

# 광 저장장치용 리니어 보이스 코일 모터의 고속, 고정밀 위치제어

°김세웅\*, 전홍걸\*, 박노철\*\*, 양현석\*\*, 박영필\*\*

## High Speed and High Precision Control of Linear Voice Coil Motor for Optical Disc

°Sewoong Kim, Hong-Gul Jun, Nochul Park, Hyunseok Yang, Young-Pil Park

### Abstract

In recent years, the LDM(Linear DC Motor) is widely used, because it has more merits than other rotary motors. First, if system requires linear motion, LDM realizes direct linear motion as rotary motor does not. Second, system is simple and easy to control, and so on. In optical disc drive, a tracking system consists of two parts. One is fine actuating and the other is coarse actuating. For coarse actuating VCM(Voice Coil Motor) actuator is used as a basic drive mechanism.

In this paper, MC (Moving Coil) type LDM is designed, manufactured and controlled. System is composed of mechanical-electromagnetic component, therefore mechanical loss and electromagnetic loss exist. The dominant mechanical loss is friction which results from sliding between guide shaft and hole. Therefore, this paper shows the friction compensation control. High speed and accurate position is not gained only PID control, therefore other control method is applied to the system.

### 1. 서론

최근의 정보 기기, 자동화 기기 등에 사용되는 소형 모터 구동 시스템에서는 고성능화가 요구되고 있으며, 직진 구동 시스템이 많이 이용되고 있다. 직진 구동방식으로는 회전형 모터와 직선 교환기구 등으로 얻어지는 간접구동방식이 있으나, 이 방식은 한계가 있으므로, 고속화, 장치의 소형과, 소음레벨의 감소, 백래쉬(back-lash)가 작은 직접 구동방식이 점차적으로 이용되고 있다.

직접 구동형의 직진 구동장치는 선형 전자 액츄에이터라고 불리우며 종류도 다양하지만 그 중의 하나인 선형 직류모터(Linear DC Motor)는 추력/질량비가 큰 서보 시스템을 구성했을 때 제어 성능이 우수하므로 컴퓨터 주변기기, 반송장치, 직접

회로 제조 구동용, 각종 로봇 등의 고속 동작을 필요로 하는 위치 제어 장치로서 많은 역할을 할 것으로 기대된다.

특히 광저장장치용 조동 액츄에이터로서 리니어 모터는 기존의 랙-피니언 방식이 갖던 속도, 정밀도의 한계를 극복할 수 있다.

본 연구에서는 간단한 구조의 MC(Moving Coil Type)형 리니어 보이스 코일 모터(Linear Voice Coil Motor, LVCM)을 제작하였고, 시스템을 간략화 하여 해석한 뒤 다양한 제어 기법을 통해 고속, 고정밀 위치제어를 실행하였다. 또한 LVCM위에 픽업부를 장착하여 광저장장치의 조동, 미동 액츄에이터로서의 운동특성을 살펴보았다.

### 2. LVCM의 원리

Fig. 1 은 MC형 LVCM의 추력 발생 원리를 설

\* 연세대학교 대학원

\*\* 연세대학교

명해 주고 있다. 자석은 그림에 표시된 대로 면방향으로 극성을 띄고 있으며 코일 부분은 수평으로 움직일 수 있도록 설계되었다. 자석과 중심 요크와의 사이에 자속 밀도가 존재하고 이 자속 밀도 속의 코일에 전류가 흐름에 따라 플레밍 법칙에 의한 자기력이 발생한다. 자속 밀도는 위치마다 약간씩 다를 수 있으나 간략화 하여 전공간에 걸쳐 균일한 자속 밀도가 유지된다고 가정하면 식 (1)과 같은 힘이 코일에 가해지게 된다.

$$F = l(I \times B) \quad (1)$$

식 (1)에 의해 주어진 힘은 그림에서 수평 방향으로 작용하게 되고 결국 코일이 중심 요크 사이를 왕복 운동할 수 있도록 해준다. 길이  $l$  은 자석과 대응하는 부분의 코일길이이다.

코일의 운동에 따라 역기전력이 형성되며 이는 기존 전류의 흐름을 방해하는 방향으로 작용하여, 이 부분에 대한 제어가 쉽지 않게 된다. 즉 입력 전압에 대한 전류의 흐름이 옴의 법칙만으로 해결되지 않고 임피던스에 의한 역기전력항이 첨가되어 결정되는 것이다. 하지만 제어 입력원으로 전압 대신 전류를 사용하면 이러한 임피던스의 영향을 고려하지 않고 제어를 할 수 있다.

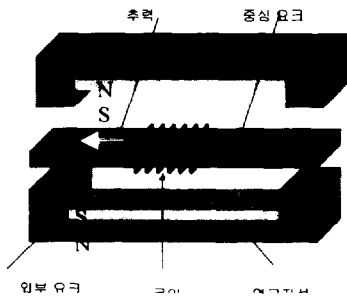


Fig. 1 Principle of thrust force

### 3. 시스템의 구성

LVCM의 제어에 들어가는 기본 구성요소는 제어 컨트롤러와 리니어 모터, A/D, D/A 변환기 및 변환 앰프들이다. 리니어 모터의 위치를 리니어 엔코더가 감지하여 그 정보를 컴퓨터에 알려주며, 컴퓨터에서는 목표위치와 현재위치와의 차이를 계산한다. 컴퓨터에서는 이러한 정보들을 바탕으로 제어 입력을 가하게 되고 D/A 보드 및 I/V 변환 앰프를 거쳐 리니어 보이스 코일모터에 입력전압이 가해지게 된다.

리니어 엔코더는 0.1 $\mu$ m의 고해상도를 갖고 있으며

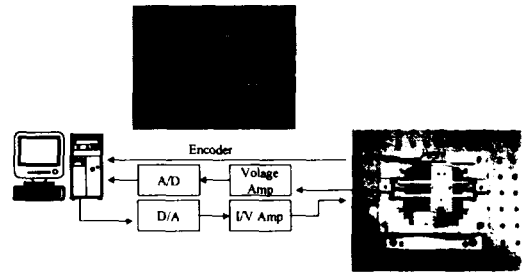


Fig. 2 System component

전류 Amp는 1A 이상의 전류를 흘려줄 수 있다. 구성도 위쪽에 표시된 A/D 보드 및 전압 앰프는 모터 위에 장착하는 픽업 부분의 신호를 읽어들이기 위한 장치들이다.

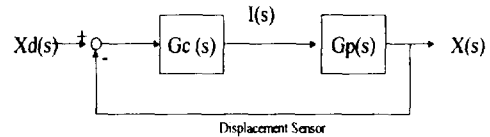


Fig. 3 Block diagram

Fig. 3의 블록 다이어그램은 단순한 계의 흐름을 보여준다. 제어 플랜트  $G_c(s)$  에는 P, PD, PID 및 마찰 보상 제어가 행해지게 되고 위치는 리니어 엔코더를 통해서 피드백 된다.

Table 1. Specification

D/A Converter	12-Bit 3 $\mu$ s Sampling
A/D Converter	12-Bit 3 $\mu$ s Sampling
Encoder	GP: 20 $\mu$ m, Resolution: 0.1 $\mu$ m
Sampling Time	1/3000 (sec)

### 4. 설계를 위한 간략한 자계해석

자기력은 코일에 흐르는 전류 및 자석과 대응하는 코일의 길이, 자속 밀도 등에 좌우되는데, 전류 및 코일 길이 등은 정량적으로 알 수 있으나, 자속 밀도는 쉽게 알 수가 없다. 중심 요크와 자석과의 거리가 멀어짐에 따라 그 중간 공기를 통과하는 자속밀도가 약해짐을 정성적으로 알 수 있으나, 그 정확한 관계를 파악하기 위해서는 자기해석 방법을 사용해야 한다. 자기해석으로 퍼미언스법을 사용하여 자석과 요크사이의 자속 밀도에 영향을 미치는 요소들 간의 관계를 알아내었다.

퍼미언스법은 옴의 법칙과 유사성이 있어서, 자석

에서 작용하는 표면 자속 밀도가 전압과 같은 역할을 하며 저항은 거리 및 투자율( $\mu$ )의 역수에 비례하게 된다. 이것들을 고려하여 식을 정립하면

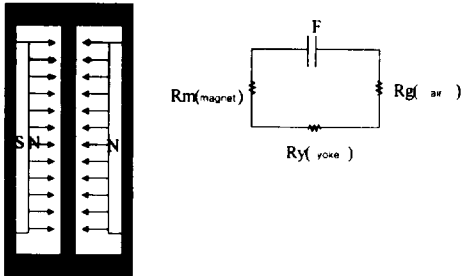


Fig.4 Magnetic flux analysis

식 (2)와 같은 형태로 표현이 된다.

$$B_{air} = k \frac{B_r}{\frac{\mu_m l_{air}}{P_d} + 1} \quad (2)$$

여기서 상수 k 는 재료의 특성 및 기하학적 형상에 의존하는 상수 값이다.

$B_r$  : 자석 표면의 자속밀도

$\mu_m$  : 자석의 비투자율

$l_{air}$  : 자석과 요크와의 상대거리

$P_d$  : 자석의 두께

$B_{air}$  : 자석과 코일간 공기중 자속 밀도

식 (2)로부터 공기중 자속 밀도를 높이기 위한 두 가지 방안을 생각할 수 있다.

1. 자석 표면의 자속밀도 ( $B_r$ ) 및 자석 두께 ( $P_d$ ) 를 증가시킨다.
2. 자석과 중심 요크와의 간격을 좁힌다.

## 5. LVCM의 고속 고정밀 위치 제어

### 5-1. PID 제어

Fig 5,6,7 은 각각 P, PD, PID의 제어 결과이다. 제어 전압에 해당하는 항은 LVCM을 구동하기 위해 가해진 전압을 표시해준 것이다.

Fig 5,6,7의 각 세 번째 제어 전압을 보면 0으로 수렴하지 않고 있음을 알 수 있다. 즉, 입력 전압이 계속 가해지고 있는데 속도나 위치는 0이 되어 움직이지 않고 있다. 이는 마찰력에 의한 것으로 LVCM이 목표위치에 도달하지 못한 채 마찰력과 대응을 이루고 있다. 이로 인해 정밀 위치 제어가 불가능하게 된다.

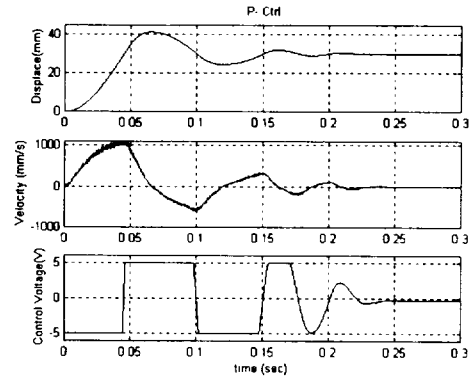


Fig. 5 P- Control

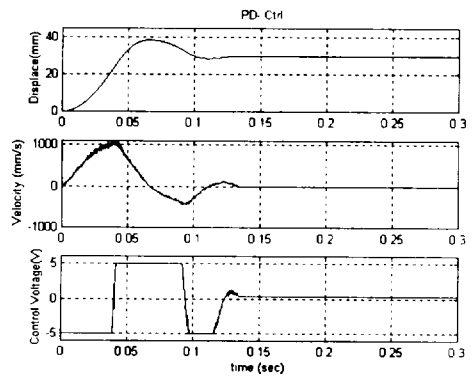


Fig. 6 PD- Control

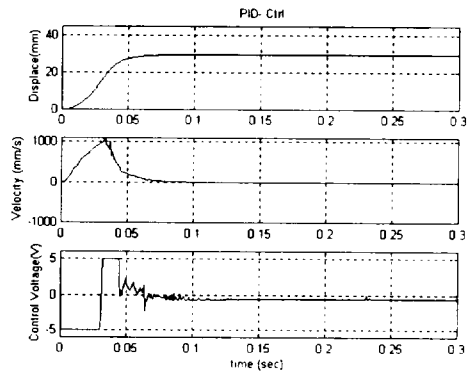


Fig. 7 PID- Control

P제어만 했을 경우는 0.1mm 의 오차내에서 목표 위치를 추종하며, PD 제어를 했을 경우는 0.05mm(50  $\mu$ m), PID 제어의 경우는 0.03mm(30  $\mu$ m) 이내로 목표에 근접할 수 있다.

나찰이 없다고 가정하면 P제어를 했을 때, 수렴하지 않고 계속 진동하는 그래프가 얻어져야 함에도 LVCM이 한 위치로 수렴하는 것을 보면 마찰의 영향이 댐핑과 같은 역할을 했음을 알 수 있다.

### 5-2. 마찰 보상 제어

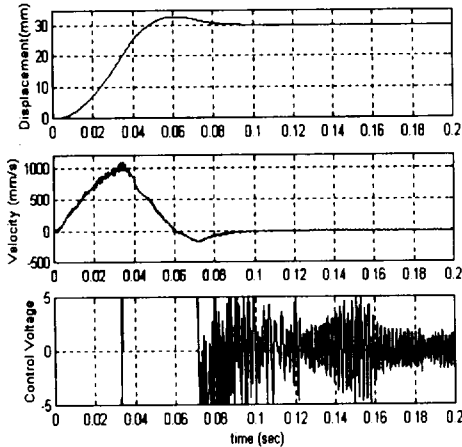


Fig. 8 Friction compensation control

마찰력의 경우, 정지 마찰의 경우와 운동 마찰의 경우를 나누어 계에 적용하였다. 앞의 PID 제어에서 보았듯이 입력전압이 0이 아닌데도 불구하고 움직이지 못하는 것은 정지마찰력이 입력 전압이 가해주는 힘보다 컸기 때문이다. 따라서 계가 목표 위치가 아닌 지점에서 멈추었을 경우 정지 마찰력보다 더 큰 입력전압을 가하여 모터가 움직이게끔 하였다. 또한 속도에 따른 운동마찰력도 고려하였다. 그리하여 나온 결과가 Fig.9 그래프인데 위치나 속도가 0 인 것처럼 보이지만 실제로는 5 micron 이내에서 계속 진동을 하고 있다. 이는 입력 전압을 통해서도 짐작할 수 있는데, 이전 PID 제어에선 입력전압이 어느 일정 값에서 움직이지 못한 반면, 이젠 입력 전압 자체가 계속 진동을 하며 모터에 힘을 가해준다. 기존 PID 제어보다는 훨씬 좋은 성능을 보이긴 하지만 목표위치에서 계속 진동을 하는 특성 때문에 1micron 이하의 정밀도는 얻을 수 없었다.

### 5-3. 게인 조정 제어

마찰에 대한 간단한 모델링으로 비교적 좋은 제어 성능을 얻었지만, 목표 위치에서 계속 진동하는 특성 때문에 다른 방법으로 제어하고자 시도하였다. 우선 목표 위치 근처에서 움직일 때 위치에 따른

비례 게인보다는 속도에 따른 미분 게인이 지어

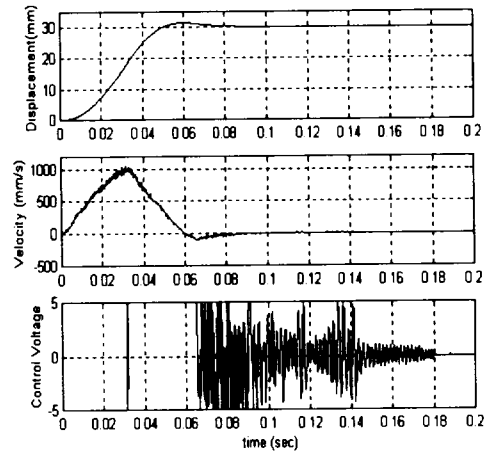


Fig. 9 Variable gain control

배적이었다. 이는  $5\mu\text{m}$  이내에서  $0.1\mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖고 진동하기 때문인데, 변위 차이는 미소한 반면 그의 시간 변화량은 비교적 크기 때문이다. 따라서 목표위치 근방( $5\mu\text{m}$  이내)에 모터가 도달하면 현재 갖는 비례 게인을 5배 정도 크게 해줘서 위치 오차에 따라 모터가 움직일 수 있게 해주고, 입력값이 큰 비례 게인은 한번 진동할때마다 조금씩 작게 해줘서 속도에 대한 민감도를 줄여나갔다. 그리고  $1\mu\text{m}$  이내에서는 증가한 비례 게인도 점차 줄여주어 LVCM이 멈출 수 있도록 하였다. 결국 이러한 제어 방법으로  $0.1\mu\text{m}$ 의 위치 추종 제어가 가능하였다.

## 6. 속도 Profile에 대한 Pick-Up의 응답

LVCM 위에 실제 24배속 픽업부를 장착한 후, LVCM의 속도 profile에 따른 픽업부의 진동 특성 실험을 실시하였다. 전홍걸<sup>[4]</sup> 등이 제시한 광픽업의 잔류진동 저감을 위한 이송속도 분포 해석의 결과를 이용하여 속도 profile을 제시하였다.

LVCM이 움직임에 따라 픽업부가 움직이는데 이에 대한 측정은 픽업부에서 발생하는 역기전력을 사용한다. 픽업부는 자석과 코일로 이루어져있기 때문에 픽업부가 움직이면 자기장내를 코일이 쇠교하여 역기전력이 발생하고 이 역기전력은 픽업의 속도에 비례한다. 따라서 역기전력을 측정하면 픽업부의 속도를 간접적으로 측정하는 것이 된다. 역기전력과 픽업의 진동에 관한 실험은 LDV로 검

중하여 이의 타당성을 확보하였다. 다만 역기전력 자체가 상당히 미약한 신호이기 때문에 전압 증폭 앰프 및 저주파 통과 필터를 설치하여 신호를 측정하였다.

속도분포는 사다리꼴로 하되  $t_1$  과  $(t_3 - t_2)$ 는 픽업부의 1차 고유진동수 주기의 정수배로 정한다.

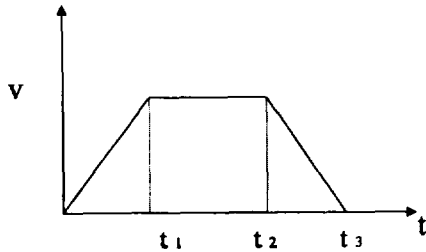


Fig. 10 Velocity profile

Fig 12의 (1), (2)번 속도 profile에서는 지연시간 ( $t_2 - t_1$ )을 두지 않는다, 다만 (1)번은  $t_1$  과 ( $t_3 - t_2$ )를 픽업부의 1차 고유진동수 주기의 2배로 맞추나, (2)번 그래프는 주기에 맞추지 않았을 경우이다.

(3), (4)번 속도 profile에서는 지연시간을 두었을 경우이다. (3)번은 (1)번과 같이 주기의 정수배로 맞추나 (4)번은 그렇지 않았을 경우이다.

(1)번과 (3)번은 속도가 0이 된 후에 자유 진동하는 것보다 더 빨리 진동이 줄어드나, (2)번과 (4)번은 속도가 0이 된 후에 (1),(3)보다 더 늦게 진동이 줄어들음을 알 수 있다.

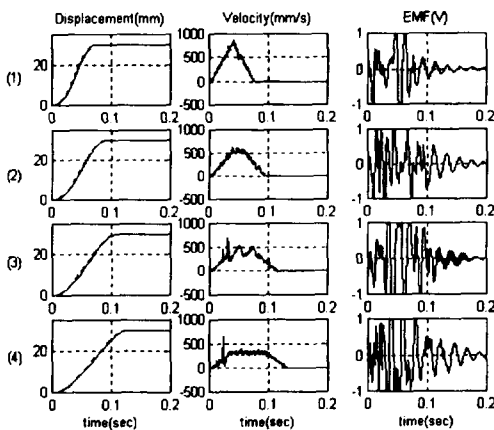


Fig. 11 Response of residual vibration in pick-up

## 7. 결론

광저장장치의 기록밀도가 높아짐에 따라 그 트랙 추종 성능도 같이 높아져야 한다. 트랙 추종 성능 향상을 위한 조동 액츄에이터로서 LVCM을 사용하여 기존의 랙-피니언 방식이 갖던 기계적 오차들을 줄일 수 있었고, 고정밀의 위치제어 가능성을 확인하였다.

단순 PID 제어로는 이송부위에서 필연적으로 발생하는 마찰력을 정밀하게 제어할 수 없음을 실험을 통해 검증했으며, 이에 대한 대책으로 마찰 모델링과 목표위치 근방 제어 개인 변화라는 새로운 제어 방법을 도입하였다. 또한 LVCM의 속도 profile에 따른 픽업의 운동 특성을 실험을 통해 알 수 있었다.

## 8. 연구 계획

향후 연구는 마찰 보상에 대한 이론적 예측과 실험적 검증을 통하여, 이론적 이해를 바탕으로 제어를 행하는 것이다.

또한 조동 액츄에이터의 이동에 따른 픽업부의 거동을 측정된 위의 실험과 더불어, 움직이는 픽업부의 제어 방법을 연구한다.

## 9. 후기

본 연구는 한국과학재단의 연세대학교 정보저장기기 연구센터에 대한 지원(No. 2000G0101)으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

## 10. 참고문헌

- [1] H. Yajima, H. Wakiwaka, K. Minegishi, N. Fujiwara, K. Tamura, Design of linear DC motor for high-speed positioning, 2000 Sensor and Actuators 81, 281-284
- [2] In Muk Choi, Soo Hyun Kim and Yoon Keun Kwak, Design and Control of Tracking Actuator for Optical Disk, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1878-1883, 1999.
- [3] S.M. Jang, S. S. Jeong, H. C. Park, Design and Excitation of Control Parameters of a moving-coil-type Linear Actuator for Driving of linear Reciprocating Motion Control Systems, Traas KIEE Vol. 48B, No. 5 May. 1999
- [4] 전홍걸, 박영필, "광픽업 잔류 진동 저감을 위한 이송 속도 분포 해석", 한국 소음진동 공학회 논문집 vol. 10. No. 2, April 2000