

# 광디스크용 트래킹 구동기의 설계 및 제어에 관한 연구 A Study on Design and Control of Tracking Actuator in Optical Disc

최인목, 한창수, 이정현, 김수현, 박윤근 (한국과학기술원)

I.M. Choi, C.S. Han, J.H. Lee, S.H. Kim, Y.K. Kwak (KAIST)

## ABSTRACT

In optical disc system, tracking actuator is consisted of coarse actuator and fine tracking actuator. This, two-stage actuator, requires many devices and two servos for large stroke and precisional displacement. These complicate configuration increases moving mass. So dynamic characteristics become bad, that is, sensitivity of high frequency gain decrease. In this paper, frequency performance is willing to be better as one dimensional tracking actuator is designed. In order to investigate the performance of the proposed tracking actuator, the Bode diagram is plotted with Dynamic analyzer and friction characteristic is explained. Finally, tracking error performance is ins investigated into  $0.1\mu\text{m}$  resolution with MATLAB simulation.

**Key Words** : Optical Disc(광디스크), Pickup Actuator(픽업 구동기), Permeance Method(투자도법), CD(compact disc), Yoke(요크), Magnetic Flux Density(자속밀도), Friction(마찰)

### 1. 서 론

CD(Compact disc), MODD(Magneto Optical Disc Drive), DVD(digital video disc)등의 광디스크는 음악 및 정보의 기록 재생을 위한 장치로 광범위하게 이용되어 있으며, 더욱 고정밀도의 기록을 요하며 이를 빠르게 재생하는 연구가 진행되고 있다.

광디스크의 구조를 살펴 보면 미디어 부분과 메커니즘(Mechanism)부분, 그리고 신호처리 부분으로 크게 나누어 질 수 있다. 특히 메커니즘 분야는 디스크를 회전하는 회전 메커니즘, 넓은 범위를 움직이는 조동 메커니즘, 좁은 범위에서 정밀한 움직임을 하는 미세 메커니즘으로 구별되며 다시 미세 메커니즘은 미세 트래킹 추종 메커니즘과 초점 구동 메커니즘이 있다.

미세 구동기에 있어서 트래킹방향은 디스크의 반경 방향을 말하며 초점 방향은 디스크에 수직 방향 말한다. 앞에서 언급한 것과 같이 트래킹방향으로 움직이는 구동은 넓은 범위를 움직이는 조동 메커니즘과 좁은 범위를 움직이는 미세 트래킹 추종 구동기가 있다. 지금까지 이것을 하나의 구동기로서 가능하게 하려는 연구가 있었지만 광학계의 구성 때문에 광픽업의 무게가 커졌고 이로 인해 마찰과 관성의 문제를 해결하지 못했다. 그러나 광학계의 소형 경량화에 따라 픽업의 무게 감소로 인해 이것이 가능해졌다.

일반적으로 조동 모터가 움직이는 범위인 약 33mm를 움직이면서 높은 정밀도( $0.1\mu\text{m}$ )를 갖는 구동기를 만들기는 매우 어렵다. 그러나 광 디스크라

는 장점을 이용하면 두 가지의 위치 감지가 가능하다. 넓은 범위를 움직이기 위해서는 트래킹의 수를 감지하고 정밀한 트래킹 추종을 위해서는 트래킹 벗어남을 감지하여 제어가 가능하다. 즉 넓은 범위와 정밀 구동에 대해 각각에 대한 감지 방법을 다르게 함으로써 이를 가능하게 할 수 있다.

이 논문에서는 조동 모터와 미세 트래킹 추종 구동기를 합치는 경우에 이러한 구동기에서 생길 수 있는 여러 가지 문제점들을 고려해 이를 설계하고 기존의 PD 제어방식에 적용해 보고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기본 구조의 설계

기본 구조는 그림 1과 같다.

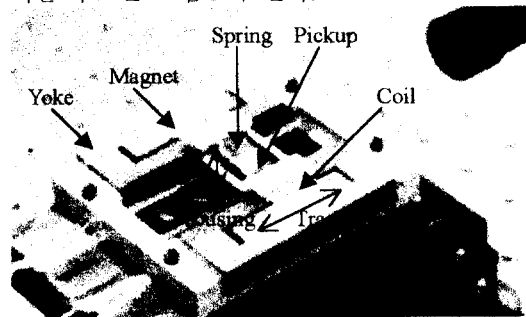


그림 1. 기본 구동 메커니즘 구조

초점 구동기는 트래킹 추종 구동기에 스프링으로 연결돼 탑재되어 있다. 스프링이 트래킹 방향과 적각으로 되어 있는 것은 같은 방향으로 연결될 경우 초점 구동을 한 상태에서 트래킹방향으로 움직이면 스

프링 상수가 작아져 공진점(resonant frequency)이 낮아지기 때문이다. 이렇게 되면 초점 구동이 트래킹 구동의 안정성에 문제를 주게 되어 좋은 구동기를 설계할 수 없다.

이 VCM 방식의 구동기는 플레밍의 왼손법칙에 의해 전자기력을 발생하게 되어 구동력을 얻는다.

## 2.2 구동력의 설계

구동력을 설계하기 위해 투자도법(Permeance method)을 이용하였다. 이를 유한 요소법(FEM)을 사용하는 전자기장 해석 프로그램을 이용해 검증하고 마지막으로 자속밀도(magnetic flux density) 측정 장비인 가우스미터(Gaussmeter)를 이용하였다.

투자도법은 전자기장 해석과 유사한 방법으로 설계시 해석적 접근이 가능하다. 전기장에서  $V=RI$ (전압=저항·전류)와 마찬가지로  $\mathcal{F}=\mathcal{R}\phi$ 이라는 식이 성립한다.  $\mathcal{F}$ 는 기자력(Magnetomotive force),  $\mathcal{R}$ 은 릴럭턴스(reluctance)이고  $\phi$ 는 자속(magnetic flux)을 나타낸다.  $\mathcal{R}$ 의 역수를 투자도(permeance)라 하며  $\wp=\mu A/l$ 로 표시된다. 여기서  $\mu$ 는 투자율이고  $A$ 는 자속이 지나는 면적이고  $l$ 은 경로의 길이이다. 어떤 구조에서의 투자도는 형상에 의해 결정되어지며 이들은 경험식으로 주어진다.

앞의 구조에 대해 다음과 같은 등가 회로를 만들 수 있다.

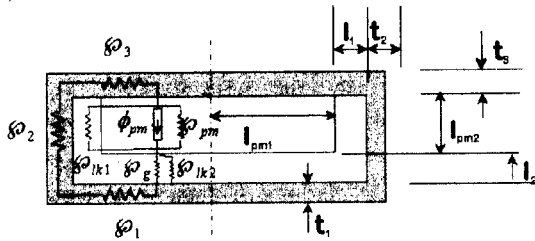


그림 2. 전자기장 회로도

그림 2에서 자석과 요크(Yoke)의 치수는 구동 메커니즘의 크기를 결정한다. 이 회로를 이용하여 간극에서의 자속밀도를 구할 수 있다. 즉,  $\wp_g$ 를 통과하는 자속밀도를 크게 하도록 설계 해야 한다.

이 회로에 대한 식을 풀면 다음과 같은 자속밀도를 얻을 수 있다.

$$\phi_g = \frac{\wp_g \phi_{eq}}{(\wp_g + \wp_{eq} + \wp_{lk2})(\wp_{pm} + \wp_g + \wp_{lk1} + \wp_{lk2}) - (\wp_g + \wp_{lk2})^2} \phi_{pm} \quad (2)$$

$\phi_g$ : 간극을 지나는 자속

$\phi_{pm}$ : 자석이 주는 자속

$$\wp_{eq}^{-1} = \wp_1^{-1} + \wp_2^{-1} + \wp_3^{-1}$$

이 값을 크게 하기위해 각각의 치수들을 변화 시켜보면 크게 영향을 미치는 변수들은 자석의 두께( $l_{pm2}$ ), 자석의 높이( $h$ ) 그리고 간극의 크기( $l_2$ )이다. 자석의 두께와 높이는 크게 간극은 줄일수록 좋다. 그러나 다른 변

수들은 거의 영향을 미치지 못하며 단지 요크의 두께만 자속이 포화 되지 않도록 두껍게 설계하면 된다.

$l_{pm2}, h, l_2$ 를 각각 5mm, 8mm, 3mm 일때 간극에서의 자속 밀도를 구하면  $B_g=0.4587T$ 이다. 또한  $l_{pm2}, h, l_2$ 를 각각 8mm, 10mm, 2mm로 하면  $B_g=0.6274T$ 가 된다.

자석에 의한 자속 이외에 코일에 의해 자속밀도가 영향을 받지만 거의 무시할만한 값이다.

전자기장 해석 프로그램을 이용해 그림 3과 같은 결과를 얻었다.

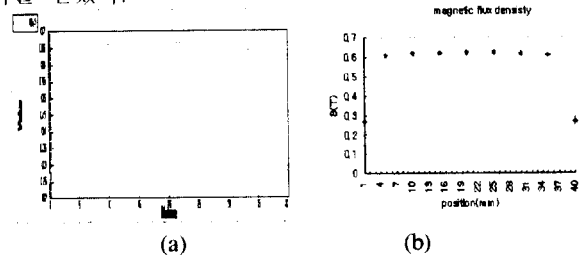


그림 3. 자속밀도 Simulation 과 측정 결과

그림 3(a)에서 보면 평균값이 0.65T 정도로 투자도법에 의해 구한 값보다 다소 큼을 알수 있는데 이것은 2차원으로 해석하여 자속의 누설을 고려하지 못했기 때문이다. 또한 그림 3(b)에서 보면 마찬가지로 이동구간에서의 자속밀도가 거의 일정하며 평균값이 약 0.63T로 다른 방법들과 거의 같은 결과를 얻었다.

## 2.3 초점용 스프링의 설계

2.1에서 설명 했듯이 스프링의 탑재 형태는 공진과 관련되어 중요하다. 그림 1과 같이 탑재되었다고 하더라도 초점방향의 구동 감도는 좋게 하면서 트래킹방향의 강성(stiffness)은 아주 크게 하여야 한다. 1차 공진 2kHz 밖에서 일어나도록 설계 하는 것이 필요하다.

일반적인 판스프링을 사용할 경우 프와송비(Poisson's ratio)는 무시할 때 두 방향의 강성의 비는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\frac{K_f}{K_t} = \frac{t^2}{b^2}, \quad \frac{\omega_f}{\omega_t} = \frac{t}{b} \quad (3)$$

여기서  $b$ 는 판 스프링의 넓이 이고  $t$ 는 두께이다. 광디스크에서 초점 방향의 공진은 20-40Hz 정도이고 이러한 구조에서의 트래킹방향의 공진은 안정성 면에서 없을 수록 좋고 최소한 5kHz 이상이어야 하는데 식(3)에서 보듯이 이러한 판 스프링 구조를 얻기 어렵다. 따라서 위를 만족 시키기 위하여 판 스프링의 형상을 바꾸어 보았다.

구조 해석 프로그램을 사용하여 일반적인 판 스프링에 대해 적용해 보면 초점방향과 트래킹방향의 공진 주파수가 각각  $\omega_f=481.8$  Hz,  $\omega_t=1561.7$  Hz 이었다. 특성을 향상 시키기 위해 가운데 판이 있는 H자 형태의 판 스프링에 대한 해석을 해보았다. 이 경우에 대해서는 각각  $\omega_f=385.5$  Hz,  $\omega_t=3381.3$  Hz 이었다.

이러한 형상에서 초점 방향으로 움직일 경우 변형이 많은 부분은 스프링의 면적을 적게 하고 트랙방향으로 움직일 경우 변형이 많은 곳은 면적을 크게 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.



그림 4. 해석 결과

(a)  $\omega_f = 121 \text{ Hz}$  (b)  $\omega_f = 5050 \text{ Hz}$

이 공진점 사이에 픽업과 상관 없는 스프링 자체의 모드가 존재하지만 픽업에 정지 노드(node)가 존재하여 초점 방향의 운동을 하게 되면 이러한 모드는 생기지 않는다. 또한 감쇠제(damper)를 사용하므로 그 영향은 거의 무시할 만큼 작아지게 된다. 초점 방향의 공진점이 높는데 이것은 초점방향의 구동력을 크게 함으로써 해결할 수 있다.

#### 2.4 동적 특성 실험

시스템의 전달 함수를 찾아 봄으로써 제어에 적합한 지를 알아 보았다.

먼저 초점 방향의 운동 방정식은 다음과 같다.

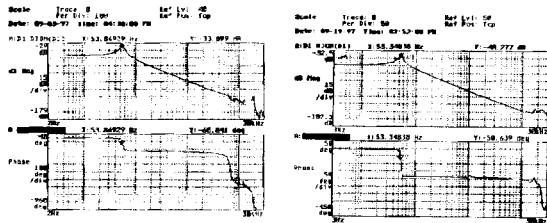
$$F = B\ddot{x}_f(t) = m\ddot{x}_f(t) + c\dot{x}_f(t) + k_f x_f(t) \quad (4)$$

이를 라플라스 변환(Laplace Transform)을 하면 다음과 같다.

$$\frac{X_f(s)}{I(s)} = \frac{Bl}{ms^2 + cs + k_f} \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 픽업의 질량,  $c$ 는 감쇠계수  $k_f$ 는 스프링 상수,  $x_f$ 는 픽업의 초점방향위치,  $I$ 는 입력 전류,  $B$ 는 자속밀도,  $l$ 은 코일의 유효 길이이다.

제작한 초점 구동기에 대해 Dyanmic Analyzer를 이용해 전달함수를 찾아 보았다.



(a) (b)  
그림 5. 초점 구동기 전달함수

그림 5(a)에서 보면 6kHz에서 위상이 갑자기 떨어진다. 이것은 코일의 인덕턴스 특성의 영향이다. 이렇게

위상이 반전되면 교차주파수가 1-2kHz 사이에 있게 되므로 안정성 면에서 좋지 않다. 이러한 특성 때문에 그림 5(b)는 전류 귀환형 증폭기를 사용하여 이러한 특성을 없앴다. 트랙 추종 구동기에서도 마찬가지로 증폭기를 사용하여 이러한 특성의 발생을 없앴다.

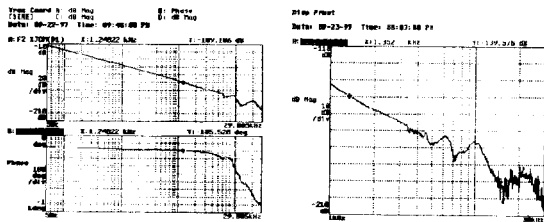
다음은 전체 트랙 추종 구동기의 방정식이다.

$$F = B\ddot{y}(t) = M\ddot{y}(t) + c\{\dot{y}(t) - \dot{x}(t)\} + k_t\{y(t) - x(t)\} + F_c(t) \quad (6)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\{\dot{x}(t) - \dot{y}(t)\} + k_t\{x(t) - y(t)\} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{Bl(cs + k_t)}{\{mMs^4 + (M+m)(cs + k_t)s^2\}} \frac{F_c(s)}{I(s)} \quad (8)$$

여기서  $M$ 은 트레보빈의 질량,  $k_t$ 는 트랙방향 스프링상수,  $x$ 는 픽업의 위치,  $y$ 는 보빈의 위치이다.



(a) (b)  
그림 6. 트랙 추종 구동기 전달함수

그림 6(a)는 5Hz에서 30kHz까지의 응답 특성이다. 이를 자세히 보기 위하여 그림 6(b)와 같이 1kHz에서 30kHz까지의 응답특성을 측정하였다. 관성만 존재하는 형태이다. 감쇠제를 사용하였기 때문에 스프링의 불필요한 모드들은 발생하지 않았고 6kHz 정도에서 발생하는 공진은 코일의 형태에서 생기는 모드이다. 이것은 코일의 움직임을 측정함으로써 알 수 있으며 이는 UV 경화제를 사용하면 해결이 가능하다.

#### 2.5 마찰 특성

축에서 미끄러지는 방식이므로 마찰이 존재한다. 이러한 축에서 발생하는 마찰력을 줄이기 위해 플라스틱 코팅제를 사용하였다. 우선 마찰력을 측정하여 플라스틱 코팅제의 효과를 실험 하였다.

Craig T. Johnson은 마찰 특성을 측정하는 방법을 제안 하였다. 어떤 시스템의 비선형적인 요소가 있다면 이것이 피드백 힘(feedback force) 오차 양으로 나타나게 되므로 마찰력이 주요한 비선형적 요소라고 하면 이 오차 양을 측정함으로써 마찰력을 측정할 수 있다. 속도와 이 피드백 오차 양과의 관계가 바로 마찰 특성인 것이다. 우선 이러한 방법을 통해 다음과 모의 실험을 먼저 수행하였다.

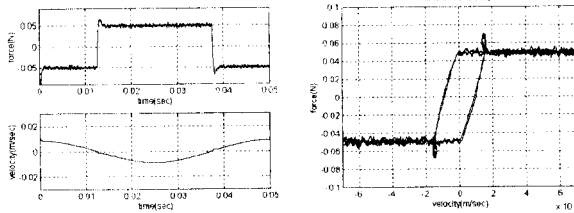
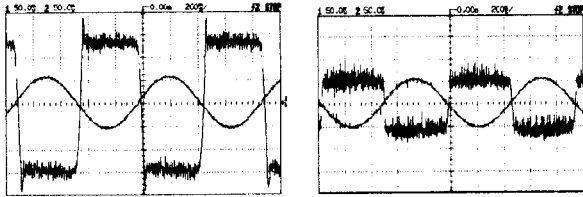


그림 7. 마찰특성 모의실험

오차 양과 속도를 얻고 이를 그려봤을 때 그림 8 과 같은 결과를 얻었다. 그림 7에서 알수 있듯이 감쇠계수의 영향은 거의 없으므로 입력속도를 작게 하여도 마찰 특성의 실험은 상관이 없게 된다.



(a) (b)

그림 8. 마찰 특성 실험

(a) no coating, 130mV, 0.0410N (b) DM-804, 50mV, 0.0159N

그림 8에서 아무 처리도 하지 않았을 경우는 정지 마찰력이 존재하고 운동마찰력도 크다. 그러나 (b)에서 플라스틱 코팅제를 사용할 경우 마찰계수가 0.2 이하로 떨어졌으며 크기도 아주 작아졌다.

### 2.6 제어 모의 실험

그림 9와 같은 제어 선도를 생각할 수 있다. 제이기로는 리드 보상기(lead compensator)나 PD 제어가 사용된다

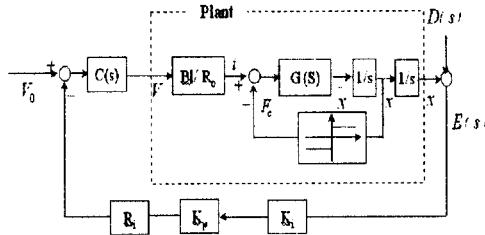


그림 9. 제어 블록 선도

$$G(s) = \frac{cs + k}{mMs^2 + (m + M)cs + (m + M)k}$$

D(s)=편심량,E(s)= 트랙 벗어남, C(s)=제이거,R<sub>o</sub>=증폭기 저항, V<sub>o</sub>=입력 전압, R<sub>i</sub>=변환저항, K<sub>p</sub>=광검출 감도 (A/W), K<sub>i</sub>=광학계 정수(W/mm),F<sub>c</sub>(s)=마찰력

$$X(s) = \frac{K_s C(s) G(s)}{1 + K_s C(s) G(s)} D(s) - \frac{G(s) R_o / BI}{1 + K_s C(s) G(s)} F_c(s) \quad (9)$$

$$G(s) = \frac{BI/R_o G(s)}{s^2}, K_s = R_i K_p K_i$$

식에서 보듯이 |K<sub>s</sub>C(s)|가 크면 클수록 X(s)=D(s), 즉 편심량에 대해 잘 추종하고 마찰력에 의한 영향은 사라

질 것이다.

이를 MATLAB을 이용해 모의 실험하였다.

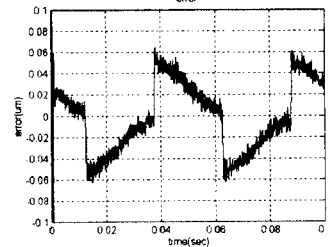


그림 10. 트랙 추종 오차

그림 13에서 나타난 추종오차는 마찰력에 의해 생긴 오차와 관성에 의한 오차이다. 최대 오차가 0.06μm이다. CD에서 허용하는 최대 트랙 벗어남은 0.1μm이므로 만족할 만한 수준이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 광디스크에서 트랙을 추종하기 위해 2단 구동기를 사용하는데 이를 하나로 합치기 위한 연구를 하였다.

- 1) 구동력을 최대를 하기 위해 투자도법을 이용하여 설계 하였고 이를 유한요소법 프로그램과 실험으로 검증하였다.
- 2) 초점용 스프링의 설계시 문제점을 제시하고 이를 해결하기 위해 구조해석 프로그램을 이용하여 설계 하였다.
- 3) 스프링의 공진점을 찾기 위해 시스템의 전달 함수를 실험을 통해 구하였다.
- 4) 마찰력을 줄이기 위해 코팅제를 사용하고 이것의 영향을 직접 측정하였다.
- 5) 앞에서 설계한 시스템을 모의 실험을 통해 검증하였다.

외부센서를 사용해서 실제 실험을 통해 이를 검증하여야 하는 연구가 필요하다.

### 4. 참고문헌

- 1) Alexander Kusko, "Computer-Aided Design of Magnetic Circuits", The MIT Press
- 2) Murayama, "광디스크 기술", Radio technology co, 1989
- 3) Craig T. Johnson, "Experimental Identification of Friction and Its Compensation in Precise, Position Controlled Mechanism" IEEE Transactions on Industry Application, Vol.28, No.6 November/December 1992
- 4) Dean Karnopp, "Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems", Transaction of the ASME, Vol. 107, March 1985