

# 리니어 直流 모터의 高速 位置 制御方式

(High Speed Position Control Method of a Linear DC Motor)

嚴基煥\* · 孫東尙\* · 金周弘\*\*

(Ki-Hwan Eom · Dong-Seol Son · Joo-Hong Kim)

## 요 약

리니어 직류 모터의 고속, 고정도 위치제어에 대하여 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간 제어 방식을 제안하였다.

제안한 방식은 간단한 구성으로 최단시간 제어를 실현하기 위하여 뱅-뱅 제어의 절환을 위상면에 설정한 포물선형 스위칭 함수상에서 행하는 것이다. 그러나 시스템의 모델링 오차등에 의하여 슬라이딩 모드를 발생시키므로 최단시간 제어를 위해 반복실험에 의하여 1회의 절환에 의한 뱅-뱅 제어를 실현하였다. 그후 선형 궤환 제어에 의하여 리니어 직류모터를 목표점에 정지시켰다.

## Abstract

This paper proposed a minimum time control method by a parabolic switching function to high speed position control, with high accuracy, of a Linear DC Motor

A proposed method is organized simply and a bang-bang control's signal switched on a parabola type switching function in the phase for a minimum time control realization. However, a sliding mode occurs owing to system's modelling errors, so the minimum time control is realized a once switching bang-bang control by repeating trial experiments. Next time, in a neighborhood of the origin in the phase plane, a Linear DC Motor is stopped at the origin by the linear feedback control.

## 1. 서 론

자동화와 정보산업의 급속한 발전으로 직진구동장치의 실용화가 넓어지고, 자동화기기, 정보기기 등에 高精度化, 高速化, 小型 輕量化 등의 요구에 따라 소형 리니어 모터(Linear Motor)가 많이 사용되고 있다.<sup>1), 2), 3)</sup>

리니어 모터는 회전모터의 회전자, 고정자 및 공극을 각각 직선적인 운동에너지로 변환할 수

있는 직선적 추력 발생 장치이다.<sup>1), 2), 4)</sup>

직진 구동방식에는 직접 구동방식과 간접 구동방식이 있으며 직접방식은 간접방식에 비하여 복잡한 직선운동 변환수단이 필요하지 않으며, 전달효율이 1에 가깝고 불감대가 작으므로 高精度 위치제어에 더욱 유리하다.

이 방식은 直進 電磁驅動裝置로서 리니어 유도모터, 리니어 펄스모터, 리니어 동기모터, 리니어 직류모터등 여러가지가 있다. 이 중에 하나인 리

\*正會員：柳韓專門大學 電氣 電子科 教授

\*\*正會員：東國大學校 電子工學科 教授

接受日字：1993年 8月 2日

니어 직류모터(Linear DC Motor)는 구조가 간단하고, 고장이 적고, 신뢰성이 높으며, 추력/질량비가 큰 서보계를 구성할때 제어성능이 우수하므로 X-Y 구동장치, 각종 로보트, 디스크장치, 카메라 렌즈 구동장치등에 高速, 高精度의 위치제어 장치로서 실용화가 기대되고 있다.<sup>1)~6)</sup>

그러므로 본 논문에서는 LDM(Linear DC Motor)을 제어대상으로 高速, 高精度의 위치제어 방식에 대하여 고찰한다.

이러한 위치제어는 우선 LDM을 고속으로 이동시키고 그 후에 정확하게 목표점에 停止시켜야 한다. LDM을 고속으로 이동시키기 위하여 최단시간 제어 이론을 적용하며, 이를 실현하는데는 일반적으로 on-line의 복잡한 비선형 계산이 필요하게 된다.<sup>7), 8)</sup>

그러므로 본 연구에서는 이를 피하고 보다 간단한 구성으로 최단시간 제어를 실현하기 위하여 포물선형 스위칭 함수를 이용한 최단시간에의 구성법을 제안한다.

제안한 방식은 위상면내에 설정하는 포물선형 스위칭 함수를 초기거리 편차에 의해 적응적으로 변화시키는 것이다.

그러나 실제로는 시스템 모델링 오차, 파라미터 변동등의 영향에 의해 최단시간 제어는 실현되지 않고 슬라이딩 모드(Sliding Mode)가 발생하며, 슬라이딩 모드 제어는 강인한 제어 방법으로 이미 알려지고 있다.<sup>9), 10)</sup>

슬라이딩 모드 구간은 整正時間을 길게함으로 구간이 짧을수록 최단시간이 되어 반복 실험을 통하여 슬라이딩 모드 구간이 발생하지 않게 포물선형 스위칭함수를 修正하여 최단시간 제어를 실현한다. 그 후 선형궤환제어 이론을 적용하여 LDM을 목표점에 정확하게 停止시킨다.

제안한 제어방식을 시뮬레이션하고 시뮬레이션에 의해서 얻어진 결과를 실험을 통하여 그 유효성을 확인한다.

## 2. LDM의 모델

제어대상인 LDM은 요크, 영구자석, 코일등으로 구성된 코일 가동용으로 動特性은 다음과 같

다.<sup>1), 2)</sup>

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + K_E V \quad (2-1)$$

$$f = K_F i = M \frac{dv}{dt} + DV \quad (2-2)$$

여기서 e는 입력전압, R은 전기자 저항, L은 전기자 인덕턴스, K<sub>E</sub>는 역기전력 상수, V는 속도, f는 추력, K<sub>F</sub>는 추력상수, M은 질량, D는 점성계수이다.

윗 식에서 LDM의 動特性을 나타내는 블록선도는 그림1의 (a)이며, 전기적 시정수(L/R)을 무시하고 D=0으로 가정한 경우에는 그림1의 (b)로 간략하게 블록선도를 그릴 수 있으며,

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

본 연구에서는 입력전압에서 위치까지의 LDM의 전달특성을 그림 1(b)의 블록선도를 이용하여 고찰한다.

## 3. 제어계의 구성

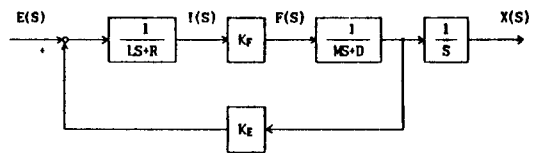
LDM을 제어대상으로 한 시스템의 상태방정식은 아래와 같다.

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (3-1)$$

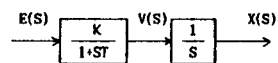
$$\dot{X}_2 = -\frac{1}{T} X_2 + \frac{K}{T} U \quad (3-2)$$

여기서 X<sub>1</sub>은 거리, X<sub>2</sub>는 속도이다.

초기상태(X<sub>1</sub>=X<sub>10</sub>, X<sub>2</sub>=0)에서 최종상태(X<sub>1</sub>=X<sub>2</sub>=0 : 위상면상의 원점)에 최단시간으로 도달하는



(a) LDM의 블록선도



(b) LDM의 간략화 한 블록선도

그림 1. LDM의 블록선도

Fig. 1. Block Diagram of the LDM

제어신호  $U^*$ 를 구하는 문제에 대하여서는, 최대 원리를 적용하면 최단시간 제어  $U^*$ 는 그림 2와 같은 뱅-뱅(Bang-Bang)제어로 되는것이 이미 알려지고 있다.<sup>8)</sup>

그림 2는 초기 거리 편차  $X_{10} < 0$ 에 대한 것으로 최대가속, 최대감속에 의해 최종 상태에 도달시키는 것이다.

여기서 최적 전환시점( $t=t_1$ )을 어떻게 정하는나가 중요한 문제로 된다.

뱅-뱅 제어에서 LDM의 위상면상에서의 궤도 방정식은 아래와 같다. 즉  $X_{10} < 0$ 의 경우 제1구간 ( $0 \leq t \leq t_1$ )에서는  $U = E_0$ 와 식(3-1), (3-2)의 상태방정식 및 초기상태( $X_1 = X_{10}, X_2 = 0$ )로부터 위상면 궤도가 구해진다.

$$X_1 = X_{10} - K_m E_0 T_m \left(1 - \frac{1}{K_m E_0} X_2\right) - T_m X_2 \quad (3-3)$$

제 2구간 ( $t_1 < t \leq t_f$ )에서는  $\tau = t - t_1$ 로 놓고 역 시간응답을 계산한다. 즉  $U = -E_0$ 와 상태방정식 및 초기상태( $\tau = 0$ 에서  $X_1 = X_2 = 0$ )로부터 위상면 궤도가 구해진다.

$$X_1 = f_1(X_2) = K_m E_0 T_m \ln\left(1 + \frac{1}{K_m E_0} X_2\right) - T_m X_2 \quad (3-4)$$

또한  $X_{10} > 0$ 의 경우도 마찬가지로 제 1구간 ( $0 \leq t \leq t_1$ ), 제 2구간 ( $t_1 < t \leq t_f$ ), 즉  $U = -E_0, U = E_0$ 에 대하여 위상면 궤도는 각각 다음과 같다.

$$X_1 = X_{10} + K_m E_0 T_m \ln\left(1 + \frac{1}{K_m E_0} X_2\right) - T_m X_2$$

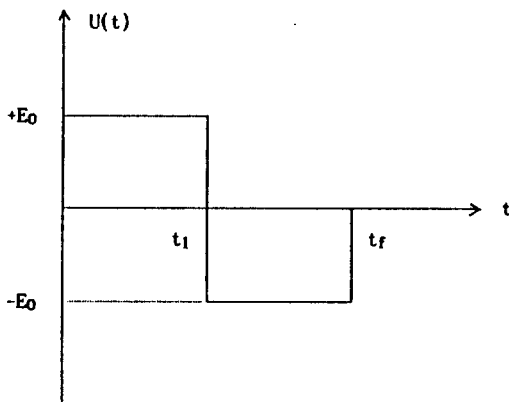


그림 2 뱅-뱅 제어  
Fig. 2. Bang-Bang Control

(3-5)

$$X_1 = f_2(X_2) = -K_m E_0 T_m \ln\left(1 + \frac{1}{K_m E_0} X_2\right) - T_m X_2 \quad (3-6)$$

식(3-3)~(3-6)에 의하여 LDM의 위상면 최적궤도가 그려지며 여러가지의 초기상태로부터 출발하였을때의 위상면 최적궤도는 그림 3과 같이 된다.

여기서  $H_0, H'_0$ 는 각각 식(3-4), 식(3-6)의 궤적이며 최적 전환 곡선을 나타낸다. 최단시간 제어를 실현하기 위하여 위상면 궤도상에서  $\{X_1 - f_1(X_2)\}$  또는  $\{X_1 - f_2(X_2)\}$ 의 부호를 常時判斷하고 이것이 0이 될때 조작량의 切換을 하기 위하여 on-line으로 비선형 계산이 필요하게 된다.

복잡한 비선형계산을 피하고 보다 간단한 구성으로 최단시간제어를 실현하기 위하여 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간제어의 구성법을 제안한다.

제안한 제어방식의 특성은 조작량의 切換을 위상면상에 설정한 포물선형 스위칭함수상에서 행하는 것이다. 즉 그림3에서 LDM은 A점에서 출발하여 최적 전환곡선상의 P점에서 조작량이 전환되어 원점 0에 도달하는 것이다.

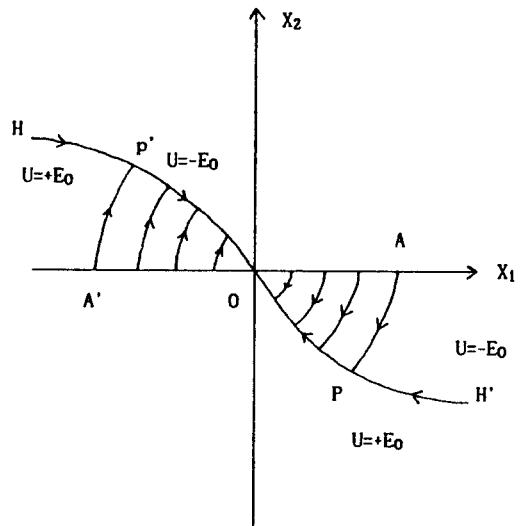


그림 3. 위상면 최적궤도  
Fig. 3. Optimal Trajectories in the Phase Plane

초기거리 편차  $X_{10} > 0$ 의 경우 궤도 AP 및 최적절환곡선 OP는 각각 식 (3-5), (3-6)에서 나타내어진다.

여기서 원점 O 및 P점을 통하는 포물선형 스위칭 함수는

$$S(X_1, X_2) = CX_1(X_1 + \epsilon) + X_2 = 0 \quad (3-7)$$

으로

$$S = CX_1(X_1 + \epsilon) + X_2 > 0 : U = -E_0$$

$$S = CX_1(X_1 + \epsilon) + X_2 \leq 0 : U = +E_0$$

를 조작량으로 하면 최단시간제어가 얻어진다. 여기서  $\epsilon$ 은 포물선형 스위칭 함수가  $X_1$ 과 만나는 점의 값으로,  $\epsilon > |X_{10}|$ 으로 정하며, 절환점의 좌표  $P(X_{1p}, X_{2p})$ 는 식 (3-5)에서 다음과 같이 구해진다.

$$X_{1p} = -K_m E_0 T_m \left( \ln \left( 1 + \left[ 1 - \exp \left( -\frac{X_{10}}{K_m E_0 T_m} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right) - \left[ 1 - \exp \left( -\exp \left( -\frac{X_{10}}{K_m E_0 T_m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right) \quad (3-8)$$

$$X_{2p} = -K_m E_0 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{X_{10}}{K_m E_0 T_m} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-9)$$

또한  $X_{10} < 0$ 의 경우도 마찬가지로 식(3-3),

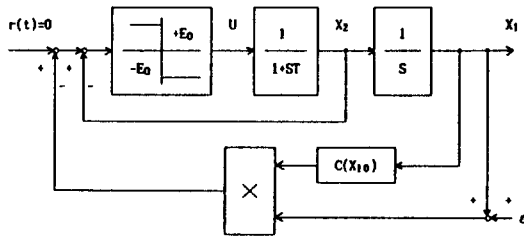


그림 4. 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간 제어의 블록선도

Fig. 4. Block Diagram of the Time Optimal Control System by Parabola Type Switching Function

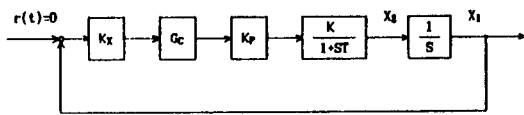


그림 5. 선형 궤환 위치제어의 블록선도

Fig. 5. Block Diagram of the Linear Feedback Position Control

(3-4)로부터 절환점의 좌표  $P(X_{1p}, X_{2p})$ 가 계산된다.

그 결과 최단시간제어를 주는 포물선형 스위칭 함수의 C는 초기거리 편차  $X_{10}$ 에 의해 다음식으로 구해진다.

$$C = -\frac{X_{2p}}{X_{1p}(X_{1p} + \epsilon)}$$

즉 그림 3과 같이 여러가지의 초기거리편차  $X_{10}$ 에 따라 포물선형 스위칭 함수를 적응적으로 설정하고 그 양측에서 조작량을 절환하면 된다. 이때 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간제어 블럭선도는 그림 4와 같다.

포물선형 스위칭 함수의 C는 식 (3-10)에 의하여 미리 설정하면 간단한 계산만으로 조작량을 절환하여 최단시간 제어를 실현할 수 있다.

이와같이 LDM이 고속으로 이동된 후 미리 설정된 범위( $X_1 = 0.05\text{cm}$ )에 오면 LDM을 목표점

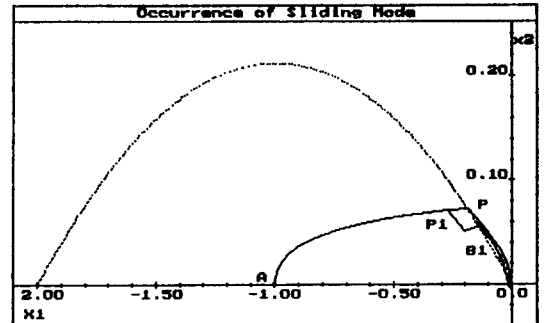


그림 6. 슬라이딩 모드의 발생

Fig. 6. Occurrence of Sliding Mode

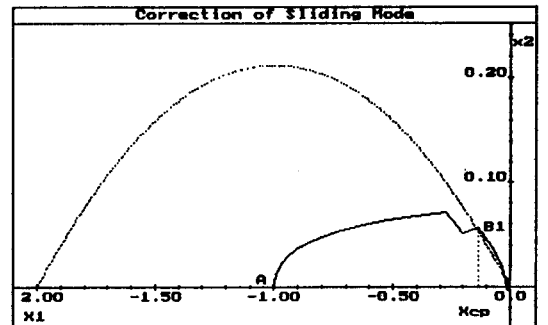


그림 7. 포물선형 스위칭함수의 수정

Fig. 7. Correction of Parabola Type Switching Function

에 정확하게 停止시키기 위하여 선형제한 위치제어로 전환한다. 이때의 블럭선도는 그림 5와 같다.

그림 5에서  $K_x$ 는 차동증폭기,  $G_c$ 는 진상보상기,  $K_p$ 는 서보 증폭기이며, 위치센서로부터 검출된 출력신호를 제한하여 오차가 0이 되는 점에서 LDM을 停止시킨다.

#### 4. 포물선형 스위칭 함수의 수정

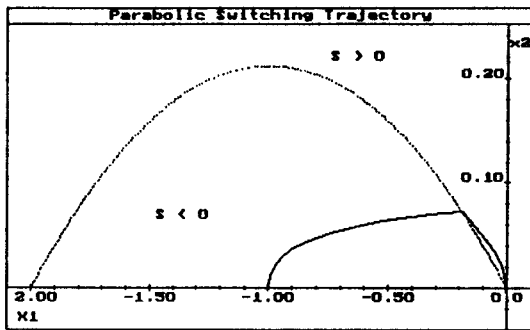
포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간제어에서 식(3-1), (3-2)로 나타내는 상태 방정식은 모델링 오차등이 있으므로 실제 상태 방정식을 다음과 같이 나타낸다.

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (4-1)$$

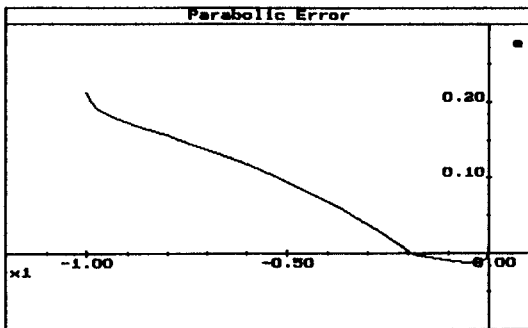
$$\dot{X}_2 = -\frac{1}{T_t} X_2 + \frac{K_t}{T_t} U \quad (4-2)$$

여기서  $T_t$ ,  $K_t$ 는 실제값으로 가정한다.

초기거리편차  $X_{10} < 0$ 로 하고 식(3-2), (3-2)



(a) 포물선형 스위칭 함수의 상태귀적



(b) 포물선형 스위칭 함수와의 오차

로 주어지는 모델 시스템이라면 그림 6에서 A점을 출발하여 P점에서 전환되는 것이 실제로는 시스템이 식(4-1), (4-2)로 나타내므로 P1점에서 전환하여 AP1B1의 궤도를 갖게된다. 이것은 실 시스템과 모델이 파라미터 오차 때문이다.

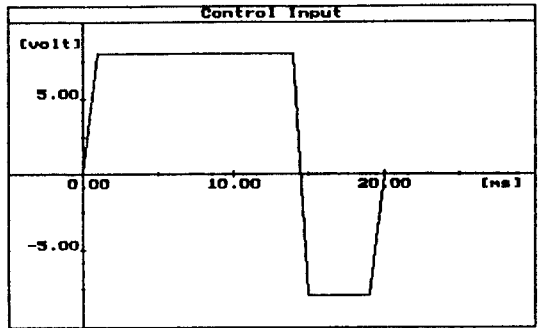
$B_1$ 점 근방에서 시스템이

$$S\dot{S} < 0 \quad (4-3)$$

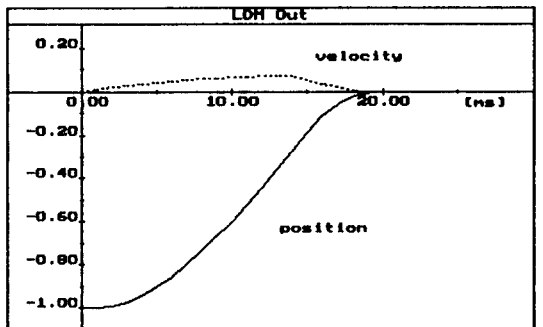
을 만족한다면 슬라이딩 모드가 발생하고 시스템은 포물선형 스위칭 함수  $S=0$ 에 구속된다.<sup>9)</sup> 이것은  $S^2$ 을 Lyapunov 함수로 하면  $\lim_{t \rightarrow \infty} S=0$ 로 되는 것으로 증명된다.<sup>9), 10)</sup>

식(4-1), (4-2)로 나타내는 시스템이  $B_1$ 점 근방에서  $S\dot{S} < 0$ 를 만족한 것에 대하여 고찰한다.

$$\begin{aligned} S < 0 \text{ 일 때 식(4-1), (4-2)와 } U = +E_0 \text{ 에 의해} \\ \dot{S} = CX_1(\dot{X}_1 + \epsilon) + \dot{X}_2 \\ = CX_2(X_2 + \epsilon) + \left[-\frac{1}{T_t} X_2 + \frac{K_t}{T_t} U\right] \end{aligned}$$



(c) 제어입력신호



(d) 출력곡선

그림 8. 시뮬레이션 결과 (계속)

Fig. 8. Result of Simulation (continue)

$$\begin{aligned}
 &= CX_2^2 CX_2 \varepsilon - \frac{1}{T_1} X_2 + \frac{K_1}{T_1} U \\
 &= CX_2^2 + \left( C\varepsilon - \frac{1}{T_1} \right) X_2 + \frac{K_1}{T_1} E_0 > 0 \quad (4-4)
 \end{aligned}$$

즉  $C > 0$ ,  $\frac{K_1}{T_1} - E_0 > 0$  이므로  $C\varepsilon > \frac{1}{T_1}$  의 조건을 만족하면  $\dot{S}S < 0$  가 성립하여 슬라이딩 모드가 발생한다.

이와 같이 시스템의 모델링 오차등의 영향에 의해 포물선형 스위칭 함수에 최적의 절환점을 주지 않아도 슬라이딩 모드가 발생하여 LDM은 안정하게 원점으로 향한다.

그러나 슬라이딩 모드는 정정시간을 길게 하므로 될 수 있는대로 적게하는 것이 좋다. 그러므로 슬라이딩 모드 구간을 적게한다.

그림 7에서 LDM은 A점( $X_{10} < 0$ )를 출발하여 AB<sub>0</sub>의 궤도를 통하여 원점에 도달한다. 이때 슬라이딩 모드가 시작하는 점에 B<sub>1</sub>에서 X<sub>1</sub>의 값을  $X_{cp}$ 라 하면 슬라이딩 모드 구간을 적게하기 위하여서는  $X_{cp} < 0$  이면 C를 적게하고  $X_{cp} > 0$  이면 C를 크게 수정한다면 좋다는 것은 쉽게 알 수 있다.

여기서  $X_{cp}$ 에 의한 수정 알고리즘

$$C_{i+1} = C_i - m \cdot X_{cp} \quad (4-5)$$

i : 실험회수 (i=1, 2, 3, ...)

m : C수정계수 (m>0)

를 이용하여 실험을 반복하여 C를 수정한다.

이 수정에 의해  $X_{cp} = 0$ 로 될때는 1회의 절환에 의한 뱅뱅 제어가 실현된다.

## 5. 시뮬레이션 및 실험

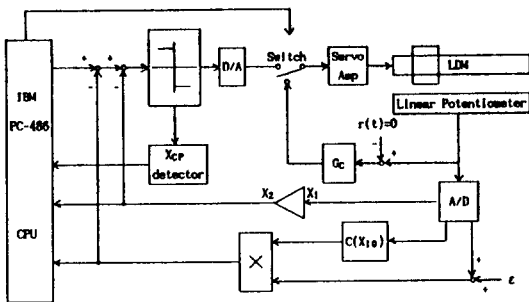


그림 8. 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Result of Simulation

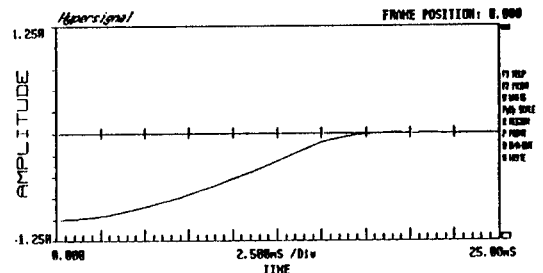
제안한 포물선형 스위칭 함수에 의한 고속 위치제어방식을 실제의 LDM에 적용하여 시뮬레이션과 실험을 하였다.

### 5.1 시뮬레이션

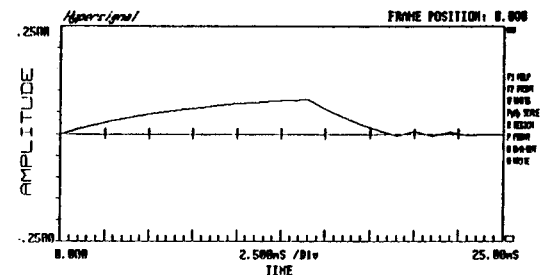
본 논문에서 사용한 LDM의 파라미터 값은  $R = 11[\Omega]$ ,  $M = 0.0376[\text{kg}]$ ,  $K_E = 2.0[\text{v} \cdot \text{s}/\text{m}]$ ,  $K_F = 2.0[\text{N}/\text{A}]$ 이다.

초기거리편차  $X_{10} = -1[\text{cm}]$ 으로 주고, 이에의해 결정되는 포물선형 스위칭 함수의 C는 식(3-10)에 의해 계산되며  $\varepsilon$ 은  $\varepsilon > |X_{10}|$  이 되는 값으로 2로 주었다.

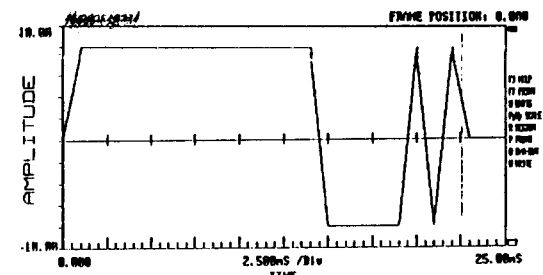
이때 시뮬레이션 결과는 그림 8의 (a)-(d)이다.



(a) 위치응답



(b) 속도응답



(c) 제어입력신호

그림 10. 실험결과(계속)  
Fig. 10. Experimental Result (continue)

그림 8(a)는 제안한 포물선형 스위칭 함수를 이용한 상태계적으로  $X_1$ 은 위치로서 [cm]이고  $X_2$ 는 속도로서 [cm/ms]이다.

슬라이딩 모드 구간이 없이 바로 목표점에 도달함을 알 수 있다.

그림 8(b)는 포물선형 스위칭 함수와 상태계적과의 오차로서 포물선형 스위칭 함수와 상태계적이 처음 만나는점 즉 처음으로 오차가 0이 되는 점이 절환점이 되며 이 점에서 입력 신호가 절환된다.

그림 8(c)는 제어입력 신호로서 |8| [v]이며, 1회의 절환으로 목표점에 도달함을 알 수 있다.

그림 8(d)는 LDM의 출력 곡선으로 위치와 속도를 나타내며, 처음에는 가속되다가 입력신호가 절환된 후 감속됨을 알 수 있다.

5.2 실험장치 구성

그림 9와 같은 실험장치를 구성하였다.

그림에서 본 시스템은 퍼스널 컴퓨터(IBM PC-486), A/D·D/A 변환기, 리니어 포텐셜메터(MIDORI LP-50F) 등으로 구성되었다.

속도신호는 거리 신호의 미분으로 얻으며  $X_{cp}$  검출신호는 스위칭 평면  $S=0$ 가 처음으로 되는 거리를 찾아서 얻었다. 스위칭 함수  $S$ 의 正負의 판단은 거리신호와 속도신호를 비교하여 수행되며, 스위칭 함수의  $C$ 는 초기거리 편차에 의하여 미리 설정된다. LDM이 미리 설정된 영역  $X_1=0.05cm$  범위안에 들어오면 선형 제환제어로 절환되어 LDM을 停止시킨다.

6. 실험결과

실험결과는 그림 10의 (a)-(c)이다.

그림 10(a)는 위치응답으로 약간의 오버슈트가 발생하며, 그림(b)는 속도응답으로 슬라이딩 모드가 발생함을 알 수 있다. 그리고 그림(c)는 제어입력호로서 슬라이딩 모드가 발생하므로 1회 이상의 절환이 된다.

다음에는 슬라이딩 모드 구간을 없애기 위하여 실험을 반복하여 포물선형 스위칭 함수의 수정을

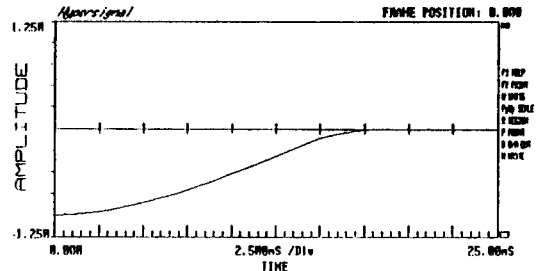
하였다.

$C$ 의 수정계수  $m$ 을 1로 하고  $X_{cp}=0$ 가 될때까지 실험을 반복한 결과는 그림11(a)-(c)이다.

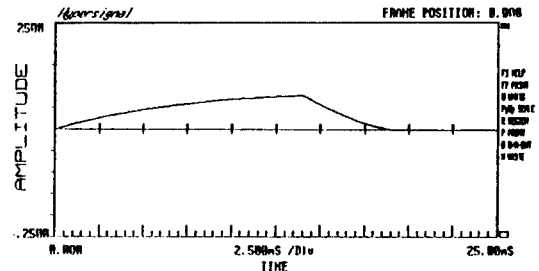
그림 11(a)는 위치응답, (b)는 속도응답, (c)는 제어입력신호로서 1회 절환의 뱅뱅 제어에 의해 그림 7의 선형제환 위치제어 영역에 도달하고 그 후 목표점에 停止됨을 알수있다.

7. 결론

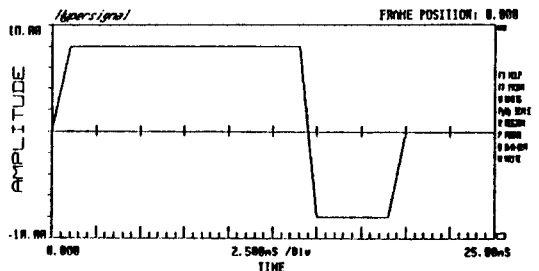
LDM을 제어대상으로 고속, 고정도 위치제어 방식에 대하여 포물선형 스위칭 함수에 의한 최단시간제어 구성법을 제안했다.



(a) 위치응답



(b) 속도응답



(c) 제어입력신호

그림 11. 수정한 실험결과(계속)

Fig. 11. Correction of Experimental Result (continue)

제안한 방식은 일반적으로 최단시간 제어를 실현하는데 on line의 복잡한 비선형 계산이 필요하나, 이를 피하고 보다 간단한 구성으로 최단 시간제어를 실현하기 위하여 조작량의 절환을 위상 면상에 설정한 포물선형 스위칭 함수상에서 행하는 것이다.

또한 시스템의 모델링 오차등에 의하여 제안한 방식은 슬라이딩 모드를 발생시키며, 슬라이딩 모드 구간이 길면 修正시간이 길어지므로 반복실험에 의하여 포물선형 스위칭 함수를 수정하여 1회의 절환에 의한 뱅뱅 제어를 실현하였다. 그 후 선형 궤환제어에 의해 LDM을 목표점에서停止시켰다.

본 논문은 유한 전문대학 학술 연구비에 의하여 연구되었습니다. 연구비를 지원해준 유한 전문대학에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 白木 學, 宮尾 修美, Linear Servo Motor와 시스템 설계, 綜合電子出版社, 1986.
- 2) 磁氣 ACTUATOR 調査專門委員會, Linear Motors and

Their Applications, 日本電氣學會, 1983.

- 3) 小川茂 樹, 堀川曠, "Linear DC Motor의 광 Disk에 응용", 精密工學會誌, Vol.52, No.8, pp.155~160, 1986.
- 4) 野快男, 長谷部 信也, 黃 辰, 太田建一郎, "Linear DC Motor의 가동자가 충돌을 따르는 경우의 추력제어", 日本電氣學會論文集, Vol.108-D, No.3, pp.292~298, 1988.
- 5) 久住洋之, 大西公平, "多段電磁石 Actuator의 위치제어", 日本電氣學會論文集, Vol.108-D, No.5, pp.509~514, 1988.
- 6) 小川雅晴, 伊藤修, "광 Disk 장치의 고속 액세스 제어", 시스템제어정보, Vol.34, No.1, pp.31~36, 1990.
- 7) Min Ho Park, Chung Yeun Won, "Time Optimal Control for Induction Motor Servo System", IEEE Trans Power Electronics, Vol.6, No.3, pp.514~524, July 1991.
- 8) Donald E. Kirk, Optimal Control Theory, Prentice Hall, 1970.
- 9) V. I. Utkin, Sliding Modes and Their Application In Variable Structure Systems, MIR PUBLISHERS MOSCOW, 1978.
- 10) V. I. Utkin, "Variable structure Systems with Sliding Modes", IEEE Trans Automatic Control, AC 22-2, pp. 212~222, 1977.