. 사다리꼴 속도 프로파일 그림 4. S형 기준 위치 레퍼  
 그림 3과 그림 4에서  $t_1, t_2, t_3$ 은 식 (18)과 같다.

$$t_1 = V_{Ref}/A_{Ref}, t_2 = P_{Ref}/V_{Ref}, t_3 = t_1 + t_2 \quad (18)$$

그림 5를 기준 레퍼로 하여 1mm와 원점을 왕복하는 경우에 X축에 대해 가변구조 제어기와 PID 제어기에 대해 모의 실험 한다. 이때 기준 가속속도( $A_{Ref}$ )는 0.01%, 기준 속도( $V_{Ref}$ )는 0.002%로 한다.

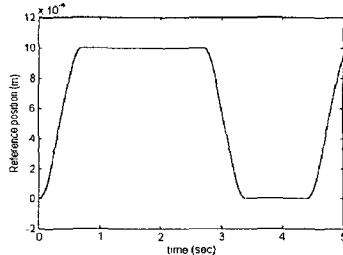


그림 5. 기준 위치 레퍼 [m]

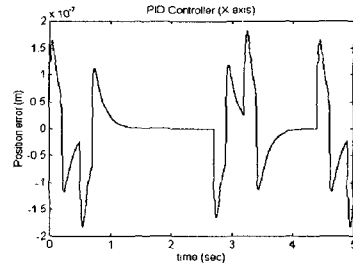
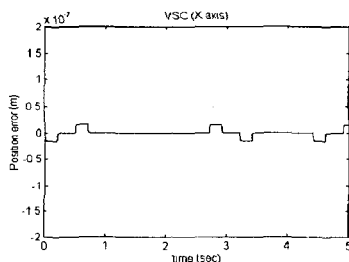


그림 6. 가변구조 제어기와 PID 제어기의 모의실험(X축)  
 : 위치오차[m]

### V. 통합설계

XY 테이블의 고속 고정도 위치제어를 위한 실험환경은 그림 7과 같다.

#### 1. 시스템 구성

고속 고정도 시스템은 XY 테이블, 토크 서보 드라이브, DSP 위치제어기가 내장된 VME 시스템, 카메라, 그리고 DSP 에뮬레이터(emulator)가 내장된 IBM PC로 구성된다. 이 절에서는 고속 고정도 시스템의 구성 요소중 XY 테이블, 토크 서보 드라이브, 그리고 위치제어기에 대해 설명한다.

#### 1) XY 테이블의 개요

2차원으로 움직이는 운동계로서 사용된 XY 테이블은 도버(Dover)사의 M-CLM-2x2 제품으로 트릴로지(Trilogy)사의 LM210 시리즈 선형 BLDC 모터와 하이덴하임(Heidenhain)사의 0.01mm의 해상도를 갖는 선형 엔코더로 구성되어 있다. 특징으로는 공압석을 사용하므로 기계적인 접촉이 없어 마멸로 인한 성능저하가 없고, 수명이 거의 영구적이고 빠른 속력의 동작이 가능하다. XY 테이블에 대한 자세한 규격은 표 3과 같다.

표 3. XY테이블의특성

Physical & Performance	Unit	Y-axis	X-axis
Moving mass	[kg]	3.6	14.1
Force Constant	[N/amp]	26.69	40.03
Resistance	[ohms]	12.00	18.00
Inductance	[mh]	1.50	3.00
Back EMF constant	[v·s/m]	19.7	29.5
Electrical time constant	[msec]	0.13	0.17

#### 2) 토크 서보 드라이브 (TQ10)

TQ10은 홀 효과(hall effect) 센서가 내장된 3상 BLDC 서보 모터 드라이브로 토크 서보 드라이브이다. 1V의 아날로그 기준 전압에 대해 TQ10은 1A의 전류를 내보낸다. TQ10의 입력은 모터 전류와 기준 전류로 구성되며, 이 두 전류의 차가 TQ10 내부의 오차 증폭기로 들어가서 PWM 회로를 거쳐 나온 출력이 모터를 제어하게 된다.

#### 3) 위치제어기

주요 구성 요소는 VME 시스템과의 인터페이스부분, XY 테이블과의 인터페이스부분, 그리고 메인 프로세서부분으로 나눌 수 있다. VME 시스템과의 인터페이스부분은 공유메모리(DPRAM)를 사용하여 양방향 통신을 하여 명령어와 데이터를 주고받는 부분이다. XY 테이블과의 인터페이스부분은 XY 테이블의 이동정보를 알수 있는 엔코더 신호로부터 펄스수를 계수 하는 카운터부분과, 그리고 계산된 제어 입력을 내어주는 12bit 4-채널 DAC(Digital to Analog Converter)부분이 있다. 메인 프로세서부분은 샘플링 주기마다 모터에 대한 제어 입력을 계산하고 여러 데이터를 처리해야 하는 등 빠른 속도가 요구되어 TMS320C30 DSP 칩을 사용했다. 이 칩은 33Mhz의 클럭 주파수로 동작하며 60ns의 단일 명령 수행 시간, 33MFLOPS, 16.7MIPS의 수행시간을 가진다. 그리고 샘플링 주기는 0.5ms이며 속도정보는 엔코더로부터 나오는 위치정보를 전향구형적분방법을 적용해 얻어낸다. 제어 알고리즘은 C언어로 구현하였고, 컴파일 한 후 에뮬레이터를 이용해 바로 실험할 수 있다.

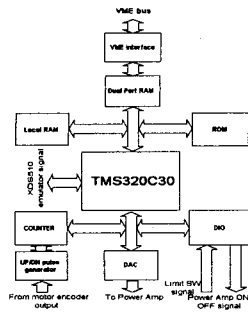


그림 7. 위치제어기 블록도

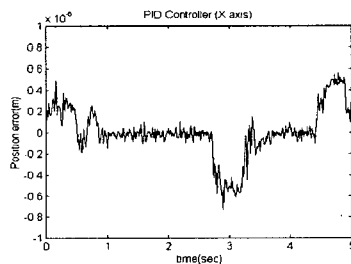
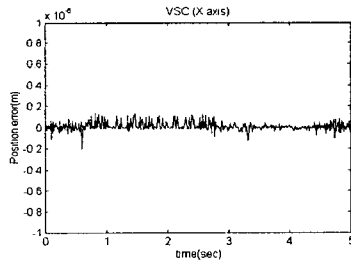
2. 실험 및 고찰

제어기의 매개변수는 모의실험의 매개변수를 바탕으로 1mm와 원점을 왕복하는 경우에 대해 반복실험을 통해 X축이 ±1μm 이내의 추적 오차를 가지도록 설정했다. 실험에 사용된 매개변수는 표 4와 같다.

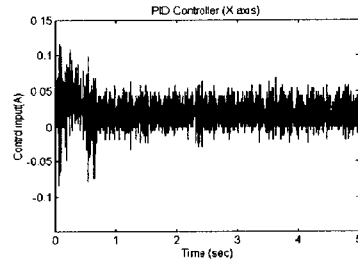
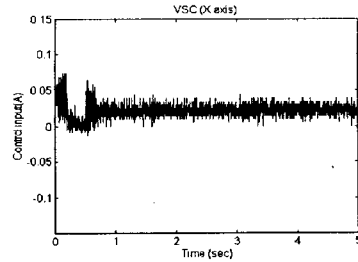
표 4. 실험을 위한 매개변수

PID 제어기	가변구조 제어기
X축	X축
$K_P = 12000$	$K_P = 295$
$K_I = 82000$	$K_I = 50000$
$K_D = 220$	$Q = 0.1$
	$C_1 = 550$

기준 가감속도는 0.01%, 기준 속도는 0.002%로 하였다. 그림 8은 X축의 실험결과를 보여주고 있다. X축의 위치 오차를 나타내는 그림 8(a)에서 PID 제어기는 기준 궤적이 변화할 때마다 오버슈트 발생과 과도상태의 위치 오차가 큰 반면 가변구조 제어기는 기준 궤적에 상관없이 오버슈트가 거의 없다. 제어 입력은 정상상태에서 약간의 오프셋(offset)을 가지는 데 이는 XY 테이블이 정확한 수평을 이루지 못했기 때문에 나타나는 현상이다.



(a)



(b)

그림 8. 가변구조 제어기와 PID 제어기의 실험 (X축)  
(a) 위치오차[m]; (b) 제어입력

VI. 결론

본 논문에서는 XY 테이블의 고속 고정도 위치제어를 위한 PI 타입의 도달 범칙을 가지는 가변구조 제어기를 제안하여 추적 성능을 고전적인 PID 제어기와 비교하였다.

제안한 가변구조 제어기는 PI 타입의 도달 범칙을 가져 초기 스위칭 함수값부터 적분을 행함으로써 도달 구간 동안에 적분값의 절대값이 증가하기 때문에 스위칭 평면에 도달하는 속도가 빠르고 정상상태 오차를 개선할 수 있었다. 그리고 제어 입력에서 Q를 적절히 선택함으로써 시스템의 불확실성을 효과적으로 개선할 수 있었다.

모의실험에서는 제안한 가변구조 제어기와 PID 제어기에 엔코더의 속도 제한을 넘지 않도록 만든 기준 궤적에 대한 위치 응답을 통해 이론적인 타당성을 확인하였다.

통합실험에서는 1mm와 원점을 왕복하는 경우에 대해 X축이 ±1μm 이내의 위치 오차를 가지도록 설정하여 실험했다. 정상상태뿐만 아니라 과도상태에서도 정밀한 응답을 요구하는 응용분야에서는 제안한 PI 타입의 도달 범칙을 가지는 가변구조 제어기가 적합함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] XY Table Product Catalog, Dover Instrument Corporation, 1995
- [2] V. I. Utkin, "Variable structure system with sliding modes," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 22, no. 2, pp. 212-222, 1977.
- [3] J. Y. Hung, W. B. Gao and J. C. Hung, "Variable structure control : A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, pp. 2-22, 1993.
- [4] N. N. Bengiamin, "Variable Structure Position Control", *IEEE Trans. on AC*, 1984.
- [5] J. Bastidas and C. Vinante "A digital variable structure control with a second order reaching law," *Computers Elect. Engng.*, vol. 23, no. 4, pp. 217-223, 1997.
- [6] W. B. Gao and J. C. Hung, "Variable structure control of nonlinear systems : A new approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, pp. 45-55, 1993.
- [7] R. A. Decarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," *Proc. of the IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.